

白光荧光粉 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ 的制备及 发光性能研究

戚世梅¹ 周卫新³ 赵文玉^{2*} 刘 军³

(1.新乡市质量技术监督检验测试中心,新乡 453000;2.内蒙古科技大学化学与化工学院,包头 014010;
3.英特美光电(苏州)有限公司,苏州 215555)

摘 要 通过高温固相法制备白光荧光粉 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$,并利用 XRD 和光致发光光谱分别对样品的晶体结构和发光性能进行表征。结果表明, Dy^{3+} 作为发光中心取代 Y^{3+} 进入基质 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}$ 的晶格中并未改变其晶体结构。样品的激发光谱是由 Dy^{3+} 的 $f-f$ 特征激发跃迁组成,主峰为 353nm。样品的发射光谱由 Dy^{3+} 的两个特征发射跃迁 ${}^4\text{F}_{9/2}\rightarrow{}^6\text{H}_{15/2}$ (483nm)和 ${}^4\text{F}_{9/2}\rightarrow{}^6\text{H}_{13/2}$ (575nm)组成;由于 Dy^{3+} 主要处于高对称性的格位, Dy^{3+} 发射以磁偶极跃迁 ${}^4\text{F}_{9/2}\rightarrow{}^6\text{H}_{15/2}$ 为主。发生浓度淬灭的主要原因是 Dy^{3+} 离子之间的双极子-双极子相互作用。样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:0.06\text{Dy}^{3+}$ 的发光强度最高,其 CIE 色坐标和相关色温分别为 (0.3122,0.3676)和 6282K,位于白光区域,接近于标准白光源 D_{65} 。随着温度的升高,由于热猝灭,样品的发光强度逐渐下降;当温度达到 140℃时,样品的发光强度下降 50%。基于 Arrhenian 公式计算,相对应的热活化能为 0.3056eV,高于白光 $\text{Na}_3\text{GdP}_2\text{O}_8:\text{Dy}^{3+}$ 。实验表明,单基质的 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ 可作为白光荧光粉应用于 UV-LED 器件中。

关键词 荧光粉,光致发光, $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$

Preparation and luminescent property of $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ white phosphor

Qi Shimei¹ Zhou Weixin³ Zhao Wenyu² Liu Jun³

(1.Xinxiang County for Quality Technical and Supervision,Xinxiang 453000;
2.School of Chemistry and Chemical Engineering,Inner Mongolia University of Science and
Technology,Baotou 014010;3.Intematix Photonics (Suzhou) Co.,Ltd.,Suzhou 215555)

Abstract $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ white phosphor was synthesized by a high-temperature solid-state reaction.XRD and photoluminescence spectrum were utilized to characterize its crystal structures and luminescent properties, respectively.Results indicated that Dy^{3+} ions was as luminescence centers substitute for Y^{3+} ions in the crystal lattice of $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}$ without changing its crystal structure. The excitation spectrum presented the $4f-4f$ characteristic transitions of Dy^{3+} with the main peak at 353nm.The characteristic emission consisted of ${}^4\text{F}_{9/2}\rightarrow{}^6\text{H}_{15/2}$ (483nm) and ${}^4\text{F}_{9/2}\rightarrow{}^6\text{H}_{13/2}$ (575nm) transitions of Dy^{3+} .The former was dominant due to high symmetry of Dy^{3+} .The concentration quenching between Dy^{3+} ions was demonstrated to be dipole-dipole interaction.The optimum phosphor $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:0.06\text{Dy}^{3+}$ showed a white-light emission with the color coordinate of (0.3122,0.3676) and correlated color temperature (CCT) of 6282K,closing to the CIE Illuminant D_{65} .The emission intensity decreased with the increasing temperature due to the thermal quenching.The emission intensity remained about 50% compared with that at 28℃.The thermal activation energy was 0.3056eV, higher than that of $\text{Na}_3\text{GdP}_2\text{O}_8:\text{Dy}^{3+}$. The $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ was a promising white phosphor for the n-UV excited white-LEDs.

