

文章编号: 0253-2239(2010)07-1878-05

Eu²⁺/Sm³⁺ 掺杂硅酸盐玻璃发光特性研究

叶仁广 徐时清 华有杰 崔志广 邓德刚 王焕平 赵士龙 黄立辉

(中国计量学院材料科学与工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 制备了一种新型的 Eu²⁺/Sm³⁺ 共掺硅酸盐玻璃,研究了 Eu²⁺/Sm³⁺ 共掺硅酸盐玻璃的热稳定性和发光特性。研究发现,在近紫外光 360 nm 激发下,在室温下同时观察到明显的蓝绿光(475 nm)、黄光(562 nm)、橙光(599 nm)和红光(644 nm 和 706 nm)发光。其中蓝绿光(475 nm)是由于 Eu²⁺ 的 4f⁶5d¹→4f⁷ 辐射跃迁,黄光(562 nm)是由于 Sm³⁺ 的 ⁴G_{5/2}→⁶H_{5/2} 辐射跃迁,橙光(599 nm)是由于 Sm³⁺ 的 ⁴G_{5/2}→⁶H_{7/2} 辐射跃迁,红光(644 nm 和 706 nm)是由于 Sm³⁺ 的 ⁴G_{5/2}→⁶H_{9/2} 和 ⁴G_{5/2}→⁶H_{11/2} 辐射跃迁。随着 Sm³⁺ 离子浓度的增加, Eu²⁺/Sm³⁺ 共掺硅酸盐玻璃的色度从蓝绿光区域逐渐向白光区域移动。当 Eu²⁺, Sm³⁺ 掺杂摩尔分数分别为 0.05% 和 1.0% 时,硅酸盐玻璃的色坐标为(0.312, 0.307),接近纯白色点的色坐标(0.333, 0.333)。研究结果表明, Eu²⁺/Sm³⁺ 掺杂硅酸盐玻璃是一种潜在的白光 LED 基质材料。

关键词 光学材料;硅酸盐玻璃;光谱性质;白光 LED

中图分类号 O482.31 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.1878

Optical Properties of Eu²⁺/Sm³⁺ Co-Doped Silicate Glass

Ye Renguang Xu Shiqing Hua Youjie Cui Zhiguang Deng Degang Wang Huanping
Zhao Shilong Huang Lihui

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

Abstract A new Eu²⁺/Sm³⁺ co-doped silicate glass was prepared, and its thermal stability and optical properties were studied. The intense blue (475 nm), yellow (562 nm), orange (599 nm) and red (644 and 706 nm) emissions were simultaneously observed at the room temperature under the excitation at 360 nm. The blue (475 nm) luminescence is due to the 4f⁶5d¹→4f⁷ transition of Eu²⁺, the yellow (562 nm) luminescence is due to the ⁴G_{5/2}→⁶H_{5/2} transition of Sm³⁺, the orange (599 nm) luminescence is due to the ⁴G_{5/2}→⁶H_{7/2} transition of Sm³⁺ and the red (644 and 706 nm) luminescence is due to the ⁴G_{5/2}→⁶H_{9/2} and ⁴G_{5/2}→⁶H_{11/2} transitions of Sm³⁺, respectively. With the increase of the concentration of Sm³⁺ ions, the hue of Eu²⁺/Sm³⁺ co-doped silicate glass varies gradually from greenish blue eventually to white. When the doped molar fraction of Eu²⁺ and Sm³⁺ ions are 0.05% and 1.0% respectively, the chromaticity coordinate of the glass is measured to be (0.312, 0.307), which is close to the standard pure white (0.333, 0.333). The results indicate that Eu²⁺/Sm³⁺ co-doped silicate glass is potential materials for white light-emitting diodes (WLED).

Key words optical materials; silicate glass; spectral properties; white LED

1 引言

白光 LED 由于具有发光效率高、使用寿命长、绿色环保以及体积小等优点,被喻为新一代绿色照明光源,得到了广泛的研究^[1~3]。1996 年,日本日

亚公司用蓝光 GaN 管芯抽运 YAG:Ce³⁺ 黄色荧光粉,研发出了白光 LED^[4]。自此,以 YAG 为代表的白光 LED 用荧光体的研究成为发光材料的研究热点之一。目前,商业化的白光 LED 通常是通过紫

收稿日期: 2010-04-13; 收到修改稿日期: 2010-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(60508014, 50772102)、教育部新世纪人才计划(NCET-07-0786)和浙江省自然科学基金(R406007)资助课题。

