第 48 卷第 9 期
2020 年 9 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 9
September，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20190719

Bi^{3+}浓度对 Y_2O_3 基荧光粉发光性能的影响

李 倩[1]，张 彪[1]，史忠旗[1]，康永锋[2]

(1. 西安交通大学材料科学与工程学院，金属材料强度国家重点实验室，西安 710049；
2. 西安交通大学电子与信息工程学院，电子物理与器件教育部重点实验室，西安 710049)

摘 要：采用高温固相法合成了 Y_2O_3:$x$$Bi^{3+}$[$x$=0.05–1.00%(摩尔分数)]荧光粉，研究了 Bi^{3+}掺杂浓度对荧光粉相组成、微观形貌及发光性能的影响。结果表明：Bi^{3+}掺杂量增加会引起 Y_2O_3 基质晶格膨胀和晶胞体积增大；荧光粉呈等轴状颗粒形貌，且随着 Bi^{3+}掺杂量的增加，粒径逐渐从 250 nm 增加到 600 nm。Y_2O_3:$x$$Bi^{3+}$荧光粉在波长为 335 nm 的紫外光激发下，其发射光谱由 370、410 和 483 nm 3 个宽带发射组成。370 nm 紫外光发射和 410 nm 蓝光发射分别是由 Bi^{3+}的 S_6 位点的 $^3A_u\rightarrow{}^1A_g$ 和 $^3E_u\rightarrow{}^1A_g$ 电子跃迁产生，483 nm 蓝绿光发射是由 C_2 位点的 $^3B\rightarrow{}^1A$ 电子跃迁产生。当 Bi^{3+}掺杂浓度为 0.25%时，荧光粉发光性能最优；掺杂量大于 0.25%时，由于 Bi^{3+}间的偶极–偶极相互作用，产生浓度猝灭现象。所制备的 Y_2O_3:0.25%Bi^{3+}荧光粉的色坐标为(0.159 2、0.218 1)，显色指数 Ra 为 69.27，表明这种蓝绿色荧光粉在白光 LED 领域具有良好应用前景。

关键词：氧化钇；蓝绿色；浓度猝灭；荧光粉
中图分类号：TB32　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)09–1468–06
网络出版时间：2020–07–13

Effect of Bi^{3+} Concentration on Photoluminescence Properties of Y_2O_3:Bi^{3+} Phosphors

LI Qian[1], *ZHANG Biao*[1], *SHI Zhongqi*[1], *KANG Yongfeng*[2]
(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi′an 710049, China
2. Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi′an 710049, China)

Abstract: Y_2O_3:$x$$Bi^{3+}$ (x=0.05–1.0% (mole fraction)) phosphors were synthesized by a solid-phase reaction route. Effect of Bi^{3+} concentration on the phase composition, microstructure and photoluminescence (PL) performance was investigated. The results show that the lattice parameter and cell volume of Y_2O_3 host increase with the increase of Bi^{3+} concentration. In addition, the phosphors are equiaxed grains, and the grain size increases gradually from 250 to 600 nm with the Bi^{3+} concentration increasing. The emission spectra of Y_2O_3:Bi^{3+} phosphors excited by ultraviolet light (λ_{EX}=335 nm) are composed of three broadband emission spectra centered at 370 nm, 410 nm and 483 nm. The ultraviolet-emission at 370 nm and blue-light emission at 410 nm appear due to $^3A_u\rightarrow{}^1A_g$ and $^3E_u\rightarrow{}^1A_g$ electron transitions of S_6 sites of Bi^{3+}, respectively. The blue-green emission at 483 nm occurs due to $^3B\rightarrow{}^1A$ electron transition of C_2 sites of Bi^{3+}. The Y_2O_3:0.25%Bi^{3+} phosphor shows the optimal PL performance. The concentration quenching occurs when Bi^{3+} concentration is higher than 0.25% due to the dipole-dipole interaction between Bi^{3+} ions. The color coordinate of Y_2O_3:0.25%Bi^{3+} is (0.159 2, 0.218 1), and the color rendering index Ra is 69.27, indicating that the as-synthesized blue-green phosphors have a broad application prospect in the field of white light-emitting diode.

