

文章编号: 0253-2239(2010)s100106

Ce, Tb 共掺杂单一基质 $\text{CaSi}_2\text{O}_2\text{N}_2$ 白光发射 荧光粉光学性能研究

苏醒宇 华有杰 邓德刚 李高峰 王倩 徐时清

(中国计量学院材料科学与工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 采用高温固相法合成了白光 LED 用荧光粉 $\text{Ca}_{1-x-y}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2 : x\text{Ce}, y\text{Tb}$ 。利用 X 射线衍射仪测量分析其物相结构, 结果表明稀土离子的掺入并没有改变其主晶相, 仍为单斜结构。通过荧光分光光度计测试并分析其激发光谱和发射光谱, 在 360 nm 波长光激发下, 观察到样品在 410 nm 和 542 nm 处存在发射谱带, 该发射分别归因于 Ce^{3+} 的 5d-4f 的电子跃迁和 Tb^{3+} 的 f-f 跃迁; 分别监测 Ce^{3+} , Tb^{3+} 特征发射, 在 360 nm 附近观察到很宽的激发谱带, 而且光谱几乎完全重叠, 分析得知 Ce^{3+} 离子对 Tb^{3+} 离子有能量传输作用。对样品色坐标分析, 结果得到 $\text{Ca}_{0.995-y}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2 : 0.005\text{Ce}^{3+}, y\text{Tb}^{3+}$ ($y=0.06, 0.08, 0.10$) 是一种性能良好的单一基质白光发光 LED 用荧光粉。

关键词 光学材料; 荧光粉; $\text{CaSi}_2\text{N}_2\text{O}_2$; 固相法; 双掺

中图分类号 O482.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100106

Luminescence Properties of the Single White Emitting Phosphor $\text{CaSi}_2\text{N}_2\text{O}_2 : \text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$

Su Xingyu Hua Youjie Deng Degang Li Gaofeng Wang Qian Xu Shiqing

(College of Materials Science and Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract $\text{CaSi}_2\text{N}_2\text{O}_2$ codoped with Ce (fixed) and varying Tb concentrations were prepared by solid-state synthesis method. Crystalline phase was investigated by powder X-ray diffraction, the Tb, Ce-codoped $\text{CaSi}_2\text{N}_2\text{O}_2$ phosphors have the monoclinic structure. Excitation spectra and emission spectra were investigated by spectrometer. The results indicated that there were two emission bands centered at 542 nm and 410 nm when excited by 360 nm, which were ascribed to the characteristic emissions of the Tb^{3+} and Ce^{3+} . Monitored at 542 and 410 nm, respectively, the overlapped excitation spectra were obtained. Moreover, this excitation spectrum of Ce^{3+} overlapped perfectly with the excitation spectrum of Tb^{3+} . As a result, the energy transfer from Ce^{3+} to Tb^{3+} was observed. The results of sample color coordinate analysis show that the $\text{Ca}_{0.995-y}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2 : 0.005\text{Ce}^{3+}, y\text{Tb}^{3+}$ ($y=0.06, 0.08, 0.10$) is a single host phosphor with superior properties for white light emitting diodes.

Key words optical material; phosphors; $\text{CaSi}_2\text{N}_2\text{O}_2$; solid-state synthesis method; co-doped

OCIS codes 260.1180; 260.2510; 260.2160

1 引 言

白光 LED 具有环保、体积小、寿命长和反应速度快等优点^[1-4], 并克服了传统白炽灯和荧光灯存在的耗电多、易碎及弃物汞污染等缺点。在特种照明、液晶显示以及普通照明等方面显示出巨大的应用前景。

目前, 获取白光 LED 的途径大致有三种: 光转换、多色 LED 芯片组合^[5, 6]和多量子阱^[7]。综合技术、工艺和生产成本等因素, 目前光转换型白光 LED 是最易实现产业化的, 其中最普遍的方法是: 通过蓝光芯片激发 $\text{YAG} : \text{Ce}^{3+}$ 黄色荧光粉, 利用黄