作者简介: 叶仁广(1986—),男,硕士研究生,主要从事发光材料方面的研究。E-mail: sxucjlu@hotmail.com

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

光或蓝光激发一种或多种荧光粉获得白光,封装工艺复杂,成本较高。随着研究的深入,涂覆荧光粉的环氧树脂老化成为研制的一个难点,并且难以突破。因此,寻找一种具有较好热稳定性又有较好的光学性能的基质材料是目前研究的热点。

与常用的白光 LED 用荧光粉 $\text{Li-}\alpha\text{-SiAlON:Eu}^{2+}$ [5], $\text{Ca-}\alpha\text{-SiAlON:Eu}^{2+}$ [6], $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}$, Mn^{2+} [7] 等相比,稀土掺杂玻璃具有光色均匀、容易制备、生产成本低和热稳定性好等优点。1991 年,法国 Zhang 等 [8] 报道了采用 Ce^{3+} , Tb^{3+} 和 Mn^{2+} 作为激活离子,硼酸盐玻璃为基质材料,通过下转换过程获得发白光的稀土掺杂玻璃。目前,采用稀土掺杂玻璃作为白光 LED 的基质材料成为发光材料研究的热点之一 [8~10]。由于硅酸盐玻璃具有良好的物化性能与热稳定性以及较好的光学性能等综合优势性能 [11], 稀土掺杂的硅酸盐玻璃作为白光 LED 的基质材料成为各国学者研究的热点 [8~10, 12]。

研究制备了一种新型的 $\text{Eu}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ 掺杂硅酸

表 1 硅酸盐玻璃的组成成分及相应编号(摩尔分数)

Table 1 Chemical composition of glasses with different Eu_2O_3 and Sm_2O_3 (molar fraction)

Sample	$\text{SiO}_2/\%$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\%$	$\text{CaO}/\%$	$\text{SrO}/\%$	$\text{Eu}_2\text{O}_3/\%$	$\text{Sm}_2\text{O}_3/\%$
SACSE _{0.05} S ₀	30	30	20	20	0.05	0
SACSE _{0.05} S _{0.2}	30	30	20	20	0.05	0.2
SACSE _{0.05} S _{0.4}	30	30	20	20	0.05	0.4
SACSE _{0.05} S _{0.6}	30	30	20	20	0.05	0.6
SACSE _{0.05} S _{0.8}	30	30	20	20	0.05	0.8
SACSE _{0.05} S _{1.0}	30	30	20	20	0.05	1.0
SACSE ₀ S _{1.0}	30	30	20	20	0	1.0

采用德国耐驰公司 DTA 404 PC 差热分析仪对玻璃样品的转变温度和析晶开始温度进行测试。荧光光谱采用法国 Jobin-Yvon Frolog-3 荧光光谱仪进行测试,用氙灯作为激发源。所有测试均在室温下进行。

3 结果与讨论

3.1 玻璃的热稳定性

图 1 给出了 SACSE_{0.05}S₀ 玻璃样品的差热分析(DTA)曲线。可以看到,玻璃转变温度 T_g 、析晶开始温度 T_x 以及析晶峰温度 T_c 分别为 850 °C, 1014 °C, 1092 °C。由于玻璃的热稳定性大致可由 $T_x - T_g$ 的数值大小来衡量。该玻璃的 $T_x - T_g$ 的值为 164 °C, 表明研究的基质玻璃既具有较好的热稳定性,又有较好的析晶稳定性 [13, 14]。

3.2 光谱分析

图 2 为 SACSE_{0.05}S₀ 玻璃样品的激发光谱和发射光谱。其中,激发光谱监测波长为 475 nm, 激发

盐玻璃,研究了基质玻璃的热稳定性以及 Eu^{2+} 和 Sm^{3+} 离子在基质玻璃中的发光特性。研究结果表明 $\text{Eu}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ 掺杂硅酸盐玻璃是一种潜在的白光 LED 基质材料。

2 实 验

实验制备了玻璃组分为: $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SrO-}x\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-}y\text{Sm}_2\text{O}_3$ ($x=0, 0.05, y=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$) 的硅酸盐玻璃。表 1 列出了系列样品的具体成分及相应的编号。采用传统的高温熔融法在还原气氛下制备了玻璃样品,所用原料均为分析纯,称取混合料 30 g,充分混合,搅拌均匀,放入刚玉坩埚中于 1600 °C 的高温炉中在还原气氛下加热 1 h。将熔融液倒入预热的铁模中,成形后移入退火炉中,在 400 °C 保温 2 h,然后自然冷却至室温得到玻璃样品,最后切割抛光成 10 mm × 5 mm × 2 mm 的样品。

