

# 掺铋铋酸盐玻璃近红外发光的温度特性

程继萌<sup>1</sup> 李韦韦<sup>1</sup> 赵国营<sup>1</sup> 李顺光<sup>1</sup> 陈伟<sup>1</sup> 胡丽丽<sup>1</sup> Georges Boulon<sup>2</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> Institute Light Matter, UMR5306 University of Lyon1-CNRS, University of Lyon, Bat. Kastler, 69622 Villeurbanne cedex, France

**摘要** 研究了组分为  $55\text{Bi}_2\text{O}_3-25\text{B}_2\text{O}_3-10\text{SiO}_2-(10-x)\text{Ga}_2\text{O}_3-x\text{Yb}_2\text{O}_3$  ( $x=0.5, 2.0, 5.0$ ) 掺铋铋酸盐玻璃在  $1\ \mu\text{m}$  近红外波段发光的温度特性。测定了 9 K 低温到 350 K 高温条件下 975 nm 和 1003 nm 主次荧光峰, 它们的半峰全宽基本没有大的变化, 表明铋酸盐玻璃基质对铋离子的非均匀加宽是谱线加宽的主要原因。另外, 电子-声子耦合对铋离子荧光光谱和荧光寿命也有一定程度的影响。对于荧光寿命的温度特性, 本身具有较大荧光俘获效应的铋离子的寿命受到明显影响, 其中在高温区的影响比在低温区的更强。

**关键词** 材料; 掺铋铋酸盐玻璃; 低温荧光光谱; 低温荧光寿命; 低温激发光谱

**中图分类号** TQ171.73<sup>+</sup>5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1015001

## Temperature Characteristics of Near-Infrared Luminescence of Yb-Doped Bismuth-Based Glasses

Cheng Jimeng<sup>1</sup> Li Weiwei<sup>1</sup> Zhao Guoying<sup>1</sup> Li Shunguang<sup>1</sup> Chen Wei<sup>1</sup>  
Hu Lili<sup>1</sup> Georges Boulon<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup> Institute Light Matter, UMR5306 University of Lyon1-CNRS, University of Lyon, Bat. Kastler, 69622 Villeurbanne cedex, France

**Abstract** The temperature dependence of near-infrared around  $1\ \mu\text{m}$  emission properties of Yb-doped  $55\text{Bi}_2\text{O}_3-25\text{B}_2\text{O}_3-10\text{SiO}_2-(10-x)\text{Ga}_2\text{O}_3-x\text{Yb}_2\text{O}_3$  ( $x=0.5, 2.0, 5.0$ ) glasses is investigated. Emission spectra, covering a major 975 nm fluorescence peak with a minor 1003 nm weaker peak, are determined within the temperature range of 9 K~350 K. The full width at half-maximum of them does not change a lot. An important cause for the width of fluorescence line is inhomogeneous broadening from this bismuth-based glass host. On the other hand, the electron-phonon coupling will have some influence on the emission spectrum and emission lifetime. For the temperature dependence of lifetime, a longer emission lifetime of Yb at higher temperature region indicates a more significant influence of radiation trapping effect.

**Key words** materials; Yb-doped bismuth-based glasses; fluorescence spectrum at low temperature; fluorescence lifetime at low temperature; emission spectrum at low temperature

**OCIS codes** 300.1030; 300.2140; 300.6280

## 1 引言

铋离子掺杂的各种玻璃, 特别是磷酸盐、硅酸盐、硼酸盐等玻璃基质, 早在 20 世纪 90 年代就已经有了较为系统的光谱特性研究<sup>[1]</sup>, 但掺铋铋酸盐玻璃方面的研究和报道较少。

为了探索铋酸盐玻璃在光学和激光器件方面的

应用, 研究了  $\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Ga}_2\text{O}_3$  系玻璃的热性质和光学性质<sup>[2]</sup>, 发现随着氧化铋含量的增加, 玻璃中非桥氧的数量增加而玻璃的转变温度有所降低。当铋离子掺入铋酸盐玻璃中时<sup>[3]</sup>, 它的峰值吸收截面和发射截面分别可以达到  $1.56 \times 10^{-20}\ \text{cm}^2$  和  $2.02 \times 10^{-20}\ \text{cm}^2$ 。尽管属于准三能级系统, 但该类玻璃中铋

