

## Dy<sup>3+</sup>对Tb<sup>3+</sup>激活硅酸盐氟氧闪烁玻璃发光性能的影响

张勇<sup>1,2</sup>, 朱金铭<sup>1</sup>, 杨丽丽<sup>1\*</sup>, 吕世权<sup>1</sup>, 武彦群<sup>1</sup>, 楚学娟<sup>1</sup>

1. 吉林师范大学物理学院, 吉林 四平 136000

2. 物理国家级实验教学示范中心(吉林师范大学), 吉林 四平 136000

**摘要** 采用高温熔融法制备了 Dy<sup>3+</sup> 或 Tb<sup>3+</sup> 单掺和 Dy<sup>3+</sup>/Tb<sup>3+</sup> 共掺硅酸盐氟氧闪烁玻璃。通过对傅里叶变换红外光谱、透射光谱、光致激发和发射光谱、X 射线激发发射光谱及荧光衰减曲线的分析, 研究 Dy<sup>3+</sup> 与 Tb<sup>3+</sup> 之间的能量传递关系以及 Dy<sup>3+</sup> 对 Tb<sup>3+</sup> 激活硅酸盐氟氧闪烁玻璃发光性能的影响。实验结果表明: Dy<sup>3+</sup>/Tb<sup>3+</sup> 共掺硅酸盐氟氧闪烁玻璃具有较高的密度和良好的可见区透过率, 玻璃的网络结构是由 [SiO<sub>4</sub>] 四面体和 [AlO<sub>4</sub>] 四面体连接构成。在紫外光激发时, Dy<sup>3+</sup> 单掺玻璃的发光源于 Dy<sup>3+</sup> 的 <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> → <sup>6</sup>H<sub>15/2</sub> (483 nm), <sup>6</sup>H<sub>13/2</sub> (576 nm) 的跃迁发射, 而 Tb<sup>3+</sup> 单掺玻璃的发光则源于 Tb<sup>3+</sup> 的 <sup>5</sup>D<sub>4</sub> → <sup>7</sup>F<sub>6</sub> (489 nm), <sup>7</sup>F<sub>5</sub> (544 nm), <sup>7</sup>F<sub>4</sub> (586 nm) 和 <sup>7</sup>F<sub>6</sub> (623 nm) 的跃迁发射。对于 Dy<sup>3+</sup>/Tb<sup>3+</sup> 共掺玻璃, 发射光谱则主要由 Tb<sup>3+</sup> 的荧光发射组成。通过对不同波长紫外光激发的发射光谱分析发现, Dy<sup>3+</sup>/Tb<sup>3+</sup> 共掺闪烁玻璃中存在多种形式的能量传递。在以 Dy<sup>3+</sup> 的特征激发 452 nm 为激发波长时, Tb<sup>3+</sup> 单掺玻璃的发光很弱。但随着 Dy<sup>3+</sup> 的引入, 通过 <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> (Dy<sup>3+</sup>) → <sup>5</sup>D<sub>4</sub> (Tb<sup>3+</sup>) 的能量传递, Tb<sup>3+</sup> 发光得到敏化增强。Dy<sup>3+</sup>/Tb<sup>3+</sup> 共掺玻璃的发光强度随着 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增多而增强, Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 1 mol% 时达到最大, 更高 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的样品由于 Dy<sup>3+</sup> 的浓度猝灭, 减少了向 Tb<sup>3+</sup> 的能量传递, 发光强度减弱。当激发波长减小到 350 nm 时, Dy<sup>3+</sup> 和 Tb<sup>3+</sup> 均被激发到更高的能级 <sup>6</sup>P<sub>7/2</sub> (Dy<sup>3+</sup>) 和 <sup>5</sup>L<sub>9</sub> (Tb<sup>3+</sup>), 此时除了 <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> (Dy<sup>3+</sup>) → <sup>5</sup>D<sub>4</sub> (Tb<sup>3+</sup>) 的能量传递外, 还出现了 <sup>5</sup>D<sub>4</sub> (Tb<sup>3+</sup>) → <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> (Dy<sup>3+</sup>) 的能量回传。Dy<sup>3+</sup> 掺杂浓度较低时, Dy<sup>3+</sup> → Tb<sup>3+</sup> 能量传递作用较强, Tb<sup>3+</sup> 发光得到敏化增强。随着 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增多, Tb<sup>3+</sup> → Dy<sup>3+</sup> 能量传递作用增强。当 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量超过 0.4 mol% 时, Tb<sup>3+</sup> → Dy<sup>3+</sup> 能量传递强于 Dy<sup>3+</sup> → Tb<sup>3+</sup> 能量传递, 减少了 Tb<sup>3+</sup> 的辐射跃迁发光, 因此 Dy<sup>3+</sup>/Tb<sup>3+</sup> 共掺玻璃的发光强度开始减弱。由于 Gd<sup>3+</sup> 向 Dy<sup>3+</sup> 或 Tb<sup>3+</sup> 均可进行有效的能量传递, 因此在以 Gd<sup>3+</sup> 的特征激发 274 nm 为激发光时, Dy<sup>3+</sup>/Tb<sup>3+</sup> 共掺玻璃中出现了 Dy<sup>3+</sup> 和 Tb<sup>3+</sup> 对 Gd<sup>3+</sup> 传递能量的竞争。随着 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增多, Tb<sup>3+</sup> 所获得的能量不断减少, 同时伴随着 Tb<sup>3+</sup> → Dy<sup>3+</sup> 能量回传和 Dy<sup>3+</sup> 之间的无辐射交叉弛豫作用, Dy<sup>3+</sup>/Tb<sup>3+</sup> 共掺玻璃的发光强度不断减弱。对 Dy<sup>3+</sup>/Tb<sup>3+</sup> 共掺闪烁玻璃中 Tb<sup>3+</sup> 的 <sup>5</sup>D<sub>4</sub> → <sup>7</sup>F<sub>5</sub> 荧光衰减曲线分析还发现, 随着 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增多, Tb<sup>3+</sup> 的荧光寿命从 2.24 ms 缩短到 1.15 ms, 曲线从单指数形式变为双指数形式, 进一步证明玻璃中存在 <sup>5</sup>D<sub>4</sub> (Tb<sup>3+</sup>) → <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> (Dy<sup>3+</sup>) 的能量回传。X 射线激发发射光谱显示, Dy<sup>3+</sup> 的引入对 Tb<sup>3+</sup> 激活闪烁玻璃的辐射发光具有很强的负面影响, 而这种负面影响不足以通过 Dy<sup>3+</sup> → Tb<sup>3+</sup> 能量传递来弥补, 因此 Dy<sup>3+</sup>/Tb<sup>3+</sup> 共掺玻璃的辐射发光强度随着 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增多而不断减弱。由此可见, 在 Tb<sup>3+</sup> 激活硅酸盐氟氧闪烁玻璃中, 不宜将 Dy<sup>3+</sup> 作为敏化剂, 用于增强 Tb<sup>3+</sup> 的发光。