收稿日期: 2010-07-22; **收到修改稿日期**: 2010-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(50772102)、教育新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0786)和浙江省科技计划(2009C21020)资助课题。

作者简介: 苏醒宇(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事发光材料方面的研究。E-mail: woshisu30@yahoo.com.cn

导师简介: 徐时清(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事发光材料方面的研究。E-mail: sxucjlu@hotmail.com(通信联系人)

光和蓝光混合得到白光^[8]。但这种类型的白光 LED 的发光颜色很容易受输入电流和荧光粉涂层厚度的影响^[7],且 YAG:Ce³⁺ 的发光强度受环境温度影响也很大^[10~12]。为解决以上问题,该领域将注意力逐渐转向采用紫外-近紫外辐射 InGaN 芯片激发荧光粉以实现白光 LED^[13,14]。

由于荧光粉混合调配及颜色再吸收等问题的存在,使得流明效率及色彩稳定性、显示指数等有较大的影响,近年来研制近紫外激发全色单一白光荧光粉成为一个研究热点。近期发现的多数氮化物,氮氧化物荧光粉都为近紫外激发,并表现出良好的热学、化学稳定性。如 Li^[15,16] 等制备出一系列氮氧化物荧光粉 MSi₂O₂N₂:Ce³⁺ (M = Ca, Sr, Ba),其中 CaSi₂O₂N₂:Ce³⁺ 在 400 nm 左右发出较宽光谱,呈现蓝光。这种荧光粉激发波长均可以与近紫外 InGaN 基发光二极管匹配。在研究中发现 Ce, Tb 共掺杂于此同一基质中时,可同时观察到 Ce³⁺, Tb³⁺ 的特征发光,并可考虑研制单一基质白色发光荧光粉。本文利用高温固相法合成了一种新型 Ca_{1-x}ySi₂O₂N₂:xCe³⁺, yTb³⁺ 荧光粉,对其结构及其发光性质进行了探讨。

2 实 验

实验所用材料为 CaCO₃ (AR), SiO₂ (AR), Si₃N₄ (99.9%), CeO₂ (99.99%) 和 Tb₄O₇ (99.99%) 按化学计量比称取以上材料,研磨均匀后置于坩埚内。利用高温固相反应,在还原气氛(体积分数 5% H₂, 95% N₂) 中于 1450 °C 下烧结 6 h,得到荧光粉样品 Ca_{1-x}ySi₂O₂N₂:xCe³⁺, yTb³⁺。

采用 Thermo ARL XTRA 型 X 射线衍射仪 (XRD) (辐射源为 Cu 靶 K α , 40 kV, 30 mA, 扫描速度为 8°/min, 步长 0.02°, 扫描范围 10°~80°) 测定样品的粉末衍射图。用配备了 Xe 闪光灯的 Y-JFL3-211-p 分光光度计测定材料的激发光谱(扫描范围是 280~430 nm) 与发射光谱(扫描范围是 400~700 nm)。

3 结果与分析

3.1 Ca_{1-x}Si₂O₂N₂:0.005Ce³⁺, yTb³⁺ 的晶体结构分析

图 1 是样品 Ca_{1-x}ySi₂O₂N₂:xCe³⁺, yTb³⁺ 的 XRD 图,发现其与卡片 PDF # 44-0117 对应,并且与 Y. Q. Li 等^[16] 的文章报导一致。CaSi₂O₂N₂ 属