收稿日期: 2013-04-16; 收到修改稿日期: 2013-05-10

作者简介: 程继萌(1985—), 男, 助理工程师, 主要从事光学材料光谱方面的研究。E-mail: chengjimeng@siom.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

离子具有的最小抽运强度预期为  $8.06 \text{ kW/cm}^2$ , 小于其他玻璃基质中的镱离子, 这对激光运行是非常有益的。如果铋酸盐玻璃基质中含有  $\text{SiO}_2$  成分, 同时对于镱离子的吸收和发射截面影响不大, 并且在共掺情况下镱离子反向能量转移几率没有较大的增加, 则具有良好的实用前景, 有利于与石英类光纤的低损耗对接, 使得产品体积减小, 维护和使用更加简便。

目前在镱离子掺杂氧化铋基玻璃光纤中已经实现了激光输出<sup>[4]</sup>, 当光纤中氧化铋的摩尔分数达到 3% 时, 吸收系数可以达到  $7800 \text{ dB/m}$ , 光纤损耗大约为  $0.24 \text{ dB/m}$ , 激光的斜率效率能够达到 36%。将其作为镱离子激光运行的抽运光源是完全可行的, 因为镱离子掺杂氟化物光纤是  $1.3 \mu\text{m}$  通信窗口用激光放大器的一个重要选择, 而镱离子掺杂激光玻璃在  $1.02 \mu\text{m}$  波长处有较强的发射带<sup>[1]</sup>。随着高功率近红外激光二极管的发展, 掺铋铋酸盐玻璃一方面可以直接作为镱离子的抽运源, 另一方面又促进了镱离子激光器件的巨大发展。在这种情况下, 镱离子的应用转向于镱离子和镱离子共掺激光材料的研究<sup>[5]</sup>, 在生物医学、光敏探测、激光显示等方面具有重要的应用。这方面的工作还包括在铋酸盐玻璃中实现镱离子与铊离子<sup>[6]</sup>和铟离子<sup>[7]</sup>的共掺, 进而提出在这类铋酸盐玻璃中取消氧化铅成分的环保型激光材料。在铋酸盐玻璃体系中, 镱离子不仅能够实现近红外激光, 而且它的上转换发光在激光方面的应用也是可能的<sup>[8]</sup>。本文研究了掺铋铋酸盐玻璃在  $1 \mu\text{m}$  近红外玻璃发光的温度特性, 研究了在不同氧化铋掺杂浓度与环境温度共同作用下, 样品发光特性的变化, 并初步探讨了产生这种变化的各种可能原因。

## 2 实 验

选取铋酸盐玻璃组分为  $55\text{Bi}_2\text{O}_3-25\text{B}_2\text{O}_3-10\text{SiO}_2-(10-x)\text{Ga}_2\text{O}_3-x\text{Yb}_2\text{O}_3$ , 其中各组元前的数值为摩尔比值,  $x=0.5, 2.0, 5.0$ 。按照以上配方称取约 200 g 的粉料, 混合均匀后倒入  $\text{Al}_2\text{O}_3$  刚玉坩埚中, 在  $950 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$  的硅碳棒电炉中熔化约 30 min, 通氧 10 min 并澄清后, 再浇铸到预热的石墨模具上, 然后迅速移入已经加热到铋酸盐玻璃转变温度  $T_g$  的马弗炉中进行退火。保温 2 h 后以  $10 \text{ }^\circ\text{C/h}$  的速度降温至  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 然后关闭马弗炉的电源自然降温到室温。所制备的玻璃样品内部质量完好, 每个样品的两大面均进行精密抛光处理, 样品尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ , 吸收和发射测量的样品在各浓度下是一致的。