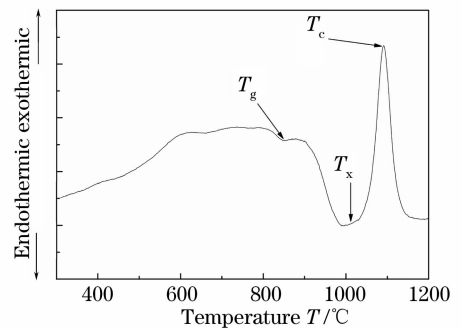


图 1 玻璃样品的 DTA 曲线

Fig. 1 The DTA curve of glass sample

光谱呈现出 Eu^{2+} 的 $4f^7 \rightarrow 4f^6 5d^1$ 特征性宽带峰 [15~17], 其峰值位于 360 nm。在紫外光 360 nm 激发下,样品呈现蓝绿光发射,其发射光谱的主峰位于 475 nm,半峰全宽约为 130 nm。

图 3 为 SACSE₀S_{1.0} 玻璃样品的发射光谱和激发光谱。其中,激发光谱监测波长为 599 nm,激发光谱由峰值分别位于 360, 375, 402, 416, 440 和 470 nm 的

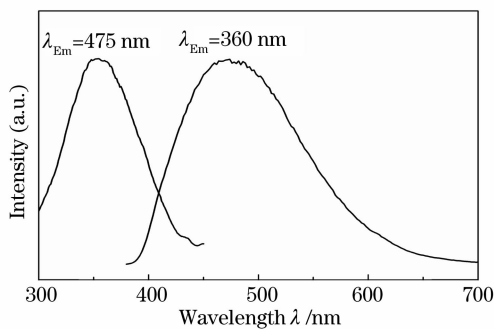


图 2 SACSE_{0.05}S₀ 玻璃样品的激发光谱和发射光谱

Fig. 2 Excitation and emission spectra of SACSE_{0.05}S₀ glass

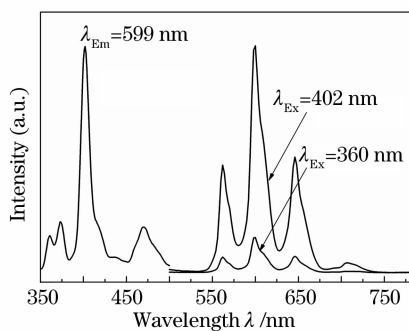


图 3 SACSE₀S_{1.0} 玻璃样品的激发光谱和发射光谱

Fig. 3 Excitation and emission spectra of SACSE₀S_{1.0} glass
 激发峰组成, 分别对应于 Sm^{3+} 的 ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^4\text{L}_{17/2}$, ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{P}_{5/2}$, ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{7/2}$, ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow ({}^6\text{P}, {}^4\text{P})_{5/2}$, ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^4\text{G}_{9/2}$ 和 ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ 的能级跃迁^[18,19]。 Sm^{3+} 离子发光属于 $4f-4f$ 辐射跃迁, 其发光性质受晶体场的影响较小, 为窄带发射。在近紫外 402 nm 激发下, 可同时观察到明显的黄光(562 nm)、橙光(599 nm)、红光(644 nm 和 706 nm)的发光。黄光(562 nm)是由于 Sm^{3+} 离子的 ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{5/2}$ 辐射跃迁, 橙光(599 nm)是由于 Sm^{3+} 离子的 ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{7/2}$ 辐射跃迁, 红光(644 nm 和 706 nm)是由于 Sm^{3+} 离子的 ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{9/2}$ 和 ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{11/2}$ 辐射跃迁。其中 599 nm 是 Sm^{3+} 离子的 ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{7/2}$ 特征发光, 其强度最大。在不同波长的紫外光 360 nm 和 402 nm 激发下, 样品均呈现橙光发射, 发射光谱的主峰没有发生偏移, 只是其发光强度发生改变。

