

文章编号: 1000-7032(2010)01-0039-05

一种适用于近紫外光 LED 激发的单一相白光发光粉

严小松, 李万万, 刘 霁, 孙 康*

(上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 采用高温固相法合成了一种单一相 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 白光发光粉, 研究了不同的合成温度和不同 Eu^{3+} 掺杂浓度等条件对其发光性能的影响。该发光粉在近紫外光激发下呈现由两个谱带组成的发射光谱, 分别是峰值为 530 nm 的 $[\text{VO}_4]^{3-}$ 的特征宽带和峰值为 610 nm 的 Eu^{3+} 的特征宽带, 通过调整合适的 Eu^{3+} 掺杂量它们可混合成白光, 当 Eu^{3+} 掺杂摩尔分数为 0.01 时, 发光粉的色品坐标为 $(x=0.33, y=0.34)$, 显色指数为 87。该发光粉可和具有近紫外光发射的 InGaN 管芯配合制得白光 LED, 极具应用价值。

关键词: 发光粉; 近紫外激发; 白光 LED

中图分类号: O482.31

PACS: 78.55.Hx

PACC: 3250F; 7855

文献标识码: A

1 引 言

半导体发光二极管(LED)由于其节能、环保、使用寿命长、体积小、耐冲击等优异的性能而被人们看成是继白炽灯、荧光灯和高压气体放电灯之后第四代照明光源, 因此白光 LED 作为照明光源极具潜力。目前, 商用白光 LED 是将发射黄光的 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ (YAG: Ce^{3+}) 作为发光粉, 涂敷在发射蓝光的 InGaN 二极管上, 由黄光和蓝光混合制造出白光 LED。其白光是由发光粉的黄色荧光与 LED 芯片的蓝光混合而成。由于器件的发光颜色随驱动电压和荧光粉涂层厚度等的变化而变化^[1], 因此在工业生产中要制造出性能稳定的白光 LED 十分困难。

为解决上述问题, 采用近紫外光 InGaN 管芯激发三基色荧光粉实现白光 LED 是一种较好的替代方案^[5]。由于近紫外光对肉眼不可见, 这类白光 LED 的颜色只由荧光粉决定。然而如果采用多相荧光粉来实现白光, 则荧光粉混合物之间将存在颜色再吸收和配比调控问题, 流明效率和色彩还原性能受到较大影响, 因此, 在单一基质中实现白光发射具有重要的意义。

在此前的研究中, Bayer 等^[6]报道了一系列具有和 YAG 石榴石相同结构的钒酸盐 $\text{LiCa}_3\text{MV}_3\text{O}_{12}$

($M = \text{Mg}, \text{Cu}, \text{Zn}, \text{Co}, \text{Ni}$)。Blasse 等^[7]报道了具有与其相同结构的 $\text{NaCa}_2\text{Mg}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ 在 Eu^{3+} 离子激活下的光谱特性, 并证明了 $[\text{VO}_4]^{3-}$ 到 Eu^{3+} 的能量转移。最近, 我们开展了白光 LED 用发光粉的研究, 研制出了一种适于近紫外光激发的单一相白光发光粉 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 。它在近紫外光激发下利用 $[\text{VO}_4]^{3-}$ 的峰值为 530 nm 的特征宽带谱和 Eu^{3+} 的峰值为 610 nm 的特征发射谱可混合成白光。本文主要对不同的合成温度和不同 Eu^{3+} 掺杂浓度等反应条件与发光粉的结构性能和发光性质的关系进行了研究。

2 实 验

采用高温固相反应法在空气中制备得到 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 粉末。所用原料有 CaCO_3 (分析纯)、 Li_2CO_3 (分析纯)、 MgO (99.99%)、 NH_4VO_3 (分析纯) 和 Eu_2O_3 (99.99%)。按所设计材料的化学计量比, 称取以上原料, 在玛瑙研钵中研磨均匀后, 置入刚玉坩埚中, 利用高温固相反应, 在 700 ~ 1 000 °C 温度范围内分别烧结 8 ~ 10 h 取出, 粉碎后即可得到所需的 Eu^{3+} 含量的单一相发光粉样品, 供表征和分析测试使用。

采用德国 BRUKER 公司 BRUKER-AXS 型 X

收稿日期: 2009-01-25; 修订日期: 2009-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(950902093)资助项目

