

# Synthesis and Luminescence Properties of $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$ Nanoparticles

Fugui Yang<sup>1\*</sup>, Liang Qiao<sup>1</sup>, Haike Ren<sup>2</sup>, Fengpo Yan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Matimatical Institution, Fujian Jiangxia University, Fuzhou Fujian

<sup>2</sup>Electronic Information Science Institution, Fujian Jiangxia University, Fuzhou Fujian

Email: \*ruopiao78@163.com

Received: Jul. 10<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2017; published: Jul. 26<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

The 3%  $\text{Eu}^{3+}/x\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  ( $x = 1, 2, 5, 7$ ) nanoparticles were synthesized by Sol-Gel-solid reaction. The structure, photoluminescence spectra and quantum efficiency were investigated. Result indicates the scale is near 300~700 nm. Excited with 255nm, we observed two emission peaks at 590 nm, 613 nm, corresponding to the transitions of ( $\text{Eu}^{3+}$ )  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ ,  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ . And two peaks at 545 nm and 586 nm, corresponding to the transitions of ( $\text{Tb}^{3+}$ )  $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$ ,  $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_4$ . With the increasing concentration of  $\text{Tb}^{3+}$ , the emission intensities of yellow and red light of  $\text{Eu}^{3+}$  enhance together, which shows that the energy transfers form  $\text{Tb}^{3+}$  to  $\text{Eu}^{3+}$ .

## Keywords

Luminescence Material, Aluminosilicate, Nanoparticle

# $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ 掺杂 $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$ 纳米粒子的制备及发光性能研究

羊富贵<sup>1\*</sup>, 乔亮<sup>1</sup>, 任海科<sup>2</sup>, 颜峰坡<sup>2</sup>

<sup>1</sup>福建江夏学院, 数理教研部, 福建 福州

<sup>2</sup>福建江夏学院, 电子信息科学学院, 福建 福州

Email: \*ruopiao78@163.com

收稿日期: 2017年7月10日; 录用日期: 2017年7月23日; 发布日期: 2017年7月26日

## 摘要

采用溶胶-凝胶-高温固相合成法制备了3%  $\text{Eu}^{3+}/x\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  ( $x = 1, 2, 5, 7$ ) 纳米粉体。采用X  
\*通讯作者。

文章引用: 羊富贵, 乔亮, 任海科, 颜峰坡.  $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  掺杂  $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  纳米粒子的制备及发光性能研究[J]. 凝聚态物理学进展, 2017, 6(3): 51-57. DOI: 10.12677/cmp.2017.63007

射线衍射仪、扫描电子显微镜和分光光度计对样品性能进行测试与表征。结果表明, 颗粒尺寸约为 300~700 nm; 在 255 nm 波长激发下, 主要发射峰位于 590 nm, 613 nm 分别对应  $\text{Eu}^{3+}$  离子的  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ ,  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$  跃迁; 同时观察到 545 nm, 586 nm 发射峰, 分别对应  $\text{Tb}^{3+}$  的  $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$ ,  $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_4$  跃迁。随着  $\text{Tb}^{3+}$  掺杂浓度增加,  $\text{Eu}^{3+}$  离子的黄光和红光强度逐渐增强, 表明  $\text{Tb}^{3+}$  与  $\text{Eu}^{3+}$  之间存在能量传递。

## 关键词

发光材料, 硅铝酸盐, 纳米颗粒

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

白光 LED (Light Emitting Diode) 因其节能、环保、寿命长等优点, 被誉为本世纪最具发展前景的照明技术。目前获得白光的方法主要采用蓝光 LED 芯片激发 YAG:Ce<sup>3+</sup> 黄色荧光粉混合而成, 该方案已经被大规模商业应用。但此方法缺少一定红光成分, 致使不仅显色指数偏低 (Ra~70), 而且色温偏高 (>7000 K), 无法满足暖白光需求 (CCT~3000~5000K), 使其很难应用于室内照明、印染涂料、医学手术等对显色指数、色温有一定要求的场所 [1] [2] [3]。因此, 研制出性能良好, 发光效率高的红色荧光粉, 对推动白光 LED 技术的快速发展起着十分重要的作用。