Keywords: yttrium oxide; blue-green; concentration quenching; phosphor

白光发光二极管(LED)与传统的白炽灯和荧光灯相比，具有寿命长、环境友好、效率高等优点，被认为是下一代照明光源[1–3]。获得白光 LED 的主要方法是将蓝色或近紫外 LED 与一种或多种荧光

收稿日期：2019–11–13。　修订日期：2020–01–09。
基金项目：陕西省创新能力支撑计划项目(2018TD-031)。
第一作者：李 倩(1994—)，女，硕士研究生。
通信作者：史忠旗(1982—)，男，博士，教授。

Received date: 2019–11–13.　**Revised date:** 2020–01–09.
First author: LI Qian (1994–), female, Master candidate.
E-mail: 1252476405@qq.com
Correspondent authors: SHI Zhongqi (1982–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: zhongqishi@xjtu.edu.cn

粉进行组合。目前最常用方法的是将 $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ (YAG:Ce)黄色荧光粉与蓝光 InGaN 芯片组合获得白光[4–5]，但该方法获得的白光存在色温偏高的问题。获得白光 LED 的另外一种方法就是将近紫外光芯片与三色(红、绿、蓝)荧光粉组合[6–8]，但集成三种荧光粉的工艺方法较为复杂。如果将蓝绿色荧光粉、红色荧光粉和紫外芯片组合形成白光 LED，可以克服上述工艺问题，并使其具有优良的显色指数和易于控制的发射特性。因此，探索新型蓝绿色荧光粉，对于白光 LED 的应用至关重要。

目前，已报道的蓝绿色荧光粉有 $Ca_2Al_3O_6F:Ce^{3+},Tb^{3+}$[9]、$Ba_3LaNa(PO_4)_3F:Eu^{2+},Tb^{3+}$[10]、$BaZrO_3$[11]等，但其发光均匀性和显色指数较差，导致其使用受限。而 $Y_2O_3:Bi^{3+}$蓝绿色荧光粉显色指数高、发射特性易于控制，故具有很好的应用前景[12–13]。然而，目前关于 Bi^{3+}离子浓度对荧光粉相组成和发光性能影响等方面还需进一步研究。

采用高效率、低成本的高温固相法合成 $Y_2O_3:xBi^{3+}$(x=0.05–1.00%)蓝绿色荧光粉，重点研究 Bi^{3+}掺杂浓度对荧光粉相组成、微观形貌及发光性能的影响，探究其发光机理和浓度猝灭机理，以期获得具有优异发光性能的 $Y_2O_3:Bi^{3+}$蓝绿色荧光粉。

1　实验

1.1　样品制备

以高纯 Y_2O_3(99.99%，国药集团化学试剂有限公司)和 Bi_2O_3(99.99%，国药集团化学试剂有限公司)为主要原料，采用高温固相法合成 $Y_2O_3:xBi^{3+}$(x=0.05%，0.25%，0.50%，0.75%，1.00%)粉体。首先，按化学计量比称取一定量的 Y_2O_3 粉和 Bi_2O_3 粉。将这两种粉体倒入研钵中，再加入一定量的乙醇作为研磨介质，研磨搅拌 1 h 至乙醇溶液挥发。将混合粉体在 70 ℃干燥 30 min，再将干燥好的粉体倒入研钵继续研磨 30 min，随后将粉体倒入氧化铝坩埚。用马弗炉在 1 250 ℃煅烧 3 h。最后，将所得产物研磨过筛后得到 $Y_2O_3:xBi^{3+}$荧光粉。

1.2　样品表征

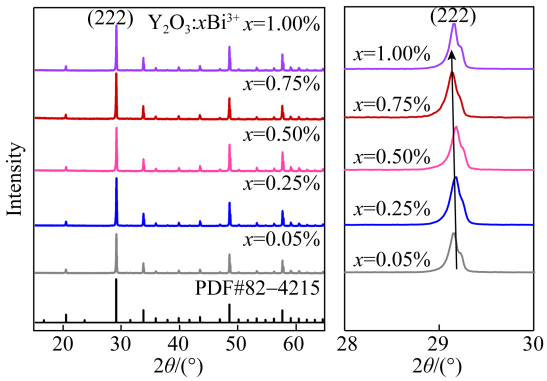
用 D8–Advance 型 X 射线粉末衍射仪分析产物相组成，测试条件：Cu 靶，管电压 40 kV，管电流 30 mA。用 S–4800 型场发射扫描电子显微镜分析粉体的微观形貌。用 F-7000 型荧光分光光度计表征激发光谱和发射光谱，激发光源为 200 W 氙灯。

2　结果与讨论

2.1　相组成及微观形貌

图 1a 为不同 Bi^{3+}掺杂量的 $Y_2O_3:xBi^{3+}$(x=0.05%，0.25%，0.50%，0.75%，1.00%)荧光粉的 XRD 谱。由图 1a 可以看出，通过与标准 PDF 卡片(PDF#82–2415)对比，发现所制备的 $Y_2O_3:xBi^{3+}$荧光粉均为立方晶体结构，且不含任何杂相，说明 Bi^{3+}掺杂浓度在此范围内变化不会影响基质的晶型。

图 1b 为 Bi^{3+}掺杂浓度对 $Y_2O_3:xBi^{3+}$荧光粉(222)晶面衍射峰位置的影响。由图 1b 可以看出，随着 Bi^{3+}掺杂浓度的增加，(222)晶面的衍射峰向小角度方向偏移，表明(222)晶面间距增大，且 Y_2O_3 晶胞体积增大。这是由于 Y 的原子半径为 0.09 nm，而 Bi 的原子半径为 0.103 nm，掺杂使得 Bi^{3+}取代原有 Y^{3+}的位置，从而产生晶格膨胀。



x—Mole fraction.