于单斜晶系,他的空间群为 P2₁/m。晶体中,每 1 个氮原子连接了 3 个 Si 原子,同时每 1 个 O 原子连接 2 个 Si 原子,形成以 SiON₃ 四面体互相连接的网状结构,金属离子镶嵌于其中^[17]。Ca²⁺ 处在一个由 6 个氧离子结合成的扭曲的三棱柱结构之中,其中的每个氧离子都归属于 SiON₃ 四面体,在 CaSi₂O₂N₂ 中由于 Ca 离子半径为 0.099 nm,而 Ce³⁺ 的离子半径分别为 0.103 nm,大小十分接近。Ce 的 3 价离子易于进入 Ca²⁺ 的空缺位置。由于 Tb³⁺ (0.092 nm) 的离子半径也接近于 Ca²⁺,并且与氧离子,氮离子和硅离子的半径相差较大,所以 Tb³⁺ 也进入了基质中 Ca²⁺ 的空缺位置,具有与 Ce³⁺ 相似的晶格场环境。

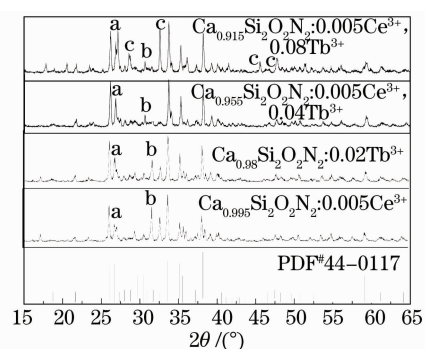


图 1 Ca_{1-x}ySi₂O₂N₂:xCe³⁺, yTb³⁺ 的 XRD 对比图

Fig. 1 XRD pattern of Ca_{1-x}ySi₂O₂N₂:xCe³⁺, yTb³⁺

当 Tb³⁺ 离子进入晶格,在图 1 中可观察到标记 b 的峰值,随着 Tb 含量的增多逐渐降低。而 a 标记处,随着 Tb 浓度的增加其峰值逐渐增大。然而标记 c 处出现峰值异常是由于 Tb 的大量掺入,会降低结晶温度。

3.2 Ca_{0.98}Si₂O₂N₂:0.005Ce³⁺ 谱图分析

图 2 所示为 Ca_{0.995}Si₂O₂N₂:0.005Ce³⁺ 的激发光谱和发射光谱。监测波长 400 nm,测得位于 340 nm 的激发峰,激发谱谱带可由 300 nm 左右延伸至 400 nm 左右,属于 Ce³⁺ 的 d-f 跃迁,可与紫外-近紫外芯片匹配应用于白光 LED。

Ca_{0.995}Si₂O₂N₂:0.005Ce³⁺ 在 340 nm 紫外光激发下呈 d-f 跃迁宽带发射,发射光谱的最大峰值位于 400 nm,但是其发光区域很宽,从图 2 看出其发光覆盖了蓝光区域。Ce³⁺ 的 4f 电子可以激发到能量较高的 5d 轨道,当激发到 5d 轨道的电子跃迁到基态能级时,就产生了 Ce³⁺ 的特征发光。由于 5d 轨道产生晶体场劈裂,所以 Ce³⁺ 的发光强度与基质晶格的结构密切相关。5d 轨道裸露在外壳层,极易受到外界晶体场的影响,而使 5d 轨道不再是分离的能级,几乎成为能带,这就造成了 Ce³⁺ 的宽带发射

而不是线谱^[18]。

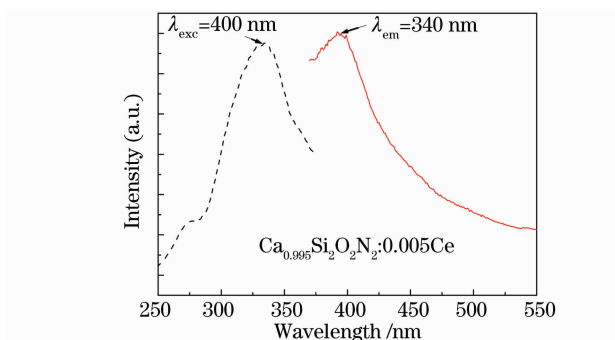


图 2 $\text{Ca}_{0.995}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2:0.005\text{Ce}^{3+}$ 激发光谱与发射光谱

Fig. 2 Excitation spectra and emission spectra of $\text{Ca}_{0.995}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2:0.005\text{Ce}^{3+}$

