

文章编号: 1000-7032(2014)11-1306-05

$\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{3+}$ 的低温合成与发光性能

何凌云, 李湘祁*

(福州大学 材料科学与工程学院, 福建 福州 350180)

摘要: 以介孔二氧化硅 MCM-41 为硅源, 采用低温水热反应与后续煅烧相结合的方法合成 $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:x\text{Eu}^{3+}$ 红色荧光粉。实验结果表明, 150 °C 水热处理 16 h 后的反应产物含 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 相, 经后续 950 °C 煅烧 3 h 得到 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 纯相。在 392 nm 近紫外光的有效激发下, $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:x\text{Eu}^{3+}$ 荧光粉显示 Eu^{3+} 离子的特征跃迁发射, 以 615 nm 的 $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ 跃迁发射峰为最强。适量 Eu^{3+} 的掺杂对 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 相结构几乎没有影响, 当 Eu^{3+} 离子的掺杂量 $x=0.10$ 时, 荧光粉发光强度最大。

关键词: $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{3+}$; 红色荧光粉; 水热处理; MCM-41

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20143511.1306

Low-temperature Synthesis and Luminescent Properties of $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{3+}$

HE Ling-yun, LI Xiang-qi*

(College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350180, China)

* Corresponding Author, E-mail: lixiangqi@fzu.edu.cn

Abstract: $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:x\text{Eu}^{3+}$ red phosphors were synthesized with mesoporous MCM-41 as silica source *via* a low-temperature hydrothermal route with further calcining. The results indicate that $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ phase appears in the hydrothermal reaction product synthesized at 150 °C for 16 h, and pure phase $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ is obtained by further calcining at 950 °C for 3 h. $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:x\text{Eu}^{3+}$ phosphors can be effectively excited by 392 nm near-ultraviolet radiation and show the typical emission spectra of Eu^{3+} . The prominent emission transition is at 615 nm assigned to $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$. The structure of $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ is not affected by doping appropriate amounts of Eu^{3+} . $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:x\text{Eu}^{3+}$ phosphor with $x=0.10$ has the highest Eu^{3+} emission intensity.

Key words: $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{3+}$; red phosphors; hydrothermal treating; MCM-41

1 引 言

白光 LED 具有节能、高效、寿命长、体积小等优点, 是一种应用前景广阔的节能光源^[1-2]。实现白光 LED 的途径之一是用近紫外-紫外(360 ~ 410 nm)光 LED 芯片激发蓝、绿、红三基色荧光粉, 相应地要求荧光粉在近紫外-紫外区有强的吸

收能力。常见的红色荧光粉如 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ ^[3-4]、 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{3+}$ ^[5]、 $\text{YVO}_4:\text{Eu}^{3+}$ ^[6] 等对 254 nm 的吸收强, 但对近紫外 400 nm 的吸收弱, 因此制备能被近紫外-紫外光有效激发的红色荧光粉是提高白光 LED 发光效率的一个重要课题。

$\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 是一种化学稳定性高、耐候性好的发光基质材料, 在其中掺入过渡金属离子或稀

土离子可发不同颜色的荧光。Zhang 等^[7]采用熔剂辅助的固相反应法,在 1 250 °C 下制备了 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7:\text{Sm}^{3+}$ 红色长余辉荧光粉。Yao 等^[8]采用溶液燃烧辅助法,在 1 000 °C 下还原煅烧燃烧产物得到 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$ 绿色荧光粉。Yan 等^[9]采用溶胶-凝胶法,在 1 100 °C 煅烧干凝胶,制备了 $M_2(\text{Mg}, \text{Zn})\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ ($M = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$) 荧光粉。

介孔二氧化硅具有高比表面积且骨架为非晶态,拥有较高的反应活性,在制备硅酸盐基荧光粉的应用中具有降低合成温度、提高掺杂离子分散均匀性等重要作用^[10-11]。本文以六方介孔结构的 MCM-41 为硅源,采用水热处理与后续 950 °C 下煅烧相结合的方法合成了能被 392 nm 近紫外光有效激发的 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{3+}$ 红色荧光粉。