图 1　$Y_2O_3:xBi^{3+}$(x=0.05%，0.25%，0.50%，0.75%，1.00%)荧光粉的 XRD 谱

Fig. 1　XRD patterns of $Y_2O_3:xBi^{3+}$ (x=0.05%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%) phosphors

图 2 为用 Jade 软件计算所得 $Y_2O_3:xBi^{3+}$荧光粉的晶胞参数(a)及晶胞体积(V)。由图 2 可以看出，随着 Bi^{3+}掺杂浓度从 0.05%增加到 1.00%，晶胞参数 a 从 0.500 01 nm 增加到 0.500 65 nm，晶胞体积 V 从 0.125 00 nm^3 增加到 0.125 49 nm^3。这进一步证实了离子半径较大的 Bi^{3+}取代 Y^{3+}所在的位置，使得晶胞参数和晶胞体积增大，同时也间接证明了 Bi^{3+}成功掺入 Y_2O_3 基质中。

图 3 为不同掺杂浓度的 $Y_2O_3:Bi^{3+}$荧光粉的微观形貌。由图 3 可以看出，所有荧光粉均呈表面光滑的等轴状颗粒形貌，且随着 Bi^{3+}离子浓度的增加，粒径由 250 nm 逐渐增加到 600 nm。这说明的 Bi_2O_3 引入对于 Y_2O_3 的生长具有促进作用。

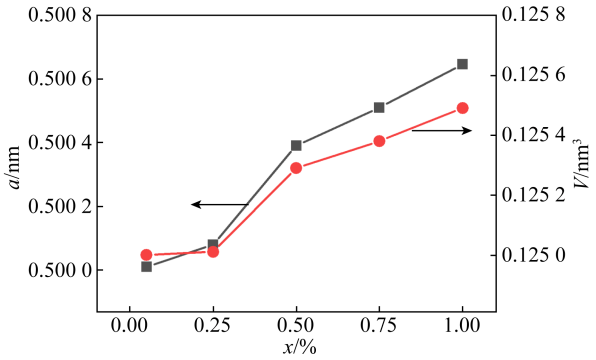


图 2 Y_2O_3:xBi^{3+}(x=0.05%，0.25%，0.50%，0.75%，1.00%)荧光粉的晶胞参数及晶胞体积

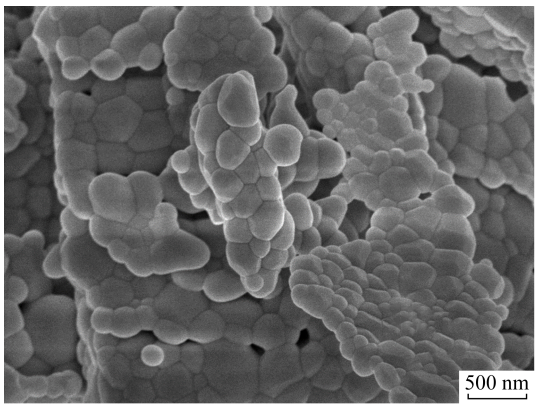
Fig. 2 Lattice parameters and cell volumes of Y_2O_3:xBi^{3+} (x=0.05%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%) phosphors

2.2 发光性能和机理

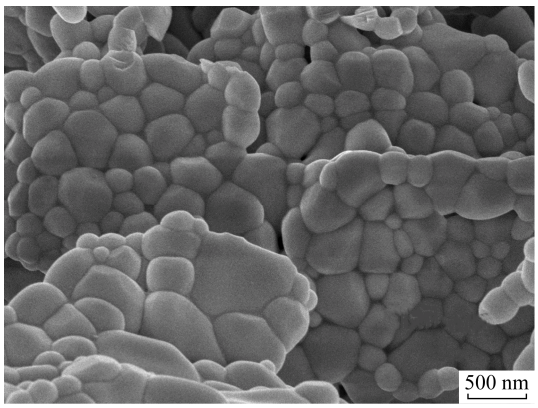
图 4 为 Y_2O_3:1.00%Bi^{3+}荧光粉的激发和发射光谱。由图 4 可以看出，在 335 nm 的紫外光激发下，Y_2O_3:1.00%Bi^{3+}的发射光谱由 3 个特征峰组成，分别为 370 nm 的浅紫外光发射、410 nm 的蓝光发射以及 483 nm 的蓝绿光发射。采用波长为 370 nm 的激发光对 Y_2O_3:1.00%Bi^{3+}荧光粉进行激发，结果发现：其发射光谱只有 410 nm 的单一发射。当发射波长为 410 nm 时，其激发光谱由 337 nm 和 373 nm 2 个激发峰组成，且 373 nm 的激发峰远远高于 337 nm。当发射波长为 483 nm 时，监测其激发光谱，可以发现其激发光谱由 325 和 345 nm 2 个激发峰组成。由此可见，483 和 410 nm 发射光谱监测得到的激发峰有很多交叉，这说明 Y_2O_3:1.00%Bi^{3+}荧光粉在发射过程中发生了能量转移。