铋酸盐玻璃的室温吸收光谱采用 PERKIN-ELMER-LAMBDA 900UV/VIS/NIR 型分光光度计测试。铋酸盐玻璃的室温和低温激发和发射光谱以及荧光寿命由 Edinburgh Instruments 公司的 FLSP920 型时间分辨荧光光谱仪记录, 以 Xe900 型稳态氙灯和微秒脉冲氙灯作为抽运源。样品激发后产生的近红外荧光, 采用 Hamamatsu 公司的 R5509 型液氮制冷近红外探测器进行接收。测试低温光谱数据时, 样品放置于 ARS 公司 DE202 型液氮闭循环制冷系统的样品室中, 温度可变范围为  $9 \text{ K} \sim 350 \text{ K}$ , 温度控制精度为  $0.005 \text{ K}$ , 选取  $9 \text{ K}, 30 \text{ K}, 50 \text{ K}, 70 \text{ K}, 100 \text{ K}, 150 \text{ K}, 200 \text{ K}, 250 \text{ K}, 300 \text{ K}, 350 \text{ K}$  共 10 个温度点, 测量各样品的发射光谱。整个测试过程中, 激发源功率和样品位置以及光谱仪狭缝大小等均保持不变。

## 3 结果和讨论

图 1 所示为掺铋铋酸盐玻璃在室温下的近红外吸收光谱。在  $850 \sim 1050 \text{ nm}$  范围内存在一个镱离子的典型吸收宽峰, 对应镱离子基态能级  $^2F_{7/2}$  到激发态能级  $^2F_{5/2}$  的吸收跃迁, 主峰位于  $975 \text{ nm}$  左右, 整个宽度可以达到  $200 \text{ nm}$  左右。随着氧化铋掺杂含量的升高, 镱离子的整个吸收带在增强, 说明在铋酸盐基质中, 镱离子的溶解性较好, 也反映出玻璃制备过程中成分控制较为准确。

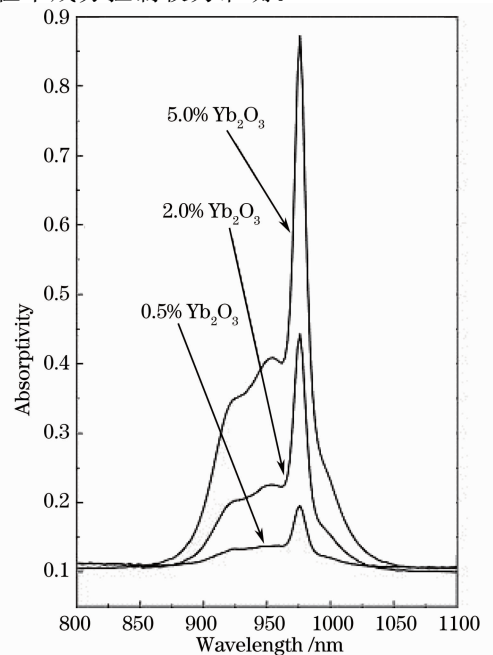


图 1 掺铋铋酸盐玻璃在室温下的近红外吸收光谱  
Fig. 1 Near-infrared absorption spectra of Yb-doped bismuth-based glass at room temperature

除了位于 975 nm 的吸收主峰,在铋酸盐玻璃中的铋离子还显示出位于 955 nm 和 925 nm 左右的吸收跃迁。这与硼硅酸盐玻璃中的铋离子,(仅表现出 975 nm 和 906 nm 两个明显的吸收峰<sup>[9]</sup>)不同。当硼硅酸盐玻璃成分被调整为以氧化铋为主的铋硼硅玻璃后,铋离子的基态能级 $^3F_{7/2}$ 和激发态能级 $^2F_{5/2}$ 的简并被更完全地解除。其中 $^2F_{5/2}$ 分裂为三个激发态子能级,分别对应于 $^2F_{7/2}$ 最低基态子能级的吸收跃迁,产生了 925、955、975 nm 这三个吸收带。这个吸收峰位的特征,与掺铋磷酸盐玻璃的 935、954、975 nm 基本相同<sup>[10-11]</sup>。由于铋酸盐中铋离子周围的结构更为复杂,导致铋离子对称性与在磷酸盐玻璃中的相比,可能会更低一些,使得激发态 $^2F_{5/2}$ 分裂的上能级处于较高的位置。

