

# Bi 离子掺杂 $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-}M$ ( $M = \text{Na}_2\text{O}, \text{BaO}, \text{Y}_2\text{O}_3$ ) 玻璃的光学性质\*

王雪俊 夏海平†

(宁波大学光电子功能材料研究所, 宁波 315211)

(2006 年 2 月 27 日收到, 2006 年 3 月 11 日收到修改稿)

用高温熔融法制备了 Bi 离子掺杂浓度为 1mol% 的  $\text{GeO-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$  (GBNB),  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$  (GANB),  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-BaO}$  (GABB) 和  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  (GAYB) 玻璃. 测定了样品玻璃的差热曲线、吸收、发射光谱及荧光衰减曲线. 实验发现 GBNB, GANB, GAYB, GABB 的吸收边带逐步发生红移. 由于这些吸收边带是由  $\text{Bi}^{3+}$  的  $6s^2$  电子到  $\text{Bi}^{5+}$   $6s^0$  空轨道的跃迁引起. 因此推断 GBNB, GANB, GAYB, GABB 玻璃中  $\text{Bi}^{5+}$  离子的含量逐步增加. 在 GABB, GAYB, GANB 三个样品中观察到发光中心约 1220nm 超宽带荧光发射. 荧光强度从 GABB, GAYB, GANB 逐步减弱, 荧光半高宽和荧光寿命逐步变小. 这些超宽带的荧光归属为  $\text{Bi}^{5+}$  离子的发光所致. 从吸收与荧光光谱的变化, 推断在  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  玻璃中引入 BaO,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  组分有利于  $\text{Bi}^{5+}$  离子的形成. 讨论了 BaO,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  化学组分对 Bi 离子在玻璃中的价态影响的内在机理.

关键词:  $\text{Bi}^{5+}$  离子, 超宽带发光, 吸收带, 荧光寿命

PACC: 4270C, 7845, 8170G, 9160K

## 1. 引 言

近年来, 掺铒光纤放大器 (EDFA) 的研制引起了许多学者的广泛兴趣<sup>[1-6]</sup>. 应用波分复用 (WDM) 技术的 EDFA 大幅度地提高了信息传输的容量. 但是不足 100nm 的有效带宽限制了 EDFA 在实际宽带网络中的应用和发展.

最近, Fujimoto 等人<sup>[7,8]</sup>发现, 铋掺杂的石英玻璃 (BIQG) 在 800nm 激光二极管的激发下在 1.3 $\mu\text{m}$  附近有超宽带发光现象. 随后, 彭明营<sup>[9]</sup>等人制备了 Bi 掺杂的  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  玻璃, 也同样具有超宽带发射, FWHM 达 300nm 以上. 在最近的几年研究中, 在许多不同基质玻璃中<sup>[10-13]</sup>也发现了在 1.3 $\mu\text{m}$  附近, 荧光半高宽达 150nm 以上的超宽带发光现象.

Fujimoto<sup>[7]</sup>认为玻璃系统的超宽带发光是由玻璃中  $\text{Bi}^{5+}$  从其激发态<sup>3</sup> $D_{1,2,3}$  和<sup>1</sup> $D_2$  到基态<sup>1</sup> $S_0$  的跃迁引起的, 而 Meng<sup>[11]</sup>认为是由  $\text{Bi}^{3+}$  从<sup>3</sup> $P_1$  到<sup>3</sup> $P_0$  态跃迁引起的. 然而他们都没有能给出足够的证据证明究

竟是 Bi 的何种价态引起的超宽带发光.

对超宽带荧光的归属与发光机理的研究对于其应用是至关重要的. 本文我们尝试在玻璃系统中引入易于使 Bi 离子形成  $\text{Bi}^{5+}$  的化学组分, 来研究获得玻璃材料的发光性能, 从而研究这些化学物质对超宽带荧光的影响规律, 以及可能的发光机理.

