

文章编号: 1000-7032(2012)11-1219-05

Ba²⁺ 掺杂对 Sr₃Al₂O₆:Eu²⁺ 红色荧光粉发光性能的影响

张 莉¹, 邱克辉^{1*}, 鲁雪光², 赵 昆², 尚 进¹

(1. 成都理工大学 材料科学技术研究所, 四川 成都 610059;

2. 四川新力光源有限公司, 四川 成都 611731)

摘要: 采用高温固相法合成了(Sr_{1-x-y}Ba_x)₃Al₂O₆:3yEu²⁺红色荧光材料,通过XRD、荧光光谱和热稳定性测试分析,分别研究了Eu²⁺、Ba²⁺掺杂对样品的晶体结构、发光性能和热稳定性的影响。XRD测试结果表明,在1200℃保温3h条件下合成了具有立方晶体结构、空间群为Pa3的Sr₃Al₂O₆纯相样品,Eu²⁺、Ba²⁺的掺入并没有改变其基质晶格的结构类型。荧光光谱分析表明,Eu²⁺的摩尔分数为4%时,(Sr_{0.98-y}Ba_{0.02})₃Al₂O₆:3yEu²⁺样品的发射峰最强,Ba²⁺的掺入使样品的发射峰发生红移而发射强度降低,且随Ba²⁺浓度的增加红移越发明显。此外,Ba²⁺的掺杂提高了Sr₃Al₂O₆:Eu²⁺样品的热稳定性。

关键词: (Sr_{1-x}Ba_x)₃Al₂O₆; 高温固相法; 红色荧光粉; 发光性能; 热猝灭

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20123311.1219

Effect of Doping Ba²⁺ Ions on Luminescence Properties of Sr₃Al₂O₆:Eu²⁺ Red Phosphor

ZHANG Li¹, QIU Ke-hui^{1*}, LU Xue-guang², ZHAO Kun², SHANG Jin¹

(1. Institute of Materials Science and Technology of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Sichuan Sunfor Lighting Co. Ltd., Chengdu 611731, China)

* Corresponding Author, E-mail: qkh2188@163.com

Abstract: Red-emitting phosphors (Sr_{1-x-y}Ba_x)₃Al₂O₆:3yEu²⁺ were synthesized by a solid-state reaction in a reducing atmosphere. X-ray diffraction and fluorescence spectrophotometer were used to investigate the effects of doping Eu²⁺ and Ba²⁺ ions on the crystal structure, luminescence properties and thermal stability of the samples. The XRD results indicate that the samples prepared at 1200℃ for 3 h generate a single Sr₃Al₂O₆ phase with cubic system and Pa3 space group. The crystal structure type of the host has not been changed by doping Eu²⁺ and Ba²⁺ ions. The emission spectra illustrate that the emission intensity of (Sr_{0.98-y}Ba_{0.02})₃Al₂O₆:3yEu²⁺ reaches the maximum when the mole fraction of Eu²⁺ is 4%. Furthermore, the emission peaks of (Sr_{1-x-y}Ba_x)₃Al₂O₆:3yEu²⁺ show a red shift and decrease of emission intensity compared with Sr_{3(1-y)}Al₂O₆:3yEu²⁺ under the excitation of 460 nm. Both of them have broad emission bands due to the 4f⁶5d¹→4f⁷ transition of the Eu²⁺ ions. Finally, the thermal stability of Sr₃Al₂O₆:Eu²⁺ is enhanced by doping Ba²⁺ ions.

Key words: (Sr_{1-x}Ba_x)₃Al₂O₆; solid-state reaction; red phosphor; luminescence properties; thermal quenching

