

不同激发波长下 Ce^{3+} - Tb^{3+} - Sm^{3+} 共掺白光玻璃的 发光性能*

陈乔乔 戴能利 刘自军 褚应波 李进延 杨旅云†

(华中科技大学, 武汉光电国家实验室, 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

(2013年11月29日收到; 2013年12月24日收到修改稿)

本文采用高温熔融技术制备了 Ce^{3+} - Tb^{3+} - Sm^{3+} 三种离子共掺杂的硼硅酸盐透明玻璃. 测试了紫外 LED 激发下 Ce^{3+} 离子、 Tb^{3+} 离子及 Sm^{3+} 离子单掺与共掺样品的激发光谱及荧光光谱, 通过对单掺及共掺样品荧光寿命的测试研究了 Ce^{3+} 离子、 Tb^{3+} 离子及 Sm^{3+} 离子在玻璃基质中的能量传递机理. 通过调整紫外 LED 灯的激发波长调整发光样品所发射光谱的色度坐标、显色指数及色温, 得到适合人类生活、学习、工作的白光发光.

关键词: 白光发光, 能量传递, 发光性能

PACS: 78.55.Qr, 76.30.Kg, 32.30.Jc, 71.55.Jv

DOI: 10.7498/aps.63.077803

1 引言

色温是描述光源或发光体特性的一个基本参数, 在颜色测量中具有重要的意义. 光源的色温定义为与光源辐射颜色相同的黑体温度, 但实际光源光谱功率分布不可能与黑体完全相同, 故延伸出了相关色温的概念. 相关色温可通过在 CIE1960UCS 图中找到与光源色坐标最靠近的黑体色坐标点所对应的黑体温度得到^[1]. 光源的显色指数是待评光源下物体的颜色与参照光源下物体颜色相符程度的度量. 为符合人类照明习惯, CIE 规定 5000 K 以下的低色温采用普朗克辐射体作为参照光源, 5000 K 以上的色温采用标准照明体 D 作为参照光源, 设定参照光源的显色指数为 100. 其结果可通过比较试验色样在待评光源与参照光源下的颜色差 ΔE_i 得到. 特殊显色指数为 $R_i = 100 - 4.6\Delta E_i$, 一般显色指数为 $R_a = \sum_1^8 R_i/8$ ^[2,3].

最近, 被称为第四代白光发光光源的白光发光二极管 (W-LED) 由于具有寿命长、能耗少、无污染、响应快、体积小等优点, 受到越来越广泛的关

注^[4-12]. 然而, 这种光源所需要的荧光粉的制作工艺复杂, 对涂覆工艺要求极高且其封装用的环氧树脂容易随着操作温度的升高而变质, 导致 LED 寿命降低并且会危害到人体健康^[13-16]. 稀土离子掺杂的白光发光玻璃成功克服了荧光粉发光的缺点, 得到了越来越多的关注^[17]. 然而, 现阶段对稀土离子掺杂的发光玻璃发光的研究主要集中在其白光颜色及光亮度方面的研究. 然而, 作为照明光源, 色温和显色指数也是十分重要的参数. 石路等研究发现, 照明光源的不同色温对人体的自主神经系统的生理功能可产生明显的影响, 也能引起脑力、体力负荷、环境温度、噪声作用及睡眠时的自主神经功能, 还能引起人体味觉和唾液分泌的变化. 研究表明, 在进行较高的脑力负荷时, 以运用对自主神经有利的 5000 K 的低色温光源为好^[18]. 为了得到适合人类生活、工作的玻璃照明光源, 本文采用分别发射红、绿、蓝三基色的稀土离子 (Ce^{3+} , Tb^{3+} , Sm^{3+}) 作为发光中心, 通过三种离子之间的能量传递过程调节三基色光谱的比例, 由于在不同激发波长激发下不同稀土离子之间的能量传递效率不同, 从而得到一种通过改变激发光的激发波长改变玻

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2013AA031501) 和国家自然科学基金 (批准号: 51302092, 61378070) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: luyunyang@gmail.com