2 实 验

2.1 样品的制备

正硅酸四乙酯 (TEOS)、十六烷基三甲基溴化胺 (CTAB)、氨水 ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、无水乙醇 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)、氢氧化钠 (NaOH)、六水合硝酸锌 ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、硝酸锶 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 、氧化铕 (Eu_2O_3)、浓硝酸 (HNO_3) 等均为分析纯。

2.1.1 MCM-41 介孔二氧化硅的制备

将 1.275 6 g CTAB、20.45 mL $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 溶于 42.0 mL 去离子水中形成均匀澄清的溶液,在磁力搅拌下滴加 7.293 5 g TEOS,继续搅拌 1 h 后于 110 °C 下水热反应 48 h,经过滤、洗涤、干燥,研磨分散后,在 550 °C 下焙烧 5 h,得到 MCM-41 介孔二氧化硅。

2.1.2 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{3+}$ 荧光材料的制备

将 Eu_2O_3 溶于浓硝酸中配制 0.1 mol/L 的 $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3$ 溶液备用。按 $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:x\text{Eu}^{3+}$ ($x = 0.02, 0.04, 0.08, 0.10, 0.12$) 的化学计量比将 MCM-41、 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3$ 与适量蒸馏水中混合均匀,缓慢滴加适量的 NaOH 溶液,继续搅拌 20 min 后将混合溶液置于水热釜,150 °C 水热反应 16 h。产物经过滤、洗涤、干燥、稍微研磨分散后,于 950 °C 下焙烧 3 h,得到 $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:x\text{Eu}^{3+}$ 荧光粉。为研究水热处理过程中 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 的形成机制,按前述方法制备了未掺 Eu 的 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 基质,并分别取出部分水热处理前后的产物备用。

2.2 样品的表征

采用德国 BRUKER 公司 D8 型 X 射线衍射仪测试样品的物相组成及结构,测试条件:辐射源为 $\text{Cu K}\alpha 1$ 射线, $\lambda = 0.154 18 \text{ nm}$;加速电压为 40 kV,管电流 40 mA;小角度扫描范围为 $0^\circ \sim 8^\circ$,扫描速度 $2^\circ/\text{min}$;高角度扫描范围为 $10^\circ \sim 85^\circ$,扫描速度 $6^\circ/\text{min}$ 。采用法国 HORIBA Jobin Yvon 公司的 FluoroMax-4 荧光光谱仪测试样品的激发光谱及发射光谱,以氙灯为激发光源,所有测试均在室温下进行。采用 Tecnai G2 F20S-TWIN 型场发射电子显微镜观察样品的微观表面形貌。

3 结果与讨论

3.1 MCM-41 的 XRD

图 1 为 MCM-41 介孔粉末样品 XRD 图谱。从图中可以看出,样品的 XRD 衍射峰与 MCM-41 介孔分子筛材料的特征衍射峰相符:在 $2\theta = 2^\circ$ 左右出现一个强衍射峰,对应着 MCM-41 介孔材料的 (100) 晶面衍射峰;在 $3^\circ \sim 6^\circ$ 范围内出现 3 个次级峰,分别对应样品的 (110)、(200) 和 (210) 晶面衍射峰。以上特征晶面衍射峰的出现,表明合成的样品是具有二维六方介孔结构的 MCM-41 介孔分子筛,并具有很好的长程有序性^[12]。

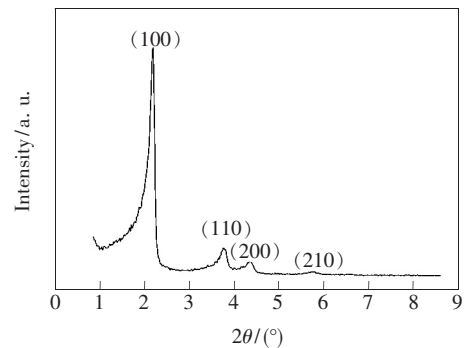


图 1 介孔 MCM 41 样品的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of MCM-41 sample