收稿日期: 2012-06-29; 修订日期: 2012-09-03

基金项目: 四川省科技攻关重点项目(08GY0082)资助

作者简介: 张莉(1988-),女,湖北宜昌人,主要从事发光材料的研究。

E-mail: zll134589@163.com

1 引 言

白光 LED 由于具有体积小、寿命长、节能、环保等一系列优点而被称为第四代固体照明光源^[1]。现在, InGaN 基蓝色发光二极管与 YAG:Ce 黄色荧光粉相组合是实现白光的主要方式,但这种方式的缺点是 LED 的光谱中缺乏红光成分,器件的显色指数偏低,不利于某些领域的应用。目前,解决此问题的主要途径就是在蓝光芯片上涂覆红色荧光粉,因此,研究白光 LED 用红色荧光粉具有重要的现实意义^[2-3]。1998 年, Katsumata^[4]首次报道了发射红光的 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$, 之后, 能被蓝光激发的 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 红色发光材料便成为人们研究的热点。 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 的合成方法主要有高温固相法^[5]、溶胶-凝胶法^[6]、水热法^[7]、微波合成法^[8]、燃烧法^[9]等, Eu^{2+} ^[8]、 Dy^{3+} ^[4]、 Pr^{3+} ^[6]、 Tb^{3+} ^[10]、 Ce^{3+} ^[5]等稀土离子都可以在 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 基质中单掺或共掺作为发光中心, 氮、氯等也可以在材料中占据氧的晶格结点^[11-12], Prodjosantoso 等^[13]也研究了 Sr^{2+} 掺杂的 $\text{Ca}_{3-x}\text{Sr}_x\text{Al}_2\text{O}_6$ 的微观结构。但是, 本文向 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 基质中掺碱土金属 Ba^{2+} 以改善其发光性能的研究尚鲜有报道。

本文采用高温固相法, 在炭粉提供的弱还原气氛下合成了 $(\text{Sr}_{1-x-y}\text{Ba}_x)_3\text{Al}_2\text{O}_6:3y\text{Eu}^{2+}$ 红色荧光粉, 研究了 Ba^{2+} 掺杂对合成样品的晶体结构、发光性能和热稳定性的影响。实验结果表明, Ba^{2+} 的掺入有利于提高 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{2+}$ 红色荧光粉的热稳定性。

2 实 验

2.1 样品制备

实验所用原料为 SrCO_3 (99.99%)、 BaCO_3 (99.99%)、 Al_2O_3 (99.99%)、 Eu_2O_3 (99.99%), 按化学计量比 $(\text{Sr}_{1-x-y}\text{Ba}_x)_3\text{Al}_2\text{O}_6:3y\text{Eu}^{2+}$ ($x = 0.005 \sim 0.04$, $y = 0.02 \sim 0.10$) 称取各物质的质量。将称取好的原料混合物放在玛瑙研钵中研磨 10 min 后装入小刚玉坩埚, 再将小坩埚放入大刚玉坩埚中, 大小坩埚间空隙用活性炭填充。将大坩埚放入箱式炉中加热至 1100°C 预烧 2 h 后, 升温至 1200°C 保温 3 h, 随炉冷却后取出即得合成样品。

2.2 测试与表征

采用丹东方圆公司的 X 射线衍射仪 DX-2700 测定合成样品的物相结构。射线源为 Cu 靶 $\text{K}\alpha_1$ 线, $\lambda = 0.154\ 056\ \text{nm}$, 管电压为 40 kV, 管电流为 30 mA, 2θ 扫描范围为 $10^\circ \sim 75^\circ$ 。采用法国 HORIBA Scientific 公司生产的 SPEX FLUOROMAX4 型荧光分光光度计测定合成样品的激发和发射光谱, 狭缝宽度为 1 nm, 光源为 150 W 的氙灯。测试激发光谱时, 测试经校正后的激发光谱 S1C/R1C, 以扣除光源的影响; 测试发射光谱时, 测试校正后的发射光谱 S1C。

3 结果与讨论

3.1 XRD 结果分析

图 1 给出了 1200°C 下保温 3 h 所得的 $\text{Sr}_{2.85}\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ 和 $(\text{Sr}_{0.93}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ 样品的 XRD 谱图。可以看出两个样品的衍射峰均与 JCPDS 卡片中的 No. 24-1187 吻合, 未发现其他明显衍射峰, 说明所合成的样品均为立方晶系的 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ (空间群 $Pa\bar{3}$), 晶格常数 $a = 1.584\ 4\ \text{nm}$ 。 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 结构中, Sr^{2+} 的半径为 $0.118\ \text{nm}$, Al^{3+} 的半径为 $0.039\ \text{nm}$, 而 Eu^{2+} 的半径为 $0.117\ \text{nm}$, 与 Sr^{2+} 的半径最接近, 故 Eu^{2+} 进入基质晶格将占据 Sr^{2+} 的格位, 对基质晶格并没有明显的影响。 Ba^{2+} 的半径 ($0.135\ \text{nm}$) 比 Sr^{2+} 的稍大, 能部分取代 Sr^{2+} 形成固溶体, 而样品的 XRD 谱图也显示掺入 Ba^{2+} 并未改变晶体结构类型。