图 4 为 SACSE_{0.05}S_{1.0} 玻璃样品的激发光谱(a)和发射光谱(b)。从图 4(b)可知, 在近紫外 360 nm 激发下, $\text{Eu}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ 掺杂硅酸盐玻璃出现了明显的蓝绿宽带光(475 nm)、黄光(562 nm)、橙光(599 nm)、红光(644 nm 和 706 nm)的发光, 五个谱带叠加从而在基中得到了白光。其中蓝绿宽带光(475 nm)是由于 Eu^{2+} 的 $4f^65d^1 \rightarrow 4f^7$ 辐射跃迁, 黄光(562 nm)由于

Sm^{3+} 的 ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{5/2}$ 辐射跃迁, 橙光(599 nm)是由于 Sm^{3+} 的 ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{7/2}$ 辐射跃迁, 红光(644 nm 和 706 nm)是由于 Sm^{3+} 的 ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{9/2}$ 和 ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{11/2}$ 辐射跃迁。图 4(a)为 SACSE_{0.05}S_{1.0} 玻璃样品的激发光谱, 激发光谱的监测波长分别为 475 nm 和 599 nm。当监测波长为 475 nm 时, 激发光谱呈现出峰值位于 360 nm 的宽带峰, 并未出现 Sm^{3+} 的特征激发峰。与 SACSE_{0.05}S₀ 玻璃样品的激发光谱对比发现, 该激发光谱为 Eu^{2+} 的 $4f^7 \rightarrow 4f^65d^1$ 特征性宽带峰。当监测波长为 599 nm 时, 激发光谱由峰值分别位于 360, 375, 402, 416, 440 和 470 nm 的激发峰组成, 分别对应于 Sm^{3+} 的 ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^4\text{L}_{17/2}$, ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{P}_{5/2}$, ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{7/2}$, ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow ({}^6\text{P}, {}^4\text{P})_{5/2}$, ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^4\text{G}_{9/2}$ 和 ${}^6\text{H}_{5/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ 能级跃迁。与 SACSE₀S_{1.0} 玻璃样品的激发光谱对比发现, 该激发光谱为 Sm^{3+} 的特征激发峰。

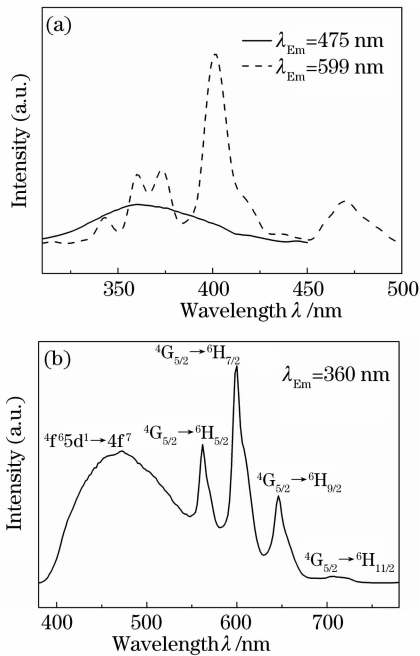


图 4 SACSE_{0.05}S_{1.0} 玻璃样品的激发光谱(a)和发射光谱(b)

Fig. 4 Excitation (a) and emission (b) spectra of SACSE_{0.05}S_{1.0} glass

图 5 为 SACSE_{0.05}S_y ($y=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$) 玻璃样品的发射光谱。由图可知, $\text{Eu}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ 掺杂硅酸盐玻璃的发射光谱(激发波长为 360 nm)由 5 个主发射峰组成, 其中蓝绿宽带光(475 nm)对应于 Eu^{2+} 的 $4f^65d^1 \rightarrow 4f^7$ 特征跃迁, 黄光(562 nm)、橙光(599 nm)、红光(644 nm 和 706 nm)分别对应于 Sm^{3+} 离子的 ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{5/2}$, ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{7/2}$, ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{9/2}$, ${}^4\text{G}_{5/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{11/2}$ 的特征跃迁。随着掺杂 Sm^{3+} 离

子浓度的增加,其特征发射峰强度相应的增加。

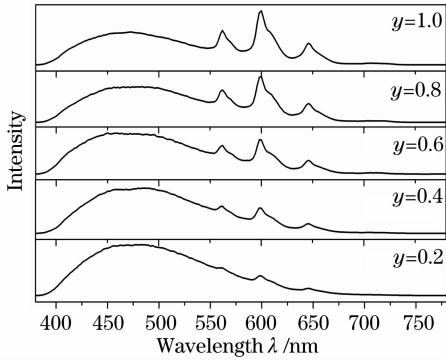


图 5 $\text{SACSE}_{0.05}\text{S}_y$ ($y=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$) 玻璃样品的发射光谱