璃发光颜色、色温及显色指数的适于人类生活工作的白光光源。

2 色温及显色指数的计算

色品坐标的计算方法如下:

$$X = K \sum \varphi(\lambda) \times \bar{x}(\lambda) \times \Delta\lambda, \quad (1)$$

$$Y = K \sum \varphi(\lambda) \times \bar{y}(\lambda) \times \Delta\lambda, \quad (2)$$

$$Z = K \sum \varphi(\lambda) \times \bar{z}(\lambda) \times \Delta\lambda, \quad (3)$$

$$K = \frac{100}{\sum S_s(\lambda) \times \bar{y}(\lambda) \times \Delta\lambda}, \quad (4)$$

其中, X, Y, Z 是三刺激值, K 是亮度归一化系数, $S_s(\lambda)$ 是参照光源(自发光物体)或照明光源(非自发光物体)发射的相对光谱功率分布, $\varphi(\lambda)$ 为发光玻璃的相对光谱功率分布, $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 是光谱三刺激值函数, $\Delta\lambda$ 是波长间隔, λ 为波长, 通常在 380—780 nm 之间. 1960UCS 色品坐标计算如下:

$$\mu = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, \quad (5)$$

$$\nu = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z}, \quad (6)$$

其中, μ, ν 为光谱的色品坐标.

2.1 相关色温计算

得到试样发射光谱的色品坐标 μ_k, ν_k 后, 按下述步骤计算相关色温.

1) 在 2500—20000 K 之间, 取一色温 T , 代入(7)式, 得到该色温黑体光谱功率分布, 再用(1)—(6)式计算其色品坐标 μ_r, ν_r ,

$$M(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} (\exp(C_2/\lambda T) - 1)^{-1}, \quad (7)$$

其中, μ_r, ν_r 为黑体光谱功率分布色品坐标, T 为黑体的绝对温度(又称色温), e 是自然常数, 约 2.718282, $C_1 = 2\pi hc^2 = 374.150 \text{ W}\cdot\text{nm}^2$, $C_2 = hc/k = 1.4388 \times 10^7 \text{ K}\cdot\text{nm}$, h 为普朗克常数, c 为真空中光速度, k 为波尔兹曼常数.

2) 按(8)式计算 UCS 图上的相关色温等温线 L_t 的方程

$$L_t = (U - \mu_r) \times (\nu_r - 0.2201) - (V - \nu_r) \times (\mu_r - 0.3097), \quad (8)$$

其中, U, V 为直线方程变量.

3) 用点到直线的距离公式算出 μ_k, ν_k 到直线 L_t 的距离 D_t , 如果 $D_t > 1 \times 10^{-5}$, 则优选或对折方法再取另一 T 值, 重复 1)—3) 过程; 如果 $D_t \leq 1 \times 10^{-5}$, 则试样发光光谱的相关色温为 T .

2.2 显色指数的计算

1) 测得待评光源的光谱 $\varphi(\lambda)$ 并算得其色品坐标 μ_k, ν_k .

2) 找出离待评光源色坐标最近的参照光源, 得到 μ_r, ν_r .

3) 设待评光源的 Y 为 100, 算得其照射下 15 种试验色样品反射光谱的颜色空间指数 W_{ki}, U_{ki}, V_{ki} .

4) 算出适应性色位移后 15 种试验色样品的 μ'_{ki}, ν'_{ki} , 其中, μ'_{ki}, ν'_{ki} 为颜色样品在试样发射光照明下与参照明体的色品坐标. 令所有

$$c = (4 - \mu - 10 \times \nu) / \nu,$$

$$d = (1.708 \times \nu + 0.404 - 1.481 \times \mu) / \nu,$$

并设

$$FC = c_r \times c_{ki} / c_k,$$

$$FD = d_r \times d_{ki} / d_k,$$

则

$$\mu'_{ki} = \frac{10.872 + 0.404 * FC - 4FD}{16.518 + 1.481 \times FC - FD},$$

$$\nu'_{ki} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \times FC - FD}.$$

5) 待评光源色坐标作适应性色位移后为 μ'_k, ν'_k , 分别等于 μ_r, ν_r , 其中, μ'_k, ν'_k 为试样发射光色品坐标调整为参照明体的色品坐标.