而同时由于其极易受外场影响,当在晶体中掺入 Tb^{3+} 离子时,如图 3 为掺杂一定量的 Tb^{3+} 离子以后的激发光谱发射光谱对照图,相较于图 2,激发光谱峰值明显红移,由 340 nm 移动至 360 nm 处。而发射光谱也由原来的 400 nm 移动到 410 nm。

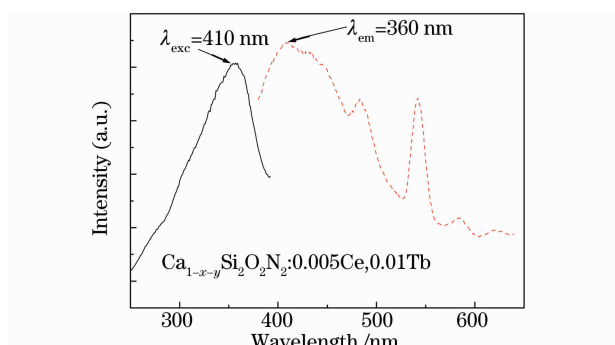


图 3 $\text{Ca}_{0.985}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2:0.005\text{Ce}^{3+}, 0.01\text{Tb}^{3+}$ 的激发光谱和发射光谱

Fig. 3 Excitation spectra and emission spectra of $\text{Ca}_{0.975}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2:0.005\text{Ce}^{3+}, 0.01\text{Tb}^{3+}$

根据晶体场理论,在晶格中,当阳离子的价态相同时,减小其离子半径,使得电荷密度增加,进而使共价性增大,其所造成的电子云膨胀效应将使 5d 轨道下降,从而产生红移现象^[17]。而此处 Tb^{3+} 半径为 0.092 nm,替换 Ca^{2+} (0.099 nm) 电荷密度大幅度增加,故符合上述理论。

3.3 $\text{Ca}_{1-x-y}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2:x\text{Ce}^{3+}, y\text{Tb}^{3+}$ 发光性能分析

图 4 为分别监测同一样品中 Ce^{3+} 发射峰波长 410 nm 和 Tb^{3+} 发射峰波长 542 nm,得到的两组激发光谱。结果显示 Ce^{3+} 的激发谱与 Tb^{3+} 的激发谱线重叠,都位于 360 nm 附近,由此可看出 $\text{Ca}_{0.975}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2:0.005\text{Ce}^{3+}, 0.02\text{Tb}^{3+}$ 可以被 360 nm 波长的光有效激发,并且此种荧光粉适于与近紫外芯片组合。

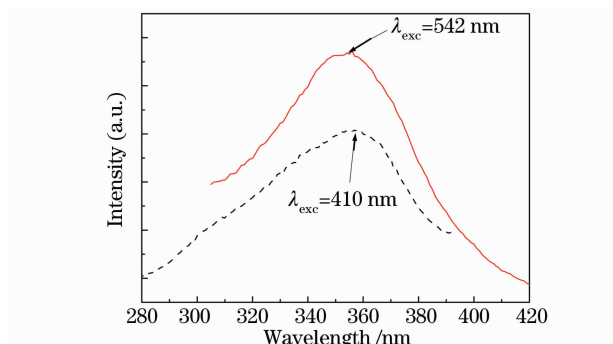


图 4 $\text{Ca}_{0.975}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2:0.005\text{Ce}^{3+}, 0.02\text{Tb}^{3+}$ 的激发光谱图

Fig. 4 Excitation spectra of

$\text{Ca}_{0.975}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2:0.005\text{Ce}^{3+}, 0.02\text{Tb}^{3+}$

由于在探测 $\text{Ca}_{0.98}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2:0.02\text{Tb}$ 光谱过程中,未发现激发光谱以及发射光谱的出现。而图 4 中,由于 Ce^{3+} 的存在,从而探测出 Tb^{3+} 的激发光谱峰值为 360 nm 与 Ce^{3+} 几乎完全重合,可以初步断定此处存在一个 Ce-Tb 间的能量传输作用。