**关键词** 闪烁玻璃; Dy<sup>3+</sup>/Tb<sup>3+</sup> 共掺; X 射线激发; 能量传递

**中图分类号:** O482.31 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)05-1412-08

收稿日期: 2018-02-01, 修订日期: 2018-06-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0108607), 国家自然科学基金项目(61775081), 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究规划项目(JJKHZ20180783KJ), 吉林师范大学博士科研启动项目(吉师博 2017001 号)资助

作者简介: 张勇, 1982 年生, 吉林师范大学物理学院副教授 e-mail: zhangyong@jlnu.edu.cn

\* 通讯联系人 e-mail: llyang1980@126.com

## 引言

闪烁玻璃是以玻璃为基质材料承载激活剂进行发光的闪烁体材料。相比于闪烁晶体,闪烁玻璃的制备工艺简单、生产成本低、易于多组分均匀掺杂,具有优良的可塑性,可以做成任意尺寸和形状,因而被广泛关注<sup>[1]</sup>。目前,对闪烁玻璃的研究主要集中在以稀土离子为激活剂的氧化物玻璃、氟化物玻璃以及结合两种玻璃优点的氟氧玻璃上,常用的稀土离子有  $Tb^{3+}$ ,  $Ce^{3+}$ ,  $Eu^{3+}$  等<sup>[2-4]</sup>。其中,  $Tb^{3+}$  激活的硅酸盐氟氧玻璃具有声子能量低,发光强度大,透光性好,特别是  $Tb^{3+}$  的最强特征发射峰(544 nm 附近)与光电探测器的敏感波长匹配等特点而成为闪烁玻璃研究的一个热点<sup>[5]</sup>。

为了增强  $Tb^{3+}$  的发光强度,通常会在基质玻璃中引入一些敏化剂稀土离子,如  $Gd^{3+}$ ,  $Ce^{3+}$  和  $Dy^{3+}$ 。 $Gd^{3+}$ ,  $Ce^{3+}$  敏化  $Tb^{3+}$  发光已有较多报道,在硅酸盐氟氧玻璃体系内,我们也对  $Gd^{3+}$ ,  $Ce^{3+}$  敏化  $Tb^{3+}$  发光进行了细致研究<sup>[6-7]</sup>。但关于  $Dy^{3+}$  敏化  $Tb^{3+}$  发光的报道较少,且主要以紫外光为激发源<sup>[8]</sup>。作为闪烁材料,更关注的是其在高能粒子或射线激发下的闪烁发光性能。因此,以高能粒子或射线为激发源研究

$Dy^{3+}$  对  $Tb^{3+}$  发光性能的影响是十分必要,但相关研究还是鲜有报道。

本文采用高温熔融法制备了  $Dy^{3+}$  或  $Tb^{3+}$  单掺和  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  共掺硅酸盐氟氧闪烁玻璃,并以不同波长紫外光和 X 射线作为激发源,研究  $Dy^{3+}$  和  $Tb^{3+}$  之间的能量传递以及  $Dy^{3+}$  对  $Tb^{3+}$  激活硅酸盐氟氧闪烁玻璃发光性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 样品制备

实验中各玻璃样品的基本组成物质量配比列于表 1 中,其中 BaO 由  $BaCO_3$  引入,其余原料均为氧化物或氟化物,纯度在 99.99% 以上。按配方称取混合物 20 g,在玛瑙研钵内充分研磨混合后放入氧化铝坩埚,在 1 480 °C 硅碳棒电炉中熔融 1 h,然后将熔体倒入预热铸铁模中淬冷成型。为消除样品中的残余应力,在 650 °C 的马弗炉中保温 2 h,然后随炉冷却至室温。为了保证样品测试结果的准确性,将样品切割并进行光学抛光,制作成 10 mm × 15 mm × 2 mm 的玻璃块,用作光谱测试。

表 1  $Dy^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$  单掺和  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  共掺硅酸盐氟氧闪烁玻璃的组成配比及密度  
Table 1 Nominal compositions and density of  $Dy^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$  doped and  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  co-doped silicate oxyfluoride scintillating glasses

Sample No.	Composition/mol%									Density/ (g · cm <sup>-3</sup> )
	SiO <sub>2</sub>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	BaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
HG	64.50	6.00	22.00	6.00	1.00	0.50	—	—	—	3.981
Dy1	64.10	6.00	22.00	6.00	1.00	0.50	—	0.40	—	4.090
TD0	58.50	6.00	22.00	6.00	1.00	0.50	6.00	—	—	4.461
TD1	58.30	6.00	22.00	6.00	1.00	0.50	6.00	0.20	—	4.501
TD2	58.10	6.00	22.00	6.00	1.00	0.50	6.00	0.40	—	4.442
TD3	57.90	6.00	22.00	6.00	1.00	0.50	6.00	0.60	—	4.418
TD4	57.70	6.00	22.00	6.00	1.00	0.50	6.00	0.80	—	4.402
TD5	57.50	6.00	22.00	6.00	1.00	0.50	6.00	1.00	—	4.513
TD6	56.50	6.00	22.00	6.00	1.00	0.50	6.00	2.00	—	4.545

### 1.2 样品表征

玻璃样品的密度利用 Archimedes 法,以蒸馏水作为浸液,在 Mettler Toledo 公司的 ML104 型电子天平上进行测定。红外光谱采用 Thermo Fisher Scientific 公司的 Nicolet iS50 FT-IR 型傅里叶变换红外光谱仪以 ATR 模式(金刚石晶体)测定,分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>,扫描次数为 16 次,检测范围为 525~1 250 cm<sup>-1</sup>。透射光谱采用 Shimadzu 公司的 UV-2700 紫外-可见分光光度计进行测定,光谱范围 200~850 nm,光谱分辨率 0.5 nm。光致发光的激发光谱和发射光谱采用 Hitachi 公司的 F-7000 荧光光谱仪进行测定,激发光源为 150 W 氙灯。样品的荧光衰减曲线是在 Horiba 公司的 Temprow 荧光寿命测试系统上完成测定,激发光源为 SpectraLED,中心波长为 280 nm。闪烁性能的测定是采用管电压 80 kV、管电流 10 mA 的 W 靶为 X 射线激发源,配合 Ocean-Optics 公司的 QE Pro-FL 光纤光谱仪测试发光光谱。所有测