已有研究表明<sup>[14]</sup>, 在空气环境中制备的  $\text{Bi}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{O}_{1.5}$  多晶薄膜和  $\text{BaBiO}_3$  晶体中存在  $\text{Bi}^{5+}$  离子. 后来在  $\text{BaKBiO}_3$  和  $\text{BaPbBiO}_3$ <sup>[15]</sup> 中也发现了  $\text{Bi}^{5+}$  离子. 在主要报道的具有超宽带 Bi 离子发光效应的  $\text{SiO}_2$  与  $\text{GeO}_2$  两类玻璃体系中, 鉴于  $\text{GeO}_2$  系统玻璃有较低的熔制温度 (约 1550 $^\circ\text{C}$ )<sup>[9]</sup>, 我们选择其作为研究对象. 由于玻璃与晶体在局部的微观环境中具有一定的相似性, 可以预见, 在  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3$  系统中, 引入 Y 或者 Ba 可能提供一个容易形成  $\text{Bi}^{5+}$  离子的微观环境. 另外, 作为比较, 我们在系统玻璃中引入了与 Y 和 Ba 同样摩尔比例的 Na, 制备了  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-Bi}_2\text{O}_3$  玻璃.

\* 浙江省自然科学基金 (批准号: 502164) 及宁波市博士基金 (批准号: 2005A610010) 资助的课题.

† 通信联系人. E-mail: hpaxcm@nbu.edu.cn

## 2. 实 验

用高温熔融法制备了组分为  $96\text{GeO}_3\text{-}2.5\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\text{Na}_2\text{O}\text{-}0.5\text{Bi}_2\text{O}_3$  (GANB),  $96\text{GeO}_3\text{-}2.5\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\text{BaO}\text{-}0.5\text{Bi}_2\text{O}_3$  (GABB),  $96\text{GeO}_3\text{-}2.5\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\text{Y}_2\text{O}_3\text{-}0.5\text{Bi}_2\text{O}_3$  (GAYB) 和  $96\text{GeO}_3\text{-}2.5\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}\text{Na}_2\text{O}\text{-}0.5\text{Bi}_2\text{O}_3$  (GBNB) 的玻璃. 原料中  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{BaO}$  和  $\text{B}_2\text{O}_3$  分别以  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$  和  $\text{H}_3\text{BO}_3$  的形式引入,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  直接以氧化物的形式引入, 各原料都为分析纯. 按上述配方精确称取总量相当为 30g 的玻璃原料, 经充分混合后加入到 30mL 的刚玉坩埚中. GBNB, GANB 和 GABB 三个组分放入到已预热至  $1500^\circ\text{C}$  的硅钼棒炉中, 并在此温度下保温熔制 40min; GAYB 放入到预热至  $1200^\circ\text{C}$  的高温炉中, 并在此温度下保温熔制 40min. 最后将所得的玻璃液浇注到预热至  $350^\circ\text{C}$  的铁模上, 成型后, 放置于  $350^\circ\text{C}$  的马沸炉中退火 4h, 然后关闭电源, 自然冷却到室温. 玻璃样品呈现棕红色. 样品经切割, 抛光后, 加工成尺寸为  $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 1\text{mm}$  的两大面平行抛光块体, 用于光谱测试.

差热曲线由型号为 CRY-2 的差热分析仪测得 (测量范围  $50\text{--}1200^\circ\text{C}$ , 升温速率  $20^\circ\text{C}/\text{min}$ , 样品重量 20mg), 吸收和红外发射光谱分别用 PerkinElmer lambda950 UV/VIS 吸收光谱仪和 TRIAX 550 荧光光谱仪 (800nm 激光二极管激发) 测定. 荧光衰减曲线由 Tektronix TDS 1012 数字储存示波器记录. 所有性质测量都是在室温下进行.

在差热分析中有几个重要的参数: 软化温度  $T_g$ , 结晶起始温度  $T_x$ , 结晶温度  $T_c$ , 融化温度  $T_1$ . 软化温度对应于材料的粘度为  $10^{12}\text{--}10^{13}\text{P}$ , 并开始由固体状态向液体状态转变的温度<sup>[16]</sup>. 结晶起始温度对应于玻璃的粘度进一步降低到开始形成快速的晶体增长的温度.

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 差热分析

为了研究玻璃样品的热稳定性, 测定了样品的差热曲线. 测定的温度范围  $50\text{--}1200^\circ\text{C}$ . 从差热曲线的变化情况, 可知道该玻璃的软化温度  $T_g$ ; 结晶起始温度  $T_x$ , 结晶温度  $T_c$ ; 融化温度  $T_1$ . 玻璃的热稳定性通常可由  $T_x - T_g$  的数值大小来衡量. 图 1 是

GANB, GABB, GAYB 玻璃的 DTA 曲线, 从曲线中可以看出各玻璃的  $T_g$ ,  $T_x$ ,  $T_c$  温度. GANB, GABB, GAYB 玻璃的  $T_g$  温度分别为  $465, 469, 477^\circ\text{C}$ ;  $T_x$  温度为  $788, 822, 791^\circ\text{C}$ ;  $T_c$  温度为  $866, 862, 861^\circ\text{C}$ ;  $T_x - T_g$  值分别为  $323, 352, 314$ . 可见, Ba 的引入与 Yb 和 Na 相比, 能提高玻璃的热稳定性.