图 2 为掺铋铋酸盐玻璃在室温下的近红外发射光谱。为了比较铋离子斯塔克能级分裂的情况,将归一化的吸收光谱并列,吸收和发射之间存在明显的重叠。通常情况下铋离子存在明显的荧光俘获效应,在掺铋磷酸盐玻璃中两者的重叠区域可以达到 50% 左右<sup>[12]</sup>。它不仅能够对荧光寿命的测试值产生很大的影响,而且对于荧光光谱的形状也有较大的影响,文献[12]对此做了详细的研究。铋离子产生荧光俘获的原因是如图 2 所示的吸收和发射的重叠,直接影响的来源有两个,一个是掺铋的浓度,一个是掺铋样品的厚度,因此样品即使是低浓度的铋离子掺杂,也采用同一的薄样品测试。对于光谱形状的影响也有两个,随着荧光俘获效应的增强,一方面荧光发射峰向长波方向移动,另一方面发射主峰与次峰之间的相对强度比发生变化。为了尽可能避免铋离子荧光俘获效应的影响,对于掺铋铋酸盐玻璃近红外发光的温度效应研究,均采用低浓度掺铋

样品。

与激发态能级 $^2F_{5/2}$ 的简并被完全解除的情况类似,基态能级 $^2F_{7/2}$ 也应该分裂为 4 个斯塔克子能级,对应于 $^2F_{5/2}$ 能级最低激发态,掺铋铋酸盐玻璃的发射光谱应该显示出 4 个发射峰。如图 2 所示,铋酸盐玻璃中的铋离子,在吸收跃迁的情况下明显表现出三个斯塔克能级,但在发射跃迁的情况下,仅表现出位于 975 nm 和 1003 nm 两处明显的发射峰,尽管 1003 nm 峰的长波侧确实存在较长的发射带。如果这一长波侧发射确实是反映了基态能级的斯塔克分裂,那么在铋酸盐玻璃中的铋离子受到格位非均匀加宽和温度效应两方面的共同作用。

图 3 为掺铋铋酸盐玻璃在不同温度下的近红外发射光谱,测试温度从 9 K 低温到 350 K 高温区,各温度下的发射光谱如图 3 中的插图所示。即使在 9 K 的低温下,掺铋铋酸盐玻璃也仅表现出位于 975 nm 和 1003 nm 的两处发射峰,在测试精度范围内也没有表现出发射峰值的明显位移。从主峰 975 nm 来看,它的峰值和带宽基本上没有随温度的变化而受到明显的影响,反映出在铋酸盐玻璃基质中,斯塔克能级间跃迁的增宽主要是由于铋离子配位场不完全相同的结果。975 nm 谱线即使在低温条件下,也有 8 nm 左右的半峰全宽(FWHM)。这种非均匀加宽的谱线,说明了在铋酸盐中铋离子发射带宽主要由玻璃远程无序的结构决定,与温度基本无关。

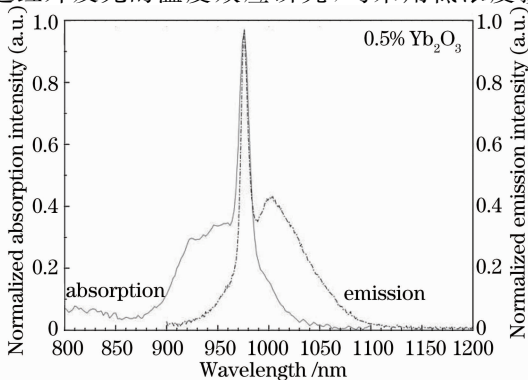


图 2 掺铋铋酸盐玻璃归一化室温吸收和发射光谱  
Fig. 2 Normalized absorption and emission spectra of Yb-doped bismuth-based glass at room temperature

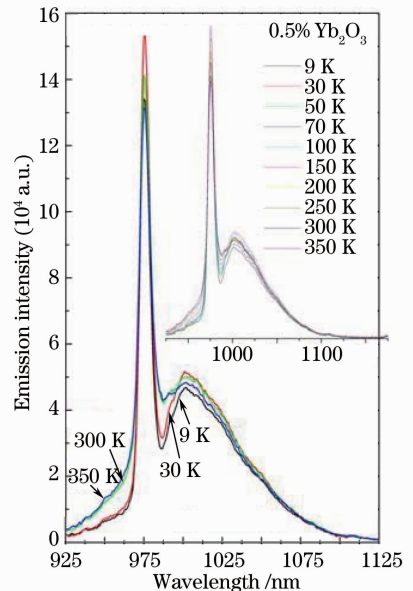


图 3 掺铋铋酸盐玻璃从低温到高温的发射光谱  
Fig. 3 Emission spectra of Yb-doped bismuth-based glass from low to high temperatures