试均在室温下完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 样品的密度

各玻璃样品的密度测试结果列于表 1。由于玻璃组成中的 BaO, BaF<sub>2</sub>, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Tb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等都是高密度化合物且含量较高,因此玻璃密度较大,  $Tb^{3+}$  激活闪烁玻璃的密度均大于 4.4 g · cm<sup>-3</sup>。高玻璃密度有助于增强样品对高能射线的截止能力,提高成像的信噪比。

### 2.2 红外光谱分析

图 1 是  $Tb^{3+}$  激活闪烁玻璃(TD0—6)的 FTIR 光谱。如图 1 所示,所有样品的特征吸收均呈漫散的宽峰,说明所测样品的结构是近程有序而长程无序。整个图谱的红外特征吸收可分为两个主要吸收带:(1)第一吸收带分布于 750~

1 200  $\text{cm}^{-1}$  范围内的强吸收, 最强吸收峰位于 850  $\text{cm}^{-1}$  附近。该吸收带是由  $[\text{SiO}_4]$  或  $[\text{AlO}_4]$  四面体中的桥氧 Si—O—Si 和 Si—O—Al 键反对称伸缩振动(AS)和非桥氧 Si—O $^-$  键的反对称伸缩振动引起的复合吸收<sup>[9]</sup>; (2) 第二吸收带分布在 550~750  $\text{cm}^{-1}$  范围内, 峰值位于 680  $\text{cm}^{-1}$  附近, 强度较弱, 是由  $[\text{SiO}_4]$  和  $[\text{AlO}_4]$  两个四面体之间的 Si—O $^-$  (Si, Al) 键的对称伸缩振动(S)引起的吸收<sup>[10]</sup>。因此,  $\text{Tb}^{3+}$  激活闪烁玻璃的网络结构主要是由  $[\text{SiO}_4]$  和  $[\text{AlO}_4]$  四面体以顶点相连的方式构成,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$  等离子进入网络间隙, 与 Si—O $^-$  连接以保持电中性。

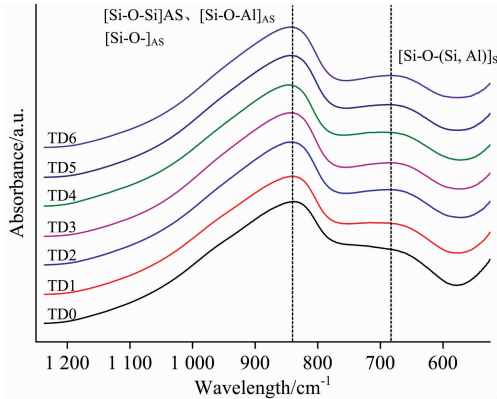


图 1  $\text{Tb}^{3+}$  激活闪烁玻璃 (TD0—6) 的 FTIR 光谱  
Fig. 1 FTIR spectra of  $\text{Tb}^{3+}$  activated scintillating glasses (TD0—6)

2.3 紫外-可见透射光谱分析

图 2 是  $\text{Dy}^{3+}$  单掺(Dy1)、 $\text{Tb}^{3+}$  单掺(TD0)和  $\text{Dy}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  共掺(TD2)玻璃的紫外-可见透射光谱。如图 2 所示, 玻璃在可见区具有较高的透过率。 $\text{Dy}^{3+}$  单掺玻璃(Dy1)的透射光谱在 348, 364, 386, 424, 453, 749 和 797 nm 处出现了吸收峰, 分别对应于  $\text{Dy}^{3+}$  的基态  $^6\text{H}_{15/2}$  向  $^4\text{I}_{11/2}$ ,  $^4\text{I}_{13/2}$ ,  $^4\text{F}_{7/2}$ ,  $^4\text{G}_{11/2}$ ,  $^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^6\text{F}_{3/2}$ ,  $^6\text{F}_{5/2}$  态的跃迁吸收<sup>[11]</sup>。 $\text{Tb}^{3+}$  单掺玻璃(TD0)的透射光谱在 337, 351, 367, 378 和 483 nm 处出现吸收峰, 是由  $\text{Tb}^{3+}$  的  $^7\text{F}_6 \rightarrow ^5\text{L}_6$ ,  $^5\text{L}_9$ ,  $^5\text{L}_{10}$ ,  $^5\text{D}_3$  ( $^5\text{G}_6$ ) 和

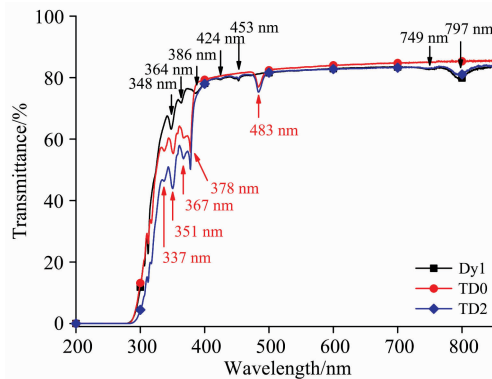


图 2  $\text{Dy}^{3+}$  单掺(Dy1)、 $\text{Tb}^{3+}$  单掺(TD0)和  $\text{Dy}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  共掺(TD2)玻璃的透射光谱

Fig. 2 Transmission spectra of  $\text{Dy}^{3+}$  doped glass (Dy1),  $\text{Tb}^{3+}$  doped glass (TD0) and  $\text{Dy}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  codoped glass (TD2)

了  $^5\text{D}_4$  能级的跃迁吸收所引起<sup>[6]</sup>。因此, 在  $\text{Dy}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  共掺玻璃(TD2)的透射光谱中,  $\text{Dy}^{3+}$  和  $\text{Tb}^{3+}$  的特征吸收峰同时出现并存在重叠。