6) 用下式算出 15 种试验色样品在待评光源照射下的 CIE1964 颜色空间坐标 $W_{ki}^*, U_{ki}^*, V_{ki}^*$,

$$W_{ki}^* = 25Y_{ki}^{1/3} - 17(1 \leq Y_{ki} \leq 100),$$

$$U_{ki}^* = 13W_{ki}^*(\mu'_{ki} - \mu'_k),$$

$$V_{ki}^* = 13W_{ki}^*(\nu'_{ki} - \nu'_k).$$

7) 算出参照光源照射下 15 种试验色样品的 CIE 1964 颜色空间坐标 $W_{ri}^*, U_{ri}^*, V_{ri}^*$.

8) 利用公式

$$\Delta E_i = [(W_{ki}^* - W_{ri}^*)^2 + (U_{ki}^* - U_{ri}^*)^2 + (V_{ki}^* - V_{ri}^*)^2]^{1/2}$$

计算出 15 种在试样发射光照明下与参照光照明下的色差 ΔE_i .

9) 利用公式 $R_i = 100 - 4.6\Delta E_i$ 及 $R_a = \sum_1^8 R_i / 8$ 算出特殊显色指数 R_i , 及一般显色指数 R_a .

3 实验

3.1 发光样品玻璃的制备

本实验中用到的硼硅酸盐玻璃是采用高温熔融法制备. 其基质组成为 $50\text{SiO}_2-14\text{B}_2\text{O}_3-10\text{MgO}-10\text{ZnO}-6\text{Na}_2\text{O}-10\text{Al}_2\text{O}_3$, 各组成的含量均是摩尔百分数(mol%), 下文中以SiB代替这一基质, 所用原料为分析纯的 SiO_2 , H_3BO_3 , MgCO_3 , ZnO , Na_2CO_3 , Gd_2O_3 及 Al_2O_3 , 其纯度为99.99%. 按化学计量比准确称取的各种原料, 然后放在玛瑙研钵中研磨均匀, 之后将充分研磨好的粉末倒入刚玉坩埚中, 整体放入程序控制的电阻炉中在 $1580\text{ }^\circ\text{C}$ 下熔融2 h后, 将熔体浇铸到预先加热的垫板上淬冷成型, 为了消除样品中的残余应力, 接着在 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 的退火炉中退火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 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的玻璃块, 供测试用.

3.2 测试方法

实验中的荧光光谱和激发光谱均是用Jasco FP-6500荧光光谱仪进行测定的, 激发源的波长范

围为200—750 nm连续可调的宽带光源, 荧光测试范围为200—900 nm; 荧光寿命是用FLS920荧光光谱仪进行测定的. 所有的测试均在室温下进行. 为了确保测试数据的准确性, 我们将所有样品放置在同样的位置, 且确保入射光以相同的角度入射到样品中.

4 结果及讨论

4.1 激发光谱与发射光谱

图1(a)为 0.1Ce^{3+} , 0.5Tb^{3+} , 0.5Sm^{3+} 掺杂样品的激发光谱, 其检测波长分别为390 nm, 543 nm, 605 nm, A, B, C分别代表 Ce^{3+} 离子、 Tb^{3+} 离子、 Sm^{3+} 离子. 图1(a)中可以看出, Ce^{3+} 离子在330 nm附近有一个很宽的激发峰, 对应于 Ce^{3+} 离子的 $4f\rightarrow 5d$ 的跃迁; Tb^{3+} 离子有五个激发峰, 分别是320 nm, 326 nm, 354 nm, 373 nm及487 nm, 它们分别对应 Tb^{3+} 离子的 ${}^7\text{F}_6\rightarrow {}^5\text{D}_J$ ($J=0, 1, 2, 3, 4$)的跃迁; Sm^{3+} 有339 nm, 369 nm, 404 nm, 440 nm, 475 nm及528 nm六个明显的发射峰, 分别对应 Sm^{3+} 离子的 ${}^6\text{H}_{5/2}\rightarrow {}^4\text{H}_{11/2}$, ${}^6\text{H}_{5/2}\rightarrow {}^4\text{F}_{5/2}$, ${}^6\text{H}_{5/2}\rightarrow {}^4\text{F}_{7/2}$, ${}^6\text{H}_{5/2}\rightarrow {}^4\text{G}_{13/2}$, ${}^6\text{H}_{5/2}\rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ 及 ${}^6\text{H}_{5/2}\rightarrow {}^4\text{F}_{3/2}$ 的跃迁.

