文章编号:1674-2869(2024)06-0625-06

$Ba_3Y_2B_6O_{15}:Dy^{3+}$荧光粉的制备及发光性能研究

王 昶,王艺泽,熊星焯,吴凯婷,岳 励,徐 慢,戴武斌*
武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:开发新型单相荧光粉,并探究其在发光二极管器件中的应用是当前的研究热点。采用高温固相法,通过多步烧成合成了$Ba_3Y_2B_6O_{15}:Dy^{3+}$(BYB:Dy)荧光粉,并重点探讨BYB:Dy荧光粉的结构特征和发光性能。X射线衍射和离子掺杂半径比计算结果表明,Dy^{3+}离子能够很好地进入$Ba_3Y_2B_6O_{15}$主晶格中,无杂相生成,并取代Y^{3+}的位点,由于Dy^{3+}离子半径大于Y^{3+}离子半径,会增大晶胞参数。荧光光谱结果显示,BYB:Dy荧光粉可被紫外光有效激发,在最佳激发波长(351 nm)的激发下,分别产生在409 nm处的宽峰,以及在481、580和678 nm处的尖峰;其中,宽峰来源于BYB基质合成过程中的氧间隙(O_i)缺陷,属于蓝光发射带,而尖峰来源于Dy^{3+}的$^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{J/2}$($J$=15,13,11)能级跃迁,属于蓝光与黄光发射带,色度坐标表明了荧光粉的发光属于蓝白光区域。由于BYB基质具有高度对称的晶体场环境及紧密的多面体,使得BYB:Dy荧光粉具有优异的发光性能和稳定性,同时补充了蓝色发射,增加了荧光粉的色纯度,因此该荧光粉在白光发光二极管领域具有良好的应用前景。

关键词:BYB:Dy荧光粉;高温固相法;结构特征;发光性能;发光二极管
中图分类号:TB34 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202403020

Preparation and luminescence performance of $Ba_3Y_2B_6O_{15}:Dy^{3+}$ phosphor

*WANG Chang, WANG Yize, XIONG Xingzhao, WU Kaiting, YUE Li, XU Man, DAI Wubin**
School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: Developing novel single-phase phosphors and exploring their applications in light emitting diode devices is a current research focus. In this study, $Ba_3Y_2B_6O_{15}:Dy^{3+}$ (BYB:Dy) phosphors were synthesized via the high-temperature solid-state method with multiple-step firings, and their structural characteristics and luminescence properties were investigated. The results of X-ray diffraction and ion doping radius ratio calculations demonstrate that Dy^{3+} ions can successfully incorporate into the main lattice of $Ba_3Y_2B_6O_{15}$ without generating impurity phases, and substitute the sites of Y^{3+}, which leads to larger cell parameters due to the fact that the radius of Dy^{3+} is larger than that of Y^{3+}. The fluorescence spectroscopy results indicate that the BYB:Dy phosphors can be effectively excited by ultraviolet light. When excited by the optimal wavelength (351 nm), broad peaks at 409 nm and sharp peaks at 481, 580, and 678 nm are respectively generated; the broad peaks originated from the oxygen interstitial (O_i) defects during the synthesis of the BYB matrix belong to the blue emission band, while the sharp ones from the $^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{J/2}$ (J=15, 13, 11) energy level transitions of Dy^{3+} correspond to the blue and yellow emission bands. The chromaticity coordinates show that the luminescence of the phosphors belongs to the blue-white light region. Due to the highly symmetric crystal field environment and close-packing polyhedra of the BYB matrix, the BYB:Dy phosphors exhibit excellent

收稿日期:2024-03-18
基金项目:武汉工程大学第十五届研究生教育创新基金(CX2023058);湖北三峡实验室创新基金(SC212003)
作者简介:王 昶,硕士研究生。Email:22205010155@stu.wit.edu.cn
***通信作者**:戴武斌,博士,教授。Email:wubin.dai@wit.edu.cn
引文格式:王昶,王艺泽,熊星焯,等. $Ba_3Y_2B_6O_{15}:Dy^{3+}$荧光粉的制备及发光性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(6):625-630.

luminescence performance and stability, supplement the blue emission and enhance the color purity of the phosphors, thereby having a promising application prospect in the field of white light emitting diodes.