近紫外光或蓝光照射稀土离子可以获得红色荧光, 如商用的红色荧光粉  $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{3+}$  [4]、 $\text{CaS}:\text{Eu}^{2+}$  [5], 但发光效率低, 热稳定性差, 光衰大, 严重损害了白光 LED 产品的质量, 而且对环境污染较大。稀土离子激活的氮化物基红色荧光粉最近几年获得很大发展, 其拥有不俗的红色荧光性能和热稳定性, 如  $\text{M}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$  (M = Ca, Sr, Ba)、 $\text{MAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$  (M = Ca, Sr),  $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Sr}_{2-x}\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}_x$  等 [6]-[10]。但对于氨基稀土红色荧光粉, 由于存在 N 元素, 不仅制备温度较高, 还需要保护性气氛, 制备成本很高, 限制了大规模的实际应用 [11]。

硅酸盐为基质的荧光粉不仅具有良好的化学、热稳定性, 还有良好的环保性, 因此被广泛用于荧光粉基质材料 [12]。 $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  是一种优异的硅铝酸盐材料, 不仅具有硅酸盐的特性, 而且含有部分铝酸盐的力学性能,  $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7:\text{Eu}^{3+}$  荧光材料已经被 H.Y.Jiao 等报道 [13], 研究表明该材料拥有较好的红光发射性能。为了增强  $\text{Eu}^{3+}$  红光发射强度, 通常引入  $\text{Tb}^{3+}$  为敏化离子, 在  $\text{Tb}^{3+}$  与  $\text{Eu}^{3+}$  共掺杂时, 由于存在能量传递, 可显著提高  $\text{Eu}^{3+}$  发射强度的效果 [14] [15]。本文采用溶胶-凝胶-高温固相合成法制备了 3%  $\text{Eu}^{3+}/x\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  (x = 1, 2, 5, 7) 系列纳米粉体, 并对其进行了结构和光谱研究, 该工作迄今为止并未见报道。

## 2. 实验部分

### 2.1. 3% $\text{Eu}^{3+}/x\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$ (x = 1, 2, 5, 7) 粉体的制备

实验中选用高纯度试剂  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  (99.99%, 赣州稀土有限公司),  $\text{Tb}(\text{NO}_3)_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  (99.95%, 1  $\mu\text{m}$ ),  $\text{SrCO}_3$  (99.99%, 1  $\mu\text{m}$ ),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (99.99%, 50~100 nm),  $\text{SiO}_2$  (99.99%, 50~100 nm)。按照适量配比称取  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Tb}(\text{NO}_3)_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  溶于稀硝酸中, 按照  $n_{\text{金属离子}}:n_{\text{EDTA}} = 1:1.1$  称取 EDTA, 并将其溶解到氨水溶液中形成 EDTA 氨水溶液, 然后在 80°C 下磁力搅拌反应 6 h, 得到湿凝胶。将湿凝胶在 160 度下烘干 4 h, 即

可得到干凝胶,将干凝胶在 600 度下煅烧 2 h 得到前驱体,然后再混合适当比例的  $\text{SiO}_2$  原料,并在  $1000^\circ\text{C}$  ~ $1150^\circ\text{C}$  下煅烧 2 h,退火后可得到  $3\% \text{Eu}^{3+}/x\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  ( $x = 1, 2, 5, 7$ ) 粉体材料。