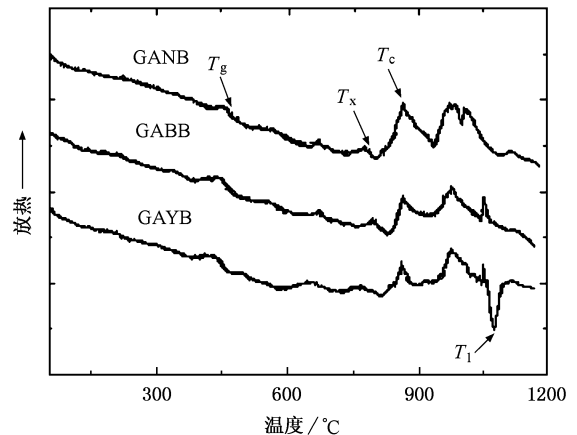


图 1 GANB, GABB 和 GAYB 玻璃的 DTA 曲线

另外, 还观察到 GAYB 的  $T_1$  温度为  $1104^\circ\text{C}$ , 然而 GANB 和 GABB 的  $T_1$  温度在  $50\text{--}1200^\circ\text{C}$  的范围内没有观察到. 因此, 与  $\text{BiO}^{[8]}$  ( $1760^\circ\text{C}$ ) 和  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3$  <sup>[9]</sup> ( $1550^\circ\text{C}$ ) 相比, GAYB 玻璃融化温度更低, 更容易用高温熔融法制得.

### 3.2. 发射光谱和荧光衰减曲线

GABB, GAYB, GANB 和 GBNB 玻璃在 800nm 激光二极管激发下的发射光谱如图 2 所示. GABB, GAYB, GANB 玻璃在中心波长 1220nm 附近显现出超宽带发光的效应, 而 GBNB 玻璃没有半高宽大于

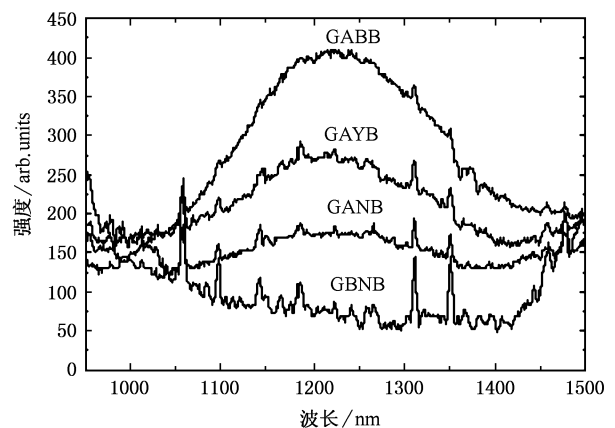


图 2 玻璃样品的发射光谱 (800nm LD 激发)

100nm 的发射峰. 从发射光谱中得到, GABB 玻璃在 1220nm 处的荧光强度分别是 GAYB 和 GANB 的 1.5 和 2.2 倍. GABB, GAYB 和 GANB 玻璃在 1220nm 附近的荧光半高宽分别为 270, 221, 161nm. 可见在所有样品中 GABB 玻璃具有最大的荧光半高宽 (FWHM) 和最强的荧光强度.

GABB 玻璃的荧光衰减曲线如图 3 所示. 该曲线是由 800nm 激光二极管激发, 检测 1220nm 波长得到的. 实验所得的荧光衰减曲线与一阶  $e$  指数拟合曲线相符. 得到该样品的荧光寿命为 374nm. 另外, 在相同条件下从示波器读取的 GAYB 和 GANB 玻璃的荧光寿命分别为 351nm 和 242nm.