Keywords: BYB: Dy phosphor; high temperature solid-state method; structural features; luminescence performance; light emitting diode

在绿色环保发展的社会背景下,显示和照明行业对环保和节能产品的需求不断增加,这产生了创造新型和尖端的环保型光学材料的强烈趋势[1]。在过去的几十年里,发光材料在发光二极管(light emitting diode, LED)、阴极射线管、液晶显示器、场发射显示器等各种显示设备中的使用日益增长,使得发光材料在照明及显示领域大放光彩,其中白光LED更是成为继传统照明灯之后的新型固态照明器件[2-5]。因为白光LED具有发光效率高、寿命长、光稳定性优异和环境友好等优点[6],因此用于白光LED的发光材料的研究引起了人们的广泛关注。其中,稀土离子由于具有广泛的能级可以触发不同颜色的发射[7-8],因此稀土掺杂荧光粉材料被认为是非常有前途的发光材料,选择合适的稀土离子掺杂能够得到特定颜色的荧光粉。另外,稀土离子的发光性能又受到基质的晶体场环境的影响,因此选择合适的基质材料,是制备新型荧光粉的必要条件。

稀土离子的掺杂通常取代主晶格中离子半径和电荷数接近的离子,在探究稀土离子最佳掺杂浓度时,以保证整体结构的稳定性和减少缺陷的产生,从而增强荧光粉的发光性能[9-10]。在所有的镧系离子中,三价镝(Dy^{3+})可以作为单相白光荧光粉的掺杂离子,由于其具有$^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{J/2}$($J$=15, 13, 11)能级跃迁,可以产生450~500 nm的蓝光发射带和550~600 nm的黄光发射带,同时Dy^{3+}对晶体场对称性环境很敏感,当其处于高对称性环境中时,其$^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{15/2}$(蓝光)跃迁发射会增强[11]。因此通过合理的离子浓度调控以及主晶格的选择可以控制蓝光与黄光的比例,从而产生白光的发射,在白光LED的应用中具有很大潜力。随着人们对稀土掺杂荧光粉的研究不断深入,稀土硼酸盐由于其作为非线性光学材料和等离子体显示面板荧光粉的实际应用而受到了很大的关注[12]。硼酸钡钇($Ba_3Y_2B_6O_{15}$, BYB)作为一种新型硼酸盐,结晶于立方晶系,具有高度对称的晶体结构,这种结构在硼酸盐晶系中十分罕见[13-14]。BYB是由共角的[B_2O_5]二聚体和[YO_6]八面体网络组成,[BaO_9]十二面体占据框架的空隙,Y^{3+}占据几乎完美的八面体,形成了一个对称而又高度凝聚态的结构。该结构的荧光粉能够被紫外光(UV)有效激发,产生稳定的窄带发射[15-17]。在2018年Duke等[18]研究了一种新型蓝光荧光粉$Ba_3Y_2B_6O_{15}$:Ce^{3+},该荧光粉由于其高的格位对称性而产生了窄带发射,半高宽仅为70 nm,被称为迄今为止报道的具有最窄的宽峰发射的Ce^{3+}荧光粉。同时由于结构紧凑和连接密集,该荧光粉的量子效率为84%。因此,研究稀土离子掺杂BYB基质荧光粉的工作具有广阔的前景。本文以BYB为荧光粉的基质,Dy^{3+}为掺杂离子,采用高温固相法,通过多步烧成制度制备了一系列Dy^{3+}掺杂浓度不同的荧光粉,探究了不同Dy^{3+}掺杂浓度荧光粉的结构与发光性能,分析其在白光LED的潜在应用。

1 实验部分

1.1 实验试剂

碳酸钡($BaCO_3$,纯度为99.99%),氧化钇(Y_2O_3,纯度为99.99%),硼酸(H_3BO_3,纯度为99.99%),氧化镝(Dy_2O_3,纯度为99.99%)