通过计算[14]可得，483 nm 蓝绿光发射斯托克斯位移为 10 065 cm^{-1}，而 410 nm 蓝光发射 Stokes 位移为 2 419 cm^{-1}，可见 Y_2O_3:1.00%Bi^{3+}荧光粉蓝绿光发射的斯托克斯位移远远大于蓝光发射。

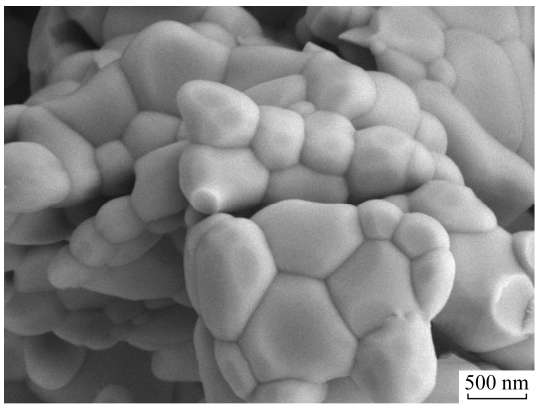
图 5 为 Y_2O_3:1.00%Bi^{3+}荧光粉的能级图。在 Y_2O_3 立方晶体结构中，Y 原子占据 S_6 和 C_2 两种位点[15–18]。Bi^{3+}掺杂时会分别占据 Y_2O_3 的 S_6 和 C_2 位点成为发光中心。Bi^{3+}基态处于 $^1S_0$ 能级，在 335 nm 紫外光激发下，Bi^{3+}最外层电子由基态跃迁到激发态，到达 $^3P_1$ 能级，处于 S_6 位点和 C_2 位点的 Bi^{3+}发生了能级分裂。处于 S_6 位点的 Bi^{3+}能级分裂为 ^3A_u 和 ^3E_u 能级，处于 C_2 位点的 Bi^{3+}能级分裂为 ^3A，^3B



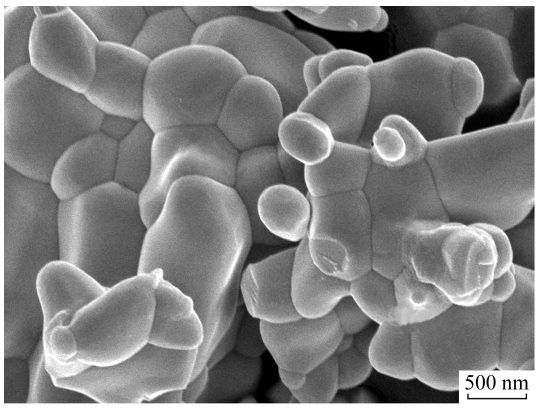
(a) x=0.25%



(b) x=0.50%



(c) x=0.75%



(d) x=1.00%

图 3 Y_2O_3:xBi^{3+}(x=0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%)荧光粉的 SEM 照片

Fig. 3 SEM images of Y_2O_3:xBi^{3+}(x=0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%) phosphors