2.4 激发光谱和发射光谱分析

$\text{Dy}^{3+}$  单掺玻璃(Dy1)的激发光谱和发射光谱如图 3 所示。在以  $\text{Dy}^{3+}$  的特征发射  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{13/2}$  (576 nm) 为监测波长的激发光谱中, 出现的各激发峰主要源于  $\text{Dy}^{3+}$  的基态  $^6\text{H}_{15/2}$  向激发态  $^4\text{K}_{15/2}$  (323 nm),  $^6\text{P}_{7/2}$  (348 nm),  $^4\text{I}_{11/2}$  (363 nm),  $^4\text{I}_{13/2} + ^4\text{F}_{7/2}$  (385 nm),  $^4\text{G}_{11/2}$  (423 nm),  $^4\text{I}_{15/2}$  (452 nm) 跃迁<sup>[11]</sup>。此外, 在 274, 306 和 312 nm 处叠加有三个激发峰, 该激发峰源于  $\text{Gd}^{3+}$  的基态  $^8\text{S}_{7/2}$  向激发态  $^6\text{I}_J$  (274 nm),  $^6\text{P}_{7/2, 5/2}$  (306 nm, 312 nm) 的能级跃迁, 这表明玻璃中存在  $\text{Gd}^{3+} \rightarrow \text{Dy}^{3+}$  的能量传递<sup>[6]</sup>。在 348 nm 紫外光的激发下,  $\text{Dy}^{3+}$  单掺样品的发射光谱是由两组发射峰组成, 分别源于  $\text{Dy}^{3+}$  激发态  $^4\text{F}_{9/2}$  向  $^6\text{H}_{15/2}$  (483 nm) 和  $^6\text{H}_{13/2}$  (576 nm) 态的跃迁发射<sup>[12]</sup>。图 3 插图是基质玻璃(HG)和 Dy1 玻璃以  $\text{Gd}^{3+}$  特征激发 274 nm 为激发波长测得的发射光谱, 随着  $\text{Dy}^{3+}$  的引入,  $\text{Gd}^{3+}$  的发光峰强度降低, 并在 483 和 576 nm 处出现了  $\text{Dy}^{3+}$  的发光峰, 进一步证明了  $\text{Gd}^{3+} \rightarrow \text{Dy}^{3+}$  的能量传递。能量传递过程如图 4(i) 所示,  $\text{Gd}^{3+}$  在获得激发能量后快速弛豫到  $^6\text{P}_{7/2}$  能级, 随后通过共振能量传递方式将部分能量传给临近的  $\text{Dy}^{3+}$ , 从而形成  $\text{Dy}^{3+}$  的荧光发射, 并降低自身的发光强度。

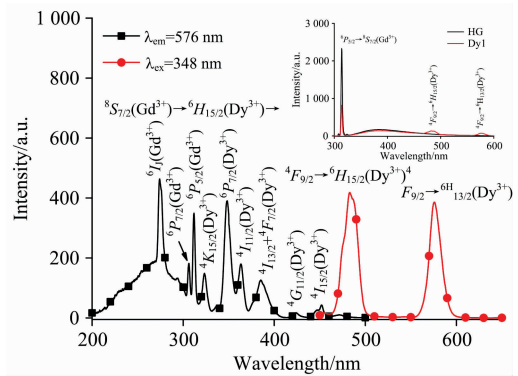


图 3  $\text{Dy}^{3+}$  单掺玻璃 (Dy1) 的激发光谱和发射光谱; 插图为 HG 和 Dy1 玻璃在 274 nm 激发时的发射光谱

Fig. 3 Photoluminescence excitation (PLE) and Photoluminescence (PL) spectra of  $\text{Dy}^{3+}$  doped glass (Dy1). The inset shows PL spectra of HG and Dy1 glasses under 274 nm excitation

图 5 是  $\text{Tb}^{3+}$  激活闪烁玻璃(TD0—6)的激发光谱, 监测波长为  $\text{Tb}^{3+}$  的特征发射 544 nm。从图 5 中可以看到,  $\text{Tb}^{3+}$  单掺闪烁玻璃(TD0)的激发光谱整体可分为两个部分: 200~300 nm 波段主要是由强度较大的宽带激发峰组成, 主要源于  $\text{Tb}^{3+}$  的  $4f^8 \rightarrow 4f^7 5d^1$  跃迁; 300~500 nm 波段则由多个相对弱一些的锐线激发峰组成, 主要源于  $\text{Tb}^{3+}$  的  $4f^8 \rightarrow 4f^8$  跃迁。这些锐线峰分别对应于  $\text{Tb}^{3+}$  的  $^7\text{F}_6$  能级向  $^5\text{H}_7$  (317 nm),  $^5\text{L}_6$  (339 nm),  $^5\text{L}_9$  (351 nm),  $^5\text{L}_{10}$  (367 nm),  $^5\text{D}_3$  (377 nm),  $^5\text{D}_4$  (483 nm) 能级的跃迁。而位于 274, 306 和



4, 3) 的能级跃迁。随着  $\text{Dy}^{3+}$  的引入,  $\text{Tb}^{3+}$  的发光强度先增强而后减弱。但与 452 nm 紫外光激发时不同, 发光最强的样品是  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  含量为 0.4 mol% 的 TD2, 而非 452 nm 紫外光激发时的 TD5 样品。 $\text{Dy}_2\text{O}_3$  含量超过 0.8 mol% 时,  $\text{Dy}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  共掺玻璃样品的发光强度已小于  $\text{Tb}^{3+}$  单掺玻璃样品。引起这一现象的原因可能是在  $\text{Dy}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  共掺玻璃中, 除了存在  $\text{Dy}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+}$  的能量传递外, 还存在  $\text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Dy}^{3+}$  的能量回传。据文献报道,  $\text{Dy}^{3+} {}^4F_{9/2}$  态能级能量 (21 144  $\text{cm}^{-1}$ ) 与  $\text{Tb}^{3+} {}^5D_4$  态能级能量 (20 545  $\text{cm}^{-1}$ ) 接近, 大约相差 600  $\text{cm}^{-1}$ , 因而当玻璃基质具有较低的声子能量时,  $\text{Dy}^{3+}$  和  $\text{Tb}^{3+}$  之间可以实现可逆的能量传递过程<sup>[13]</sup>。从图 3 和图 5 的激发谱中可知, 350 nm 紫外光可以同时激发  $\text{Dy}^{3+}$  和  $\text{Tb}^{3+}$  激发到激发态  ${}^6P_{7/2}(\text{Dy}^{3+})$  和  ${}^5L_9(\text{Tb}^{3+})$ , 随后再通过无辐射弛豫至  ${}^4F_{9/2}(\text{Dy}^{3+})$  和  ${}^5D_4(\text{Tb}^{3+})$  态, 如图 4 所示。硅酸盐氟氧玻璃体系由于氟化物的引入而具有较低的声子能量, 因此满足可逆能量传递条件。当  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂浓度较低时,  $\text{Dy}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+}$  的共振能量传递作用显著, 被激发到  ${}^6P_{7/2}$  态的  $\text{Dy}^{3+}$  快速弛豫到  ${}^4F_{9/2}$  态后通过  $\text{Dy}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+}$  能量传递, 增多了  ${}^5D_4$  态的  $\text{Tb}^{3+}$ , 发光强度增强。随着  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂浓度的增加,  $\text{Dy}^{3+}$  和  $\text{Tb}^{3+}$  之间的距离变短,  $\text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Dy}^{3+}$  的能量传递作用增强, 当  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  含量超过 0.4 mol% 时,  $\text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Dy}^{3+}$  的能量传递强于  $\text{Dy}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+}$  的能量传递, 减少了激发态  $\text{Tb}^{3+}$  数量, 而  $\text{Dy}^{3+} \rightarrow \text{Dy}^{3+}$  之间存在较多的交叉弛豫通道, 可以通过无辐射交叉弛豫返回基态, 所以  $\text{Tb}^{3+}$  发光强度减弱。