1.2 实验步骤

$Ba_3Y_{2-z}B_6O_{15}$:zDy^{3+}(z=0.01~0.09)荧光粉样品采用高温固相法制备。按化学计量比称取各原料,将称取的原料放在玛瑙研钵中,加入适量无水乙醇进行混合、研磨、烘干,得到混合原料,将混合原料放入氧化铝坩埚中,于空气气氛下在箱式电阻炉中升温至600 ℃预烧6 h,随后样品在箱式电阻炉中冷却至室温,取出再次研磨后放入氧化铝坩埚中,再次放入箱式电阻炉中升温至850 ℃煅烧6 h,待样品冷却后再次研磨后放入箱式电阻炉中升温至910 ℃煅烧12 h,样品在冷却至室温后取出研磨得到荧光粉样品。预烧和煅烧的升温和降温速率均为3 ℃/min。

1.3 表征方法

采用X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)仪(德国布鲁克公司Bruker D8 Advance)对样品的物相进行表征(辐射源为Cu靶$K\alpha$射线,管电压为40 kV,管电流为40 mA,波长λ=0.154 18 nm,步长为0.02°,扫描范围为10°~90°)。采用日立F-7000荧光分光光度计(激发源为450 W氙灯)测试粉体的光致发光激发(photoluminescence excitation,

PLE）和光致发光（photoluminescence，PL）光谱，研究样品的发光性能。

2　结果与讨论

2.1　结构分析

图 1 为 BYB 基质的晶胞结构示意图，该结构是空间群为 $Ia\bar{3}$ 的立方晶系，晶胞参数 a=1.426 24 nm。在 BYB 结构中 Ba^{2+} 被 9 个 O^{2-} 包围，离子半径为 0.147 nm（C_N=9），Y^{3+} 被 6 个 O^{2-} 包围，离子半径为 0.090 nm（C_N=6），稀土离子 Dy^{3+} 的离子半径为 0.108 nm（C_N=9）和 0.091 nm（C_N=6）。根据离子掺杂半径比 D_r[式（1）]判断离子的占位情况：

$$D_r = \left| \frac{R_h(C_N) - R_d(C_N)}{R_h(C_N)} \right| \times 100\% \qquad (1)$$

式（1）中：C_N 代表配位数，R_h 与 R_d 分别代表被取代离子和掺杂离子的离子半径。计算结果 D_r<30% 即表示离子半径在合理的范围内，而 D_r 值越小代表取代更容易发生。Dy^{3+} 取代 Ba^{2+} 和 Y^{3+} 的 D_r 值分别为 26.33% 和 1.33%，表明 Dy^{3+} 更容易进入 Y^{3+} 的格位，同时由于两种离子的电荷数相同，且满足电荷平衡条件，因此判定稀土离子 Dy^{3+} 掺入 BYB 基质中取代 Y^{3+} 的格位，而不改变晶体结构。

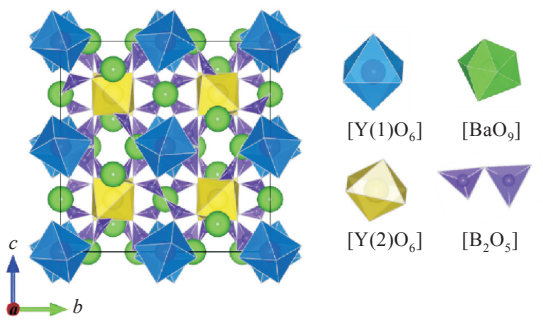

图 1　BYB 基质的晶胞结构图

Fig. 1　Cell structure of BYB matrix

与传统的无机荧光粉的制备不同，以 BYB 为基质的荧光粉合成需要通过多步烧成制度，通过较慢的升温制度混合料发生缓慢结晶，直至生成目标样品[19]，否则会在制备过程中因结晶不完全产生杂质。图 2（a）显示了通过单次烧成制备的一系列不同浓度的 BYB：zDy 样品的 XRD 图谱，与标准卡片（ICSD-261704）比较可知，样品在 19.8°、31.2° 和 33.1° 处有杂峰产生，通过 Jade 软件分析可知杂峰对应的化合物为 YBO_3。为了消除杂峰的影响，采用多步烧成制度制备了同样的荧光粉，其 XRD 图谱如图 2（b）所示，可知所有主峰均与标准卡片（ICSD-261704）对应良好，无明显的杂峰产生。说明 Dy^{3+} 离子良好地掺入到主晶格中，未引起晶相的改变，没有产生杂相。此外不同样品在 27.9° 处的主峰随着 Dy^{3+} 离子掺杂浓度的增加，其峰位向低角度偏移，根据布拉格方程[式（2）]进行判断：