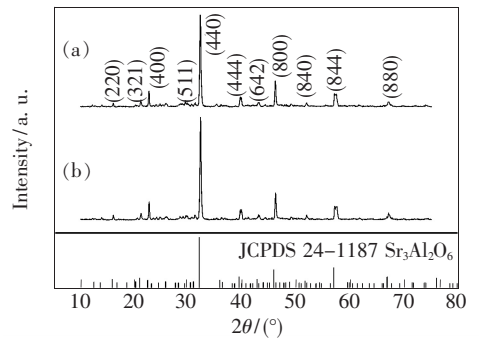


图 1 $(\text{Sr}_{0.93}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ (a) 和 $\text{Sr}_{2.85}\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ (b) 的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD patterns of $(\text{Sr}_{0.93}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ (a) and $\text{Sr}_{2.85}\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ (b)

3.2 发光性能分析

图 2、图 3 分别为掺入 Eu^{2+} 的摩尔分数为

5% 时, Sr₃Al₂O₆: Eu²⁺ 和 (Sr_{0.93}Ba_{0.02})₃Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ 样品的激发光谱和发射光谱。由图 2 可以看出, 在监控 615 nm 发射波长的情况下, 两样品的激发光谱形状相同, 为 380 ~ 570 nm 的宽带谱, 主峰位于 435 nm, 只是掺 Ba²⁺ 样品的激发峰强度低于不掺 Ba²⁺ 的样品。由图 3 可以看出, 在 460 nm 激发下, Sr₃Al₂O₆: Eu²⁺ 的发射光谱为 525 ~ 775 nm 的宽带谱, 主峰位于 615 nm。 (Sr_{0.93}Ba_{0.02})₃-Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ 的发射光谱与 Sr₃Al₂O₆: Eu²⁺ 的基本相同, 但是主峰位置却有轻微的红移, 位于 619 nm, 峰强较 Sr₃Al₂O₆: Eu²⁺ 要稍弱一些。两样品的激发光谱和发射光谱均为宽带谱, 这充分表明样品的发光是由 Eu²⁺ 的 4f⁶5d¹ → 4f⁷ 的跃迁产生的。

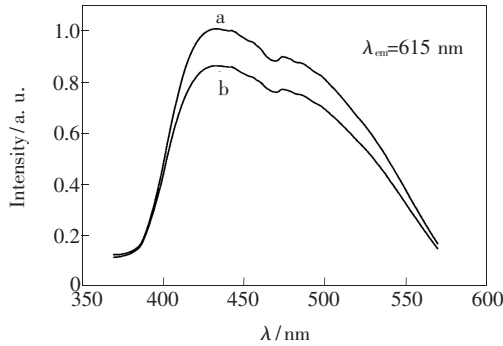


图 2 Sr_{2.85}Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ (a) 和 (Sr_{0.93}Ba_{0.02})₃Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ (b) 的激发光谱
Fig. 2 Excitation spectra of Sr_{2.85}Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ (a) and (Sr_{0.93}Ba_{0.02})₃Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ (b)

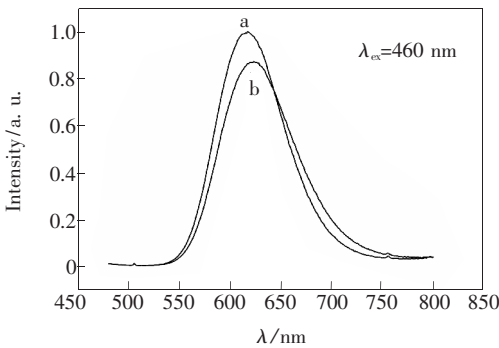


图 3 Sr_{2.85}Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ (a) 和 (Sr_{0.93}Ba_{0.02})₃Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ (b) 的发射光谱
Fig. 3 Emission spectra of Sr_{2.85}Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ (a) and (Sr_{0.93}Ba_{0.02})₃Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ (b)

在 λ_{ex} = 460 nm 蓝光激发下, (Sr_{0.95-x}Ba_x)₃-Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ 系列样品的发射波长与峰强如图 4 所示。当 x = 0, 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04

时, 对应的发射波长分别为 615, 616, 618, 619, 621, 626 nm。可以看出, 该系列样品的发射波长随着 Ba²⁺ 含量的增加而向长波方向移动, 同时发射峰强度随着 Ba²⁺ 含量的增加而逐渐降低。