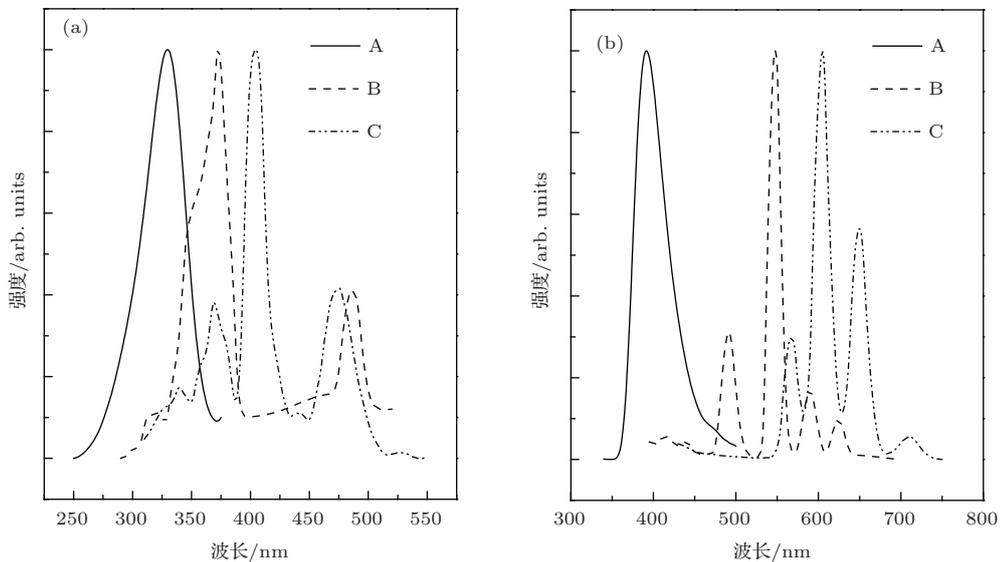


图1 (a)为 Ce^{3+} , Tb^{3+} , Sm^{3+} 的激发光谱图; (b)为 Ce^{3+} , Tb^{3+} , Sm^{3+} 的发射光谱图

图1(b)为 0.1Ce^{3+} , 0.5Tb^{3+} , 0.5Sm^{3+} 掺杂样品的发射光谱, 其激发波长分别为330 nm, 373 nm及404 nm, A, B, C分别代表 Ce^{3+} 离子、 Tb^{3+} 离子、 Sm^{3+} 离子. 图1(b)显示 Ce^{3+} 离子在390 nm附近有一个宽带发射, 其对应于 Ce^{3+}

离子的 $5d\rightarrow 4f$ 的发射; Tb^{3+} 离子有六个发射峰, 其中415 nm和438 nm的发射峰对应 Tb^{3+} 离子的 ${}^5\text{D}_3\rightarrow {}^7\text{F}_J$ ($J=5, 4$)的发射, 488 nm, 543 nm, 588 nm及622 nm的发射峰对应 Tb^{3+} 离子的 ${}^5\text{D}_4\rightarrow {}^7\text{F}_J$ ($J=6, 5, 4, 3$)的发射; Sm^{3+} 的

发射峰为 568 nm, 605 nm, 650 nm 及 711 nm 对应其 $^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_J$ ($J = 5/2, 7/2, 9/2, 11/2$) 的发射.

4.2 共掺样品的激发光谱与发射光谱

图 2(a) 为 Ce-Sm 共掺样品的激发光谱, 其检测波长为 605 nm, 实线(A)、虚线(B)及短虚线(C)分别对应 Ce 离子的浓度为 0.1, 0.2 及 0.3, Sm 离子的浓度为 0.5. 图 2(b) 为 Ce-Tb 共掺样品的激发光谱, 其检测波长为 543 nm, 实线(A)、虚线(B)及短虚线(C)分别对应 Ce 离子的浓度为 0.1, 0.2 及 0.3, Tb 离子的浓度为 0.5. 图 2(c) 为 Ce-Sm 共掺样品的发射光谱, 其激发波长为 330 nm, 实线(A)、虚线(B)及短虚线(C)分别对应 Ce 离子浓度为 0.1, 0.2 及 0.3, Sm 离子的浓度为 0.5. 图 2(d) 为 Ce-Tb 共掺样品的发射光谱, 其激发波长为 330 nm, 实线(A)、虚线(B)及短虚线(C)分别对应 Ce 离子浓度为 0.1, 0.2 及 0.3, Tb 离子的浓度为 0.5. 图 2(a) 插图为 Ce-Sm 共掺样品的激发谱在波长为 400—410 nm 的局部放大图. 从图中可以看出, 随着 Ce 离子