为了更加明显地区分高低温下镱离子的发射特性,特别在图 3 中比较了 9 K~30 K 与 300 K~350 K 下的发射光谱。发现 975 nm 主发射峰的两侧均受到温度的明显作用。在图 4 中将归一化的 350 K 和 9 K 下的发射光谱作了对比,并标示出了两者的差值曲线。在紧靠 975 nm 主峰值附近的 10 nm 左右,基本上完全与温度无关,突出了主峰的非均匀加宽的特征。但是超过这一范围的两侧,大约各 30 nm 的区域,明显在高温下具有相对较强的发射。不同于铒离子荧光发射的温度效应<sup>[13]</sup>,一是上述 975 nm 主峰的形状没有受到温度的明显影响,二是没有发现镱离子具有与铒离子同样的斯塔克分裂与温度的明显关系。如果图 4 在主峰两侧与温度明显相关的原因不是铋酸盐玻璃的非均匀加宽,如文献[2]所述,有关的铋硼镓玻璃没有发现结构的异常,可能的原因是随着温度的升高,在这两个区域的发射强度是与温度有关的电声耦合密切相关的。从镱离子电子构型为  $4f^{13}$  来说,由于镧系收缩,它受到的屏蔽越来越小。与其他镧系离子相比,镱离子最容易与周围晶格产生较强的相互作用。因此在电声耦合作用下,加之随温度变化而改变的布居分布,导致荧光发射表现出相对较为明显的温度效应是可能的。

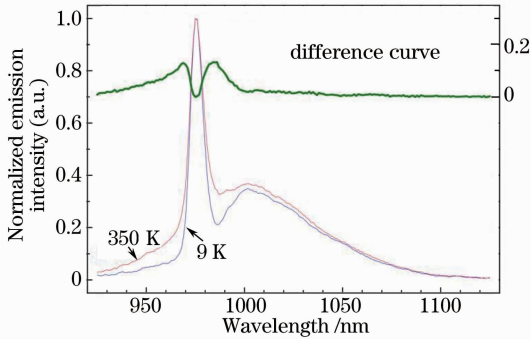


图 4 掺铋铋酸盐玻璃在 350 K 和 9 K 下的归一化发射光谱

Fig. 4 Normalized emission spectra of Yb-doped

bismuth-based glass at the temperatures of 350 K and 9 K

图 5 为掺铋铋酸盐玻璃在 1020 nm 波长处的荧光寿命。从低中高三个氧化铋掺杂浓度的寿命来看,无论是低温区还是高温区,高浓度样品均表现出更大的荧光寿命,这种现象应该主要是由于镱离子荧光俘获效应引起的。

对于 0.5%氧化铋掺杂的样品,随着温度的升高,荧光寿命略有下降。但是无论是 2.0% 还是 5.0%氧化铋掺杂的样品,随着温度的升高,荧光寿命均有明显的上升,与通常情况下稀土离子掺杂晶

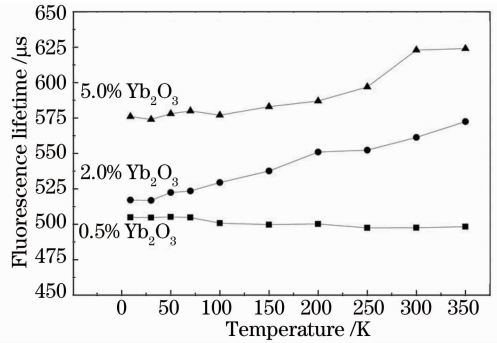


图 5 掺铋铋酸盐玻璃从低温到高温条件下测定的 1020 nm 处荧光寿命

Fig. 5 Fluorescence lifetime of Yb-doped bismuth-based glass from low temperature to high temperature conditions at 1020 nm