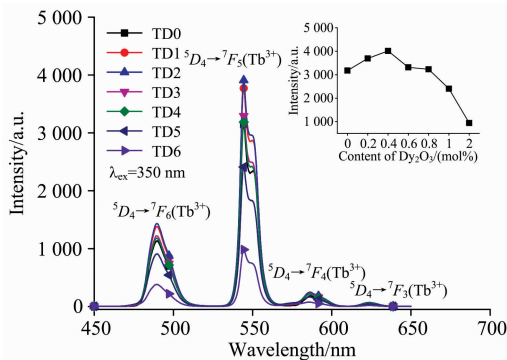


图 7  $\text{Tb}^{3+}$  激活闪烁玻璃 (TD0—6) 的发射光谱, 激发波长 350 nm; 插图为 544 nm 处峰强随  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  掺杂浓度变化曲线

Fig. 7 PL spectra of  $\text{Tb}^{3+}$  activated scintillating glasses (TD0—6) under 350 nm UV light excitation. The inset shows the emission intensities at 544 nm of  $\text{Tb}^{3+}$  ions as a function of  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  contents in the  $\text{Tb}^{3+}$  activated scintillating glasses

当激发波长为  $\text{Gd}^{3+}$  特征激发 274 nm 时,  $\text{Tb}^{3+}$  激活闪烁玻璃的发射光谱如图 8 所示。发光峰仍源于  $\text{Tb}^{3+}$  的  ${}^5D_4$  态向  ${}^7F_J (J=6, 5, 4, 3)$  态跃迁发射, 但发光强度随着  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂浓度的增加而不断减弱。根据图 3 和图 5 分析可知,  $\text{Gd}^{3+}$  向  $\text{Dy}^{3+}$  或  $\text{Tb}^{3+}$  均可以进行有效的能量传递。因此,  $\text{Dy}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  共掺闪烁玻璃在 274 nm 紫外光激发时, 处于激发态的

${}^6I_J(\text{Gd}^{3+}), {}^5I_7(\text{Tb}^{3+}), {}^4P_{5/2}(\text{Dy}^{3+})$  的电子除了通过无辐射弛豫到  ${}^6P_{7/2}(\text{Gd}^{3+}), {}^5D_4(\text{Tb}^{3+}), {}^4F_{9/2}(\text{Dy}^{3+})$  态进行辐射跃迁返回到基态外, 还存在  $\text{Gd}^{3+} \rightarrow \text{Dy}^{3+}$  (过程 i),  $\text{Gd}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+}$  (过程 ii),  $\text{Dy}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+}$  (过程 iii),  $\text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Dy}^{3+}$  (过程 iv) 的能量传递过程以及  $\text{Dy}^{3+} \rightarrow \text{Dy}^{3+}$  (过程 v, vi, vii) 之间的无辐射交叉弛豫过程。导致发光强度随  $\text{Dy}^{3+}$  的引入及其掺杂浓度增加而不断减弱的可能原因: 一是  $\text{Dy}^{3+}$  的引入, 使  $\text{Dy}^{3+}$  和  $\text{Tb}^{3+}$  发生了对  $\text{Gd}^{3+}$  传递能量的竞争, 由于  $\text{Gd}^{3+} \rightarrow \text{Dy}^{3+}$  的能量传递, 减少了  $\text{Gd}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+}$  的能量传递; 二是样品中  $\text{Tb}^{3+} \rightarrow \text{Dy}^{3+}$  的能量传递强度随着  $\text{Dy}^{3+}$  掺杂浓度的增加而逐步强于  $\text{Dy}^{3+} \rightarrow \text{Tb}^{3+}$  的能量传递, 因此  $\text{Dy}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  共掺闪烁玻璃的发光强度不断减弱。

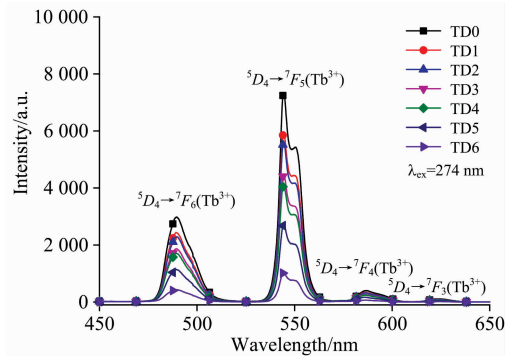


图 8  $\text{Tb}^{3+}$  激活闪烁玻璃 (TD0—6) 的发射光谱, 激发波长 274 nm

Fig. 8 PL spectra of  $\text{Tb}^{3+}$  activated scintillating glasses (TD0—6) under 274 nm UV light excitation

## 2.5 荧光衰减曲线分析

荧光寿命的变化是能量传递的直接证据。图 9 是 HG 和 Dy1 玻璃中  $\text{Gd}^{3+}: {}^6P_{5/2} \rightarrow {}^8S_{7/2}$  跃迁发射的荧光衰减曲线。随着  $\text{Dy}^{3+}$  的引入, 玻璃中  $\text{Gd}^{3+}$  的荧光衰减变快, 这是无辐射能量传递的典型特征, 进一步证明玻璃样品中存在  $\text{Gd}^{3+}$  向  $\text{Dy}^{3+}$  的能量传递。根据 Dexter 能量传递理论, 其能量传递效率可采用如式 (1) 计算

$$\eta_{ET} = 1 - \frac{\tau}{\tau_0} \quad (1)$$

其中,  $\eta_{ET}$  为能量传递效率,  $\tau_0$  是无激活离子时敏化离子  $\text{Gd}^{3+}$  的本征寿命;  $\tau$  是激活离子  $\text{Dy}^{3+}$  存在时敏化离子  $\text{Gd}^{3+}$  的荧光寿命。 $\text{Gd}^{3+}$  的荧光寿命可通过指数函数对衰减曲线进行拟合计算, 如式 (2) 所示

$$I(t) = I_0 + \sum A_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad i = 1, 2, \dots \quad (2)$$