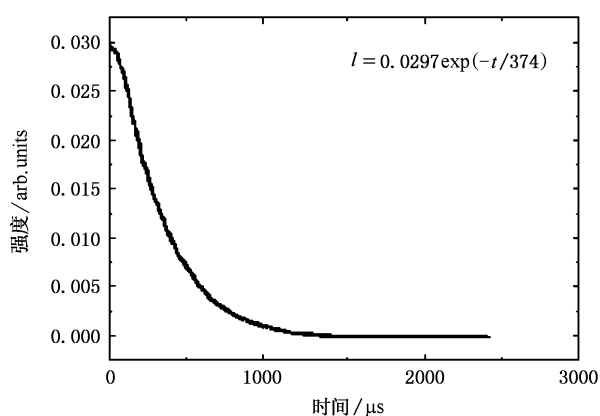


图 3 1220nm 处 GABB 玻璃的荧光衰减曲线 (800nm LD 激发)

比较上述玻璃的荧光强度, 荧光寿命和半高宽, 可以看出, 在  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3$  玻璃中引入 BaO,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  后, 它们都有较大的提高. 我们把这归因于系统中  $\text{Bi}^{5+}$  离子浓度的增加所致.

$\text{Bi}$  离子的价态有  $\text{Bi}^+$ ,  $\text{Bi}^{3+}$ ,  $\text{Bi}^{4+}$ ,  $\text{Bi}^{5+}$  等存在形式. 这些离子的稳定性跟制备的工艺条件、环境气氛、温度、离子的局域结构等诸多因素有关. 在空气中所制备的  $\text{Bi}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{O}_{1.5}$ ,  $\text{BaBiO}_3$ ,  $\text{BaKBiO}_3$  和  $\text{BaPbBiO}_3$ <sup>[14,15]</sup> 晶体中, 被证实  $\text{Bi}$  离子主要由  $\text{Bi}^{3+}$  与  $\text{Bi}^{5+}$  形式存在.  $\text{Bi}^{5+}$  离子在  $\text{Bi}$  离子中占一定的比例. 由于玻璃是一种近程有序的结构物质, 它与晶体在局部的微观环境中具有一定的相似性, 当在  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3$  引入  $\text{Y}_2\text{O}_3$  与 BaO 化学组分后, 在局部具备了形成类似上述晶体结构的化学元素, 导致  $\text{Bi}$  离子易于形成  $\text{Bi}^{5+}$  价态的局部配位.

### 3.3. 吸收光谱

图 4 是 GBNB, GANB, GABB, GAYB 玻璃的吸收

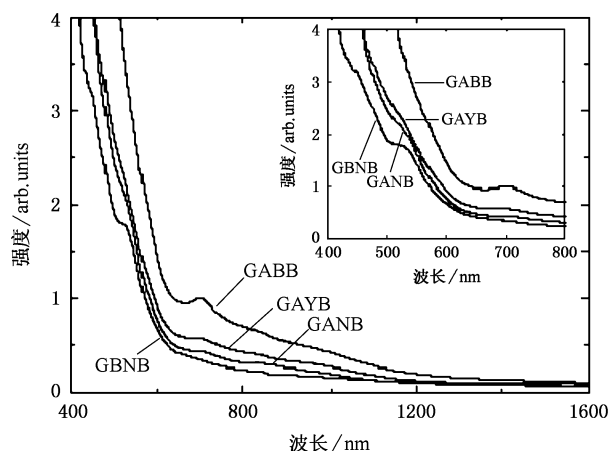


图 4 GBNB, GANB, GABB 和 GAYB 的吸收光谱

光谱, 测量范围为 400—1600nm. GANB, GABB 和 GAYB 的谱线都包含三个主要的吸收带: 530, 700 和 800nm, GBNB 的谱线也有三个明显的吸收带: 460, 530 和 800nm.

Mizoguchi<sup>[14]</sup> 研究表明, 随着  $\text{Bi}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{O}_{1.5+\delta}$  多晶薄膜中氧含量的增加,  $\text{Bi}$  离子的价态从  $\text{Bi}^{3+}$  到  $\text{Bi}^{5+}$  变化, 则其吸收边带从 3.0eV (414nm) 变化到 2.1eV (592nm). 这些吸收边带 (大于 414nm, 或低于 3.0eV) 是由  $\text{Bi}^{3+}$  的  $6s^2$  电子到  $\text{Bi}^{5+}$   $6s^0$  空轨道的电荷跃迁所引起的. 在此研究的玻璃样品中  $\text{Bi}^{5+}$  的浓度随组分的变化情况可从其吸收边带得到直接说明. 从吸收光谱图中可以得到 GBNB, GANB, GAYB, GABB 的吸收边带分别在 420, 525, 555, 580nm, 它们逐渐发生红移, 因此可以断定, 随着 Ba 与 Y 的加入, 玻璃成分中  $\text{Bi}^{5+}$  离子的量逐步增加. 这一情况与荧光光谱的研究结果相一致. 因此进一步说明铋掺杂玻璃超宽带发光的效应是由  $\text{Bi}^{5+}$  离子发光引起的.