浓度从 0.1 增加到 0.3, Sm 离子在 404 nm 处的特征激发波长的激发强度依次增强, 由于 Sm 离子浓度在本组数据中没有发生变化, 所以 Sm 离子 404 nm 处的激发增强可能是来源于 Ce 离子的激发态向 Sm 离子传递能量所致; 同样, 图 2(b) 中随着 Ce 离子的浓度由 0.1 增加到 0.3, Tb 离子在 373 nm 处的特征激发也随之增强, 其原因也极有可能是 Ce 离子向 Tb 离子传递能量所致. 据之前实验报道, 330 nm 的激发波长不能直接激发 Sm 离子和 Tb 离子, 如果 Ce 离子向 Sm 离子及 Tb 离子的能量传递过程存在, 由于 Ce 离子的加入, 330 nm 激发的 Ce-Sm, Ce-Tb 共掺的样品的发射谱中会观察到 Sm 离子及 Tb 离子的发射, 并且随着 Ce 离子浓度由 0.1 增加到 0.3, Sm 离子与 Tb 离子的发光强度会随之增强. 图 2(c) 及 (d) 的实验恰好验证了这一结论. 为了证明 Ce 离子向 Tb 离子及 Sm 离子的能量传递确实存在, 我们测试了 Ce 单掺样品与 Ce-Tb 共掺样品、Ce-Sm 共掺样品的荧光寿命, 测试数据如图 3 所示.

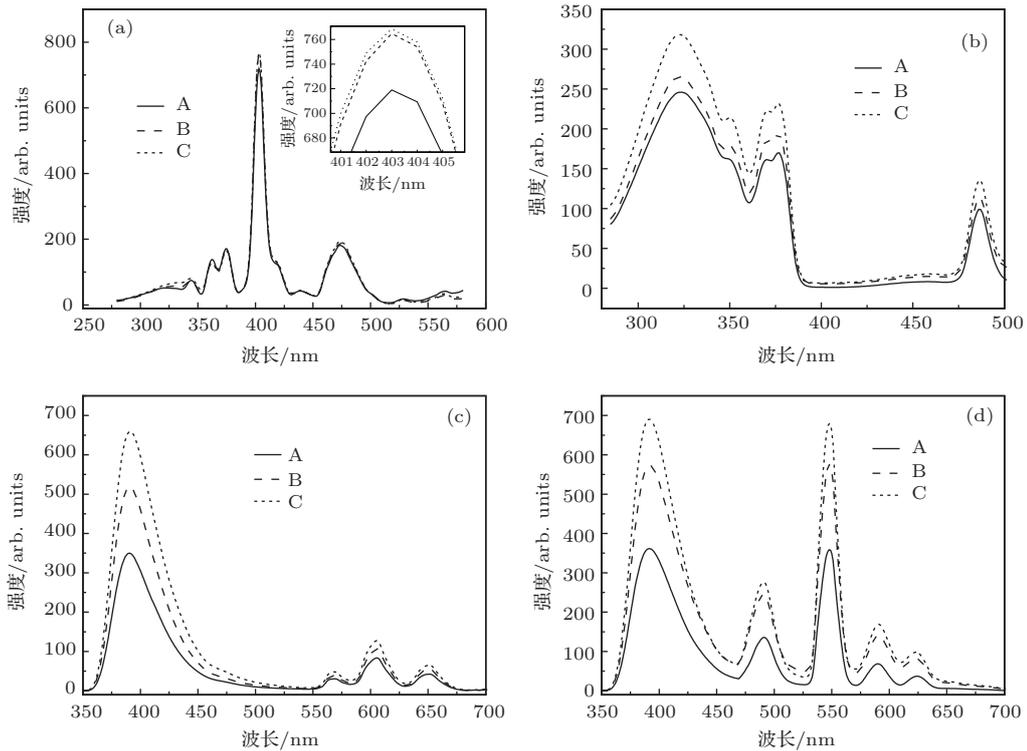


图 2 (a) Ce-Sm 共掺样品的激发光谱; (b) Ce-Tb 共掺样品的激发光谱; (c) Ce-Sm 共掺样品的发射光谱; (d) Ce-Tb 共掺样品的发射光谱