Ce^{3+} 离子浓度不变,改变 Tb^{3+} 离子浓度进而得到发光较佳的单一基质白光发射荧光粉体。如图 5 所示,在 360 nm 波长激发下,得到了一系列随 Tb^{3+} 浓度变化的曲线。图中可明显看出未掺杂 Tb 的样品与掺杂 Tb 的样品相比, Ce^{3+} 的特征发射峰值有明显的偏移,发生这种现象的原因在图 3 处已加以验证说明。而单掺杂 Tb 的样品,在 360 nm 激发下,并未观察到发射光谱。而其他双掺杂的样品发射光谱均出现 Ce^{3+} 和 Tb^{3+} 的双发射。其中 Tb^{3+} 的发射由许多线谱构成,它的发射峰主要位于 490, 542, 590 和 620 nm,它们分别属于 $^5\text{D}_4-7\text{F}_J$ ($J=6, 5, 4, 3$) 的跃迁。在 Tb^{3+} 的 $5\text{D}_4-7\text{F}_J$ 发射中,位于 540 nm 左右的 $5\text{D}_4-7\text{F}_5$ 发射峰是最强的,这是因为 $5\text{D}_4-7\text{F}_5$ 的能级跃迁属于电偶级和磁偶级允许跃迁^[19]。

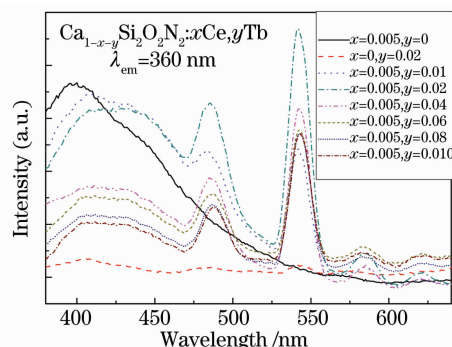


图 5 $\text{Ca}_{1-x-y}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2:x\text{Ce}^{3+}, y\text{Tb}^{3+}$ 的发射光谱图

Fig. 5 Emission spectra of

$\text{Ca}_{1-x-y}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2:x\text{Ce}^{3+}, y\text{Tb}^{3+}$

在 $\text{Ca}_{1-x-y}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2 : x\text{Ce}^{3+}, y\text{Tb}^{3+}$ 中, Ce^{3+} 对 Tb^{3+} 的能量传递作用十分明显。图 5 中已经观察到单掺 Tb 的 $\text{CaSi}_2\text{O}_2\text{N}_2$, 其发射基本观测不到, 而在其中掺杂了 Ce 离子以后, Tb^{3+} 的发射明显增强。并且由图 6 直观的表现出来: 随着 Tb 掺杂浓度的不断增加, Ce^{3+} 的发射强度逐渐降低。很明显 Ce^{3+} 吸收能量以后, 能有效地把能量传递给 Tb^{3+} , 从而增强了 Tb^{3+} 的发射强度。