Key words phosphor,photoluminescence, $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$

近年来,白光 LED 因具有低成本、高光效、长寿命、节能、环保等优点而被人们所重视。实现白光 LED 的方式主要有 3 种:三基色 LED 芯片直接配光,但价格高;蓝光芯片激发黄色荧光粉[$(\text{Lu},\text{La},\text{Y})_3(\text{Al},\text{Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$]实现白光,但色稳定性差;

UV-LED 芯片激发三基色荧光粉合成的白光具有光效高、显色性好、色温可调,以及价格低等优点,因而逐渐实现商用化。然而,在实现白光的过程中,三基色荧光粉之间却相互吸收,粒度大小分布不一致,形貌不同,从而降低了发光效率^[1-2]。单基质白光荧

基金项目:内蒙古自然科学基金资助项目(2018MS02002)

作者简介:戚世梅(1982-),女,硕士,中级工程师,主要从事功能材料研究和测试。

联系人:赵文玉(1980-),女,副教授。

光粉不仅可克服这些缺点,而且稳定性高、成本低、流明效率高、色彩还原性好^[3],所以对其进行研究的意义重大。

单基质白光荧光粉是在合适的基质中同时掺杂敏化剂和激活剂或其他合适的发光中心,从而实现白光,如 $\text{Dy}^{3+}-\text{Tm}^{3+}-\text{Eu}^{3+}$ ^[3]、 $\text{Eu}^{3+}-\text{Tm}^{3+}-\text{Tb}^{3+}$ ^[4]、 Dy^{3+} ^[5]等。其中, Dy^{3+} 主要有 $^4\text{F}_{9/2}-^6\text{H}_{15/2}$ (470~500nm,蓝色)和 $^4\text{F}_{9/2}-^6\text{H}_{13/2}$ (570~600nm,黄色)两个跃迁。前者为一般跃迁,其强度几乎不受基质的变化;后者是超灵敏跃迁,在不同的基质中,发射强度有较大幅度的变化。因此,通过改变基质,可以调整蓝光和黄光的强度比,使其达到合适的比例来获得白光。在基质的选择上,硼酸盐($\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}$)作为不同稀土离子的掺杂基质表现出优越的发光性能、良好的稳定性,以及高的内量子效率,如 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Ce}^{3+}$ ^[6]、 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ ^[7]。然而,对于单基质的 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}$,白光LED发光材料却鲜有报道。基于以上分析,本实验利用高温固相法制备单基质白光荧光粉 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$,并对其发光性能和稳定性进行研究。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

氧化钇(Y_2O_3 ,高纯,99.99%),包头稀土研究院;氧化镱(Dy_2O_3 ,高纯,99.99%),包头稀土研究院;碳酸钡(BaCO_3 ,分析纯),国药集团化学试剂有限公司;硼酸(H_3BO_3 ,分析纯),国药集团化学试剂有限公司。

X-射线衍射仪(XRD,D/max-III B),日本理学公司;荧光光谱仪(RF-5301PC),日本岛津公司。

1.2 样品制备

通过高温固相法,以 Y_2O_3 和 Dy_2O_3 ,以及 BaCO_3 和 H_3BO_3 为原料制备 $\text{Ba}_3\text{Y}_{2-x}\text{B}_6\text{O}_{15}:x\text{Dy}^{3+}$ ($0 < x \leq 0.12$)白光荧光粉。按化学计量比称取相应的原料置于玛瑙研钵中(H_3BO_3 质量过量10%);充分研磨30min后放入刚玉坩埚中,加盖放入箱式炉中,在500℃下预烧4h,冷却、研磨;然后,在850℃下煅烧8h,冷却、研磨;最后在920℃下煅烧8h,冷却、研磨,即得所需样品单基质白光荧光粉 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ 。

1.3 性能表征

采用X-射线衍射仪对样品的物相进行测试,Cu靶 $\text{K}\alpha$, $\lambda = 0.15406\text{nm}$,管电压35kV,管电流60mA;利用荧光光谱仪对样品的光致发光性能进