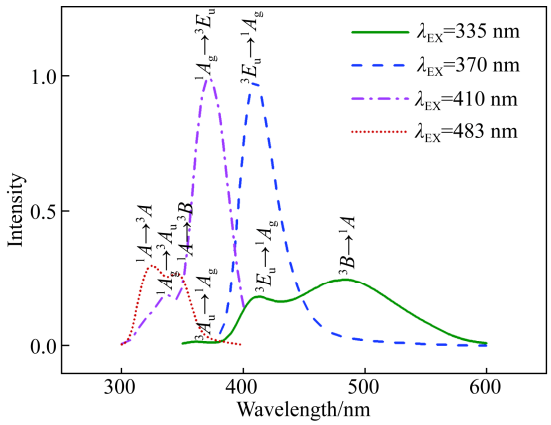


图 4　Y_2O_3:1.00%Bi^{3+}荧光粉的激发光谱和发射光谱

Fig. 4　Excitation and emission spectra of Y_2O_3:1.00%Bi^{3+} phosphor

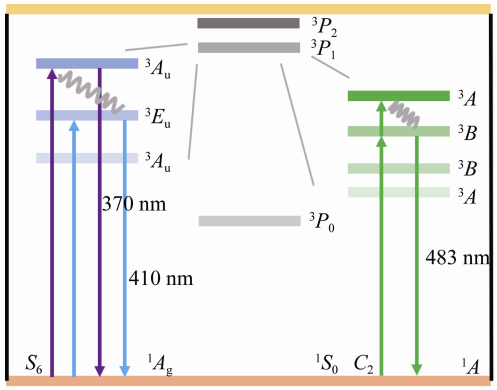


图 5　Y_2O_3:Bi^{3+}荧光粉的能级图

Fig. 5　Energy-level diagram of Y_2O_3:Bi^{3+} phosphors

能级。在 335 nm 紫外光激发时，S_6 位点 Bi^{3+}的最外层电子发生 $^1A_g\rightarrow{}^3A_u$ 和 $^1A_g\rightarrow{}^3E_u$ 电子跃迁，C_2 位点 Bi^{3+}的最外层电子发生 $^1A\rightarrow{}^3A$ 和 $^1A\rightarrow{}^3B$ 电子跃迁。由图 4 可知，Y_2O_3:1.00%Bi^{3+}荧光粉的发射光谱由 370 nm、410 nm、483 nm 3 个发射峰组成，即发生了 $^3A_u\rightarrow{}^1A_g$、$^3E_u\rightarrow{}^1A_g$、$^3B\rightarrow{}^1A$ 电子跃迁。当采用波长为 370 nm 的激发，结果发现其发射光谱只有 410 nm 的单一发射，再用 410 nm 的光监测其激发光谱时，激发光谱由 337 和 373 nm 2 个激发峰组成。这表明，410 nm 激发仅仅可以引发 S_6 位点 Bi^{3+}的 $^1A_g\rightarrow{}^3A_u$ 和 $^1A_g\rightarrow{}^3E_u$ 的电子跃迁，而处于激发态的电子的少部分能量以非辐射跃迁形式散发出来，大部分能量则产生了 $^3E_u\rightarrow{}^1A_g$ 的电子跃迁，从而发出蓝紫光。再用 483 nm 监测其激发光谱时，激发光谱由 325 和 345 nm 两个激发峰组成。表明 Bi^{3+}最外层电子发生 $^1A\rightarrow{}^3B$ 和 $^1A\rightarrow{}^3A$ 的电子跃迁而处于激发态。处于 ^3A 能级电子的能量以非辐射跃迁的能量散发出来，到达 ^3B 能级。此时，由于 C_2 位点的 Bi^{3+}发生 $^3B\rightarrow{}^1A$ 的能级跃迁而发出蓝绿光。

图 6 为不同掺杂含量的 Y_2O_3:$x$$Bi^{3+}$荧光粉在 335 nm 紫外光激发下的发射光谱。由图 6 可以看出，由于处于 S_6 位点的 Bi^{3+}发生了 $^3A_u\rightarrow{}^1A_g$ 和 $^3E_u\rightarrow{}^1A_g$ 电子跃迁，而处于 C_2 位点的 Bi^{3+}发生了 $^3B\rightarrow{}^1A$ 电子跃迁，使得 Y_2O_3:$x$$Bi^{3+}$荧光粉分别形成了 370、410 和 483 nm 3 个发射特征峰。另外，随着 Bi^{3+}掺杂浓度增加，发射光谱的形状和位置基本保持不变，但不同发射峰的发光强度发生了明显变化。具体来说，随着 Bi^{3+}浓度的增加，370 nm 紫外区的发光强度因发生浓度猝灭而逐渐减弱，说明处于 S_6 位点 $^3A_u\rightarrow{}^1A_g$ 电子跃迁逐渐减弱；当 Bi^{3+}浓度增加至 0.25%时，410 和 483 nm 处的可见光发射强度均逐渐增强至最大值，说明处于 S_6 位点和 C_2 位点的 Bi^{3+}的 $^3E_u\rightarrow{}^1A_g$ 和 $^3B\rightarrow{}^1A$ 电子跃迁逐渐活跃；当 Bi^{3+}离子浓度继续增加，410 和 483 nm 的发射强度均逐渐减弱，即处于 S_6 位点和 C_2 位点的 Bi^{3+}的 $^3E_u\rightarrow{}^1A_g$ 和 $^3B\rightarrow{}^1A$ 电子跃迁逐渐减弱。这一方面是由于 C_2 位点的 Bi^{3+}与 S_6 位点的 Bi^{3+}发生了能量转移，另一方面 Bi^{3+}之间的相互作用也会导致浓度猝灭。