3.2 $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:x\text{Eu}^{3+}$ 的 XRD 和 SEM

图 2 为 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 合成过程中不同阶段产物的 XRD 图谱。从图中可以看出水热前驱体具有微弱的 SrCO_3 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 和 ZnO 衍射峰;水热处理后产物中出现了 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 和 SrSiO_3 新相衍射峰,原 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 相衍射峰消失,但 SrCO_3 和 ZnO 相衍射峰依然存在。这表明生成新相的反应不完全,产物中残留有未反应的 SrCO_3 、 ZnO 与 SiO_2 。

经 950 °C 焙烧后,产物的衍射峰与标准卡片 JCPDS No. 39-0235 完全吻合,表明样品为四方晶系 锌黄长石结构的 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 纯相^[9]。

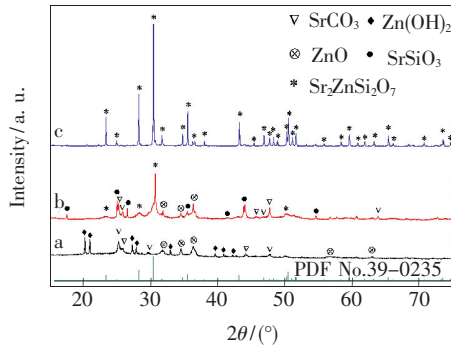
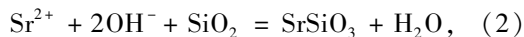
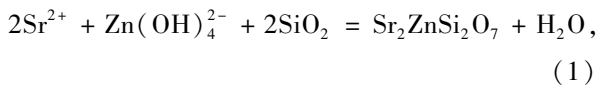


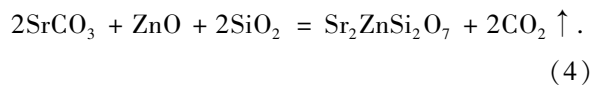
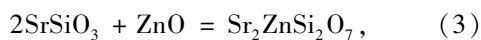
图 2 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 不同合成阶段产物 XRD 图谱(a. 水热前产物;b. 水热产物;c. 950 °C 煅烧后产物)

Fig. 2 XRD patterns of the products formed at different steps of synthetic process(a. Before hydrothermal reaction. b. After hydrothermal reaction. c. Calcined at 950 °C)

在强碱性介质 NaOH 溶液中, Zn^{2+} 倾向于结合 OH^- 形成可溶性羟基化离子团 $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$, Sr 元素主要以 Sr^{2+} 形式存在^[13],水热过程中发生以下反应:



在后续的煅烧过程中,残留的 SrSiO_3 、 ZnO 、 SrCO_3 、 SiO_2 通过固相反应生成 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$, 反应式如下:



本研究中 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 相在低温水热条件下即可生成,得到 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 纯相的煅烧温度也远低于文献所报道的合成温度^[7-9]。这是由于介孔二氧化硅具有高的比表面积和规则的孔道结构,同时其骨架为非晶态,因而表现出较高的反应活性^[10-11]。

图 3 为 $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7: x\text{Eu}^{3+}$ 样品的 XRD 图谱。从图可以看出,所有样品的衍射峰均与标准卡片 JCPDS No. 39-0235 完全吻合,为 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 单相,说明适量 Eu^{3+} 离子的掺入对基质晶体结构的影响不大。 Eu^{3+} 离子半径(0.107 nm)与 Sr^{2+} 离子(0.126 nm)相近, Eu^{3+} 离子在基质中取代 Sr^{2+} 离子,与 8 个 O^{2-} 配位^[9]。