### 3.4. 荧光发射截面

荧光发射截面  $\sigma_p$  是一个重要的参数, 在荧光发射曲线为近似高斯形状时, 它可根据以下的公式进行估算<sup>[11]</sup>:

$$\sigma_p = \frac{\lambda_c^4}{4\pi n^2 \tau c \Delta\lambda} \left( \frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $\lambda_c$ ,  $c$ ,  $\Delta\lambda$ ,  $n$ ,  $\tau$  分别表示中心发射波长、光速、荧光半高宽、材料折射率和荧光寿命. GANB, GAYB 和 GABB 样品的参数 ( $\lambda_c$ ,  $\sigma_p$ ,  $\Delta\lambda$ ,  $n$ ,  $\tau$ ) 值列于表 1. 从表 1 中可以看出, GANB 的荧光发射截面最大, 其值比 PAB 和 GBA<sup>[11]</sup> 的  $\sigma_p$  值大.

$\sigma_p \times \tau$  与  $\sigma_p \times \Delta\lambda$  的值是光纤放大器的两个重

要参数.  $\sigma_p \times \tau$  与激光阈值成反比<sup>[17]</sup>;  $\sigma_p \times \Delta\lambda$  的值与光纤放大器的增益带宽成正比<sup>[4]</sup>. GANB, GABB, GAYB 样品玻璃  $\sigma_p \times \tau$  和  $\sigma_p \times \Delta\lambda$  值列于表 2. 从表

2 可以看出, 样品玻璃  $\sigma_p \times \tau$  和  $\sigma_p \times \Delta\lambda$  的值, 比  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[12]</sup> 和  $\text{Er}^{3+}:\text{SiO}_2$ <sup>[18]</sup> 中的值大. 因此, GANB, GABB 和 GAYB 玻璃是研制成从 O 到 L 波段

表 1 玻璃样品的参数( $\lambda_c, \sigma_p, \Delta\lambda, n, \tau$ ) 值

样品玻璃	$n$	$\lambda_c/\text{nm}$	$\Delta\lambda/\text{nm}$	$\tau/\mu\text{s}$	$\sigma_p/10^{-20}\text{cm}$
96GeO-2.5Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Na <sub>2</sub> O-0.5Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (GANB)	1.62	1220	161	242	2.70
96GeO-2.5Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -BaO-0.5Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (GABB)	1.62	1220	270	374	1.04
96GeO-2.5Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0.5Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (GAYB)	1.63	1220	221	351	1.34
PAB <sup>[11]</sup>	1.53	1300	300	500	1.0
GAB <sup>[11]</sup>	1.60	1300	320	254.5	1.68

表 2 玻璃样品  $\sigma_p \times \tau$  和  $\sigma_p \times \Delta\lambda$  的值

样品玻璃	GANB	GABB	GAYB	PAB <sup>[11]</sup>	$\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[12]</sup>	$\text{Er}^{3+}:\text{SiO}_2$ <sup>[18]</sup>
$\sigma_p \times \tau/10^{-24}\text{cm}^2 \cdot \text{s}$	6.53	3.89	4.70	5.0	1.4	-
$\sigma_p \times \Delta\lambda/10^{-20}\text{cm}^2 \cdot \text{nm}$	435	281	296	300	-	22

超宽带光纤放大器的良好材料.

## 4. 结 论

在 800nm 光激发下, 在 Bi 离子掺杂 GABB, GAYB 和 GANB 玻璃中, 观察到约 1220nm 发光中心附近 FWHM 分别为 270, 221, 161nm, 荧光寿命为 374, 351, 242 $\mu\text{s}$  的超宽带发光效应. 且它们的荧光强

度逐步减弱. 超宽带荧光效应是由于  $\text{Bi}^{5+}$  的发光所致. 由于 Ba, Y 等化学组分在  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3$  玻璃局部区域形成有利于  $\text{Bi}^{5+}$  稳定存在的配位环境, 随着 Ba, Y 含量的增加, 玻璃的吸收边带逐步发生红移. 玻璃中  $\text{Bi}^{5+}$  离子的浓度增加. 由于 Ba, Y 化学组分对  $\text{Bi}^{5+}$  离子价态的影响, 导致 GANB, GABB 和 GAYB 玻璃中的超宽带发光强度、寿命以及 FWHM 的变化.