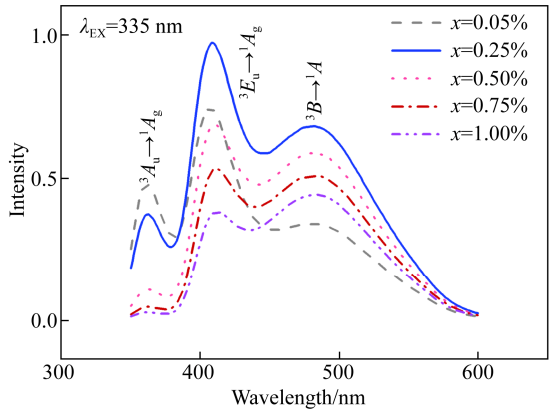


图 6　Y_2O_3:$x$$Bi^{3+}$($x$=0.05%，0.25%，0.50%，0.75%，1.00%)荧光粉的发射光谱

Fig. 6　Emission spectra of Y_2O_3:$x$$Bi^{3+}$ (x=0.05%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%) phosphors

2.3　浓度猝灭机理

根据 Dexter 理论[19–20]，Y_2O_3:$x$$Bi^{3+}$荧光粉的发光强度与发光中心 Bi^{3+}浓度的关系如式(1)所示。

$$I/x = K[1+\beta(x)^{Q/3}]^{-1} \quad (1)$$

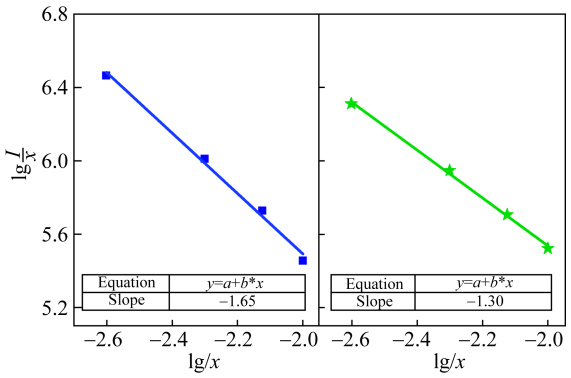
式中：I 为光强；x 为发光中心浓度；K 和 β 是常数(相同的激发条件下)。根据发光中心离子之间的相互作用，当 Q 值为 6、8、10 时，分别对应偶极–偶极相互作用、偶极–四极相互作用、四极–四极相互作用的猝灭机理[21–23]。当 x 大于 0.25%时，式(1)可

简化为式(2)。

$$\lg(I/x)=c-(Q/3)\lg(x) \quad (2)$$

式中：c 为常数。

图 7a 和图 7b 分别为 Y_2O_3:xBi^{3+}荧光粉在发射波长 410 和 483 nm 处的 lg$x$ 与 lg(I/x)线性拟合图。由图 7a 和图 7b 可以看出，图 7a 曲线的斜率为–1.65，所得 Q 值约为 4.95，更接近 6，说明产生 410 nm 蓝光发射的 S_6 位点 Bi^{3+}的浓度猝灭机制为偶极–偶极相互作用。图 7b 曲线的斜率为–1.30，所得 Q 值约为 3.90，也更接近 6，所以产生 483 nm 蓝绿光发射的 C_2 位点 Bi^{3+}离子的浓度猝灭机制也属于偶极-偶极相互作用。即 Bi^{3+}之间的偶极–偶极相互作用导致了处于 S_6 位点和 C_2 位点的 Bi^{3+}的 $^3E_u\rightarrow{}^1A_g$ 和 $^3B\rightarrow{}^1A$ 电子跃迁逐渐减弱。



(a) λ=410 nm (b) λ=483 nm

图 7 Y_2O_3:xBi^{3+}荧光粉的 lg$x$ 与 lg(I/x)线性拟合曲线

Fig. 7 Linear fitting graphs of lg$x$ and lg(I/x) for the Y_2O_3:xBi^{3+} phosphors