## 2.2. 样品表征

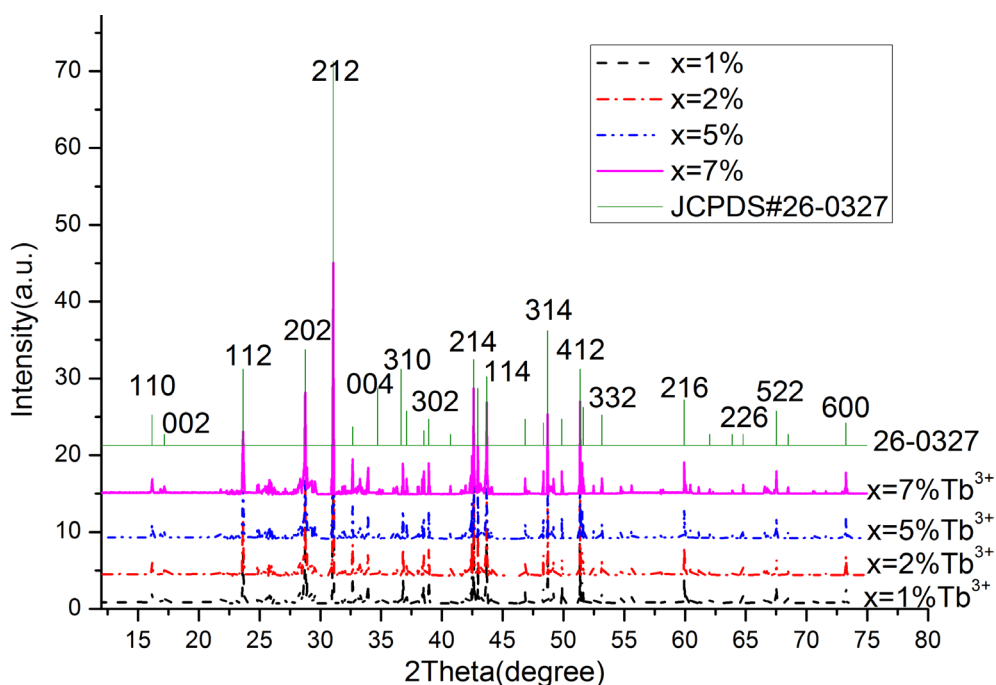
采用 Rigaku Miniflex600 XRD ( $\text{Cu-K}\alpha$ ,  $\lambda = 0.1540 \text{ nm}$ ) 衍射分析仪器测定了样品的结构,并用日立公司的 Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) 对样品的微纳结构进行了测试,利用 Edinburgh Instruments 的 FLS980 荧光光谱仪系统对样品激发和发射谱进行了测试。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 物相分析

根据标准卡片(JCPDS#26-0327),  $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  空间群为  $\text{P}2_12_12_1$ ,  $a = b = 0.7751 \text{ nm}$ ,  $c = 10.320 \text{ nm}$ , 结构与  $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$  类似。图 1 显示了本实验中  $3\% \text{Eu}^{3+}/x\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  ( $x = 1, 2, 5, 7$ ) 系列样品的 X-射线衍射谱与标准卡片(JCPDS#26-0327)的对比关系。从图中可以看出,  $\text{Tb}^{3+}$  掺杂浓度的增加对晶格的结构影响很小,主要原因在于掺杂浓度较低,并未造成严重的晶格畸变。与纯  $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  标准粉末衍射卡片比较,本实验系列样品的主要衍射峰位置与其一一对应,其中(212)位置具有最大衍射强度,这说明样品在微量稀土掺杂情况下,与纯  $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  结构一致,整批次样品均为纯相。

图 2 为  $3\% \text{Eu}^{3+}/2\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  样品在温度为  $1000^\circ\text{C}$  和  $1150^\circ\text{C}$  时的 SEM 图。图中左边(a)为  $1000^\circ\text{C}$  时的 SEM 图,颗粒直径约为  $300\sim 400 \text{ nm}$ ,右边(b)为  $1150^\circ\text{C}$  时的 SEM 图,颗粒直径约为  $600\sim 700 \text{ nm}$ ,部分颗粒团聚成片状结构。结果表明随着烧结温度的增加,颗粒尺寸也显著增加,并且团聚现象也更加明显,但总的说来,在  $1000^\circ\text{C}\sim 1150^\circ\text{C}$  温区范围内,样品基本呈现  $300\sim 700 \text{ nm}$  粒径的微纳结构特征。



**Figure 1.** Comparison of X-ray diffraction patterns between  $3\% \text{Eu}^{3+}/x\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  ( $x=1,2,5,7$ ) samples and standard pattern of JCPDS#26-0327

**图 1.**  $3\% \text{Eu}^{3+}/x\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  ( $x = 1,2,5,7$ ) 粉体的 X 射线衍射谱与标准卡片(JCPDS#26-0327) 的对比关系