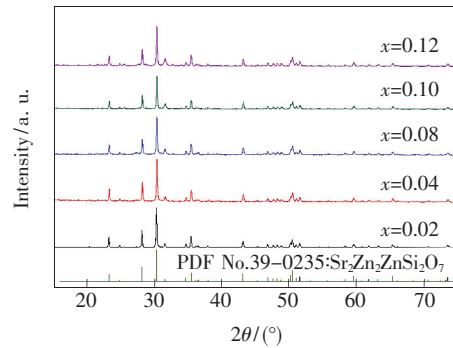


图 3 $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7: x\text{Eu}^{3+}$ 的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7: x\text{Eu}^{3+}$

图 4(a) 和 (b) 分别为 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 与 $\text{Sr}_{1.9}\text{ZnSi}_2\text{O}_7: 0.10\text{Eu}^{3+}$ 两个样品的 SEM 照片。从图 4(a) 可以看出,未掺 Eu^{3+} 离子的 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 样品颗粒形貌主要为似球形或不规则形状,颗粒大小约为 0.5 ~ 1.5 μm 。从插图中似球形颗粒的放大图可以看出,似球形颗粒实际上由一些更小的晶粒聚集而成,这些晶粒形状不规则,大小约 0.1 μm 。图 4(b) 显示,掺 Eu^{3+} 离子后样品的颗粒形貌比较规则,为球形或椭球形,颗粒大小约 0.5 ~ 2 μm 。插图显示这些颗粒也是由一些小晶粒聚集而成的。与 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 样品相比,这些晶粒的粒度明显增大,大

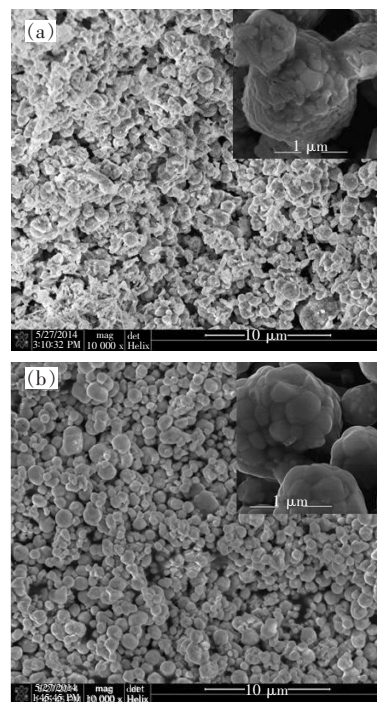


图 4 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ (a) 与 $\text{Sr}_{1.9}\text{ZnSi}_2\text{O}_7: 0.10\text{Eu}^{3+}$ (b) 样品的 SEM 图

Fig. 4 SEM images of $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ (a) and $\text{Sr}_{1.9}\text{ZnSi}_2\text{O}_7: 0.10\text{Eu}^{3+}$ (b)

多数晶粒约为 $0.3 \mu\text{m}$ 。晶粒的边界更平直,表明 Eu^{3+} 的掺入改善了 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 基质的结晶度。

3.3 荧光光谱

图 5 为 $\text{Sr}_{1.90}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:0.10\text{Eu}^{3+}$ 样品的激发与发射光谱。由图可以看出,样品的激发光谱由 $350 \sim 500 \text{ nm}$ 范围内的一组锐谱线组成,其中最强峰位于 392 nm 处,对应于 Eu^{3+} 离子 ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{L}_6$ 跃迁;位于 $361, 374, 413, 464 \text{ nm}$ 的弱峰分别对应于 ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_4, {}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{G}_2, {}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_1, {}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_2$ 跃迁。在 392 nm 激发下,所有样品的发射光谱均显示典型的 Eu^{3+} 离子的 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_J (J = 1, 2, 3, 4)$ 及 ${}^5\text{D}_1 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ 跃迁的锐线发射峰,分别位于 $533 \text{ nm} ({}^5\text{D}_1 \rightarrow {}^7\text{F}_1), 577 \text{ nm} ({}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_0), 588 \text{ nm}, 592 \text{ nm} ({}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1), 610 \text{ nm}, 615 \text{ nm}, 622 \text{ nm} ({}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2), 643 \text{ nm} ({}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_3), 684 \text{ nm}, 689 \text{ nm}, 699 \text{ nm} ({}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_4)$ 。