作者简介: 严小松(1982-), 男, 湖北人, 博士研究生, 主要从事稀土发光材料的研究。

E-mail: yxs_912@sju.edu.cn

*: 通讯联系人; E-mail: ksun@sju.edu.cn, Tel: (021)34202743

射线粉末衍射仪测定样品的粉末衍射图。采用日本岛津 RF-2550 荧光分光光度计测量样品的激发和发射光谱。采用浙大三色公司 SPR-920 荧光辐射仪测量样品发光的色品坐标和显色指数。所有测量均是在室温下进行。

3 结果与讨论

3.1 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 粉末样品的结构

图 1 是分别在 700, 800, 900, 1 000 °C 下烧结所制备 $\text{Li}_{1.01}\text{Ca}_{2.98}\text{Eu}_{0.01}\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 粉末样品的 X 射线衍射图。由图可见, 当温度为 700 °C 时, 虽然有 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 相衍射峰的存在, 但伴随着很多杂峰, 说明在这个温度下的烧结产物不纯; 当烧结温度达到 800, 900 °C 时, $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 相衍射峰的位置和衍射强度基本一致, 且杂峰较少, 表明在此温度范围内可以形成稳定的单一相。当继续升温到 1 000 °C, 原有单一相的各衍射峰虽然仍然存在, 而在 $2\theta = 32^\circ$ 左右的杂相峰又变得明显起来, 这可能是由于温度过高产生了熔融现象, 导致产物不纯。

图 2 是在 900 °C 下烧结所制备 $\text{Li}_{1.01}\text{Ca}_{2.98}\text{Eu}_{0.01}\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 粉末样品的 X 射线衍射图与标准粉末衍射卡片的对比。可以发现, 900 °C 下烧结所制备 $\text{Li}_{1.01}\text{Ca}_{2.98}\text{Eu}_{0.01}\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 粉末样品的 XRD 衍射峰数据(图 b)与 JCPDS 卡片 24-1212 卡片数据(图 a)一致, 表明所制得的样品为纯的单一相 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 晶体。根据 JCPDS 卡片 24-1212, $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 为石榴石结构, 属于立方晶系, 晶格常数 $a = 1.2415 \text{ nm}$, $b = 1.2415 \text{ nm}$, $c = 1.2415 \text{ nm}$ 。

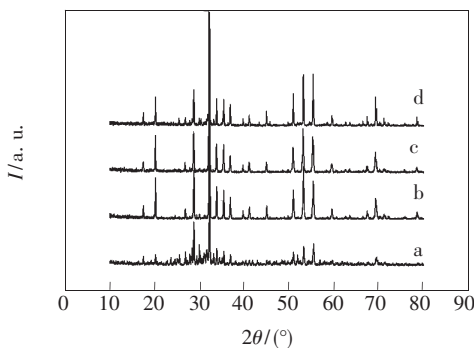


图 1 不同温度烧结的 $\text{Li}_{1.01}\text{Ca}_{2.98}\text{Eu}_{0.01}\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 样品的 X 射线衍射图

Fig. 1 XRD patterns of $\text{Li}_{1.01}\text{Ca}_{2.98}\text{Eu}_{0.01}\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ sintered at different temperatures: (a) 700 °C; (b) 800 °C; (c) 900 °C; (d) 1 000 °C.

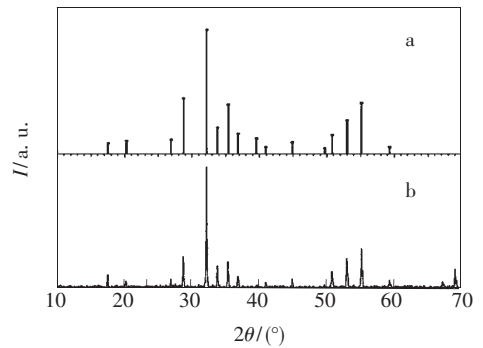


图 2 900 °C 烧结 $\text{Li}_{1.01}\text{Ca}_{2.98}\text{Eu}_{0.01}\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 的 X 射线衍射图(b)与标准卡片(a)的比较

Fig. 2 XRD patterns of standard card (a) and $\text{Li}_{1.01}\text{Ca}_{2.98}\text{Eu}_{0.01}\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ (b)

可见, 少量 Eu^{3+} 离子的掺杂对晶格结构影响不大, 没有改变 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 的晶体结构。