### 3.2. 激发与发射光谱分析

图3为3%  $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$ 的激发光谱, 监测波长为613 nm。从图中可以看出, 最强的激发峰位于255 nm的宽激发带, 该宽激发带主要由于 $\text{Eu}^{3+} \rightarrow \text{O}^{2-}$ 的电荷转移, 大量文献已经对其机理有着较为详细的讨论。其次, 395 nm也存在较强的激发峰, 该激发带对应于 $\text{Eu}^{3+}$ 离子的特征峰 ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{L}_6$ 。因此, 可以利用255 nm和395 nm入射3%  $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$ 材料并分析其613 nm红光发射情况。

图4为3%  $\text{Eu}^{3+}/7\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$ 的激发光谱, 监测波长为545 nm。从图中可以看出, 最强激发峰位于248 nm的激发带, 属于 $\text{Tb}^{3+}$ 离子的f-d跃迁。在300~400 nm之间还有一个激发带, 对应于f-f跃迁。

图5显示了3%  $\text{Eu}^{3+}/x\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  ( $x = 1, 2, 5, 7$ )样品在255 nm波长激发下的发射谱。从图中可以看出, 主要发射峰位于545 nm, 585~592 nm和613 nm。其中, 中心波长为590 nm的黄光和613 nm

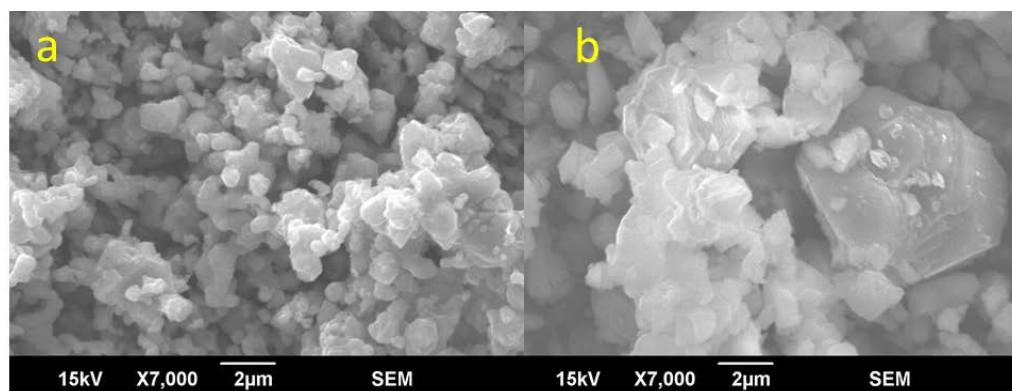


Figure 2. SEM micrographs of 3%  $\text{Eu}^{3+}/2\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  sample calcined at (a) 1000°C and (b) 1150°C  
图2. 3%  $\text{Eu}^{3+}/2\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  SEM图; (a)和(b)分别为1050°C和1150°C合成条件

