

# 溶胶-凝胶法制备 $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : \text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ 荧光粉及其光学性质的研究

马红萍

(浙江科技学院机械与汽车工程学院, 浙江 杭州 310012)

**摘要** 采用溶胶-凝胶法制备了  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : \text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  荧光粉, 利用 X 射线衍射仪、荧光光谱仪、差热分析仪和透射电镜对其结构和光学性质进行了研究。该荧光粉在 331nm 近紫外光的激发下, 出现 5 个主发射峰, 分别位于 382, 485, 544, 584 和 619 nm, 5 个谱带叠加从而在单一基质中得到了白光。 $\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  中存在着能量传递,  $\text{Ce}^{3+}$  作为供体将能量传递给作为受体  $\text{Tb}^{3+}$ 。通过调节荧光粉中  $\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  的掺杂浓度, 可以调谐发光体的发光颜色。当  $\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  掺杂浓度分别为 0.01 和 0.05 时, 荧光粉的色坐标为 (0.31, 0.37), 接近纯白色点的色坐标为 (0.33, 0.33)。该荧光粉是一种新型的单一基质白色荧光粉。

**关键词** 材料; 白色发光二极管 (WLED); 溶胶-凝胶; 单一基质; 能量传递

**中图分类号** O482.3      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/AOS200929s2.0001

## Optical Properties of $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : \text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ Phosphors Prepared by a Sol-Gel Method

Ma Hongping

(School of Mechanical & Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

**Abstract**  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : \text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  phosphors were prepared by the sol-gel method, and their structure and optical properties were studied by X-ray diffraction (XRD), fluorescence spectrophotometer, differential thermal analysis (DTA) and transmission electron microscopy (TEM) respectively. Excited at the near ultra-violet 331nm light, the emission band consists of five peaks located at 382, 485, 544, 584, 619 nm respectively. The white light can be obtained by mixing the five emission peaks in the single host. Energy transfer exists between  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Tb}^{3+}$ , and the energy transfers from the  $\text{Ce}^{3+}$  sensitizer to the  $\text{Tb}^{3+}$  activator. The emission color can be changed by tuning the concentration of the  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Tb}^{3+}$  in the  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : \text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  phosphors. When the concentration of the  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Tb}^{3+}$  are 0.01 and 0.05 respectively, the chromaticity coordinate of the phosphor is measured to be (0.31, 0.37), which is close to the coordinate of standard pure white (0.33, 0.33).  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}, 0.05\text{Tb}$  phosphor is a promising single-phased white-light emitting phosphor.

**Key words** materials; white light emitting diode (WLED); sol-gel; single-phased; energy transfer

## 1 引 言

随着人们对环保、节能要求的提高, 白光发光二极管 (WLED) 照明得到迅速发展。目前 WLED 照明主要采用 LED 芯片结合荧光粉的方法制备, 通过多种荧光粉将光转换成不同颜色并组合成白光。但是, 多种荧光粉的混合会造成发光再吸收等问题<sup>[1-4]</sup>, 降低了发光效率; 而且产生配比调控等工艺

问题, 增加了生产成本。单一基质发白光的荧光粉能够有效地解决以上问题, 在科学和工业生产方面具有十分重要的意义, 引起了人们的广泛关注。

Hong He 等<sup>[5]</sup> 采用一种荧光粉 ( $\text{Mg}_{0.1}\text{Sr}_{1.9}\text{SiO}_4 : \text{Eu}^{2+}$ ) 将近紫外光直接转换成白光, Woan-Jen 等<sup>[6]</sup> 通过  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 : \text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$  荧光粉实现了单一基质发白光的现象。但是, 这些传统的硅酸盐类粉体主要采

**基金项目:** 浙江省科技计划 (2008C21053) 资助课题。

**作者简介:** 马红萍 (1975—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事光学材料方面的研究。E-mail: hongpingma@hotmail.com

用高温固相法合成,存在烧结温度高、烧结后的粉体容易结块和颗粒粒径不均匀等问题,提高了生产成本,增加了荧光粉涂覆工艺的难度。

针对以上问题,本文以  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  为基质,以  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  为激活离子,通过双掺杂激活离子实现单一荧光粉发白光的设想。另外,采用溶胶-凝胶这一湿化学法来合成此类荧光粉体,以达到降低烧结温度、提高性能和降低成本的目的<sup>[7]</sup>。通过对合成方法和光学性质的深入研究,发现该荧光粉是一种性能较好的单一基质发白光的材料。