行测试,150W 氙灯作为光源;在自制的加热控制器下(控制精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)测试样品温度相关的光致发光性质。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

图1为样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:0.06\text{Dy}^{3+}$ 、 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:0.12\text{Dy}^{3+}$ 和基质 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}$ 的XRD图,由图可见,样品的衍射峰与基质 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}$ 的衍射峰一致。对比文献[6-7]可知,样品中没有生成其他杂相,说明掺杂离子 Dy^{3+} 进入到基质 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}$ 的晶格中,并没有改变基质的晶体结构。这是因为 Dy^{3+} (配位数 $N=6$,半径 $r=91.2\text{pm}$)和 Y^{3+} ($N=6$, $r=90\text{pm}$)的价态一致,半径相近^[7]。根据泡利定则,它们之间可以相互替代,不会造成对基质晶体结构的很大影响。由此可见,本实验制备的样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:x\text{Dy}^{3+}$ ($0 < x \leq 0.12$)均为单一基质的荧光粉。

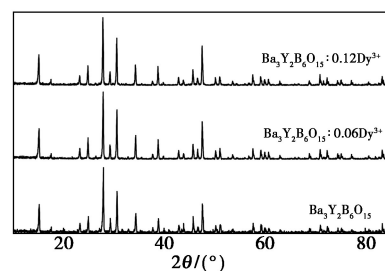


图1 样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:0.06\text{Dy}^{3+}$ 、 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:0.12\text{Dy}^{3+}$ 和基质 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}$ 的XRD谱图

2.2 发光性能分析

图2为样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ 的激发光谱图,监控波长为486nm和575nm。由图2可见,样品的激发光谱均由 Dy^{3+} 的 $f-f$ 特征激发跃迁组成,如 $^6\text{H}_{15/2} \rightarrow ^5\text{P}_{3/2}$ (326nm)、 $^6\text{H}_{15/2} \rightarrow ^6\text{M}_{21/2}$ (353nm)、 $^6\text{H}_{15/2} \rightarrow ^6\text{P}_{7/2}$ (366nm)、 $^6\text{H}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ (388nm)、 $^6\text{H}_{15/2} \rightarrow ^4\text{G}_{11/2}$ (428nm)、 $^6\text{H}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ (455nm)和 $^6\text{H}_{15/2} \rightarrow ^4\text{F}_{9/2}$ (473nm)。其中,主峰为353nm。由图2可见,样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ 在350~370nm存

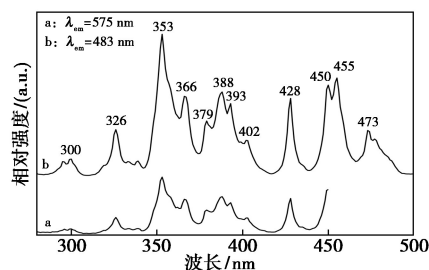


图2 样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ 的激发光谱图

在较强的激发峰,说明样品可以很好地被 UV 光所激发,可应用于 UV-LED 器件中。

图 3(a)为样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:x\text{Dy}^{3+}$ 的发射光谱图($0.02 \leq x \leq 0.12$),激发波长为 353nm。由图 3(a)可见,样品的发射光谱均由 Dy^{3+} 的两个特征发射跃迁 $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{15/2}$ (483nm) 和 $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{13/2}$ (575nm) 组成,分别位于蓝光和黄光区域,主峰为 485nm。根据选择定则^[7],当 Dy^{3+} 主要处于高对称性的格位时, Dy^{3+} 发射将以磁偶极跃迁 $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{15/2}$ 为主;当 Dy^{3+} 主要处于非对称性的格位时, Dy^{3+} 发射将以受迫电偶极跃迁 $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{13/2}$ 为主。在立方体晶体 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}$ 的结构中: Y^{3+} 位于 $[\text{YO}_6]$ 八面体中,具有高对称性 O_h 的格位^[6-7];当 Dy^{3+} 取代 Y^{3+} 时, Dy^{3+} 也会位于高对称的格位。因此,在 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:x\text{Dy}^{3+}$ 的发射光谱中, Dy^{3+} 发射以 $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{15/2}$ 为主。