4.3 能量传递

图 3 中的三种颜色 A, B, C 分别对应 Ce 单掺样品、Ce-Tb 共掺样品及 Ce-Sm 共掺样品的荧光寿命, 其中 Ce 离子的浓度为 0.1, Tb 离子的浓度为

0.5, Sm 离子的浓度为 0.5, 激发波长为 330 nm, 检测波长为 390 nm. 根据下式可以计算出三块样品中 Ce 离子的荧光寿命:

$$\tau = \int_0^\infty I(t)tdt / \left(\int_0^\infty I(t)dt \right), \quad (9)$$

其中, τ 为荧光寿命, $I(t)$ 是实测的荧光衰减曲线, t 为积分时间. 通过计算得到 Ce 单掺样品中 Ce 离子的寿命为 $\tau_1 = 19.9$ ns; Ce-Tb 共掺样品中 Ce 离子的寿命为 $\tau_2 = 14.6$ ns; Ce-Sm 共掺的样品中 Ce 离子的寿命为 15.3 ns. 根据下式可以算出 Ce 离子分别向 Tb 离子和 Sm 离子传递能量的效率:

$$\eta_{ET} = 1 - \tau'/\tau, \quad (10)$$

其中, η_{ET} 代表能量传递的效率, τ' 是共掺杂样品中离子的荧光寿命, τ 是单掺杂样品中离子的荧光寿命. 通过计算, 得到 Ce 离子向 Tb 离子的能量传递效率为 26.6%; Ce 离子向 Sm 离子的能量传递效率为 23.1%. 多种稀土离子共掺杂的发光体中, 可以利用不同离子之间的能量传递过程调节发光体所发射光的色温及显色指数, 从而得到利于人类生活、工作的发射光. 由于不同激发波长激发下, 离子之间能量传递的效率不同, 所以可以采用改变激发波长改变发射光的色温及显色指数的目的.

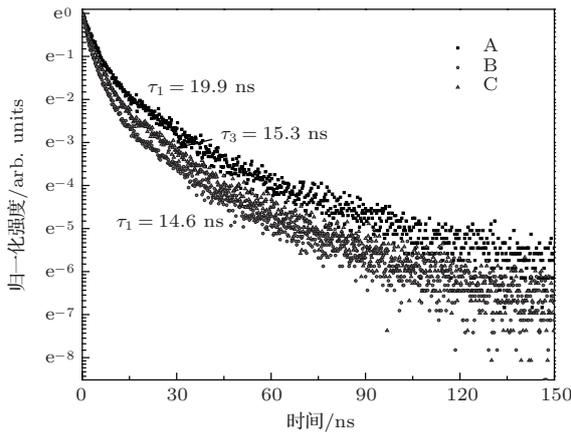


图3 Ce 单掺样品与 Ce-Tb 共掺样品、Ce-Sm 共掺样品的荧光寿命

4.4 不同激发波长激发下 Ce³⁺-Tb³⁺-Sm³⁺ 共掺样品的发光光谱及发光参数

图4为不同激发波长激发下 Ce-Tb-Sm 共掺样品发射光谱图及色度坐标图, Ce 离子的浓度为 0.2, Tb 离子的浓度为 0.5, Sm 离子的浓度为 0.7. 图4(b)可以看出所有激发波长激发下样品的发光均位于白光区域. 显然, 这几组白光都对应不同的色温及显色指数. 根据第2节中介绍的色温及显色指数的计算方法, 我们把 330—365 nm 激发波长激发下样品发光的色度坐标、色温及显色指数的结果列于表1中.