式中  $I(t)$  和  $I_0$  分别为  $t$  和起始时间的荧光强度,  $A$  为振幅,  $t$  为时间,  $i$  为指数项个数,  $\tau_i$  为该指数分量的衰减时间常数, 即荧光寿命。图 9 中  $\text{Gd}^{3+}$  的荧光衰减曲线采用双指数函数进行拟合, 相应的平均寿命通过式 (3) 计算<sup>[14]</sup>

$$\tau_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n A\tau_i^2}{\sum_{i=1}^n A\tau_i} \quad (3)$$

根据拟合结果计算, HG 玻璃中  $Gd^{3+}$  的平均寿命  $\tau_{HG} = 1.66$  ms, Dy1 玻璃中  $Gd^{3+}$  平均寿命为  $\tau_{Dy1} = 1.24$  ms。根据式(1)计算, Dy1 玻璃样品中  $Gd^{3+}$  向  $Dy^{3+}$  的能量传递效率为 25.3%。

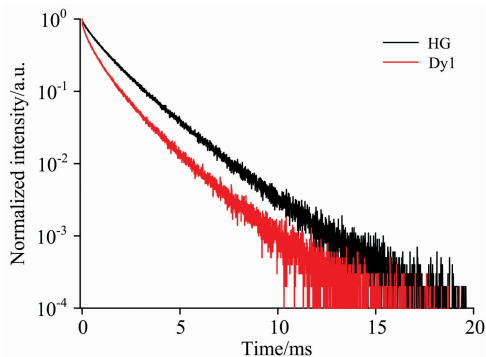


图 9 HG 和 Dy1 玻璃样品中  $Gd^{3+} : {}^6P_{5/2} \rightarrow {}^8S_{7/2}$  跃迁的荧光衰减曲线

Fig. 9 Luminescence decay curves of  $Gd^{3+} {}^6P_{5/2} \rightarrow {}^8S_{7/2}$  emission in HG and Dy1 glass samples

图 10 是  $Tb^{3+}$  激活闪烁玻璃(TD0—6)中  $Tb^{3+}$  的  ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$  跃迁(544 nm)的荧光衰减曲线。根据拟合结果, TD0 玻璃的荧光衰减曲线是单指数形式( $i = 1$ ), 荧光寿命为 2.24 ms, 说明  $Tb^{3+}$  单掺玻璃中的  ${}^5D_4$  态的  $Tb^{3+}$  是以单一的辐射跃迁返回到基态。图 10(b)是  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  共掺闪烁玻璃的荧光衰减曲线。TD1—TD3 玻璃的衰减曲线符合单指数函数, 拟合的荧光寿命分别是 2.36, 2.24 和 2.03 ms; 而 TD4—TD6 玻璃的衰减曲线则需采用双指数函数拟合, 相应的平均寿命分别是 1.87, 1.47 和 1.15 ms。  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  共掺玻璃中,  $Tb^{3+}$  掺杂浓度是固定的, 但随着  $Dy^{3+}$  的引入增加,  $Tb^{3+} {}^5D_4$  态的荧光寿命从 2.24 ms 先增加到 2.36 ms, 这是因为  $Dy^{3+} \rightarrow Tb^{3+}$  的能量传递。进一步增加  $Dy^{3+}$  掺杂浓度,  $Tb^{3+}$  的荧光寿命则逐渐降低到 1.15 ms, 且荧光衰减曲线也从单指数形式转变为双指数形式, 这是非辐射能量传递的典型特征, 进一步证明了玻璃中存在  ${}^5D_4(Tb^{3+}) \rightarrow {}^4F_{9/2}(Dy^{3+})$  的能量回传。

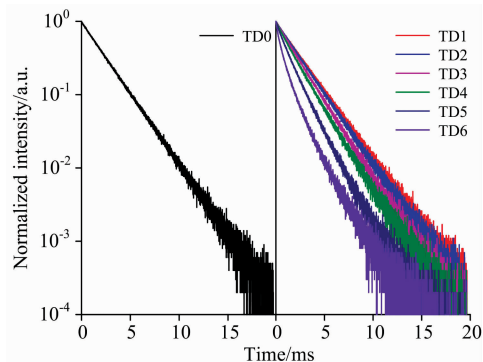


图 10  $Tb^{3+}$  激活闪烁玻璃(TD0—6)中  $Tb^{3+} : {}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$  跃迁的荧光衰减曲线

Fig. 10 Luminescence decay curves of  $Tb^{3+} {}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$  emission in  $Tb^{3+}$  activated scintillating glasses (TD0—6)

### 2.6 X 射线激发发射光谱分析

$Tb^{3+}$  激活闪烁玻璃(TD0—6)的 X 射线激发发射光谱如图 11 所示。发光峰组成及峰位与紫外光激发时相同。虽然, 以特定波长紫外光激发, 通过  $Dy^{3+} \rightarrow Tb^{3+}$  能量传递, 能够敏化增强  $Tb^{3+}$  的荧光发射。但在 X 射线激发时并非如此, 随着  $Dy_2O_3$  含量的增加,  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  共掺玻璃中  $Tb^{3+}$  的发光强度不断减弱。众所周知, 紫外光和 X 射线激发的发光机制不同。紫外光激发是直接激发发光离子从基态激发至激发态, 而后再辐射发光返回到基态。而 X 射线等高能射线激发的闪烁发光属于基质敏化发光, 其过程包含三个环节<sup>[15]</sup>: (1)高能射线与基质玻璃作用, 产生大量电子-空穴对; (2)产生的电子-空穴对在玻璃中进行迁移传输时被发光离子捕获而进入激发态; (3)激发态的发光离子辐射发光。  $Dy^{3+}$  的引入使  $Tb^{3+}$  掺杂硅酸盐氟氧玻璃的发光强度降低, 可能是因为  $Dy^{3+}$  和  $Tb^{3+}$  在俘获 X 射线辐射产生的电子-空穴对时形成竞争, 减少了  $Tb^{3+}$  对电子-空穴对的俘获。虽然  $Dy^{3+}$  可以向  $Tb^{3+}$  进行能量传递, 但传递效率较低, 同时  $Dy^{3+}$  自身存在较多无辐射交叉弛豫通道, 使得能量可以通过无辐射形式返回到基态, 因此玻璃样品中  $Tb^{3+}$  的闪烁发光强度减弱。由此可见, 在  $Tb^{3+}$  激活硅酸盐氟氧闪烁玻璃中, 不宜将  $Dy^{3+}$  作为敏化剂, 用于增强  $Tb^{3+}$  的发光。