Eu^{3+} 的 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 为电偶极跃迁,对自由离子是禁戒的,而 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ 为磁偶极跃迁,是容许的。当 Eu^{3+} 离子占据无反演对称中心的格位时,选择定则被打破, ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 跃迁成为可能,对应的谱线强度大幅提高,而 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ 跃迁的谱线强度下降^[14]。从图 5 可以看出, 615 nm 的电偶极发射跃迁最强,表明 Eu^{3+} 在 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 晶格中处于非对称中心格位。 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_0 (J = 0 \rightarrow J = 0)$ 跃迁属于非

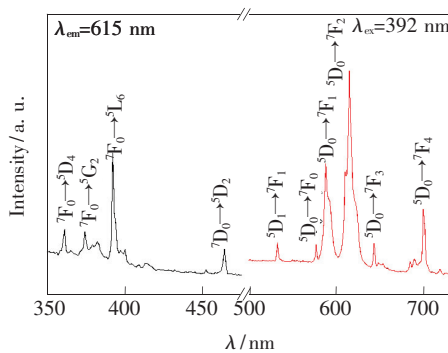


图 5 $\text{Sr}_{1.90}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:0.10\text{Eu}^{3+}$ 的激发与发射光谱

Fig. 5 Excitation and emission spectra of $\text{Sr}_{1.90}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:0.10\text{Eu}^{3+}$

参 考 文 献:

- [1] Yoshitaka T, Makoto K, Toshiki M. An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres [J]. *Nature*, 2006, 441 (7091):325-328.
- [2] Zhang J H, Lv W, Hao Z D, et al. Color-tunable white-light emitting $\text{BaMg}_2\text{Al}_6\text{Si}_9\text{O}_3:\text{Eu}^{2+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$ phosphors via energy transfer [J]. *Chin. Opt. (中国光学)*, 2012, 5(3):203-208 (in Chinese).

简并的跃迁,在晶体场中不发生劈裂,图 5 中 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_0$ 跃迁为一个单峰,因此 Eu^{3+} 离子在基质中只有一种占位,即替代基质晶格中 Sr^{2+} 离子,与 8 个 O_2^- 配位。

图 6 为 Eu^{3+} 掺杂浓度不同的系列 $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:x\text{Eu}^{3+}$ 样品的荧光光谱。从图可以看出,随着 Eu^{3+} 离子掺量的增大,发射峰的峰形和峰位均未发生明显变化,但强度逐渐增加,当 $x = 0.10$ 时,峰强达到最大值,随后减小,出现浓度猝灭现象^[6]。通常 Eu^{3+} 离子掺杂的红色荧光粉的猝灭浓度 ≤ 0.05 ^[5-6,15],而本研究中 Eu^{3+} 离子在 $\text{Sr}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ 中的猝灭浓度高达 0.10 ,这可能是由于 MCM-41 的规则孔道结构有利于激活离子在基质中均匀分散^[10-11],在一定程度上增大了 Eu^{3+} 离子间的距离,从而抑制了相邻发光中心 $\text{Eu}^{3+}-\text{Eu}^{3+}$ 之间的能量迁移。

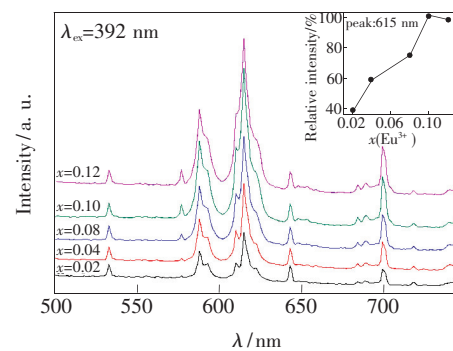


图 6 $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:x\text{Eu}^{3+}$ 的发射光谱

Fig. 6 Emission spectra of $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:x\text{Eu}^{3+}$