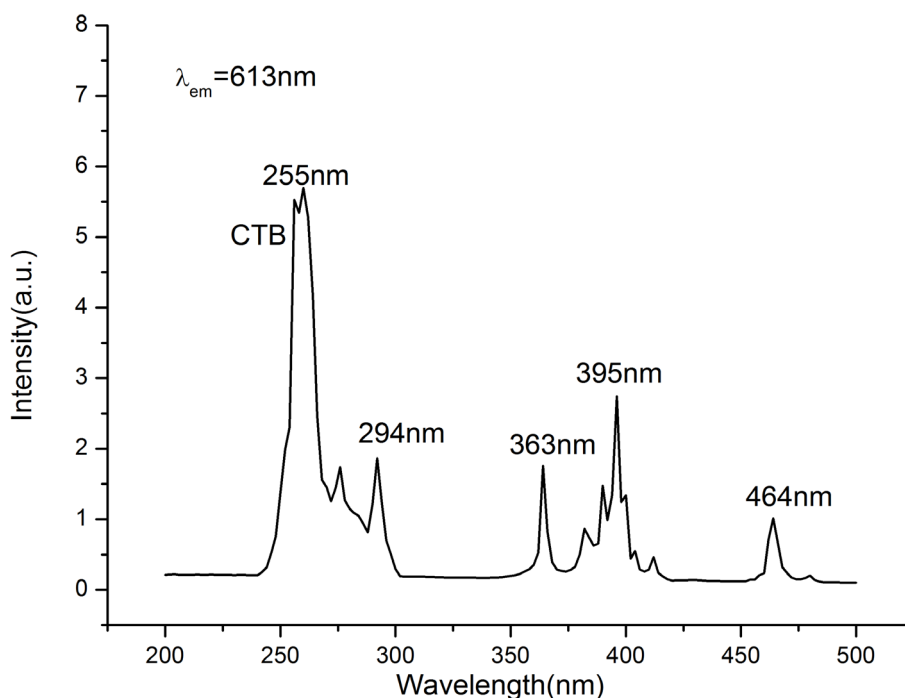
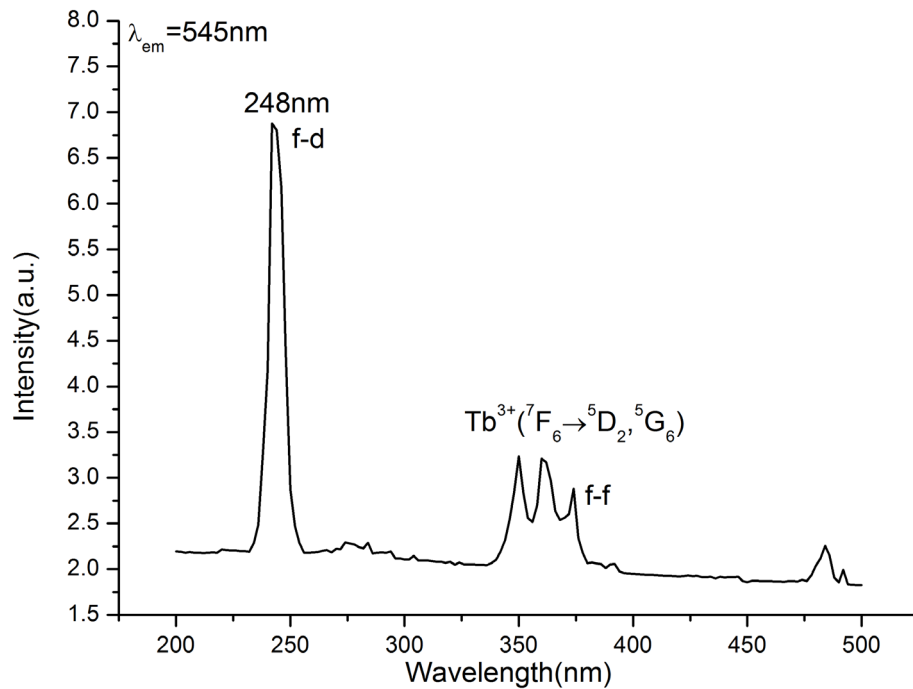
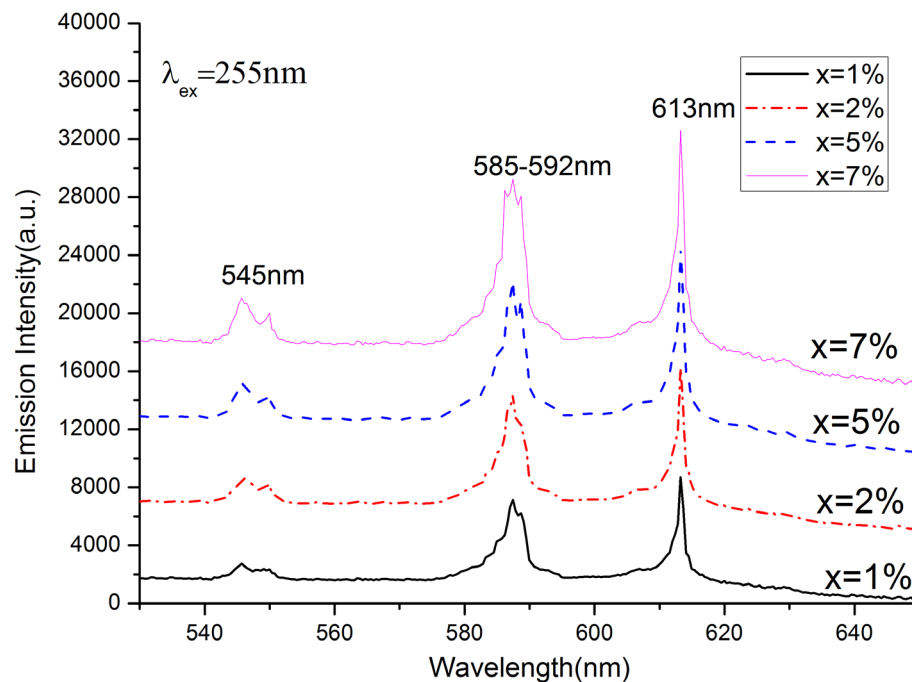