$$2d\sin\theta = n\lambda \qquad (2)$$

由式（2）可知衍射角度 θ 降低，其晶胞参数 d 增加，说明随着掺杂浓度增加，体积较大的 Dy^{3+} 离子取代较小的 Y^{3+} 离子，导致晶胞参数变大。

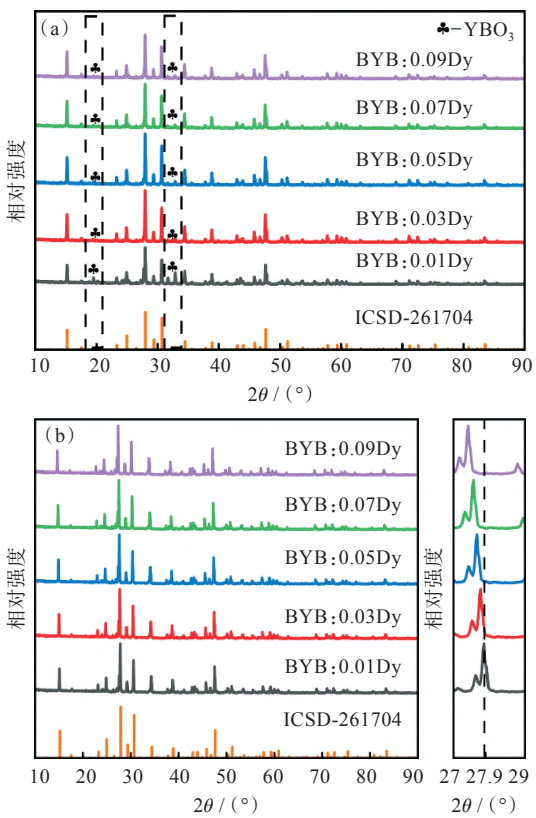

图 2　BYB：zDy 荧光粉的 XRD 图谱：（a）单次烧成，（b）多步烧成

Fig. 2　XRD patterns of BYB：zDy phosphor：（a）single firing，（b）multi-step firing

2.2　光谱分析

BYB 基质的激发光谱如图 3（a）所示，在最佳发射波长为 409 nm 的监测下，BYB 在 200~380 nm 范围内有很宽的激发峰，说明基质在此波段内均能被激发。图 3（b）显示了 BYB 基质的发射光谱，其发光来源于基质合成中产生的氧间隙（O_i）缺陷。分别用基质本身的最佳激发波长 298 nm 和单掺 Dy^{3+} 样品的最佳激发波长 351 nm 对基质进行激发，得到了 2 条发射强度不同的蓝光发射峰，且 2 种激发波长只影响发射强度，并不改变其峰型和峰位，说明基质的发射峰是由 BYB 合成过程中产生的氧间隙（O_i）缺陷导致的。

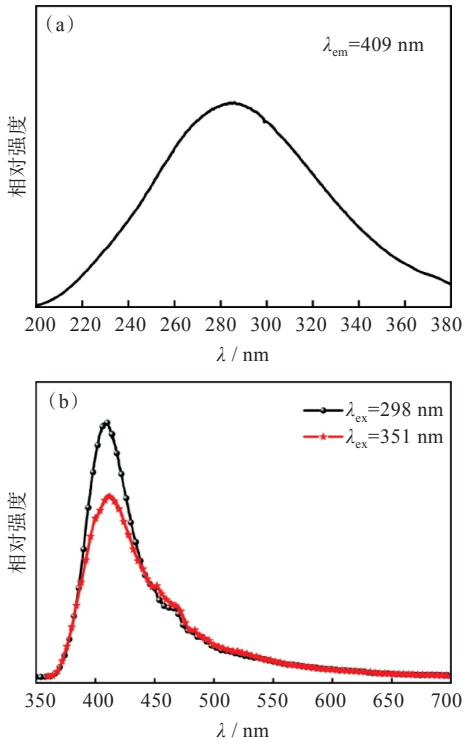

图3 BYB基质的激发光谱(a)和发射光谱(b)