图 8 为 Y_2O_3:xBi^{3+}荧光粉的 CIE 色坐标图。由图 8 可以看出，随着 Bi^{3+}掺杂浓度的增加，Y_2O_3:xBi^{3+}的色坐标逐渐由淡蓝色向蓝绿色方向移动。当 Bi^{3+}浓度为 0.05%、0.25%、0.50%、0.75%、1.00%时，相应荧光粉的色坐标分别为(0.161 1，0.200 6)、(0.159 2，0.218 1)、(0.158 7，0.226 5)、(0.158 8，0.231 4)和(0.159 0，0.241 9)，相对的显色指数分别为 70.48、69.27、68.14、67.90 和 67.32，说明其显色指数随 Bi^{3+}浓度的增加逐渐减小，但减小的程度不大，基本保持蓝绿色。另外，从图 6 的发射光谱也可以看出，随着 Bi^{3+}浓度的增加，483 nm 蓝绿光发射的浓度猝灭导致发射强度减小的速度较慢。当 Bi^{3+}浓度为 1.00%时，483 nm 蓝绿光发射强度已超过了 410 nm 蓝光发射强度。因此，不同 Y_2O_3:xBi^{3+}荧光粉的色坐标是由可见光区内这 2 个发射峰共同决定的。

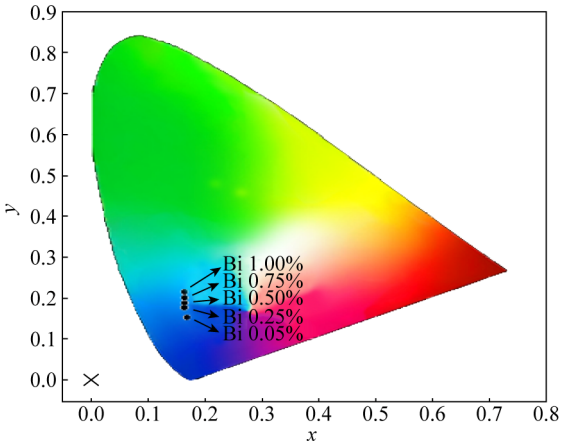


图 8 Y_2O_3:xBi^{3+}(x=0.05%,0.25%,0.50%,0.75%,1.00%)荧光粉的 CIE 色坐标图

Fig. 8 The coordinate diagram of Y_2O_3:xBi^{3+} (x=0.05%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%) phosphors

3 结论

采用高温固相法，在 1 250 ℃保温 3 h 成功制备出发光性能优异的 Y_2O_3:xBi^{3+}(x=0.05–1.00%)荧光粉，其微观形貌为表面光滑的等轴状颗粒。随着 Bi^{3+}掺杂量的增加，颗粒粒径由 250 nm 逐渐增加至 600 nm。另外，随着 Bi^{3+}掺杂量的增加，Y_2O_3 基质的晶型不发生改变，但会引起基体晶格膨胀和晶胞体积增大。Y_2O_3:xBi^{3+}荧光粉在波长为 335 nm 的紫外光激发下，其发射光谱由较弱的 370 nm、较强的 410 和 483 nm 3 个宽带发射组成。370 nm 紫外发射和 410 nm 蓝光发射是由 Bi^{3+}的 S_6 位点 $^3A_u\rightarrow{}^1A_g$ 和 $^3E_u\rightarrow{}^1A_g$ 电子跃迁产生；483 nm 蓝绿光发射是由 Bi^{3+}的 C_2 位点的 $^3B\rightarrow{}^1A$ 电子跃迁产生。当 Bi^{3+}掺杂浓度为 0.25%时，荧光粉发光性能最优，其色坐标为(0.159 2，0.218 1)，显色指数为 69.27。当 Bi^{3+}掺杂浓度大于 0.25%时，410 nm 蓝光发射和 483 nm 蓝绿光发射由于 Bi^{3+}间的偶极–偶极相互作用产生浓度猝灭现象。所制备的 Y_2O_3:Bi^{3+}蓝绿色荧光粉在白光 LED 领域具有良好应用前景。

参考文献:

[1] 杨志平, 李旭, 李兴民, 等. 燃烧法制备白光发光二级管用 $Ca_{(1-x)}Sr_xS$:Eu^{2+}红色荧光粉[J]. 硅酸盐学报, 2006, 8: 966–969.
YANG Zhiping, LI Xu, LI Xingming, et al. J Chin Ceram Soc, 2006, 8: 966–969.

[2] 朱超峰, 杨云霞, 梁晓峦, 等. 白光 LED 用稀土离子掺杂硼硅酸盐玻璃的发光性能[J]. 硅酸盐学报, 2007, 10: 1401–1405.
ZHU Chaofeng, YANG Yunxia, LIANG Xiaoluan, et al. J Chin Ceram Soc, 2007, 10: 1401–1405.

[3] 夏李斌, 叶信宇, 潘锡翔, 等. 白光 LED 用铕离子掺杂硼铋锌红光

玻璃的制备与性能[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(3): 410–415.
XIA Libing. YE Xingyu, PAN Xixiang, et al. J Chin Ceram Soc (in chinese), 2017, 45(3): 410–415.