表1 不同激发波长下样品的色度坐标、显色指数 (R_a) 及色温 (CT)

激发波长 /nm	表征发光的参数		
	色度坐标 (x, y)	显色指数	色温/K
330	0.292, 0.310	68.6	8103
340	0.275, 0.266	75.4	12434
350	0.263, 0.254	77.2	17229
360	0.345, 0.294	87.2	4671
365	0.342, 0.316	87.7	4957

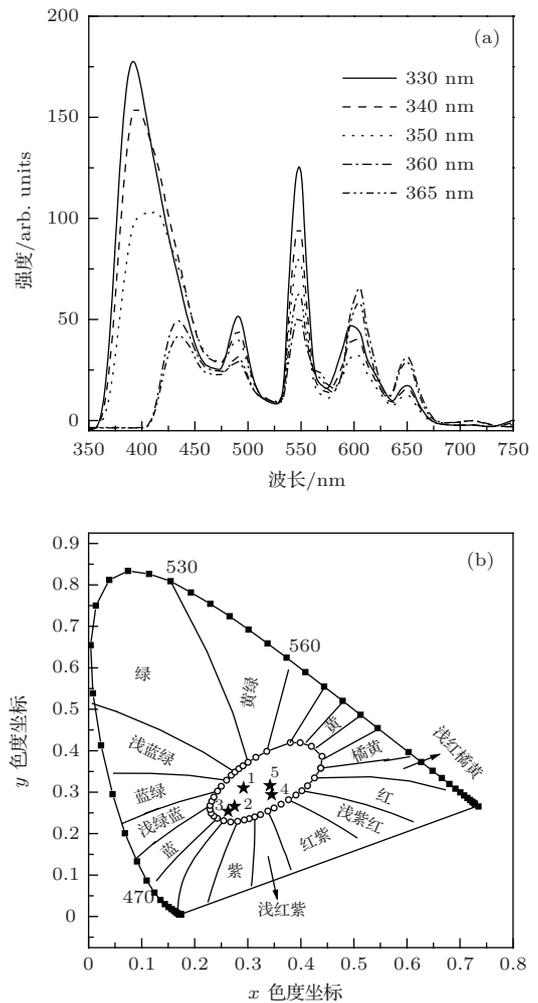


图4 不同激发波长下 Ce-Tb-Sm 共掺样品的荧光光谱图 (a) 及色度坐标图 (b)

为了直观了解样品的发光颜色, 我们把样品在不同激发波长激发下的色度坐标分别用五角星标注在 CIE 色坐标图中. CIE 色坐标图中, 中间的椭圆区域均属于白光发光区域. 序号 1, 2, 3, 4, 5 分别代表 330 nm, 340 m, 350 nm, 360 nm, 365 nm 激发下样品发光的色度坐标. 可以看出五组数据的

发光均位于白光区域, 其中, 365 nm 激发下样品的发光最接近理想的白光, 330—340 nm 波长激发下的白光含有较多的蓝色成分, 色温偏冷, 显色指数偏低; 360 nm, 365 nm 波长激发下的白光红光成分增加, 色温偏暖, 显色指数提高, 人眼对这种光具有较为舒适的感觉.

5 结 论

本文采用高温熔融技术制备了一系列 Ce³⁺ 离子、Tb³⁺ 离子、Sm³⁺ 离子单掺与共掺的硼硅酸盐多组分玻璃样品, 极大的提高了玻璃的化学稳定性、物理性质以及稀土离子在基质中的掺杂浓度. 通过对单掺与共掺样品激发光谱及发射光谱的测量, 研究了 Ce³⁺ 离子、Tb³⁺ 离子、Sm³⁺ 离子在玻璃基质中的能量传递机理. 并且通过改变紫外激发光的激发波长, 改善了 Ce³⁺-Tb³⁺-Sm³⁺ 共掺样品的色度坐标, 显色指数 (R_a) 以及色温 (CT).

对华中科技大学分析测试中心给予测试方面的帮助表示感谢.