Fig. 3 Excitation spectra (a) and emission spectra (b) of BYB matrix

图4(a)显示了最佳样品BYB:0.05Dy荧光粉的激发光谱,从图4(a)中可以看出,激发光谱的激发峰由298 nm处的BYB基质激发峰以及324、351、364、387、426、452和469 nm处的Dy^{3+}激发峰组成。Dy^{3+}激发峰来源于$^6H_{15/2}\rightarrow{}^6P_{3/2}$、$^6H_{15/2}\rightarrow{}^6P_{7/2}$、$^6H_{15/2}\rightarrow{}^6P_{5/2}$、$^6H_{15/2}\rightarrow{}^4I_{13/2}$、$^6H_{15/2}\rightarrow{}^4G_{11/2}$、$^6H_{15/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$和$^6H_{15/2}\rightarrow{}^4F_{9/2}$的能级跃迁。其中351 nm处的激发峰为最强峰,表明BYB:0.05Dy荧光粉可被紫外芯片有效激发,其在白光LED中的应用具有重大潜力。从图4(b)的发射光谱可知,在351 nm的最佳激发下,BYB:0.05Dy荧光粉的发射光谱存在位于409、481、580和678 nm的发射峰。它们分别来源于基质的特征发射(蓝光)和Dy^{3+}的$^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{J/2}$($J$=15,13,11)能级跃迁,这些跃迁产生了蓝光发射(481 nm)、黄光发射(580 nm)和红光发射(678 nm)。其中最强发射峰位于481 nm处,高于580 nm处的发射峰,这是由于Dy^{3+}离子取代了主晶格中Y^{3+}格位,该格位具有高对称性,使得Dy^{3+}的$^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{15/2}$(蓝光)跃迁强度增强,高于$^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{13/2}$(黄光)跃迁,荧光粉呈现出蓝白光的发射。为了验证$Y^{3+}$格位的对称性,分析了[$YO_6$]多面体的键长扭曲指数$D$,可根据式(3)进行计算[20]。

$$D=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|l_i-l_{av}\right|}{l_{av}} \tag{3}$$

式(3)中:l_i为中心原子与第i个配位原子之间的距离,l_{av}为多面体的平均键长,n为多面体配位数。当D为0时,说明该多面体属于完美对称。通过计算结果可知,D值为0,可得[YO_6]多面体具有良好对称性。

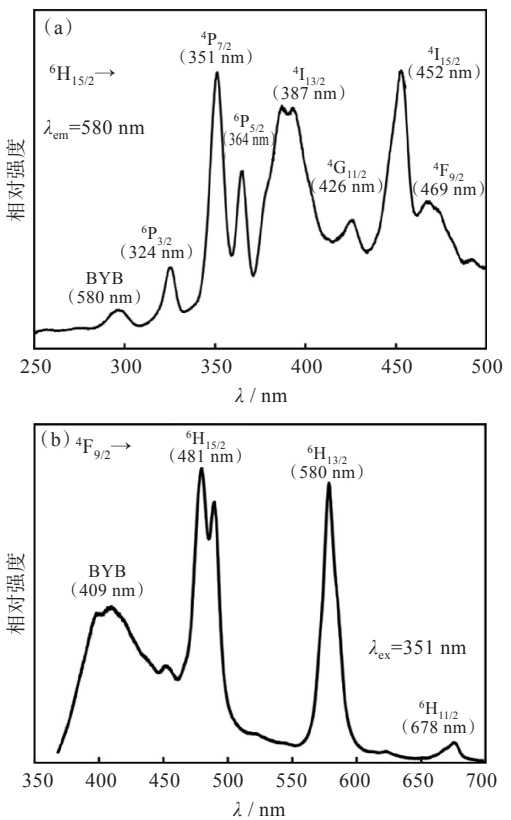

图4 BYB:0.05Dy荧光粉的激发光谱(a)和发射光谱(b)