Fig. 5 Emission spectra of $\text{SACSE}_{0.05}\text{S}_y$ ($y=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$) glass

3.3 CIE 色坐标

表 2 给出了系列样品 $\text{Eu}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ 掺杂硅酸盐玻璃的色坐标,比较了玻璃色度随 Eu^{2+} , Sm^{3+} 浓度的变化,并且在色度图中给出了相应的位置如图 6 所示。从图 6 中可以看出, $\text{Eu}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ 掺杂硅酸盐

表 2 $\text{Eu}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ 掺杂硅酸盐玻璃的色坐标

Table 2 Comparison of CIE chromaticity coordinates of SACSE_xS_y glass

Sample	Serial number	x	y	$\lambda_{\text{ex}}/\text{nm}$	(x, y)
$\text{SACSE}_{0.05}\text{S}_0$	1	0.05	0	360	(0.204, 0.280)
$\text{SACSE}_{0.05}\text{S}_{0.2}$	2	0.05	0.2	360	(0.229, 0.297)
$\text{SACSE}_{0.05}\text{S}_{0.4}$	3	0.05	0.4	360	(0.241, 0.301)
$\text{SACSE}_{0.05}\text{S}_{0.6}$	4	0.05	0.6	360	(0.257, 0.289)
$\text{SACSE}_{0.05}\text{S}_{0.8}$	5	0.05	0.8	360	(0.291, 0.310)
$\text{SACSE}_{0.05}\text{S}_{1.0}$	6	0.05	1.0	360	(0.312, 0.307)
$\text{SACSE}_0\text{S}_{1.0}$	7	0	1.0	360	(0.562, 0.401)

4 结 论

本文制备了 $\text{Eu}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ 掺杂硅酸盐玻璃,研究表明该玻璃具有较好的析晶稳定性和热稳定性能。在 360 nm 激发下,不同浓度 $\text{Eu}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ 掺杂硅酸盐玻璃出现了明显的蓝绿宽带光(475 nm)、黄光(562 nm)、橙光(599 nm)、红光(644 nm 和 706 nm)的发光,五个谱带叠加从而在基质中得到了白光。当 Eu^{2+} , Sm^{3+} 掺杂摩尔分数分别为 0.05% 和 1.0% 时,基质玻璃的色坐标为 (0.312, 0.307), 接近纯白色点的色坐标 (0.333, 0.333)。因此, $\text{Eu}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ 掺杂硅酸盐玻璃可作为一种白光 LED 潜在的基质材料。

参 考 文 献

1 S. C. Allen, A. J. Steckl. A nearly ideal phosphor-converted white light-emitting diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008,

玻璃的色坐标是 (0.312, 0.307), 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 (0.333, 0.333) 相近, 表明 $\text{Eu}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ 掺杂硅酸盐玻璃样品发出较强的白光, 是一种潜在的白光 LED 基质材料。

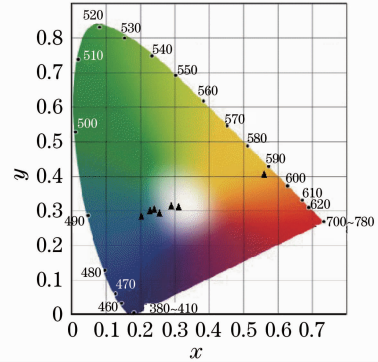


图 6 SACSE_xS_y ($x=0, 0.05, y=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$) 玻璃样品的色坐标

Fig. 6 Chromaticity coordinates of SACSE_xS_y ($x=0, 0.05, y=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$) glass

92(14): 143309

- M. Zeuner, F. Hintze, W. Schnick. Low temperature precursor route for highly efficient spherically shaped LED-phosphors $\text{M}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$ ($M = \text{Eu}, \text{Sr}, \text{Ba}$) [J]. *Chem. Mater.*, 2009, **21**(2): 336~342
- 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. 涂敷红、绿荧光粉的白光 LED 显色性研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1777~1782
- Y. Narukawa, I. Niki, K. Izuno *et al.*. Phosphor-conversion white light emitting diode using InGaN near-ultraviolet chip [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**: L371~L373
- R. J. Xie, N. Hirotsaki, M. Mitomo *et al.*. Highly efficient white-light-emitting diodes fabricated with short-wavelength yellow oxynitride phosphors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(10): 101104
- X. Rong-Jun, H. Naoto, S. Ken *et al.*. Eu^{2+} -doped $\text{Ca-}\alpha$ - SiAlON : A yellow phosphor for white light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(26): 5404
- J. S. Kim, K. T. Lim, Y. S. Jeong *et al.*. Full-color $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$