Figure 3. Excitation spectra of 613 nm emission in 3%  $\text{Eu}^{3+}/7\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  samples  
图3. 3%  $\text{Eu}^{3+}/7\% \text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$ 在613 nm波长发射时的激发谱



**Figure 4.** Excitation spectra of 545 nm emission in 3%  $\text{Eu}^{3+}$ /7%  $\text{Tb}^{3+}$ : $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  sample  
**图 4.** 3%  $\text{Eu}^{3+}$ /7%  $\text{Tb}^{3+}$ : $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  在 545 nm 波长发射时的激发谱



**Figure 5.** Emission spectra of 3%  $\text{Eu}^{3+}$ / $x\%$   $\text{Tb}^{3+}$ : $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  ( $x=1,2,5,7$ ) samples excited with 255 nm.  
**图 5.** 3%  $\text{Eu}^{3+}$ / $x\%$   $\text{Tb}^{3+}$ : $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  ( $x=1,2,5,7$ ) 样品在 255 nm 激发下的发射谱

的红光分别对应  $\text{Eu}^{3+}$  离子的  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ ,  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$  跃迁; 而 545 nm, 586 nm 发射峰, 分别对应  $\text{Tb}^{3+}$  的  ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_5$ ,  ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_4$  跃迁。随着  $\text{Tb}^{3+}$  浓度的增加, 发射光谱略有不同, 主要体现在以下方面: 第一是 545 nm 的蓝光发射带, 随着  $\text{Tb}^{3+}$  浓度增加, 其发射变得越来越明显; 第二是 585~592 nm 波段, 随着  $\text{Tb}^{3+}$  浓度增加分叉

峰也越来越明显,同时黄光发射波段的 FWHM 变得越来越宽;第三是 613 nm 的红光发射峰,随着  $\text{Tb}^{3+}$  浓度增加也逐渐增强。

对  $3\%\text{Eu}^{3+}/x\%\text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  样品进行了量子效率测试[16]

$$\eta_0 = \frac{\int \lambda P(\lambda) d\lambda}{\int \lambda E(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

其中,  $E(\lambda)$  和  $P(\lambda)$  为激发谱和发射谱中光强度。最后得到 613 nm 处的离子效率分别为  $46\pm 1\%$ ,  $48\pm 1\%$ ,  $53\pm 1\%$ ,  $55\pm 1\%$  ( $x = 1\%, 2\%, 5\%, 7\%$ )。因此,随着  $\text{Tb}^{3+}$  掺杂浓度的增加,  $\text{Eu}^{3+}$  离子的黄光和红光发射也跟着增强,这表明在 255 nm 波长照射下,  $\text{Tb}^{3+}$  的部分能量向  $\text{Eu}^{3+}$  离子转移,从而使得固定  $\text{Eu}^{3+}$  离子浓度也能获得更高的发光效率。同时,  $\text{Tb}^{3+}$  的另外一部分能量继续为 545 nm 绿光提供跃迁能量,从而使得整个  $3\%\text{Eu}^{3+}/x\%\text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  ( $x = 1, 2, 5, 7$ ) 样品存在绿光 - 黄光 - 红光三色光强度分布,这使得其在白光 LED 领域具有潜在的应用前景。