[4] BACHMANN V, RONDA C, MEIJERINK A. Temperature quenching of yellow Ce^{3+} luminescence in YAG:Ce[J]. Chem Mater, 2009, 21: 2077–2084.

[5] 潘政薇, 何洪, 宋秀峰, 等. LED 用稀土 Eu 掺杂硅酸盐基荧光粉的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(9): 1590–1596.
PAN Zhengwei, HE Hong, SONG Xiufeng, et al. J Chin Ceram Soc, 2009, 37(9): 1590–1596.

[6] IM W B, BRINKLEY S, HU J, et al. $Sr_{2.975-x}Ba_xCe_{0.025}AlO_4F$: A highly efficient green-emitting oxyfluoride phosphor for solid state white lighting[J]. Chem Mater, 2010, 22: 2842–2849.

[7] JUNG K Y, LEE H W. Luminescent properties of (Sr, Zn)Al_2O_4:Eu^{2+},B^{3+} particles as a potential green phosphor for UV LEDs[J]. Chem Mater, 2006, 18: 2249–2255.

[8] ZHANG S, NAKAI Y, TSUBOI T, et al. The thermal stabilities of luminescence and microstructures of Eu^{2+}-doped $KBaPO_4$ and $NaSrPO_4$ with β-K_2SO_4 type structure[J]. Inorg Chem, 2011, 50: 2897–2904.

[9] XIA Z, LIU R S. Tunable blue-green color emission and energy transfer of $Ca_2Al_3O_6F$:Ce^{3+},Tb^{3+} phosphors for near-UV white LEDs[J]. J Phys Chem C, 2012, 116: 15604–15609.

[10] JIAO M, GUO N, LÜ W, et al. Tunable blue-green-emitting $Ba_3LaNa(PO_4)_3F$:Eu^{2+},Tb^{3+} phosphor with energy transfer for near-UV white LEDs[J]. Inorg Chem, 2013, 52: 10340–10346.

[11] CAVALCANTE L S, SCZANCOSKI J C, ESPINOSA J W M, et al. Intense blue and green photoluminescence emissions at room temperature in barium zirconate powders[J]. J Alloys Compd, 2009, 471: 253–258.

[12] MENG L, XU W, ZHANG Q. Optical and structural properties of down-conversion Bi doped Y_2O_3 films for potential application in solar cell[J]. Appl Surf Sci, 2017, 409: 187–193.

[13] JAFER R M, SWART H C, YOUSIF A, et al. The effect of annealing temperature on the luminescence properties of Y_2O_3 phosphor powders doped with a high concentration of Bi^{3+}[J]. J Lumin, 2016, 180: 198–203.

[14] CHEN Y, LIU Q, DU X, et al. The structure refinement and fluorescent quenching mechanism of $Sr_{3-x}B_2SiO_8$:xEu^{3+} phosphor[J]. J Mater Sci, 2017, 52: 1156–1164.

[15] CHANG N C. Fluorescence and stimulated emission from trivalent europium in yttrium oxide[J]. J Appl Phys, 1963, 34: 3500–3504.

[16] GAJOVIC A, TOMASIC N, DJERDJ I, et al. Influence of mechanochemical processing to luminescence properties in Y_2O_3 powder[J]. J Alloys Compd, 2008, 456: 313–319.

[17] SILVER J, MARTINEZ-RUBIC M I, IRELAND T G, et al. Yttrium oxide upconverting phosphors. Part 2: Temperature dependent upconversion luminescence properties of erbium in yttrium oxide[J]. J Phys Chem B, 2001, 105: 7200–7204.

[18] JU G, HU Y, CHEN L, et al. White-light generation and energy transfer in Y_2O_3:Bi,Eu phosphor for ultraviolet light-emitting diodes[J]. J. Electrochem Soc, 2011, 158: J294.

[19] DEXTER D L. A theory of sensitized luminescence in solids[J]. J Chem Phys, 1953, 21: 836–850.

[20] HALASZ F, SCHWARTZ M. The Dexter hypertext reference model[J]. Commun ACM, 1994, 37: 30–39.

[21] LI X, BUDAI JD, LIU F, et al. Crystal structures and optical properties of new quaternary strontium europium aluminate luminescent nanoribbons[J]. J Mater Chem C, 2015, 3: 778–788.

[22] AXE J D, WELLER P F. Fluorescence and energy transfer in Y_2O_3:Eu^{3+}[J]. J Chem Phys, 1964, 40: 3066–3069.

[23] ZHANG B, LIU Q, YAN W, et al. Relation between structure conversion and spectra-tuning properties of Eu^{2+}-doped strontium aluminate phosphor[J]. J Mater Sci, 2017, 52: 8188–8199.