- :Eu²⁺, Mn²⁺ phosphors for white-light-emitting diodes[J]. *Solid State Commun.*, 2005, **135**(1~2): 21~24
- 8 J. C. Zhang, C. Parent, G. le Flem *et al.*. White light emitting glasses[J]. *J. Solid State Chem.*, 1991, **93**(1): 17~29
- 9 Shimin Liu, Gaoling Zhao, Xiaohua Lin *et al.*. White luminescence of Tm-Dy ions co-doped aluminoborosilicate glasses under UV light excitation[J]. *J. Solid State Chem.*, 2008, **181**(10): 2725~2730
- 10 Chaofeng Zhu, Yunxia Yang, Xiaoluan Liang *et al.*. Rare earth ions doped full-color luminescence glasses for white LED[J]. *J. Lumin.*, 2007, **126**(2): 707~710
- 11 Ming Chengguo, Li Chengren, Zhang Li *et al.*. Spectral Investigation of Yb³⁺:Er³⁺ co-doped borosilicate glasses at visible band based on Judd-Ofelt theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 749~755
明成国,李成仁,张 丽等. 镱铒共掺硼硅酸盐玻璃可见光波段扎得-奥菲而特理论分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 749~755
- 12 Xiaoluan Liang, Yunxia Yang, Chaofeng Zhu *et al.*. Luminescence properties of Tb³⁺-Sm³⁺ codoped glasses for white light emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(9): 091104
- 13 Xu Shiqing, Ma Hongping, Zhang Zaixuan *et al.*. Rare-earth-doped oxyhalide tellurite glass for three-dimensional volumetric display[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, **34**(7): 1173~1176
徐时清,马红萍,张在宣等. 三维立体显示用稀土掺杂氧卤碲酸盐玻璃[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, **34**(7): 1173~1176
- 14 Dong Qinglei, Zhang Liyan, Hu Lili. Crystalization stability and spectral properties of Yb³⁺-doped alkaline metal modified fluorophosphates glasses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2383~2387
董擎雷,张丽艳,胡丽丽. 碱金属氟化物对掺 Yb³⁺ 氟磷酸盐玻璃析晶稳定性和光谱性质的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2383~2387
- 15 Li Chenxia, Xu Shiqing, Ye Renguang *et al.*. Optical properties of Eu²⁺/Eu³⁺ doped SiO₂-Al₂O₃-ZnO-K₂CO₃ glass-ceramic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1084~1087
李晨霞,徐时清,叶仁广等. Eu²⁺/Eu³⁺ 掺杂的微晶玻璃发光特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1084~1087
- 16 Meng Yanshuang, Wang Dajian, Wu Jun *et al.*. Photoluminescent characteristics of self-assembled Sr₂Al₂SiO₇:Eu²⁺ phosphor obtained by composite sol spraying technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2235~2239
蒙延双,王达健,武 浚等. 复合胶体喷雾自组装 Sr₂Al₂SiO₇:Eu²⁺ 荧光体及其发光特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2235~2239
- 17 Zhang Qinhuai, Liu Bo, Xu Yuheng. Sensitization of Ce³⁺ ions co-doped in zinc tungstate laser crystals doped with Nd³⁺ or Eu³⁺ ions[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 605~609
张钦辉,刘 波,徐玉恒. 共掺 Ce³⁺ 对 Nd, Eu:ZnWO₄ 激光晶体的敏化作用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 605~609
- 18 Zhao Junwu, Huang Liqing, Wang Yongchang *et al.*. Fluorescence characteristics of electron trapping material Eu, Sm:CaS[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 250~252
赵军武,黄丽清,王永昌等. 电子俘获材料 Eu, Sm:CaS 荧光特性的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 250~252
- 19 G. Lakshminarayana, Jianrong Qiu. Photoluminescence of Pr³⁺, Sm³⁺ and Dy³⁺:SiO₂-Al₂O₃-LiF-GdF₃ glass ceramics and Sm³⁺, Dy³⁺:GeO₂-B₂O₃-ZnO-LaF₃ glasses [J]. *Phys. B*, 2009, **404**(8~11): 1169~1180