4 结 论

以介孔 MCM-41 为硅源,采用水热处理与后续煅烧相结合的方法,有效地降低了 $\text{Sr}_{2-x}\text{ZnSi}_2\text{O}_7:x\text{Eu}^{3+}$ 红色荧光粉的合成温度。该荧光粉能被 392 nm 近紫外光有效激发,与近紫外-紫外光 LED 芯片相匹配,最强发射峰位于 615 nm ,是一种适用于白光 LED 的红色荧光粉, x 最大可达到 0.10 。

- [3] Som S, Sharma S K, Lochab S. P. Swift heavy ion induced structural and optical properties of $Y_2O_3:Eu^{3+}$ nanophosphor [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2013, 48(2):844-851.
- [4] Wakefield G, Holland E, Dobson P J, *et al.* Luminescence properties of nanocrystalline $Y_2O_3:Eu$ [J]. *Adv. Mater.*, 2001, 13(20):1557-1560.
- [5] Cui C E, Jiang G W, Huang P, *et al.* Effect of Eu^{3+} concentration on the luminescence properties of $Y_2O_2S:Eu^{3+}, Mg^{2+}, Ti^{4+}$ nanotubes [J]. *Ceram. Int.*, 2014, 40(3):4725-4730.
- [6] Takaaki T, Tomoaki W, Kenichi K, *et al.* Synthesis of amphiphathic $YVO_4:Eu^{3+}$ nanophosphors by oleate-modified nucleation/hydrothermal-growth process [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2010, 114(9):3763-3769.
- [7] Zhang Y Y, Pang R, Li C Y, *et al.* Reddish orange long lasting phosphorescence of Sm^{3+} in $Sr_2ZnSi_2O_7:Sm^{3+}$ phosphors [J]. *J. Rare Earths*, 2010, 28(5):705-708.
- [8] Yao S S, Xue L H, Yan Y W. Photoluminescence properties of $M_2ZnSi_2O_7:Eu^{2+}$ ($M = Sr, Ba$) [J]. *J. Rare Earths*, 2010, 28(2):265-268.
- [9] Hao Y, Wang Y H. Synthesis and photoluminescence of new phosphors $M_2(Mg, Zn)Si_2O_7:Mn^{2+}$ ($M = Ca, Sr, Ba$) [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2007, 42(12):2219-2223.
- [10] Li X Q, Chen F Y. Structure and luminescence properties of $Zn_2SiO_4:Mn$ phosphor prepared with MCM-48 [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2013, 48(6):2304-2307.
- [11] Lu Q S, Li J G. Low-temperature synthesis of $Y_2SiO_5:Eu^{3+}$ powders using mesoporous silica and their luminescence properties [J]. *Opt. Mater.*, 2011, 33(3):381-384.
- [12] Schacht S, Janicke M, Schuth F. Modeling X-ray patterns and TEM images of MCM-41 [J]. *Microp. Mesop. Mater.*, 1998, 22:485-493.
- [13] Khodakovskiy I L, Elkin A E. Experimental determination of znicite solubility in water and NaOH aqueous solutions at temperatures 100, 150, and 200 °C [J]. *Rev. Mineral. Geochem.*, 1975, 10:1490-1497.
- [14] Nagabhushana H, Nagabhushana B M, Madesh K M, *et al.* Synthesis, characterization and photoluminescence properties of $CaSiO_3:Eu^{3+}$ red phosphor [J]. *Spectrochim. Acta, Part A*, 2011, 78(1):64-69.
- [15] Zhang S A, Hu Y H, Chen L, *et al.* Photoluminescence properties of $Ca_3WO_6:Eu^{3+}$ red phosphor [J]. *J. Lumin.*, 2013, 142:116-121.



何凌云(1990 -),女,福建福州人,硕士研究生,2008年于福州大学获得学士学位,主要从事光电功能材料的研究。
E-mail: 597352033@qq.com



李湘祁(1968 -),女,湖南宜章人,副教授,1999年于中南工业大学(现中南大学)获得博士学位,主要从事介孔材料、硅酸盐基质发光材料的合成应用方面的研究。
E-mail: 2635146185@qq.com