参考文献

- [1] Zhang H, Xu H S 2006 *Opt. Instrum.* **28** 54 (in Chinese) [张浩, 徐海松 2006 光学仪器 **28** 54]
- [2] Tan L, Liu Y L, Yu F H 2006 *Opt. Instrum.* **26** 41 (in Chinese) [谭力, 刘玉玲, 余飞鸿 2006 光学仪器 **26** 41]
- [3] Liu Y C 2000 *J. Electr. Dev.* **23** 43 (in Chinese) [刘义成 2000 电子器件 **23** 43]
- [4] Wei X D, Cai L Y, Lu F C, Chen X L, Chen X Y, Liu Q L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3555
- [5] Tian H, Liu J W, Qiu K, Song J, Wang D J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 098504
- [6] Qiao Y P, Zhu Z F, Zhang Y B, Liu D G, Wang B Q, Zhang Z C 2012 *Acta. Phys. Chim. Sin.* **28** 0001 (in Chinese) [乔荫颇, 朱振峰, 张燕斌, 刘佃光, 王冰清, 张志春 2012 物理化学学报 **28** 0001]
- [7] Lakshminarayana G, Yang R, Qiu J R, Bril M G, Kumar G A, Kityk I V 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 015414
- [8] Liu Z J, Yang L Y, Dai N L, Li J Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 047806 (in Chinese) [刘自军, 杨旅云, 戴能利, 李进延 2011 物理学报 **60** 047806]
- [9] Yu Y, Liu Z J, Chen Q Q, Dai N L, Li J Y, Yang L Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 017804 (in Chinese) [余阳, 刘自军, 陈乔乔, 戴能利, 李进延, 杨旅云 2013 物理学报 **62** 017804]
- [10] Yu Y, Liu Z J, Dai N L, Sheng Y B, Luan H X, Peng J G, Jiang Z W, Li H Q, Li J Y, Yang L Y 2011 *Opt. Express* **19** 19473
- [11] Zhang G Y, Chen Z Z 2004 *Physics* **33** 833 (in Chinese) [张国义, 陈志忠 2004 物理 **33** 833]
- [12] Qi Z J, Huang W G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 197801 (in Chinese) [齐智坚, 黄维刚 2013 物理学报 **62** 197801]
- [13] Liang X L, Yang Y X, Zhu Q F, Yuan S L, Chen G R 2007 *Appl Phys. Lett.* **91** 091104
- [14] Liu Z J, Dai N L, Luan H X, Sheng Y B, Peng J G, Jiang Z W, Li H Q, Li J Y, Yang L Y 2010 *Opt. Express* **18** 21138
- [15] Lin Z Y, Liang X L, Ou Y W, Fan C X, Yuan S L, Zeng H D, Chen G R 2010 *J. Alloys Compd.* **496** 33
- [16] Liu S M 2009 *Ph. D. Dissertation* (Zhejiang: Zhejiang University) (in Chinese) [刘史敏 2009 博士学位论文 (浙江: 浙江大学)]
- [17] Qi J, Wang C Y, Ning G L 2009 *B. Cer. Soc.* **28** 1018 (in Chinese) [齐济, 王承遇, 宁桂玲 2009 硅酸盐通报 **28** 1018]
- [18] Shi L 2006 *Chin. J. Ergon.* **12** 59 (in Chinese) [石路 2006 人类工效学 **12** 59]

Luminescence property of Ce^{3+} - Tb^{3+} - Sm^{3+} co-doped borosilicate glass under various ultraviolet excitations*

Chen Qiao-Qiao Dai Neng-Li Liu Zi-Jun Chu Ying-Bo Li Jin-Yan Yang Lü-Yun[†]

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College of optical and electronic information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 29 November 2013; revised manuscript received 24 December 2013)

Abstract

Ce^{3+} - Tb^{3+} - Sm^{3+} co-doped white light emitting borosilicate glasses were fabricated by high-temperature melting technique. In this paper, the excitation spectra and the emission spectra of Ce^{3+} , Tb^{3+} and Sm^{3+} ions-doped and co-doped samples were measured and the energy transfer mechanism of Ce^{3+} , Tb^{3+} , and Sm^{3+} were studied by analyzing the fluorescence lifetime of single-doped and co-doped samples. The color coordinate, rendering index, and color temperature of the emission spectra can be adjusted by changing the excitation wavelength of ultraviolet LED. Finally, we have obtained the white light which fits for life, study, and work.

Keywords: white light emitting, energy transfer, luminescent property

PACS: 78.55.Qr, 76.30.Kg, 32.30.Jc, 71.55.Jv

DOI: 10.7498/aps.63.077803

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No.2013AA031501), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51302092, 61378070).

[†] Corresponding author. E-mail: luyunyang@gmail.com