体材料所表现出来的荧光寿命随温度变化的规律相反<sup>[10]</sup>,而且在 5.0%氧化铋掺杂情况下,高温区具有饱和的趋势。可能的原因是,在不同温度下镱离子之间的能量转移速率有所不同<sup>[10]</sup>。在掺铋铋酸盐玻璃中,镱离子的无辐射跃迁主要是由于能量转移引起的,即在较低温度下的能量转移速率大于较高温度下的能量转移速率。对于掺铋铋酸盐玻璃,不能认定若低温能量转移速率大于高温时,就一定是低温下无辐射跃迁的几率有所增大。另一方面,如果假定铋酸盐玻璃中镱离子受到的电声耦合作用是比较大的,如对于低温发射特性图 3 和图 4 所分析的那样,那么掺铋铋酸盐玻璃可能在低温时,仍然存在镱离子与周围晶格较强的相互作用,从而导致低温时镱离子的无辐射跃迁几率没有急剧下降。在这种情况下,就有可能表现出当温度上升时,镱离子的荧光寿命不是下降,反而有所上升的现象。还要说明的是,这种荧光寿命的反常,在一定程度上也是与荧光俘获效应有关的,如图 5 所示,在中高浓度掺杂情况下的荧光寿命反常现象确实更为明显。随着温度的升高,无论是针对吸收还是发射,电声耦合作用都具有加强的趋势。一方面,尽管吸收和发射的峰值没有明显的变化,但相互之间的重叠有所扩大。另一方面,基态斯塔克分裂各子能级与声子耦合的作用在加强,各子能级上的布居数也在发生变化。这两方面都使得荧光俘获效应在增强,如图 5 所示,高温区各个浓度之间的荧光寿命差异在扩大。对于掺铋铋酸盐玻璃,大概在 200 K~250 K 范围开始产生较大的差异,而对于掺铋铋酸盐玻璃则在 100 K 左右即开始急剧扩大<sup>[14]</sup>。

对于掺铋铋酸盐玻璃的激发特性,发现不仅在图 1 所示的近红外波段能够激发出图 2 的近红外发



射光谱,而且在靠近近紫外的可见光区也能够激发出掺铋铋酸盐玻璃的近红外发射光谱,如图6所示。随着温度的下降,总的趋势是掺铋铋酸盐玻璃的近红外发射在增强,即温度越低,可见光区的激发越有效。无论是低温区还是高温区,位于275~525 nm的激发宽峰都应该是由两个激发峰组成的,一个位于330 nm左右,一个位于405 nm左右。

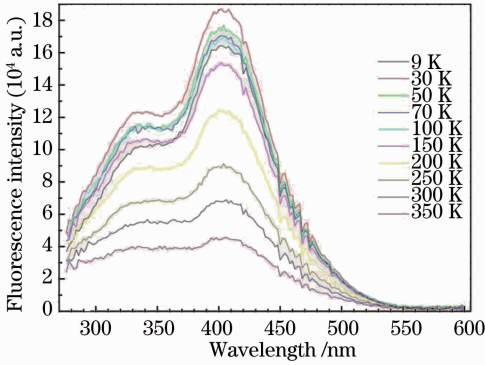


图6 掺铋铋酸盐玻璃在1020 nm荧光处测定的可见光区激发光谱

Fig. 6 Visible region fluorescence excitation spectra of Yb-doped bismuth-based glass at 1020 nm

为了区分这两个激发峰的温度特性,在图7中将归一化的高温350 K激发峰与低温9 K激发峰作了对比,并将两者的差值曲线也标示在图7中。发现330 nm激发峰受到温度加强的作用更加明显,具体表现在:如图6所示,虽然330 nm和405 nm两个激发峰,随着温度的上升,激发效率都有明显下降,但330 nm峰所代表的中心有明显增加的趋势,也就是330 nm和405 nm峰强的比例有明显增大的趋势,说明330 nm峰受温度的影响较大。如图7所示,405 nm峰显示出无论是高温350 K还是低温