3.2 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 粉末样品的发光性质

图 3 给出的是不同温度下烧结所得到的 $\text{Li}_{1.01}\text{Ca}_{2.98}\text{Eu}_{0.01}\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 的发射光谱 ($\lambda_{\text{ex}} = 365 \text{ nm}$)。可以看出样品在 365 nm 紫外光的激发下均可以发出位于可见光区的辐射, 其发射光谱由两个发射带组成, 分别是峰值为 530 nm 的发射带和峰值为 610 nm 处发射带, 这两个发射带可分别归结为 $[\text{VO}_4]^{3-}$ 离子和 Eu^{3+} 离子发射。

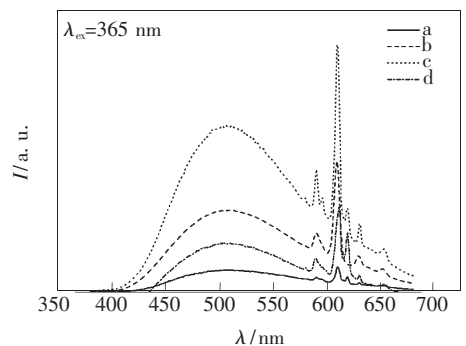


图 3 不同温度烧结 $\text{Li}_{1.01}\text{Ca}_{2.98}\text{Eu}_{0.01}\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 的发射光谱
Fig. 3 Emission spectra of $\text{Li}_{1.01}\text{Ca}_{2.98}\text{Eu}_{0.01}\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ sintered at different temperatures: (a) 700 °C; (b) 800 °C; (c) 900 °C; (d) 1 000 °C.

峰值为 530 nm 的发射谱带与 $(\text{VO}_4)^{3-}$ 配位四面体中 $\text{O}^{2-} 2p \rightarrow \text{V}^{5+} 3d$ 的电荷转移带 (CTBs) 相符, 因而归结于 VO_4^{3-} 的发射。掺杂 Eu^{3+} 离子进入基质 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 晶格后, 替位 Li^+ 或 Ca^{2+} 产生一组尖锐的发射峰, 它们属于 Eu^{3+} 的 $^5\text{D} \rightarrow ^7\text{F}$ 跃迁特征发射谱带。一般认为: Eu^{3+} 离子荧光发射与其周围离子配位环境密切相关, 当 Eu^{3+} 在基

质晶体中占据对称中心的格位时,发光中心为 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ 磁偶极允许的跃迁,波长为593 nm,发光颜色为橙红色;如果 Eu^{3+} 在晶体中占据非对称中心的格位,宇称选择定则可能发生松动,结果 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ 变成电偶极允许的跃迁,发出波长为610 nm 纯红色的光。对于 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$,在 5D_0 和 7F_J ($J = 1 \sim 3$)之间均对应存在一个跃迁。在590 nm附近较弱的峰是由 Eu^{3+} 的 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ 跃迁引起的。位于610 nm左右的主峰是由于 Eu^{3+} 的电偶极子的 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ 跃迁引起的,而650 nm处的发射峰则与 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3$ 的跃迁对应。在 Eu^{3+} 取代 Li^+ 或 Ca^{2+} 的格位的发光光谱中,强电偶极子 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ 的跃迁占据主导地位,从而使位于610 nm左右的线状发射峰强度相对于其他跃迁发射峰强度更高,不同于经典的YAG石榴石中 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ 和 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$ 占主导地位^[4]。这可能是因为 Mg^{2+} 和 V^{5+} 替换 Al^{3+} 后导致了很强的 O^{2-} 极化场而造成^[7,8],也有可能是低能量的 VO_4^{3-} 相反的宇称变化增强了 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ 的跃迁^[9],即 Li^+ 与 Ca^{2+} 的电荷补偿效应导致了发光中心的对称性发生了改变所致^[7]。

由于温度对结晶影响较大,将影响基质与掺杂离子之间的相互作用,从而导致不同烧结温度下所得样品发光强度产生差异。从图3中不同烧结温度得到样品的发射光谱可以看出,700 °C时由于烧结产物不纯,所以辐射强度很弱;随着烧结温度升高,形成了纯相产物其辐射较强。当温度达到1 000 °C时,荧光的发射强度明显降低,这可能是因为产生了温度过高引起的熔融现象。以上结果与样品的X射线衍射分析的结果是一致的。