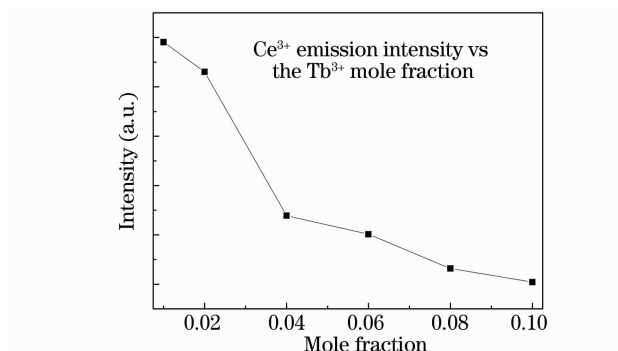


图 6 Tb^{3+} 摩尔分数与 Ce^{3+} 发光强度的关系图

Fig. 6 Graph of Ce^{3+} emission intensity versus the Tb^{3+} mole fraction

图 7 是 $\text{Ca}_{1-x-y}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2 : x\text{Ce}^{3+}, y\text{Tb}^{3+}$ 中, Ce^{3+} 和 Tb^{3+} 的能级图以及能量传递的途径。当 Ce^{3+} 从基态 $2\text{F}_7/2$ 能级激发到 5d 态时, 激发态 5d 的能量直接以无辐射共振的方式传递到 Tb^{3+} 的 5D_3 和 5D_4 能级; Tb^{3+} 的 5D_3 能级的能量迅速地无辐射弛豫到 Tb^{3+} 的 5D_4 能级, 最后由 5D_4 能级跃迁到 7F_j 能级, 产生 Tb^{3+} 的特征发射。

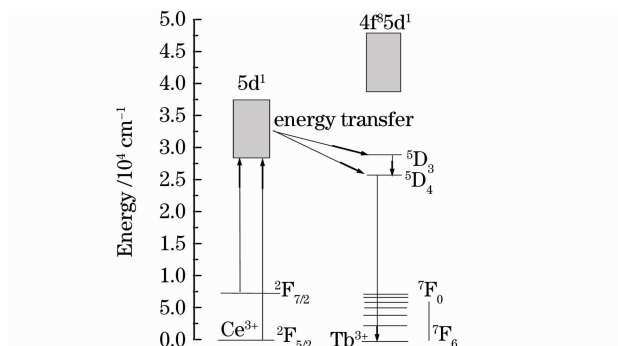


图 7 Ce^{3+} 能量转移至 Tb^{3+} 能级关系图

Fig. 7 Energy level diagram of the energy transfer between Ce^{3+} and Tb^{3+}

由图 8 可以直观的看出随 Tb 含量的增加, 接受 Ce^{3+} 传能的离子也逐渐增多, Tb^{3+} 的特征发射强度逐渐增强, 当 Tb 的掺杂摩尔分数达到 0.02 时其发光强度达到最大值, 而后随着 Tb^{3+} 离子的浓度增加, 出现浓度猝灭现象, 其发光逐渐减弱。

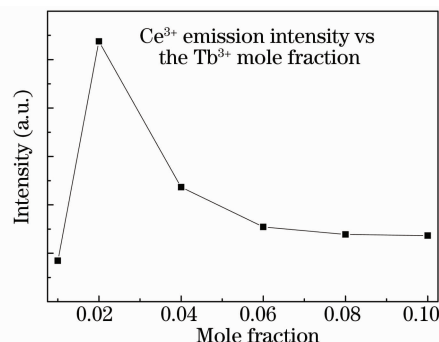


图 8 Tb^{3+} 摩尔分数与 Ce^{3+} 发光强度的关系图

Fig. 8 Graph of Tb^{3+} emission intensity versus the Ce^{3+} mole fraction

$\text{Ca}_{0.995-y}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2 : 0.005\text{Ce}^{3+}, y\text{Tb}^{3+}$ 在 360 nm 激发下, 发射光的发光区域在图 9 中显示出来, 当 Tb^{3+} 的浓度分别为 0.06, 0.08, 0.10 时, 对应色坐标为 (0.281, 0.320), (0.283, 0.329), (0.293, 0.341)。此坐标表明, 其发光区域均位于白光区域, 是一种很好的冷白光。

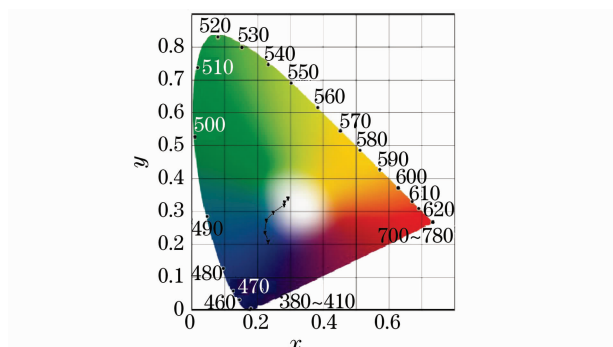


图 9 $\text{Ca}_{0.995-x}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2 : 0.005\text{Ce}^{3+}, y\text{Tb}^{3+}$ 色坐标图