Fig. 4 Excitation spectra (a) and emission spectra (b) of BYB:0.05Dy phosphor

为了研究BYB:zDy(z=0.01,0.03,0.05,0.07,0.09)荧光粉中不同Dy^{3+}离子浓度对发射光谱的影响,在最佳激发波长为351 nm的激发下得到了BYB:zDy荧光粉的发射光谱,如图5(a)所示。由图5(a)可知,随着Dy^{3+}离子掺杂浓度的增加,发射光谱的峰形和峰位未发生变化,只有强度发生了改变。插图为$^6H_{15/2}$能级与$^6H_{13/2}$能级的发射峰强度的比值随Dy^{3+}离子掺杂浓度的变化图,可知发射峰强度比值无较大变化,说明Dy^{3+}离子在掺杂浓度增加的同时,一直处于高对称晶体环境中。图5(b)显示了随着Dy^{3+}离子浓度变化,BYB:zDy荧光粉在481 nm处的最强发射峰的强度变化,当Dy^{3+}离子的掺杂浓度在z=0.05时,发射强度最强,随后强度降低,这种现象是浓度猝灭作用的原因导致的。

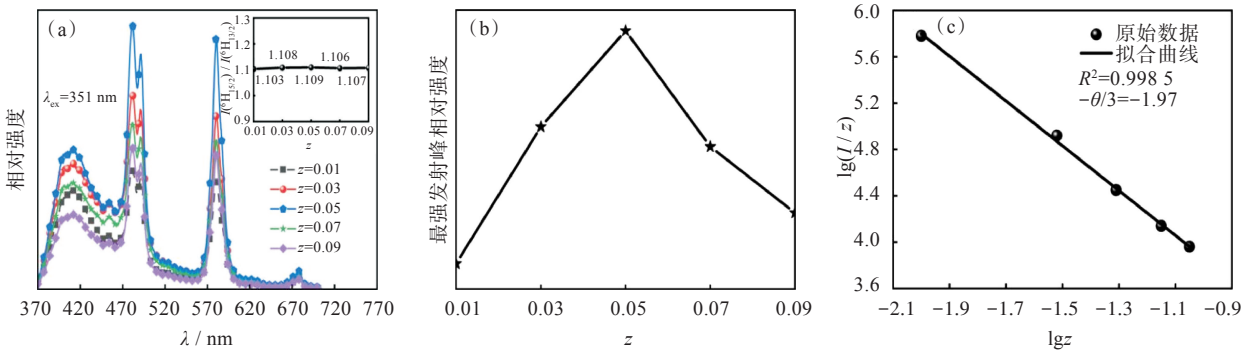

图5　(a)BYB:*z*Dy荧光粉发射光谱(插图为$^6H_{15/2}$能级与$^6H_{13/2}$能级的发射峰强度的比值变化图)；(b)最强发射强度变化图；(c)lg(*I*/*z*)对lg(*z*)的依赖关系的拟合曲线

Fig. 5　(a) Emission spectra of BYB:*z*Dy phosphor(inset shows the variation of the ratio of the intensity of the $^6H_{15/2}$energy level to the $^6H_{13/2}$ energy level); (b)Maximum emission intensity variation map; (c)Fitted plot of the dependence of lg(*I*/*z*) on lg(*z*)

这种猝灭作用通常归因于Dy^{3+}离子之间的非辐射能量转移，因此采用临界距离R_c[式(4)]判断离子间能量转移的机制。R_c>0.5 nm代表由电多极相互作用效应引起的猝灭，R_c≤0.5 nm代表由交换相互作用效应引起的猝灭[21]。

$$R_c \approx 2\left(\frac{3V}{4\pi X_c Z}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{4}$$

式(4)中：V为晶胞体积，X_c为猝灭浓度，Z为晶胞分子数。由式(4)计算可得R_c的值为2.402 nm(R_c>0.5 nm)，Dy^{3+}离子之间的能量转移机制为电多极的相互作用。电多极相互作用的具体类型包括偶极-偶极(d-d)、偶极-四极(d-q)和四极-四极(q-q)相互作用，可以通过式(5)判断[22]：

$$\lg\frac{I}{z} = -\frac{\theta}{3}\lg z + K \tag{5}$$

式(5)中：I为发射强度；z为Dy^{3+}离子的掺杂浓度；K为常数；θ=6，8，10，分别对应d-d、d-q和q-q相互作用。图5(c)显示了lg(*I*/*z*)与lg(*z*)的依赖关系曲线，通过线性拟合结果可知，θ=5.91，接近于6，且决定系数R^2=0.998 5，说明拟合结果良好，表明d-d相互作用是BYB:*z*Dy荧光粉中Dy^{3+}离子间能量转移的主要机制。