#### 4. 结论

采用溶胶 - 凝胶 - 高温固相合成法制备了  $3\%\text{Eu}^{3+}/x\%\text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  ( $x = 1, 2, 5, 7$ ) 纳米粉体,并对其微纳结构和光谱性能进行了表征。在温度为  $1000^\circ\text{C} \sim 1150^\circ\text{C}$  合成条件下,测得颗粒尺寸约为 300~700 nm。利用 255 nm 紫外光照射样品,观察到 545 nm, 585~592 nm 和 613 nm 三个典型的发射带,分别对应  $\text{Eu}^{3+}$  离子的  $(590\text{ nm})^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ ,  $(613\text{ nm})^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$  跃迁和  $\text{Tb}^{3+}$  的  $(545\text{ nm})^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$ ,  $(586\text{ nm})^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_4$  跃迁。随着  $\text{Tb}^{3+}$  浓度增加,三个发射带强度均有明显增强,这表明  $\text{Tb}^{3+}$  能量其中一部分转移给  $\text{Eu}^{3+}$  离子,而另外一部分激发  $\text{Tb}^{3+}$  离子的 545 nm 绿光。实验结果表明  $3\%\text{Eu}^{3+}/x\%\text{Tb}^{3+}:\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7$  ( $x = 1, 2, 5, 7$ ) 纳米粉体可以同时产生红黄绿三种色光,使其在白光 LED 领域具有潜在的应用价值。

#### 基金项目

福建省科技厅项目(2016J01752)和教育厅项目(JA15537, JK2015057)。

#### 参考文献 (References)

- [1] Lee, S.P., Huang, C.H., Chan, T.S. and Chen, T.M. (2014) New  $\text{Ce}^{3+}$ -Activated Thiosilicate Phosphor for LED Lighting Synthesis, Luminescence Studies, and Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **6**, 7260-7267. <https://doi.org/10.1021/am500483j>
- [2] Liu, H., Luo, Y., Mao, Z., Liao, L. and Xia, Z. (2014) A Novel Single-Composition Trichromatic White-Emitting  $\text{Sr}_{3.5}\text{Y}_{6.5}\text{O}_2(\text{PO}_4)_{1.5}(\text{SiO}_4)_{4.5}:\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}/\text{Mn}^{2+}$  Phosphor: Synthesis, Luminescent Properties and Applications for White LEDs. *Journal of Materials Chemistry C*, **2**, 1619-1627. <https://doi.org/10.1039/c3tc32003k>
- [3] Lü, W., Jiao, M.M., Shao, B.Q., Zhao, L.F. and You, H.P. (2015) Enhancing Photoluminescence Performance of  $\text{SrSi}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}^{2+}$  Phosphors by Re (Re = La, Gd, Y, Dy, Lu, Sc) Substitution and Its Thermal Quenching Behavior Investigation. *Inorganic Chemistry*, **54**, 9060-9065. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5b01402>
- [4] Kottaisamy, M., Rao, R.P., Avudathai, M., Srinivasan, L.K., Sundaram, V. and Jagannathan, R. (1995) On the Formation of Flux Grown  $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{3+}$  Red Phosphor. *Journal of the Electrochemical Society*, **142**, 3205-3209.
- [5] He, X. and Zhu, Y. (2008) Improvement of Morphology and Luminescence of  $\text{CaS}:\text{Eu}^{2+}$  Red-Emitting Phosphor Particles via Carbon-Containing Additive Strategy. *Journal of Materials Science*, **43**, 1515-1519. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2359-2>
- [6] Schmiechen, S., Schneider, H., Wagatha, P., Hecht, C., Schmidt, P.J. and Schnick, W. (2014) Toward New Phosphors for Application in Illumination-Grade White Pc-LEDs: the Nitridomagnesiumsilicates  $\text{Ca}[\text{Mg}_3\text{SiN}_4]:\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Sr}[\text{Mg}_3\text{SiN}_4]:\text{Eu}^{2+}$ , and  $\text{Eu}[\text{Mg}_3\text{SiN}_4]$ . *Chemistry of Materials*, **26**, 2712-2719. <https://doi.org/10.1021/cm500610v>
- [7] Tsai, Y.T., Chiang, C.Y., Zhou, W., Lee, J.F., Sheu, H.S. and Liu, R.S. (2015) Structural Ordering and Charge Variation Induced by Cation Substitution in  $(\text{Sr}, \text{Ca})\text{AlSiN}_3:\text{Eu}$  Phosphor. *Journal of the American Chemical Society*, **137**, 8936-8939.