Fig. 9 Fig. 9 Color coordinates of $\text{Ca}_{0.995-x}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2 : 0.005\text{Ce}^{3+}, y\text{Tb}^{3+}$

4 结 论

本文采用高温固相法合成了 $\text{Ca}_{1-x-y}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2 : x\text{Ce}^{3+}, y\text{Tb}^{3+}$ 荧光粉, 分析其物相结构, 仍属于单斜晶系。在 $\text{Ca}_{0.995}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2 : 0.005\text{Ce}$ 中, 掺杂 Tb 离子以后 Ce 特征光谱发生红移, 其原因是由于 Tb^{3+} 的掺入增加了电荷密度, 从而使共价性增强, 进而得能级劈裂, 最低能级下降。在发光过程中, Ce^{3+} 对 Tb^{3+} 有明显的能量传递作用。分析色坐标, 在 360 nm 光激发下 $\text{Ca}_{0.995-y}\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2 : 0.005\text{Ce}^{3+}, y\text{Tb}^{3+}$ ($y=0.06, 0.08, 0.10$) 粉体发射冷白光, 是一种较好的近紫外激发单一基质白光发射荧光粉。

参 考 文 献

1 Daniel A. Steigerwald, Jerome C. Bhat, Dave Collins *et al.*.

- illumination with solid state lighting technology[J]. *J. IEEE J. Sel. Topics in Quant. Electron.*, 2002, **8**(2): 310~320
- 2 Yang Yi, Jin Shangzhong, Shen Changyu *et al.*. Spectral properties of alkaline earth composite silicate phosphors for white-LED[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2008, **12**, **29**(5): 800~804
杨翼, 金尚忠, 沈常宇等. 白光 LED 用碱土金属硅酸盐荧光粉的光谱性质[J]. *发光学报*, 2008, **12**, **29**(5): 800~804
- 3 Wu Haibin, Wang Changling, He Sumei. Research of color rendering of white LED based on red and green phosphors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1777~1782
吴海彬, 王昌铃, 何素梅等. 绿荧光粉的白光 LED 显色性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1777~1782
- 4 Su Xingyu, Ju Haidong, Ye Renguang *et al.*. Luminescence properties of $\text{CaSi}_2\text{N}_2\text{O}_2:\text{Eu}^{2+}$ phosphors codoped with Dy^{3+} or Gd^{3+} [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 844~848
苏醒宇, 鞠海东, 叶仁广等. Eu^{2+} , Dy^{3+} (Gd^{3+}) 共掺杂 $\text{CaSi}_2\text{N}_2\text{O}_2$ 荧光粉发光性质[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 844~848
- 5 N. Narendran, N. Maliyagoda, L. Deng *et al.*. Characterizing LEDs for general illumination applications: mixed-color and phosphor-based white sources[J]. *Proc. SPIE*, 2001, **4445**: 137~147
- 6 S. Muthu, F. Schuurmans, M. Pashley. Red, green, and blue LEDs for white light illumination [J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.*, 2002, **8**(2): 333~338
- 7 D. Xiao, K. W. Kim, S. M. Bedair *et al.*. Design of white light-emitting diodes using InGaN/AlInGa quantum-well structures[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(5): 672~674
- 8 Zheng Daishun, Qian Keyuan, Luo Yi. Fabrication and luminescence characteristics studies of the high power white LEDs with low t_c and high R_a [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(12): 1422~1426
郑化顺, 钱可元, 罗毅. 低色温高黑色性功率白光 LED 的制备及发光特性研究 [J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(12): 1422~1426