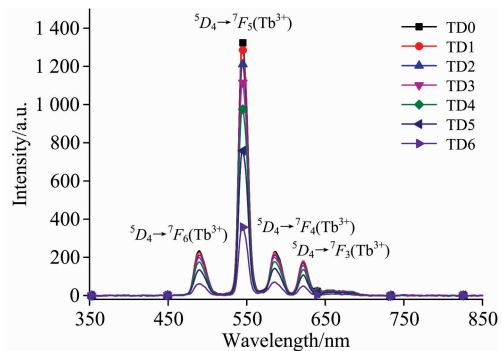


图 11  $Tb^{3+}$  激活闪烁玻璃(TD0—6)在 X 射线激发下的发射光谱

Fig. 11 X-ray excited luminescence spectra of  $Tb^{3+}$  activated scintillating glasses (TD0—6)

### 3 结 论

采用高温熔融法制备了  $Dy^{3+}$  或  $Tb^{3+}$  单掺以及  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  共掺硅酸盐氟氧闪烁玻璃, 研究了不同  $Dy_2O_3$  含量对  $Tb^{3+}$  激活硅酸盐氟氧闪烁玻璃发光性能的影响, 探讨了  $Dy^{3+}-Tb^{3+}$  之间的能量传递作用。结果表明:  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  共掺硅酸盐氟氧闪烁玻璃具有较高的密度和良好的可见区透过率。通过紫外光激发时,  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  共掺玻璃中存在  $Gd^{3+} \rightarrow Dy^{3+}$ ,  $Gd^{3+} \rightarrow Tb^{3+}$ ,  $Dy^{3+} \rightarrow Tb^{3+}$  和  $Tb^{3+} \rightarrow Dy^{3+}$  的能量传递过程和  $Dy^{3+}-Dy^{3+}$  之间的无辐射交叉弛豫过程。虽然以特定波长紫外光激发, 通过  $Dy^{3+} \rightarrow Tb^{3+}$  能量传递能够敏化增强  $Tb^{3+}$  的发光, 但  $Dy^{3+}$  的加入将在激发重叠区对  $Tb^{3+}$  的激发产生不小的负面影响, 尚不足以通过能量传递来弥补。进

一步以 X 射线激发研究发现, 这种负面影响同样存在。因此, 在  $Tb^{3+}$  激活硅酸盐氟氧闪烁玻璃中, 不宜将  $Dy^{3+}$  作为敏化剂, 用于增强  $Tb^{3+}$  的发光。

## References

- [ 1 ] Zaman F, Rooh G, Srisittipokakun N, et al. *Radiation Physics and Chemistry*, 2017, 130: 158.
- [ 2 ] Liu Liwan, Shao Chongyun, Zhang Yu, et al. *Journal of Luminescence*, 2016, 176: 1.
- [ 3 ] Chewpraditkul W, Shen Y L, Chen D P, et al. *Optical Materials*, 2013, 35(3): 426.
- [ 4 ] Duan Jiao, Liu Yan, Pan Xiuhong, et al. *Materials Letters*, 2016, 173: 102.
- [ 5 ] Jia Shijie, Huang Lihui, Ma Donglei, et al. *Journal of Luminescence*, 2014, 152(1): 241.
- [ 6 ] Zhang Yong, Lv Jingwen, Ding Ning, et al. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2015, 423-424: 30.
- [ 7 ] Zhang Yong, Ding Ning, Zheng Tao, et al. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2016, 441: 74.
- [ 8 ] Lakshminarayana G, Kaky Kawa M, Baki S O, et al. *Optical Materials*, 2017, 72: 380.
- [ 9 ] Lesniak M, Partyka J, Pasiut K, et al. *Journal of Molecular Structure*, 2016, 1126: 240.
- [ 10 ] Wang Mitang, Fang Long, Li Mei, et al. *Materials Chemistry and Physics*, 2016, 179: 304.
- [ 11 ] Sun Xinyuan, Yu Xiaoguang, Jiang Daguo, et al. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(23): 233103.
- [ 12 ] Caldino U, Muñoz H G, Camarillo I, et al. *Journal of Luminescence*, 2015, 161: 142.
- [ 13 ] WANG Qian, ZHANG Wei-huan, OUYANG Shao-ye, et al(王倩, 张为欢, 欧阳绍业, 等). *Acta Photonica Sinica(光子学报)*, 2015, 44(1): 168.
- [ 14 ] Sillen A, Engelborghs Y. *Photochemistry and Photobiology*, 1998, 67(5): 475.
- [ 15 ] Martin Nikl. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(4): R37.

## Effect of $Dy^{3+}$ on Luminescence Properties of $Tb^{3+}$ Activated Silicate Oxyfluoride Scintillating Glass

ZHANG Yong<sup>1,2</sup>, ZHU Jin-ming<sup>1</sup>, YANG Li-li<sup>1\*</sup>, LÜ Shi-quan<sup>1</sup>, WU Yan-qun<sup>1</sup>, CHU Xue-juan<sup>1</sup>