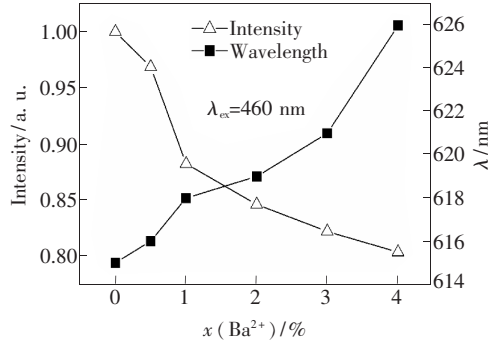


图 4 不同 Ba²⁺ 摩尔分数下的 (Sr_{0.95-x}Ba_x)₃Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ 的发射波长与发射峰强度
Fig. 4 Emission wavelengths and peak intensities of (Sr_{0.95-x}-Ba_x)₃Al₂O₆: 0.15Eu²⁺ with different Ba²⁺ mole fractions

由于 Eu²⁺ 的 5d 电子裸露在 5s²5p⁶ 的屏蔽之外, d → f 跃迁能量随环境改变而明显变化, 故其受周围氧离子形成的晶体场和 Eu—O 键共价键性质的影响较大, 因此, Eu²⁺ 的发射波长随着基质结构和组成的变化而变化。Sr₃Al₂O₆ 中存在 6 种不同的 Sr²⁺ 格位^[14], Eu²⁺ 进入基质晶格后, 随机的取代 Sr²⁺ 格位, 所以存在 6 种不同的 Eu—O 键。由于 Ba²⁺ 半径较 Sr²⁺ 半径稍大, 所以当 Ba²⁺ 占据 Sr²⁺ 晶格位置时, 会挤压周围的氧原子和 Eu²⁺。受到挤压的 Eu—O 键键长缩短, 共价性增强, 而 Eu²⁺ 的 5d 能级劈裂程度 D_q 与 Eu—O 键长的 5 次方成反比^[15], 因此处于这种格位的 Eu²⁺ 的能级劈裂程度就会加深, 发射波长红移。Ba²⁺ 的浓度越大, 样品的发射波长红移越明显。

Ba²⁺ 的掺入使样品发射峰强度下降, 这与 Ba²⁺ 和 Sr²⁺ 两者的离子半径差异有着密切的关系。正如前面所述, Ba²⁺ 取代 Sr²⁺ 后会导致 Eu—O 键受挤压而变短^[16], 基质晶体场的立方对称性变差, 进而造成发光强度下降^[16-17]。Ba²⁺ 的浓度越大, 对称性就越差, 故样品的发射峰强度随着 Ba²⁺ 含量的增加而降低。

3.3 Eu²⁺ 浓度对样品发光性能的影响

图 5 是不同浓度 Eu²⁺ 掺杂的 (Sr_{0.98-y}Ba_{0.02})₃-Al₂O₆: 3yEu²⁺ 在 460 nm 蓝光激发下的发射光谱。作为发光中心, Eu²⁺ 的含量对样品的发光性能有

着非常重要的影响。由图 5 可以看出,当 Eu^{2+} 的摩尔分数小于 4% 时,样品的发射峰强度随着 Eu^{2+} 浓度的增加而增大,在 Eu^{2+} 的摩尔分数为 4% 时达到最大值。这是由于 Eu^{2+} 在 $(\text{Sr}_{0.98-y}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 基质晶格中起发光中心的作用,当 Eu^{2+} 浓度较低时,发光中心的数目较少,于是导致发光强度偏低。当 Eu^{2+} 摩尔分数大于 4% 后,发射峰强度随着 Eu^{2+} 浓度的增加而下降。这是由于当 Eu^{2+} 浓度超过某一浓度后,相邻 Eu^{2+} 之间由于交叉弛豫作用,使得部分 Eu^{2+} 将能量传递给周围的 Eu^{2+} 或猝灭中心,而自己则通过无辐射跃迁至基态,使得发光强度降低。 Eu^{2+} 浓度越高,交叉弛豫作用越大,样品的发射强度下降越明显,即表现为浓度猝灭。