## 2 实 验

按照化学计量比称取一定量的  $\text{Tb}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (摩尔分数 99.99%),  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (摩尔分数 99.99%),  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (摩尔分数 99%),  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (摩尔分数 99%)溶于适量的乙醇中,通过磁力搅拌器将溶液混合均匀,然后加入  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ,继续搅拌 3 h 形成无色透明溶胶。将该溶胶放入干燥箱在 65 °C 下干燥 16 h,得到半透明状干凝胶。将干凝胶研磨成粉末,放入刚玉坩埚中于空气中 500 °C 下预烧 2 h。将预烧后的粉体研磨成粉末,在  $4(\text{H}_2)/4(\text{N}_2)5/95$  还原气氛下,在 800~1200 °C 温度下,焙烧 2 h 得到目标样品。

采用美国 Thermo ARL XTRA 型自动 X 射线衍射仪(XRD)对样品进行物相鉴定,测试条件为:铜靶,管压为 40 kV,管流为 30 mA,波长为 0.15415 nm,步长值为 0.02°,扫描范围从 10°~80°。采用德国 NETZSCH 公司生产的 DTA404PC 差热分析仪对样品进行差热分析,升温速率为 10 °C/min。采用法国 Y-J 公司 FL3-211-P 型荧光光谱仪在室温下测量样品的激发光谱和发射光谱,激发源为氙灯。采用日本岛津公司生产的 UV-3150 型分光光度计测量样品的反射光谱,测量范围为 200~2500 nm。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 XRD 物相分析

图 1 所示是样品  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$  的 XRD 曲线,从图中可以看出,当焙烧温度低于 800 °C 时,样品 XRD 主要呈现宽的衍射包峰,表明样品为非晶态结构。900 °C 焙烧时,样品的 XRD 曲线呈现多锐峰,温度继续升高至 1000 °C, 1100 °C 和 1200 °C 时,主要峰形无明显变化,通过与

标准粉末衍射卡片对比,温度高于 900 °C 后,所得样品的 XRD 衍射峰数据与 JCPDS 88-0777 卡片数据基本一致( $a=0.78338$  nm,  $c=0.50082$  nm),说明样品为  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  晶体,空间点群为  $P-42_1m$ 。此外,由于  $\text{Ce}^{3+}$  的离子半径(0.103 nm)和  $\text{Tb}^{3+}$  的离子半径(0.092 nm)与  $\text{Ca}^{2+}$  的离子半径(0.099 nm)相近, $\text{Ce}^{3+}$  和  $\text{Tb}^{3+}$  取代  $\text{Ca}^{2+}$  进入晶格后,不会引起晶格常数的很大变化。所以,所得样品晶型仍为  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_7$  晶体。样品的结晶相可由 Scherrer 方程给出

$$D_{hkl} = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (1)$$

式中  $D_{hkl}$  表示结晶相在  $[hkl]$  晶向上的尺度, $K$  为常数取 0.90, $\lambda$  为 X 射线的波长( $\lambda=0.15405$  nm), $\beta$  为  $(hkl)$  晶面对应的衍射峰半峰全宽, $\theta$  为 Bragg 衍射角。根据(1)式计算可得表 1  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$  不同焙烧温度下的晶粒平均尺寸,从表中可以看出样品的平均晶粒大小在 26 nm 左右。随着温度的升高,样品的晶粒平均尺寸有增大的趋势,这有可能是样品焙烧温度的升高促使晶粒逐渐长大有关。

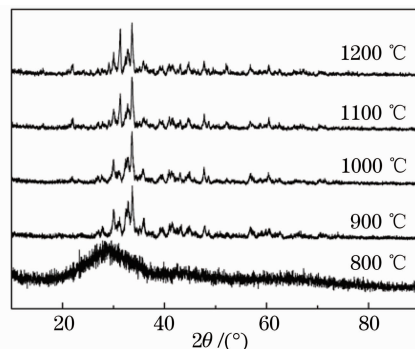


图 1  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$  不同焙烧温度下的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$  at different sintered temperature