2.3　BYB:*z*Dy荧光粉的色度坐标

色度坐标可以判断荧光粉发光的颜色区域，是在实际照明应用中的一个重要因素，因此通过BYB:*z*Dy(*z*=0.01，0.03，0.05，0.07，0.09)荧光粉的发射光谱计算出了对应的色度坐标。图6表明，最佳掺杂量的荧光粉样品BYB:0.05Dy的色度坐标位于(0.289 2，0.287 9)，该颜色属于蓝白光区域。该荧光粉的最佳激发波长为351 nm，处于紫外光区域，与紫外芯片的发射波长接近，说明该荧光粉能够有效地被紫外芯片激发，发射出蓝白色光，与红色荧光粉封装可得到白光发射，证明其具有在白光LED中应用的潜力。

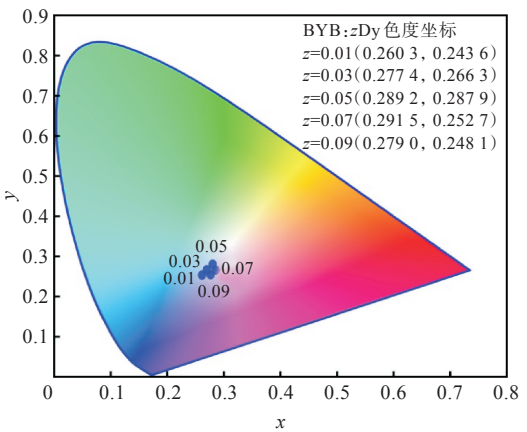

图6　BYB:*z*Dy荧光粉的色度坐标图

Fig. 6　Chromaticity coordinate plot of BYB:*z*Dy phosphors

3　结　论

本研究通过高温固相法，采用多步烧成制度制备了一系列新型单相BYB:*z*Dy荧光粉。稀土离子Dy^{3+}掺杂进入BYB基质中会主要取代离子半径较小的Y^{3+}位点，从而增大晶胞参数，使衍射角向小角度偏移。同时由于Y^{3+}位点存在高度对称性，增强了Dy^{3+}离子的$^4F_{9/2}\rightarrow{}^6H_{15/2}$跃迁的发射强度，在最佳激发波长为351 nm下的BYB:*z*Dy荧光粉存在基质的发射峰和Dy^{3+}离子的特征发射峰，最强发射峰在481 nm处。Dy^{3+}离子的的最佳掺杂量为*z*=0.05，其猝灭机理为偶极-偶极(d-d)相互作用的非辐射能量转移。对荧光粉的色度坐标进行计算，发现最佳掺杂浓度的荧光粉的色度坐标位于蓝白光区域，与红色荧光粉协调发射可产生白光，其在白光LED中的应用具有很大潜力。

参考文献

[1] ZHANG Z W, YANG N, LI Z, et al. A multi-centre activated single-phase white light phosphor with high efficiency for near-UV based WLEDs [J]. Inorganic Chemistry Frontiers, 2023, 10(14): 4230−4240.

[2] WANG C, ZHENG X Z, YUE L, et al. Color tunable single-phase cyclosilicate $KBaScSi_3O_9$: Eu^{2+}/Tb^{3+}/Sm^{3+} for *n*-UV pumped wLEDs [J]. Materials Research Bulletin, 2024, 172: 112674.

[3] LI Z B, SETO T, WANG Y H. Enhanced thermal stability of red-emitting $Sr_2Si_5N_8$: Eu^{2+} phosphors from triggered applicable trap level via rare earth ions co-doping [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(1): 2309086.

[4] 罗娟,陈世碧,姚植彩,等.稀土离子掺杂荧光材料在防伪技术领域的研究进展[J].武汉工程大学学报,2023,45(5):482−489.

[5] 李江,李万圆,刘欣,等.固态照明/显示用荧光陶瓷研究进展[J].发光学报,2021,42(5):580−604.

[6] 刘凯,李孝斌,吴锐敏,等.新型绿色荧光粉 CeO_2: Mn(Ⅱ)的发光性能研究[J].武汉工程大学学报,2024,46(1):38−42,49.