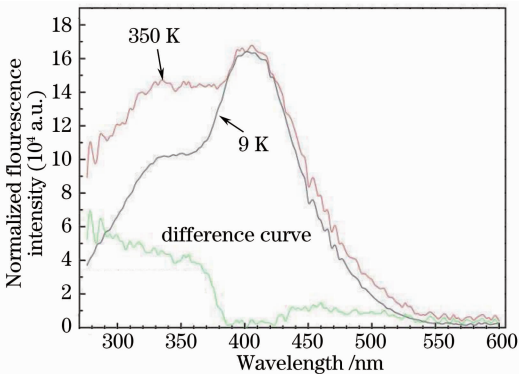


图7 掺铋铋酸盐玻璃在350 K和9 K下的归一化激发光谱  
Fig. 7 Normalized excitation spectra of Yb-doped bismuth-based glass at the temperatures of 350 K and 9 K

9 K,它的长波侧没有发生明显的波形变化,说明它受温度的影响很小。

测定了掺铋铋酸盐紫外到可见的吸收光谱,由于吸收开始急剧增强的“吸收边”发生在425 nm波长左右,没有发现明显能够与图6激发光谱对应的吸收峰。这一点与所研制的其他铋酸盐玻璃类似,“吸收边”已经扩展到可见光区,例如铋硼镓玻璃<sup>[15]</sup>和铋硅镓玻璃<sup>[16]</sup>都接近500 nm。只有当铋酸盐中的氧化铋含量降低到15%时<sup>[17]</sup>,该“吸收边”才能够在400 nm以下。选择390 nm这个横跨两个激发峰的激发波长,能够激发出与图2和图3相同的近红外发射光谱,但没有检测到有效的可见光区的发射峰。因此可以认为,无论是330 nm峰还是405 nm峰,它们吸收的能量均转移到铋离子。

产生可见光区激发中心的原因目前尚不清楚。一个可能的原因是产生了二价铋离子,但二价铋离子通常会表现出蓝光区的发射<sup>[18]</sup>。另外一个可能是铋酸盐玻璃中有少量铋离子发生了变价,例如一价铋离子<sup>[19]</sup>,但类似的铋离子将有约1.1 μm的近红外发射光谱。从铋硼碲玻璃关于Bi 4f光电子能谱的测试结果来看,确实在玻璃中三价铋和五价铋离子有可能是共存的<sup>[20]</sup>,这些离子及其与周围结构缺陷的组合也是不能被完全排除的。

## 4 结 论

在实现对铋酸盐玻璃进行低中高氧化铋均匀掺杂的基础上,研究了掺铋铋酸盐玻璃近红外发光及激发的温度特性。结果表明铋离子近红外发光的能力,随着温度的下降有所上升,有利于形成准四能级的铋离子激光运行。无论是发射光谱还是荧光寿命,都受到荧光俘获效应的影响,但低温下这种影响可能相对弱些。对于铋离子的发光以及它的可见激发,除了铋酸盐玻璃配位场作用外,还存在一定程度的电声耦合作用,但产生可见光区激发峰的原因有待于进一步研究。

## 参 考 文 献

- 1 X Zou, H Toratani. Evaluation of spectroscopic properties of Yb<sup>3+</sup>-doped glasses [J]. Phys Rev B, 1995, 52 (1): 15889-15897.
- 2 Huiyan Fan, Guonian Wang, Lili Hu. The thermal and optical properties of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses[C]. Conference on Laser and Electro Optics / The Pacific Rim, 2009.
- 3 Fan Huiyan. The Study on Structure, Spectroscopic and Nonlinear Optical Properties of Bismuth Glasses[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.