在 LED 荧光粉的实际应用中,荧光粉发光强度的高低直接决定其 LED 光效的高低,其中,掺杂浓度也是影响发光强度的重要因素之一。图 3(b)为样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:x\text{Dy}^{3+}$ 与掺杂浓度(x)之间的关系。由图 3(b)可见,随着掺杂浓度的增加,样品的发光强度先增加后降低,最佳掺杂浓度为 0.06。原因在于,随着 Dy^{3+} 浓度的增加,发光中心的数量增加,发光强度逐渐提高;但是,当 Dy^{3+} 浓度过高时, $\text{Dy}^{3+}-\text{Dy}^{3+}$ 之间的距离变小, $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{F}_{3/2}$ 和 $^6\text{H}_{15/2} \rightarrow ^6\text{H}_{9/2}$ 能级对之间发生交叉弛豫,形成浓度淬灭效应,从而引导致光强度下降。

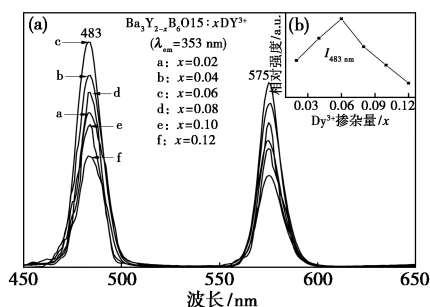


图3 样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:x\text{Dy}^{3+}$ 的发射光谱图(a)和 Dy^{3+} 的掺杂浓度对其发光强度的影响(b)

在荧光粉中,引起浓度淬灭机理有很多。根据 Blasse 的公式^[8],掺杂离子的临界距离(R_c)可由公式(1)计算得到。

$$R_c = 2[(3V)/(4\pi x_c Z)]^{1/3} \quad (1)$$

式中, V 为基质的晶胞体积, $\text{\AA}^3$; x_c 为最佳掺杂浓度,%(摩尔分数); Z 为每个晶胞中阳离子的数目,个。

当 $R_c > 5\text{\AA}$ 时,能量损失以多极子的相互作用为主; $R_c < 5\text{\AA}$ 时,能量损失以离子之间的相互交叉弛豫为主。对于样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$,当 $V = 2906.27\text{\AA}^3$, $x_c = 6\text{mol}\%$, $Z = 8$ 时, $R_c = 22.61\text{\AA}$ 。所以, Dy^{3+} 的浓度淬灭以多极子的相互作用为主。多极子的相互作用又可分为双极子-双极子($d-d$)、双极子-四极子($d-q$)和四极子-四极子($q-q$)相互作用。根据公式(2)^[9]:

$$I/x = K[1 + \beta(x)^{\theta/3}]^{-1} \quad (2)$$

式中, K 和 β 为研究体系有关的常量参数; x 为 Dy^{3+} 的淬灭浓度,0.06~0.12; I 为 Dy^{3+} 的发光强度,483nm。

当 $\theta = 6, 8$ 和 10 时,分别对应于 $d-d$ 、 $d-q$ 和 $q-q$ 相互作用。

将公式(2)两边分别取对数后,得到公式(3)。

$$\lg(I/x) = \lg K - \lg \beta - \theta/3 \lg(x) \quad (3)$$

因此, $\lg(I/x)$ 与 $\lg(x)$ 线性关系的斜率为 $-\theta/3$ 。如图 4 所示, $\lg(I/x)$ 与 $\lg(x)$ 之间存在最佳的线性关系,斜率即 $-\theta/3 = -2.013$ 。因此, θ 接近 6。由此说明,导致 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ 浓度淬灭的最终原因是 Dy^{3+} 之间的 $d-d$ 相互作用。