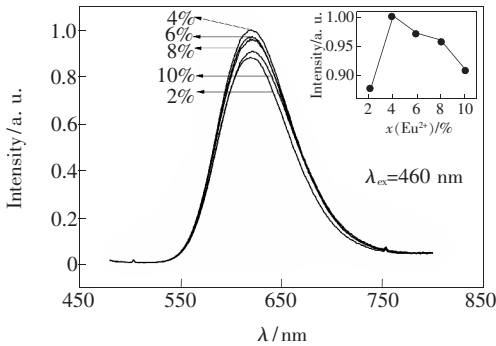


图 5 $(\text{Sr}_{0.98-y}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6:3y\text{Eu}^{2+}$ 发光强度随 Eu^{2+} 摩尔分数的变化

Fig. 5 Luminescent intensities of $(\text{Sr}_{0.98-y}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6:3y\text{Eu}^{2+}$ with different Eu^{2+} mole fractions

3.4 样品的热稳定性分析

图 6 为 $(\text{Sr}_{0.93}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ 与 $\text{Sr}_{2.85}\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ 的发射峰强度与温度变化的关系。由图 6 可以看出,两样品的发射峰强度均随着温度的升高而下降。当温度低于 100 $^{\circ}\text{C}$ 时,两样品的发射峰强度随温度的升高下降速率较快;高于 100 $^{\circ}\text{C}$ 之后,下降速率略微减慢。从 100 $^{\circ}\text{C}$ 升温至 250 $^{\circ}\text{C}$ 时, $(\text{Sr}_{0.93}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ 的发射峰强的下降速率比 $\text{Sr}_{2.85}\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ 要缓慢,250 $^{\circ}\text{C}$ 时, $\text{Sr}_{2.85}\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ 的强度只占其初始强度的 41.8%,而 $(\text{Sr}_{0.93}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ 的却有 47.5%,明显高于前者。这是由于 Eu^{2+} 在高价小离子构成的基质中,当碱土金属

的数量与其他离子相比较少时,其猝灭温度主要受晶格中格位大小的影响,格位越大,猝灭温度越高^[18]。当向 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 基质中掺入 Ba^{2+} 时,由于 Ba^{2+} 的离子半径比 Sr^{2+} 的离子半径大,导致晶格变大,所以掺入 Ba^{2+} 之后,样品的猝灭温度升高,热稳定性增强。降温过程中,样品的发射峰强度随温度的降低而呈上升趋势。当温度降至 200 $^{\circ}\text{C}$ 以下时,样品的发射峰强度比升温过程中同温度点的强度要略高,这是由于样品的余辉作用所致。

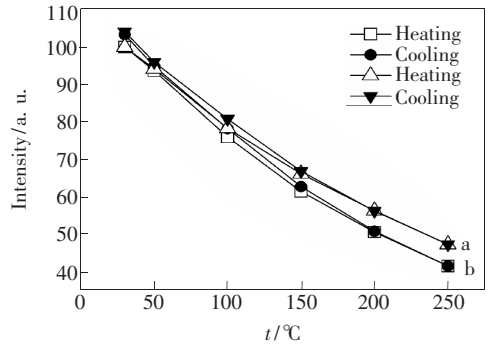


图 6 $(\text{Sr}_{0.93}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ (a) 和 $\text{Sr}_{2.85}\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ (b) 的发光强度随温度的变化

Fig. 6 Luminescent intensities of $(\text{Sr}_{0.93}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ (a) and $\text{Sr}_{2.85}\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ (b) at different temperatures

4 结 论

采用高温固相法合成了 $(\text{Sr}_{1-x-y}\text{Ba}_x)_3\text{Al}_2\text{O}_6:3y\text{Eu}^{2+}$ 红色荧光粉。XRD 测试结果表明, $(\text{Sr}_{0.93}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ 与 $\text{Sr}_{2.85}\text{Al}_2\text{O}_6:0.15\text{Eu}^{2+}$ 具有相同的晶体结构类型,即立方晶系,空间群为 $Pa\bar{3}$ 。两者的激发光谱均为 380 ~ 570 nm 的宽带,与 LED 蓝光芯片相匹配,受激发后的发射波长为 525 ~ 775 nm 范围的红光,因而可配合黄色荧光粉封装暖白色 LED。掺 Ba^{2+} 之后,样品的发射光谱形状没有改变,但随着 Ba^{2+} 含量的增加发射峰位置逐渐红移,这源于 Ba^{2+} 的掺入所引起的晶格畸变。此外, Ba^{2+} 的掺杂还提高了 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{2+}$ 样品的热稳定性,这对提高 LED 照明质量有利。当 Eu^{2+} 的摩尔分数为 4% 时, $(\text{Sr}_{0.98-y}\text{Ba}_{0.02})_3\text{Al}_2\text{O}_6:3y\text{Eu}^{2+}$ 的发射峰最强。