- 9 Yang Zhiping, Liu Yufeng, Xiong Zhijun *et al.*. Luminescent properties of the single white emitting phosphor $\text{Sr}_2\text{MgSiO}_5:(\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+})$ [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2006, **34**(10): 1195~1198
杨志平, 刘玉峰, 熊志军等. $\text{Sr}_2\text{MgSiO}_5:(\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+})$ 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
- 10 Li Huijuan, Shao Qiyue, Dong Yan *et al.*. The thermal quenching of YAG:Ce³⁺ phosphors for white LED application [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2008, **29**(6): 994~998
李慧娟, 邵起越, 董岩等. 白光 LED 用 YAG:Ce³⁺ 荧光粉的温度猝灭性质 [J]. *发光学报*, 2008, **29**(6): 994~998
- 11 J. K. Park, C. H. Kim, S. H. Park *et al.*. Application of strontium silicate yellow phosphor for white light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**: 1647~1649
- 12 Zhang Kai, Liu Hezhou, Wu Yating *et al.*. Temperature dependence of luminescence and decay time of YAG:Ce nanophosphor [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2008, **23**(5): 1054~1048
张凯, 刘河洲, 作亚婷等. YAG:Ce 纳米荧光粉发光的温度依赖特性 [J]. *无机材料学报*, 2008, **23**(5): 1054~1048
- 13 Liu Jie, Sun Jiayue, Shi Chunshan. The development of the white converter based on LED [J]. *Chemistry*, 2005, **68**(6): 417~424
刘洁, 孙家跃, 石春山. 与 LED 匹配的白光发射荧光体的研究进展 [J]. *化学通报*, 2005, **68**(6): 417~424
- 14 Sun Xiaoyuan, Zhang Jiahua, Zhang Xia *et al.*. A single white phosphor suitable for near ultraviolet excitation applied to new generation white LED lighting [J]. *Chin. J. Lumine.*, 2005, **26**(3): 404~406
孙晓园, 张家华, 张霞等. 新一代 LED 照明用一种适于近紫外光激发的单一白光荧光粉 [J]. *发光学报*, 2005, **26**(3): 404~406
- 15 Li Yuan qiang. Structure and Luminescence Properties of Novel Rare-Earth Doped Silicon Nitride Based Materials [M]. Eindhoven, The Netherlands: University Press Facilities, 2005: 175~177
- 16 Y. Q. Li, A. C. A. Delsing, G. de With *et al.*. Luminescence properties of Eu^{2+} -activated alkaline-earth silicon-oxynitride $\text{MSi}_2\text{O}_2\text{-a-N}_{2+2/3\text{a}}$ (M = Ca, Sr, Ba): a promising class of novel LED conversion phosphors [J]. *Chem. Mater.*, 2005, **17**(12): 3242~3248
- 17 Liu Ruxi, Liu Yuheng. Introduction of Oxynitride Phosphors for Light Emitting Diodes [M]. Taipei: Quanhua Press, 2006• (3-1~3-24)
刘如熹, 刘宇桓. 发光二极管用氮氧化物介绍 [M]. 台北: 全华图书, 2006• (3-1~3-24)
- 18 Sun Yimin, Teng Xiaoming, Zhuang Weidong *et al.*. Luminescence and energy transfer in (Ce, Tb)MgAl₁₁O₁₉ [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2005, **28**(1): 56~60
孙益民, 滕晓明, 庄卫东等. (Ce, Tb)MgAl₁₁O₁₉ 绿色荧光粉的发光性质和能量传递 [J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2005, **28**(1): 56~60
- 19 Liu Xingren, Shi Shikao, Wu Yuan. Spectra of Gd³⁺ ion and energy transfer between Gd³⁺ and Tb³⁺ ions in barium. Magnesium Fluorides [J]. *Chin. J. Lumin.*, 1990, **11**(4): 277~280
刘行仁, 石士考, 吴渊. BaMgF₄ 中 Gd³⁺ 的光谱以及 Gd³⁺ 和 Tb³⁺ 之间的能量传递 [J]. *发光学报*, 1990, **11**(4): 277~280