1. School of Physics, Jilin Normal University, Siping 136000, China

2. National Demonstration Center for Experimental Physics Education (Jilin Normal University), Siping 136000, China

**Abstract**  $Dy^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$  doped and  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  co-doped silicate oxyfluoride scintillating glass were prepared by high temperature melting method. The Fourier transform infrared spectra, transmission spectra, photoluminescence excitation and emission spectra, X-ray excited luminescence spectra and luminescence decay curves were analyzed. The influence of the energy transfer between  $Dy^{3+}$  and  $Tb^{3+}$  ions and  $Dy^{3+}$  doping on luminescence properties of  $Tb^{3+}$  activated silicate oxyfluoride scintillating glass was studied. The results indicated that  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  co-doped silicate oxyfluoride scintillating glass has relatively high density and good transmittance in visible region. The network structure of glass is constituted of tetrahedral  $[SiO_4]$  and  $[AlO_4]$ . Under the irradiation of ultraviolet light, the luminescence of  $Dy^{3+}$ -doped glass originates from  $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{15/2}$  (483 nm) and  $^6H_{13/2}$  (576 nm) transition emission of  $Dy^{3+}$  ions, while the luminescence of  $Tb^{3+}$ -doped glass originates from  $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$  (489 nm),  $^7F_5$  (544 nm),  $^7F_4$  (586 nm) and  $^7F_6$  (623 nm) transition emission of  $Tb^{3+}$  ions. As for  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  co-doped silicate oxyfluoride scintillating glasses, the emission spectra are mainly due to fluorescence emission of  $Tb^{3+}$  ions. The emission spectra under ultraviolet excitation with different wavelengths revealed that  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  co-doped scintillating glass includes manifold energy transfers. When  $Tb^{3+}$ -doped glass is excited by the characteristic excitation wavelength (452 nm) of  $Dy^{3+}$  ions, the luminous intensity of  $Tb^{3+}$ -doped glass is very weak. With the introduction of  $Dy^{3+}$  ions,  $Tb^{3+}$  ions emission are sensitized and enhanced by the energy transfer of  $^4F_{9/2}(Dy^{3+}) \rightarrow ^5D_4(Tb^{3+})$ . The luminous intensity of  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  co-doped glasses is improved with the increase of  $Dy_2O_3$ . The luminous intensity of  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  co-doped glasses reaches the maximum when the content of  $Dy_2O_3$  is 1mol%. However, when the content of  $Dy_2O_3$  is further increased, the concentration of  $Dy^{3+}$  ions is quenched, which results in the decrease of the energy transfer to  $Tb^{3+}$  ions and the reduction of the luminous intensity. When the excitation wavelength is decreased to 350 nm,  $Dy^{3+}$  and  $Tb^{3+}$  ions are excited to higher energy levels of  $^6P_{7/2}(Dy^{3+})$  and  $^5L_9(Tb^{3+})$ . At this point, the energy transfer of both  $^4F_{9/2}(Dy^{3+}) \rightarrow ^5D_4(Tb^{3+})$  and  $^5D_4(Tb^{3+}) \rightarrow ^4F_{9/2}(Dy^{3+})$  occurs. When the doping concentration of  $Dy^{3+}$  ions is relatively low, the energy transfer of  $Dy^{3+} \rightarrow Tb^{3+}$  is stronger than that of  $Tb^{3+} \rightarrow Dy^{3+}$ , which enhances the luminescence

of  $Tb^{3+}$  ions by sensitization. With the increase of  $Dy_2O_3$  content, the energy transfer of  $Tb^{3+} \rightarrow Dy^{3+}$  is enhanced. When the content of  $Dy_2O_3$  is above 0.4 mol%, the energy transfer of  $Tb^{3+} \rightarrow Dy^{3+}$  is stronger than that of  $Dy^{3+} \rightarrow Tb^{3+}$ , which reduces the transition luminescence of  $Tb^{3+}$  ions and thus decreases the luminous intensity of  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  co-doped glass. Due to the efficient energy transfer from  $Gd^{3+}$  to  $Dy^{3+}$  or  $Tb^{3+}$ , the competition of energy transfer from  $Gd^{3+}$  to  $Dy^{3+}$  and  $Tb^{3+}$  ion occurs under characteristic excitation wavelength of  $Gd^{3+}$  ion at 274 nm. With the increase of content of  $Dy_2O_3$ , the captured energy of  $Tb^{3+}$  ions decreases constantly. At the same time, the energy backtransfer of  $Tb^{3+} \rightarrow Dy^{3+}$  and the nonradiative cross relaxation between  $Dy^{3+}$  ions appear, which leads to the reduction of the luminous intensity of  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  co-doped glass. The  ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$  luminescence decay curves of  $Tb^{3+}$  ions for  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  co-doped scintillating glass showed that with the increase of  $Dy_2O_3$  content, the lifetime of  ${}^5D_4(Tb^{3+})$  reduces from 2.24 to 1.15 ms and the curve changes from single-exponential to double-exponential form, indicating the possibility of the energy back transfer of  ${}^5D_4(Tb^{3+}) \rightarrow {}^4F_{9/2}(Dy^{3+})$  in the glass. The X-ray excited luminescence emission spectra showed that the introduction of  $Dy^{3+}$  ions has a negative effect on the luminescence of  $Tb^{3+}$  activated scintillating glass. Because that negative effect is not enough to make up for the  $Dy^{3+} \rightarrow Tb^{3+}$  energy transfer, the radiation luminescence intensity of  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  co-doped glass decreases with the increase of the  $Dy_2O_3$  content. Therefore,  $Dy^{3+}$  ions should not be used as sensitizers to enhance the luminescence intensity of  $Tb^{3+}$  ions in  $Tb^{3+}$  activated silicate oxyfluoride scintillating glass.

**Keywords** Scintillating glass;  $Dy^{3+}/Tb^{3+}$  co-doped; X-ray excitation; Energy transfer

(Received Feb. 1, 2018; accepted Jun. 22, 2018)

\* Corresponding author

## 关于《光谱学与光谱分析》调整审稿费收费标准的通知

尊敬的《光谱学与光谱分析》广大作者、读者：我刊自 2018 年 7 月 1 日以后登记的稿件向投稿作者收取审稿费 200 元/篇，在您投稿之前，为免受经济损失，请您必须考虑：

1. 没有创新的一般性稿件，请您不要投稿。
2. 没有国家级基金资助的稿件，请您不要投稿。
3. 不是光谱专业的稿件，请您不要投稿。
4. 与其他文章重合率超过 10% 的稿件，请您不要投稿。

所投稿件经初审通过后，作者会收到缴纳审稿费的通知。请作者及时从我刊网站(<http://www.gpxygpfx.com>)查询稿件是否处于交审稿费状态，在收到通知后，请及时缴纳审稿费；如在 10 天之内没有收到您的审稿费，被视为自动放弃，我刊不再受理。交费后我刊开据增值税电子普通发票，并传至作者提供的电子邮箱，作者可自行打印。

联系电话：010-62181070, 62182998

电子邮箱：chngpaxygpfx@vip.sina.com

感谢您多年来对《光谱学与光谱分析》的支持和厚爱！

《光谱学与光谱分析》期刊社

2018 年 6 月 30 日