表 1  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$  不同焙烧温度下的晶粒平均尺寸

Table 1 Average size of crystal particles of  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$  at different sintered temperature

Sample(Ttemperature)	Average size of crystal particles /nm
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$ (900 °C)	25.51
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$ (1000 °C)	25.85
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$ (1100 °C)	27.86
$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$ (1200 °C)	28.12

图 2 为  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$  的 TEM 图,从图中可以看出样品的颗粒大小在 30 nm 左右,这与根据(1)式计算所得样品的颗粒平均尺寸吻合。

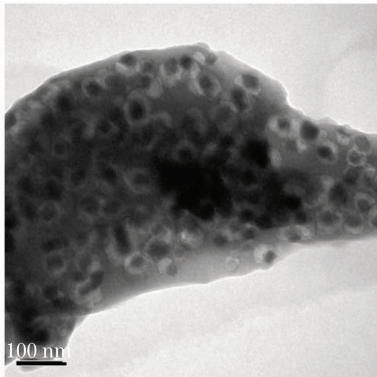


图 2  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$  的 TEM 图  
Fig. 2 TEM of the  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$

### 3.2 差热分析

图 3 为荧光粉  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$  的前驱体进行的示差扫描量热法(DSC)分析曲线。图 3 中可见,在 DSC 曲线上 123 °C 时出现了一个吸热峰,这是由于前驱体脱去乙醇和吸附水挥发所致。在 393 °C 和 548 °C 时分别出现了两个吸热峰,这与体系中硝酸盐的分解有关。而在 865 °C 处出现了一个比较大的放热峰,这主要是同  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  的结晶相关,说明高于此温度时,  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  晶相开始形成,此结果与 XRD 的物相分析一致。

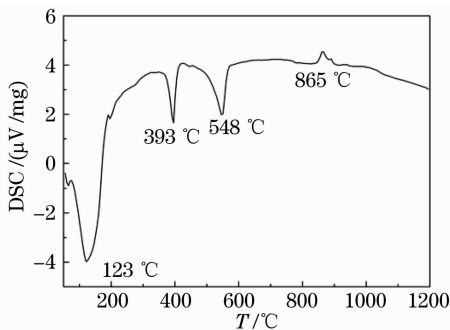


图 3 示差扫描量热法分析曲线  
Fig. 3 DSC curves of the precursor

### 3.3 光谱分析

样品  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.05\text{Ce}^{3+}$  在紫外光激发下呈蓝紫色发光。图 4 中 *a, b* 曲线分别为  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.05\text{Ce}^{3+}$  在室温下的激发光谱和发射光谱。激发光谱(监测波长为 401 nm)是位于 294 和 331 nm 处的宽谱带构成,是  $\text{Ce}^{3+}$  离子的  $4f \rightarrow 5d$  跃迁产生的紫外近紫外区的吸收,能够有效吸收激发光。发射光谱由主峰值是由位于 384 nm 处的不

对称峰构成,属于  $5d \rightarrow 4f$  跃迁发射。从  $5d$  激发态跃迁到  $2F_{7/2}$  和  $2F_{7/2}$  基态特征不明显。Kutty<sup>[8]</sup> 在研究基质  $\text{Ca}_3\text{Al}_3\text{B}_6\text{O}_{24}$  中  $\text{Ce}^{3+}$  的发光时也发现类似现象,并把此现象归结为  $\text{Ce}^{3+}$  周围具有强烈的晶体场所致。因此,这里  $\text{Ce}^{3+}$  的特征发射双峰不明显,同样表明  $\text{Ce}^{3+}$  周围具有较强的晶体场,使  $4f$  能级劈裂较大,从而导致  $5d \rightarrow 4f$  跃迁双峰重叠较大。

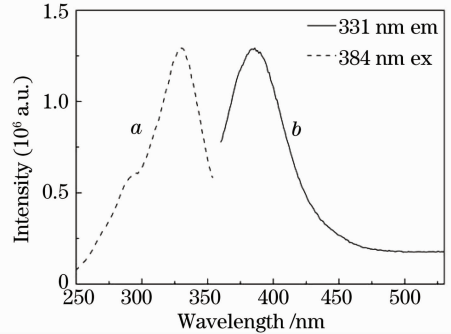


图 4  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.05\text{Ce}$  的激发光谱和发射光谱  
Fig. 4 Excitation and emission spectra of  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6 : 0.05\text{Ce}$