- [1] Flood Felton A 2000 *Proc. of OFC '2000*, Paper WG1-2
- [2] Federighi M, Pasquale F Di 1995 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7** 303
- [3] Mori A, Ohishi Y, Sudo S 1997 *Electron. Lett.* **33** 863
- [4] Yang J H, Dai S X, Zhou Y F et al 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 977
- [5] Yang J H, Dai S X, Wen L et al 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 508 (in Chinese) [杨建虎、戴世勋、温磊等 2003 物理学报 **52** 508]
- [6] Chen B Y, Lin Y H, Chen D D et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **54** 2374 (in Chinese) [陈炳炎、刘粤惠、陈东丹等 2004 物理学报 **54** 2374]
- [7] Fujimoto Yasushi, Nakatsuka Masahiro 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** L279
- [8] Fujimoto Yasushi, Nakatsuka Masahiro 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82**

3325

- [9] Peng M Y, Qiu J R, Chen D P et al 2004 *Opt. Lett.* **29** 1998
- [10] Meng X G, Qiu J R, Peng M Y et al 2005 *Opt. Expr.* **13** 1635
- [11] Meng X G, Qiu J R, Peng M Y et al 2005 *Opt. Expr.* **13** 1628
- [12] Peng M Y, Qiu J R, Chen D P et al 2005 *Opt. Lett.* **30** 2433
- [13] Peng M Y, Qiu J R, Chen D P et al 2005 *Opt. Expr.* **13** 6892
- [14] Mizoguchi H, Kawazoe H, Hosono H et al 1997 *Solid State Commun.* **104** 705
- [15] Ignatov A Yu, Menushenkov A P, Klementev K V et al 1995 *Nucl. Instru. and Meth. in Phys. Res.* **359** 244
- [16] Wang J S, Vogel E M, Snitzer E 1994 *Opt. Mater.* **3** 187
- [17] Suzuki T, Ohishi Y 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3804
- [18] Zou X L, Izumitani T 1993 *J. Non-Cryst. Solids* **162** 68

# Properties of Bi doped $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-}M$ ( $M = \text{Na}_2\text{O}, \text{BaO}, \text{Y}_2\text{O}_3$ ) glasses<sup>\*</sup>

Wang Xue-Jun Xia Hai-Ping<sup>†</sup>

(*Laboratory of Photo-Electronic Materials, Ningbo University, Ningbo 315211, China*)

(Received 27 February 2006; revised manuscript received 11 March 2006)

## Abstract

The  $\text{GeO-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$  (GBNB),  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$  (GANB),  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-BaO}$  (GABB) and  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  (GAYB) glasses doped with bismuth of 1mol% concentration were prepared by melting method and measurement of their DTA curves, absorption and emission spectra and fluorescence decay curves were carried out. It was found that the absorption edges of GBNB, GANB, GAYB, GABB were red-shifted. Since the absorption edges are ascribed to the charge transfer transition from  $\text{Bi}^{3+} 6s^2$  to  $\text{Bi}^{5+} 6s^0$ , we conclude that the content of  $\text{Bi}^{5+}$  in GBNB, GANB, GAYB, and GABB glasses increased gradually. Near infrared super-broadband emission of GANB, GABB and GAYB samples were observed to be center-peaked at  $\sim 1220\text{nm}$ . The fluorescence intensity, FWHM and emission lifetime of GABB, GAYB, GANB were reduced gradually. The super-broadband emissions may be due to the formation and fluorescence of  $\text{Bi}^{5+}$ . It could be deduced from the absorption and emission spectra that the introductions of BaO and  $\text{Y}_2\text{O}_3$  into  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  glass were advantageous to the formation of  $\text{Bi}^{5+}$  in the glass. The mechanism of BaO and  $\text{Y}_2\text{O}_3$  composition affecting the formation of  $\text{Bi}^{5+}$  in the  $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  glass is discussed.

**Keywords:**  $\text{Bi}^{5+}$  ions, superbroadband emission, absorption band, emission lifetime

**PACC:** 4270C, 7845, 8170G, 9160K

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Grant No. 502164) and the Doctoral Science Foundation of Ningbo City (Grant No. 2005A610010).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: hpxcm@nbu.edu.cn