参 考 文 献:

- [1] Zhang R X, Wang H B, Huang R X, *et al.* Preparation and package performances of red phosphor for LED [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(3):305-310 (in English).
- [2] Yamada M, Naitou T, Izuno K, *et al.* Red-enhanced white-light-emitting diode using a new red phosphor [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, 42:L20-L23.
- [3] Pu Y, Zhu D C, Han T. Preparation and characterization of Ca_{1-x-y}WO₄: xPr³⁺, yLi⁺ deep red phosphors for white LEDs excited by blue light [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2012, 33(1):12-16 (in Chinese).
- [4] Katsumata T, Sasajima K, Nabae T, *et al.* Characteristics of strontium aluminate crystals used for long-duration phosphors [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1998, 81(2):413-416.
- [5] Li G H, Lai Y W, Cui T J, *et al.* Luminescence properties and charge compensation of Sr₃Al₂O₆ doped with Ce³⁺ and alkali metal ions [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2010, 124(2-3):1094-1099.
- [6] Zhang P, Xu M X, Liu L, *et al.* Luminescent properties of Sr₃Al₂O₆: Eu, Pr prepared by sol-gel method [J]. *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 2009, 50(3):267-270.
- [7] Liu G, Liang J H, Deng Z X, *et al.* Synthesis and photoluminescence research of novel red-fluorescent Sr₃Al₂O₆ powders [J]. *Chin. J. Inorganic Chem.* (无机化学学报), 2002, 18(11):1135-1137 (in Chinese).
- [8] Zhang P, Xu M X, Zheng Z T, *et al.* Microwave synthesis and characterization of new red long afterglow phosphor Sr₃Al₂O₆: Eu [J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2006, 16:s423-s425.
- [9] Huang P, Cui C E, Wang S. Influence of calcination temperature on luminescent properties of Sr₃Al₂O₆: Eu²⁺, Dy³⁺ phosphors prepared by sol-gel-combustion processing [J]. *Opt. Mater.*, 2009, 32(1):184-189.
- [10] Page P, Ghildiyal R, Murthy K V R. Photoluminescence and thermoluminescence properties of Sr₃Al₂O₆: Tb³⁺ [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2008, 43(2):353-360.
- [11] Bai Z H, Zhang X Y, Zhu H Y, *et al.* Preparation of Eu²⁺-activated aluminate doped by N phosphors for white LED [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(5):732-736 (in Chinese).
- [12] Zhang X M, Chio N S, Park K W, *et al.* Orange emissive Sr₃Al₂O₅Cl₂: Eu²⁺ phosphor for warm-white light-emitting diodes [J]. *Solid State Commun.*, 2009, 149(25-26):1017-1020.
- [13] Prodjosantoso A K, Kennedy B J, Hunter B A. Synthesis and structural studies of strontium-substituted tricalcium aluminate Ca_{3-x}Sr_xAl₂O₆ [J]. *Aust. J. Chem.*, 2000, 53(3):195-202.
- [14] Chakomakos B C, Lager G A, Fernandez-Baca J A. Refinement of the structures of Sr₃Al₂O₆ and the hydrogarnet Sr₃Al₂(O₄D₄)₃ by rietveld analysis of neutron powder diffraction data [J]. *Acta Cryst.*, 1992, 48(3):414-419.
- [15] Zhou X M, Zeng H H. Synthesis and characterization of new long lasting red phosphors Y₂O₂S: Eu, Si, M (M = Mg, Ca, Sr, Ba) [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(1):59-63 (in Chinese).
- [16] Shen C Y, Li K, Hou Q L, *et al.* White LED based on YAG: Ce, Gd phosphor and CdSe-ZnS core/shell quantum dots [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2010, 22(12):884-886.
- [17] Park J K, Choi K J, Yeon J H, *et al.* Embodiment of the warm white-light-emitting diodes by using a Ba²⁺ codoped Sr₃SiO₅: Eu phosphor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(4):043511-1-3.
- [18] Blasse G. Thermal quenching of characteristic fluorescence [J]. *J. Phys. Chem.*, 1969, 51(8):3529-3530.