图 5 中 *a, b* 曲线分别为  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.05\text{Tb}^{3+}$  的激发光谱和发射光谱。从图 5 可知,激发光谱(监测波长为 543 nm)在近紫外紫外区主要由 348, 370 和 450 nm 的宽谱带构成,是  $\text{Tb}^{3+}$  离子的  $4f \rightarrow 5d$  跃迁吸收。发射光谱在 351 nm 激发下呈现出较强的荧光光谱。其峰分别为 618, 584, 544 和 441 nm,分别对应于  $\text{Tb}^{3+}$  的  $5D_4 \rightarrow 7F_j (j=3, 4, 5, 6)$  的特征跃迁,485 nm 处对应于  $\text{Tb}^{3+}$  的  $5D_3 \rightarrow 7F_6$  的特征跃迁。其中 545 nm 是  $\text{Tb}^{3+}$  的  $5D_4 \rightarrow 7F_5$  的特征绿光,其强度最大。

图 6 为  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : x\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+} (x = 0.01, 0.03, 0.05)$  的激发光谱和发射光谱。从图 6(b)可知,荧光粉的发射光谱(激发波长为 331 nm)由 5 个主发射峰组成,其中 382 nm 对应  $\text{Ce}^{3+}$  的特征跃迁,619, 584, 544 nm 分别对应于

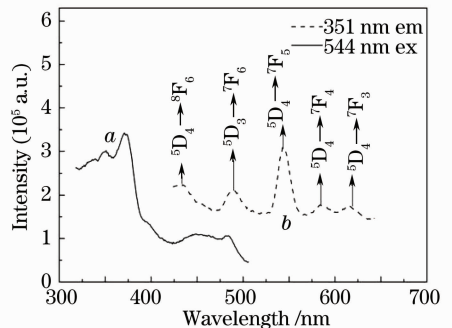


图 5  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.05\text{Tb}^{3+}$  的激发光谱和发射光谱  
Fig. 5 Excitation and emission spectra of  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.05\text{Tb}^{3+}$

$Tb^{3+}$  的  $^5D_4 \rightarrow ^7F_j$  ( $j=3, 4, 5$ ) 的特征跃迁。485 nm 处对应于  $Tb^{3+}$  的  $5D_3 \rightarrow 7F_6$  的特征跃迁。随着  $Ce^{3+}$  浓度的增加,  $Tb^{3+}$  的特征发射峰强度增加。当  $x$  逐渐增大到 0.03 时,  $Ce^{3+}$  和  $Tb^{3+}$  的特征峰的强度都增大, 但当  $x$  增大到 0.05 时,  $Ce^{3+}$  和  $Tb^{3+}$  的特征峰的强度降低, 出现了浓度淬灭现象。图 7 所示为  $Ca_2MgSi_2O_7 : 0.01Ce^{3+}, yTb^{3+}$  ( $y=0.07, 0.09, 0.11$ ) 的

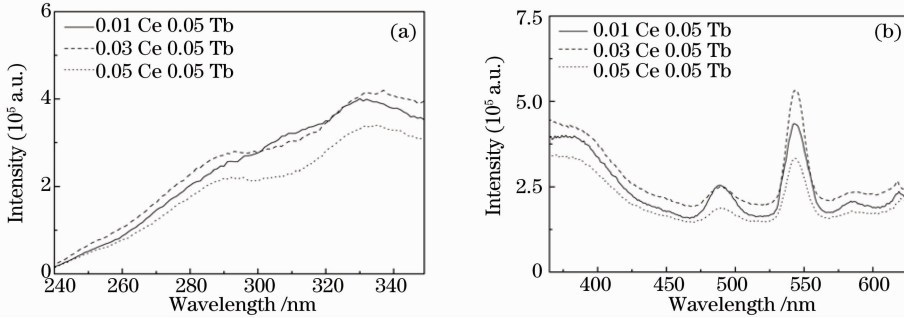


图 6  $Ca_2MgSi_2O_7 : xCe^{3+}, 0.05Tb^{3+}$  的 (a) 激发光谱和 (b) 发射光谱

Fig. 6 (a) Excitation and (b) emission spectra of  $Ca_2MgSi_2O_7 : xCe^{3+}, 0.05Tb^{3+}$