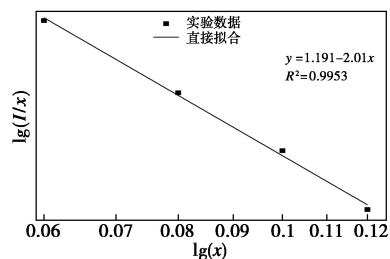


图4 $\lg(I/x)$ 和 $\lg(x)$ 之间的线性关系

基于图 3 的分析,样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:0.06\text{Dy}^{3+}$ 的发光强度最高,其 CIE 色坐标为 (0.3122, 0.3676),位于白光区域。根据 McCamy 相关色温的计算公式(4)^[10]:

$$T = 449n^3 + 3525n^2 + 6823.3n + 5520.33; \quad n = (x - 0.3320)/(0.1858 - y) \quad (4)$$

式中, T 为相关色温,K; (x, y) 对应于样品的 CIE 色坐标(0.3122, 0.3676)。因此,计算相关色温为 6282K。此结果接近于欧洲广播联盟(EBU)制定的标准白光源 D_{65} [(0.3127, 0.3290)、6504K],说明此样品可以用于 UV-LED 显示器件中。

图 5 为样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:0.06\text{Dy}^{3+}$ 的发光强度(483nm)与温度之间的关系($\lambda_{\text{ex}} = 353\text{nm}$, 28~200℃)。由图可见,随着温度的升高,样品的发光强度逐渐下降。当温度达到 140℃ 时,样品的发光强

度大约是 28℃ 时的 50%。温度猝灭的趋势与 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ 和 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Ce}^{3+}$ (50%, 121℃) 接近, 高于 $\text{Lu}_6(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{Si}_3\text{O}_{10}):\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ (80%, 100℃)^[11], 说明样品热稳定性较好。众所周知, 温度升高, 发光强度的下降是热猝灭造成的; 当发光中心被激发后, 由于晶格振动加剧, 发光中心的晶格弛豫增强, 热电子-声子的相互作用使其非辐射跃迁几率增加, 降低辐射跃迁的几率, 导致发光强度降低。通过 Arrhenian 公式[式(4)]可以计算说明热猝灭效应。

$$I_0/I_T - 1 = \text{Ae}^{(-\Delta E/kT)} \quad (4)$$

式中, k 为波尔兹曼常数, $8.625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$; ΔE 为热活化能, eV ; I_0 为初始相对发光强度; I_T 为给定温度下的相对发光强度。

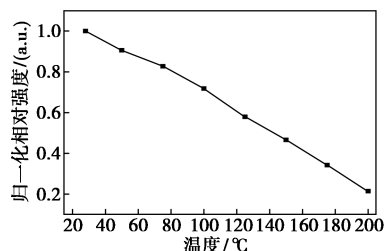


图 5 样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:0.06\text{Dy}^{3+}$ 的发光强度与温度之间的关系

将公式(4)两边取对数, $\ln(I_0/I_T - 1)$ 与 $1/kT$ 线性关系的斜率为 $-\Delta E$ 。如图 6 所示, 相对应的 ΔE 为 0.3056 eV, 接近于白光 $\text{Sr}_3\text{Y}(\text{PO}_4)_3:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$ (0.31 eV) 荧光粉^[8], 高于 $\text{Na}_3\text{GdP}_2\text{O}_8:\text{Dy}^{3+}$ (0.26 eV)^[9]。由此可见, 样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ 具有热稳定性, 可应用于 UV-LED 中。

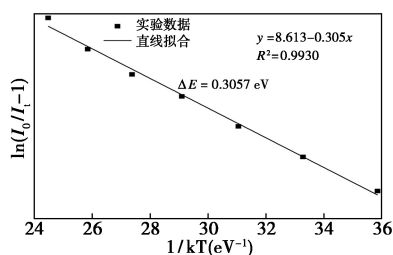


图 6 $\ln(I_0/I_T - 1)$ 与 $1/kT$ 的线性关系

3 结论

利用高温固相法制备一系列单基质的白光荧光粉 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:x\text{Dy}^{3+}$ ($0.02 \leq x \leq 0.12$), 在 353 nm 激发下, 样品发射出由蓝光 (483 nm) 和黄光 (575 nm) 合成的白光。由于 Dy^{3+} 在 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}$ 的晶格中占据高对称的格位 (O_h), 所以样品的发射主峰为 483 nm。 Dy^{3+} 之间的临界距离为 22.61 Å。