- 范慧燕. 铋酸盐玻璃结构和非线性及光谱性质研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2010.
- 4 O Seiki, K Yutaka. Highly ytterbium-doped bismuth-oxide-based fiber[J]. *Opt Express*, 2009, 17(16): 14104–14108.
- 5 J Lousteau, N Boetti, D Negro, *et al.*. Rare-earth doped tellurite glass optical fibre for visible light sources[J]. *IEEE 2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2011.
- 6 H Lin, K Liu, L Lin, *et al.*. Optical parameters and upconversion fluorescence in  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -doped alkali-barium-bismuth-tellurite glasses [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2006, 65 (3): 702–707.
- 7 X Wei, L Feng, X Nie, *et al.*. Intense upconversion emission of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-Na}_2\text{O}$  glasses [C]. *IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 2006, 1389–1392.
- 8 H Sun, L Zhang, S Zhao, *et al.*. Structural and upconversion fluorescence properties of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped oxychloride lead-germanium-bismuth glass[J]. *Solid State Commun*, 2005, 133 (6): 357–361.
- 9 Li Shanfeng, Miao Zhuang, Peng Yang, *et al.*. The optical properties of Yb-doped borosilicate glass and its co-operation of the two-photon upconversion fluorescence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(8): 4315–4320.
- 李善峰, 苗 壮, 彭 杨, 等. 掺 Yb 硼硅酸盐玻璃的光学特性及其双光子合作上转换荧光[J]. *物理学报*, 2006, 55(8): 4315–4320.
- 10 Dai Shixun, Hu Lili, Liu Zhuping, *et al.*. Spectroscopy and laser properties of Yb-doped phosphate laser glass at low temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(5): 627–631.
- 戴世勋, 胡丽丽, 柳祝平, 等. 低温下掺铋磷酸盐激光玻璃的光谱和激光特性[J]. *光学学报*, 2002, 22(5): 627–631.
- 11 Mao Yanli, Deng Peizhen, Gan Fuxi, *et al.*. Spectroscopic properties of  $\text{Yb}^{3+}$  in phosphate glass [J]. *Chinese J Luminescence*, 2002, 23(2): 152–156.
- 毛艳丽, 邓佩珍, 干福熹, 等. 掺铋磷酸盐玻璃的光谱特性[J]. *发光学报*, 2002, 23(2): 152–156.
- 12 Dai Shixun, Yang Jianhu, Dai Nengli, *et al.*. Effect of radiation trapping to  $\text{Yb}^{3+}$  phosphate glass spectroscopic properties[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(6): 1533–1538.
- 戴世勋, 杨建虎, 戴能利, 等. 荧光俘获效应对  $\text{Yb}^{3+}$  磷酸盐玻璃光谱性质的影响[J]. *物理学报*, 2003, 52(6): 1533–1538.
- 13 Li Xujie, Nie Qiuhua, Dai Shixun, *et al.*. Luminescence properties of low temperature for  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  doped tellurite glasses[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(5): 3001–3005.
- 厉旭杰, 聂秋华, 戴世勋, 等. 低温下  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺碲酸盐玻璃的发光特性研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(5): 3001–3005.
- 14 H Kiriya, N Srinivasan, M Yamanaka, *et al.*. Temperature dependence of emission cross-section of  $\text{Yb}^{3+}$  glass[J]. *Jpn J Appl Phys*, 1997, 36: L1165–L1167.
- 15 Huiyan Fan, Guonian Wang, Kefeng Li, *et al.*. Broadband 1.5- $\mu\text{m}$  emission of high erbium-doped  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$  glasses[J]. *Solid State Commun*, 2010, 150(25): 1101–1103.
- 16 Guoying Zhao, Ying Tian, Shikai Wang, *et al.*. Broadband near-IR emission and temperature dependence in  $\text{Er}/\text{Tm}$  co-doped  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3$  glasses [J]. *Physica B*, 2012, 407 (24): 4622–4626.
- 17 Guoying Zhao, Ying Tian, Xin Wang, *et al.*. Spectroscopic properties of 1.8  $\mu\text{m}$  emission in  $\text{Tm}^{3+}$  doped bismuth silicate glass[J]. *Journal of Luminescence*, 2013, 134: 837–841.
- 18 M Engholm, L Norin, D Åberg. Strong UV absorption and visible luminescence in ytterbium-doped aluminosilicate glass under UV excitation[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(22): 3352–3354.
- 19 Ruan Jian. Mechanism of Broadband Near-Infrared Luminescence and Optical Amplification in Bi-Doped Glasses[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- 阮 健. Bi 掺杂玻璃的宽带近红外荧光机理和光放大[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2009.
- 20 Guoying Zhao, Ying Tian, Huiyan Fan, *et al.*. Properties and structures of  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-TeO}_2$  glass[J]. *J Mater Sci Technol*, 2013, 29(3): 209–214.

栏目编辑: 韩 峰