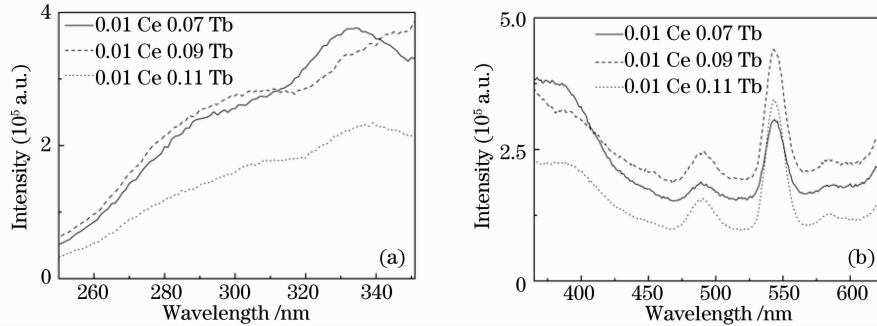


图 7  $Ca_2MgSi_2O_7 : 0.01Ce^{3+}, yTb^{3+}$  的 (a) 激发光谱和 (b) 发射光谱

Fig. 7 (a) Excitation and (b) emission spectra of  $Ca_2MgSi_2O_7 : 0.01Ce^{3+}, yTb^{3+}$

### 3.4 CIE 色度坐标

表 2 给出了系列样品  $Ca_2MgSi_2O_7 : xCe^{3+}, yTb^{3+}$  ( $x=0.01-0.05, y=0.05-0.11$ ) 的色坐标, 比较了荧光粉体色度随  $Ce^{3+}, Tb^{3+}$  浓度的变化, 从表 1 中可以看出  $Ca_2MgSi_2O_7 : 0.01Ce^{3+}, 0.05Tb^{3+}$  的色

激发光谱和发射光谱。从图 7(b) 可知, 随着  $Tb^{3+}$  浓度的增加,  $Ce^{3+}$  的特征发射峰强度降低, 而  $Tb^{3+}$  的特征发射峰强度增加, 这表明  $Ce^{3+}$  和  $Tb^{3+}$  之间存在着能量转移,  $Ce^{3+}$  作为供体将能量传递给作为受体的  $Tb^{3+}$ 。当  $y$  逐渐增大到 0.09 时,  $Tb^{3+}$  的特征峰的强度都增大, 但是当  $y$  增大到 0.11 时,  $Tb^{3+}$  的特征发射峰强度减小, 出现了浓度淬灭现象。

坐标是 (0.31, 0.37), 与 1931 年国际照明委员会 (CIE) 色度图上给出的纯白色点的色坐标 (0.33, 0.33) 相近, 表明  $Ca_2MgSi_2O_7 : 0.01Ce^{3+}, 0.05Tb^{3+}$  样品发出较强的白光, 是一种新型的单一基质发白色的荧光粉体。

表 2 荧光粉  $Ca_2MgSi_2O_7 : xCe^{3+}, yTb^{3+}$  ( $x=0.01-0.05, y=0.05-0.11$ ) 的色坐标

Table 2 CIE of the  $Ca_2MgSi_2O_7 : xCe^{3+}, yTb^{3+}$  ( $x=0.01-0.05, y=0.05-0.11$ )

Phosphors	CIE Chromaticity $x$	Coordinate $y$
$CaMgSi_2O_7 : 0.01Ce^{3+} 0.05Tb^{3+}$	0.31	0.37
$CaMgSi_2O_7 : 0.03Ce^{3+} 0.05Tb^{3+}$	0.30	0.36
$CaMgSi_2O_7 : 0.05Ce^{3+} 0.05Tb^{3+}$	0.30	0.36
$CaMgSi_2O_7 : 0.05Ce^{3+} 0.07Tb^{3+}$	0.30	0.35
$CaMgSi_2O_7 : 0.05Ce^{3+} 0.09Tb^{3+}$	0.30	0.36
$CaMgSi_2O_7 : 0.05Ce^{3+} 0.11Tb^{3+}$	0.30	0.38