Dy^{3+} 的 $d-d$ 相互作用是导致样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ 发生浓度猝灭的最终原因。荧光粉 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:0.06\text{Dy}^{3+}$ 的发光强度最高, 其色坐标趋于标准白光源 D_{65} , 并表现出优异的热稳定性, 说明样品可作为白光荧光粉直接应用于 UV-LED 器件中。然而, 样品 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Dy}^{3+}$ 的色温偏高 (6282 K), 不适合暖色白光 LED。但是, 可能通过共掺杂 Sm^{3+} 或 Eu^{3+} , 利用 Dy^{3+} 与 Sm^{3+} 或 Eu^{3+} 之间的能量传递得到暖白光荧光粉 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Sm}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$ 或 $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$ 。

参考文献

- [1] Jiao Y H, Wu X L, Ren Q, et al. Photoluminescence and energy transfer of a color tunable phosphors: $\text{Sr}_3\text{La}(\text{BO}_3)_3:\text{Ln}^{3+}$ ($\text{Ln}=\text{Dy}, \text{Eu}, \text{Tb}$) for warm white light UV-excited WLEDs [J]. Optics and Laser Technology, 2019, 109: 470-479.
- [2] Kim Dorim, Moon Byung Kee, Park Sung Heum, et al. Full-color tuning in europium doped phosphosilicate phosphors via adjusting crystal field modulation or excitation wavelength [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 770: 411-418.
- [3] Cai G M, Yang N, Liu H X, et al. Single-phased and color tunable $\text{LiSrBO}_3:\text{Dy}^{3+}, \text{Tm}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ phosphors for white-light-emitting application [J]. Journal of Luminescence, 2017, 187: 211-220.
- [4] Yahiaoui Z, Hassairi M A, Dammak M, et al. Tunable luminescence and near white-light emission of $\text{YPO}_4:\text{Eu}^{3+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ phosphors [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 763: 56-61.
- [5] Zhao W Y, An S L, Bin F, et al. The VUV-Vis luminescent properties of $\text{NaYFPO}_4:\text{Dy}^{3+}$ Phosphor [J]. Journal of Luminescence, 2012, 132(4): 953-956.
- [6] Duke Anna C, Hariyani Shruti, Brgoch Jakoah. $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Ce}^{3+}$ —A high symmetry, narrow-emitting blue phosphor for wide-gamut white lighting [J]. Chemistry of Materials, 2018, 30: 2668-2675.
- [7] Pan J L, Guo Z Y, Zhu Z P, et al. Synthesis and photoluminescent properties of high-efficient color-tunable $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{B}_6\text{O}_{15}:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ phosphors [J]. Ceramics International, 2018, 44: 20732-20738.
- [8] Leng Z H, Li L P, Che X L, et al. A bridge role of Tb^{3+} in broadband excited $\text{Sr}_3\text{Y}(\text{PO}_4)_3:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$ phosphors with superior thermal stability [J]. Materials and Design, 2017, 118: 245-255.
- [9] Xie M L, Min X, Huang Z H, et al. Synthesis and photoluminescence properties of novel thermally robust $\text{Na}_3\text{GdP}_2\text{O}_8:\text{Re}^{3+}$ ($\text{Re}=\text{Sm}, \text{Dy}$) phosphors [J]. Chemical Physics Letters, 2018, 710: 84-89.
- [10] McCamy C S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates [J]. Color Research and Application, 1992, 17: 142-144.
- [11] Li K, Lian H Z, Han Y Q, et al. $\text{BaLu}_6(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{Si}_3\text{O}_{10}):\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$: a novel blue-green emission phosphor via energy transfer for UV LEDs [J]. Dyes Pigments, 2017, 139: 701-707.

收稿日期: 2018-12-04

修稿日期: 2019-02-12