[7] MEHARE M D, MEHARE C M, SWART H C, et al. Recent development in color tunable phosphors: a review [J]. Progress in Materials Science, 2023, 133: 101067.

[8] 洪广言.稀土发光材料的研究进展[J].人工晶体学报,2015,44(10):2641−2651.

[9] VU T H Q, STEFAŃSKA D, DEREŃ P J. Effect of A-cation radius on the structure, luminescence, and temperature sensing of double perovskites A_2MgWO_6 doped with Dy^{3+} (A=Ca, Sr, Ba) [J]. Inorganic Chemistry, 2023, 62(49): 20020−20029.

[10] 彭霞,李淑星,刘学建,等. Eu^{2+}/Tb^{3+}掺杂的 $Sr_2Si_5N_8$ 基荧光粉的制备与发光性能[J].无机材料学报,2015,30(4):397−400.

[11] SONG R T, ZHANG Z H, LI H, et al. A single-phase white-emitting $La(BO_3, PO_4)$:Dy^{3+} phosphor with high thermostability [J]. Ceramics International, 2023, 49(4): 6965−6973.

[12] ZHAO S G, YAO J Y, ZHANG G C, et al. $Ba_3Y_2B_6O_{15}$, a novel cubic borate [J]. Acta Crystallographica Section C: Crystal Structure Communications, 2011, 67(7): i39−i41.

[13] ANNADURAI G, LI B, DEVAKUMAR B, et al. Synthesis, structural and photoluminescence properties of novel orange-red emitting $Ba_3Y_2B_6O_{15}$: Eu^{3+} phosphors [J]. Journal of Luminescence, 2019, 208: 75−81.

[14] ZHANG X J, ZHANG Z Q, FENG Y M, et al. Luminescence performance of bismuth activated $Ba_3Lu_2B_6O_{15}$ phosphors [J]. Journal of Molecular Structure, 2023, 1294(Part 2): 136523.

[15] HUANG X X, ZHANG D, LI Z, et al. Structural origin of blue luminescence in Ce-doped $Ba_2Y_5B_5O_{17}$ and $Ba_3Y_2B_6O_{15}$ with multiple cation sites and occupational disorder [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 797: 890−895.

[16] LI B, ANNANURAI G, SUN L L, et al. High-efficiency cubic-phased blue-emitting $Ba_3Lu_2B_6O_{15}$: Ce^{3+} phosphors for ultraviolet-excited white-light-emitting diodes [J]. Optics Letters, 2018, 43(20): 5138−5141.

[17] SUN Z S, ZHU Z P, GUO Z Y, et al. Electronic structure and luminescent properties of Ce^{3+}-doped $Ba_3Lu_2B_6O_{15}$, a high-efficient blue-emitting phosphor [J]. Ceramics International, 2019, 45(6): 7143−7150.

[18] DUKE A C, HARIYANI S, BRGOCH J. $Ba_3Y_2B_6O_{15}$: Ce^{3+} : a high symmetry, narrow-emitting blue phosphor for wide-gamut white lighting [J]. Chemistry of Materials, 2018, 30(8): 2668−2675.

[19] LI B, LIANG J, SUN L L, et al. Cyan-emitting $Ba_3Y_2B_6O_{15}$: Ce^{3+}, Tb^{3+} phosphor: a potential color converter for near-UV-excited white LEDs [J]. Journal of Luminescence, 2019, 211: 388−393.

[20] HUANG X Y, GUO H, SUN L L, et al. A high-efficiency, broadband-excited cyan-emitting $Ba_3Lu_2B_6O_{15}$:Ce^{3+},Tb^{3+} phosphor for near-UV-pumped white light-emitting diodes [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 787: 865−871.

[21] LUO J, WU K T, YAO Z C, et al. Tunable photoluminescence of intrinsic oxygen vacancies and Bi^{3+}/Eu^{3+}/Li^{+} tridoped BaZnOS for application in wLEDs [J]. Ceramics International, 2023, 49(22): 35524−35533.

[22] YUE L, ZHENG X Z, XIA P J, et al. Structure and optical properties of stable Bi/Eu codoped borophosphate $La_7O_6(BO_3)(PO_4)_2$ phosphors for application in wLEDs [J]. Ceramics International, 2024, 50(7): 10947−10958.

本文编辑:苗 变