## 4 结 论

采用溶胶-凝胶法成功合成了  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : \text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  系列荧光粉。900 °C 焙烧后样品即可形成  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  晶体。 $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 : 0.01\text{Ce}^{3+}, 0.05\text{Tb}^{3+}$  发射光谱由 5 个主发射峰组成, 其中 382 nm 对应  $\text{Ce}^{3+}$  的特征跃迁, 618, 584, 544 nm 分别对应于  $\text{Tb}^{3+}$  的  $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_j$  ( $j = 3, 4, 5$ ) 的特征跃迁。485 nm 处对应于  $\text{Tb}^{3+}$  的  $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_6$  的特征跃迁, 5 个谱带叠加在单一基质中得到了白光。 $\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  中存在着能量传递,  $\text{Ce}^{3+}$  作为供体将能量传递给作为受体的  $\text{Tb}^{3+}$ 。通过比较荧光粉体色度随浓度的变化, 当  $\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  掺杂浓度分别为 0.01 和 0.05 时, 荧光粉的色坐标为 (0.31, 0.37), 接近纯白色点的色坐标为 (0.33, 0.33), 可以作为紫外发光二极管 (UV-LED) 用单一基质发白的荧光粉体。

## 参 考 文 献

- Jiao Haiyan, Wang Yuhua, Zhang Jiachi. Synthesis and luminescent characteristics of  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4 : \text{Sm}^{3+}$  phosphors for light-emitting diode[J]. *J. Inorganic Materials*, 2008, **28**(3): 471~474  
焦海燕, 王育华, 张加驰. 发光二极管用荧光材料  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4 : \text{Sm}^{3+}$  的合成及其发光特性[J]. *无机材料学报*, 2008, **28**(3):

471~474

- Yang Zhiping, Liu Yufeng, Xiong Zhijun *et al.*. Properties of the single white emitting phosphor luminescence  $\text{Sr}_2\text{MgSiO}_5 : (\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+})$ [J]. *J. Chinese Ceramic Society*, 2006, **34**(10): 1195~1198  
杨志平, 刘玉峰, 熊志军.  $\text{Sr}_2\text{MgSiO}_5 (\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+})$  单一基质白光荧光粉的发光性质[J]. *硅酸盐学报*, 2006, **34**(10): 1195~1198
- WanJen Yang, Tengming Chen. White-light generation and energy transfer in  $\text{SrZn}_2(\text{PO}_4)_2 : \text{Eu}, \text{Mn}$  phosphor for ultraviolet light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(10): 101903
- Yuhong Won, Hoseong Jang, Wonbin Lm *et al.*. Tunable full-color-emitting  $\text{La}_{0.827}\text{Al}_{11.9}\text{O}_{19.09} : \text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$  phosphor for application to warm white-light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**: 231909
- Hong He, Renli Fu. White light-emitting  $\text{Mg}_{0.1}\text{Sr}_{1.9}\text{SiO}_4 : \text{Eu}^{2+}$  phosphors[J]. *J. Luminescence*, 2008, **128**(3): 489~493
- W. J. Yang, L. Y. Luo, T. M. Chen *et al.*. Luminescence and energy transfer of Eu- and Mn-activated  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  as a potential phosphor for white-light UVLED [J]. *Chem. Mater.*, 2005, **17**(15): 3883~3888
- Xiaoming Liu, CuiKun Lin, Jun Lin. White light emission from  $\text{Eu}^{3+}$  in  $\text{CaIn}_2\text{O}_4$  host lattices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**: 081904
- You Hongpeng, Hong Guangyan. Luminescent characteristics of several rare earths in  $\text{CaAl}_3\text{BO}_7 : \text{RE}$  ( $\text{RE} = \text{Ce}, \text{Gd}, \text{Tb}$ ) [J]. *Chinese J. Luminescence*, 1997, **18**(3): 22~25  
尤洪鹏, 洪广言.  $\text{CaAl}_3\text{BO}_7 : \text{RE}$  ( $\text{RE} = \text{Ce}, \text{Gd}, \text{Tb}$ ) 中稀土离子的光谱特性[J]. *发光学报*, 1997, **18**(3): 22~25