- [8] Schmiechen, S., Strobel, P., Hecht, C., Reith, T., Siegert, M., Schmidt, P.J., Huppertz, P., Wiechert, D. and Schnick, W. (2015) Nitridomagnesiumsilicate  $\text{Ba}[\text{Mg}_3\text{SiN}_4]:\text{Eu}^{2+}$  and Structure-Property Relations of Similar Narrow-Band Red Nitride Phosphors. *Chemistry of Materials*, **27**, 1780-1785. <https://doi.org/10.1021/cm504604d>
- [9] Pust, P.V., Weiler, C., Hecht, A., Tücks, A.S., Wochnik, A.K., Henß, D., Wiechert, C., Scheu, P.J. and Schmidt, W. (2014) Narrow-Band Red-Emitting  $\text{Sr}[\text{LiAl}_3\text{N}_4]:\text{Eu}^{2+}$  as a Next-Generation LED-Phosphor Material. *Nature Materials*, **13**, 891-896. <https://doi.org/10.1038/nmat4012>
- [10] Yeh, C., Chen, W., Liu, R.S., Hu, S.F., Sheu, H., Chen, J. and Hintzen, H.T. (2012) Origin of Thermal Degradation of  $\text{Sr}_{2-x}\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}$  Phosphors in Air for Light-Emitting Diodes. *Journal of the American Chemical Society*, **134**, 14108-14117.
- [11] Deng, D.G., Yu, H., Li, Y.Q., Hua, Y.J., Jia, G.H., Zhao, S.L., Wang, H.P., Huang, L.H., Li, Y.Y., Li, C.X. and Xu, S.Q. (2013)  $\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}:\text{Eu}^{2+}$  Red-Emitting Phosphor for Solid-State Lighting: Structure, Luminescent Properties and White Light Emitting Diode Application. *Journal of Materials Chemistry C*, **1**, 3194-3199. <https://doi.org/10.1039/c3tc30148f>
- [12] Joshi, B. and Lee, S.W. (2015) Luminescence Properties of  $\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$  and  $\text{Pr}^{3+}$  Doped Translucent Sialon Phosphors. *Journal of Rare Earths*, **33**, 1142. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60538-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60538-X)
- [13] Jiao, H.Y. and Wang, Y. (2012) A Potential Red-Emitting Phosphor  $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7:\text{Eu}^{3+}$  for Near-Ultraviolet Light-Emitting Diodes. *Physica B: Condensed Matter*, **407**, 2729-2733. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2012.04.001>
- [14] Zhang, L., Jiang, D., Xia, J., Li, C., Zhang, N. and Li, Q. (2014) Novel Luminescent Yttrium Oxide Nanosheets Doped with  $\text{Eu}^{3+}$  and  $\text{Tb}^{3+}$ . *RSC Advances*, **4**, 17648-17652. <https://doi.org/10.1039/c4ra01881h>
- [15] Behrendt, M., Mahlik, S., Szczołdrowski, K., Kukliński, B. and Grinberg, M. (2016) Spectroscopic Properties and Location of the  $\text{Tb}^{3+}$  and  $\text{Eu}^{3+}$  Energy Levels in  $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}$  under High Hydrostatic Pressure. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **18**, 22266-22275. <https://doi.org/10.1039/C6CP03075K>
- [16] Ohkubo, K. and Shigeta, T. (1999) Absolute Fluorescent Quantum Efficiency of NBS Phosphor Standard Samples. *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, **83**, 87-93.

#### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [cmp@hanspub.org](mailto:cmp@hanspub.org)