图4是不同 Eu^{3+} 掺杂摩尔分数在900 °C烧结所得样品的激发光谱($\lambda_{\text{em}} = 610$ nm)和发射光谱($\lambda_{\text{ex}} = 365$ nm)。可以看出,激发光谱是一宽带,分布于250 ~ 390 nm 波长范围之内,可分解为280 nm和350 nm两个激发峰,峰值位于280 nm左右的激发峰是Eu和其周围的氧原子之间的电荷迁移形成的(即CTS带),而与之之前未掺杂 Eu^{3+} 离子 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 的激发光谱($\lambda_{\text{em}} = 530$ nm)相比可知峰值位于350 nm左右的激发峰是 $\text{O}^{2-} 2p \rightarrow \text{V}^{5+} 3d$ 之间的电荷迁移形成的^[10]。由图可见, $[\text{VO}_4]^{3-}$ 的激发能带处于主导地位,这可能导致 $[\text{VO}_4]^{3-}$ 到 Eu^{3+} 的能量转移的存在^[8]。

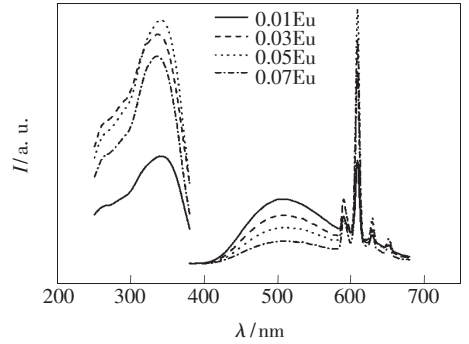


图4 900 °C下掺杂不同浓度 Eu^{3+} 的 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 样品的激发光谱($\lambda_{\text{em}} = 610$ nm)和发射光谱($\lambda_{\text{ex}} = 365$ nm)

Fig. 4 Excitation (left, $\lambda_{\text{em}} = 610$ nm) and Emission (right, $\lambda_{\text{ex}} = 365$ nm) spectra of $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ with different Eu^{3+} concentrations sintered at 900 °C

随着 Eu^{3+} 浓度改变,发射光谱中发射峰的相对强度发生了较大变化。当 Eu^{3+} 浓度较小时,610 nm处的发光峰的强度与530 nm处相当;当 Eu^{3+} 浓度增加时, $[\text{VO}_4]^{3-}$ 发射强度持续下降,这同样可能是由于存在 $[\text{VO}_4]^{3-}$ 到 Eu^{3+} 的能量转移引起的,而 Eu^{3+} 发射强度先上升,当摩尔分数超过0.05后其发射强度下降,这可能是因为当掺杂浓度太大时,形成太多的非辐射发光中心发生了浓度猝灭,降低发光强度。一般来说,对于一定的激发波长 Eu^{3+} 吸收很少或者不吸收能量, Eu^{3+} 激活的荧光粉主要是依赖于基质的吸收和能量传递。在 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 体系中, $[\text{VO}_4]^{3-}$ 把吸收的能量传递给 Eu^{3+} 离子起着重要的作用^[8]。

有相关报道称^[11], $[\text{VO}_4]^{3-}$ 的原有发光光谱与 Eu^{3+} 的跃迁引起的发光光谱通过调整之后,可获得显色指数在80,色品坐标在($x = 0.38, y = 0.41$),相对色温为4 050 K的荧光粉,这类荧光粉制得的近紫外激发白光LED发光效率可达到130 lm/W,这些性能指标已经非常接近于传统光源。由于 $[\text{VO}_4]^{3-}$ 和 Eu^{3+} 所对应的发光带的相对辐射强度可由 $[\text{VO}_4]^{3-}$ 到 Eu^{3+} 的能量转移所控制^[8],通过调整 Eu^{3+} 的含量,可以改变样品在受近紫外光激发时发射光谱的两个光带的相对辐射强度从而调整荧光粉的显色性。表1列出了不同 Eu^{3+} 掺杂浓度的 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 被365 nm紫外光激发所得到的CIE色品坐标值,图5中可以看到随着 Eu^{3+} 掺杂浓度的增加,样品的色品坐标值

(x, y) 非常规律化地从 (0.27, 0.26) 变化到 (0.46, 0.39), 其颜色可以从蓝绿色到红色变化, 当 Eu^{3+} 含量在 0.01 时呈现白色, 其显色指数在 87 左右, 相对色温为 2 793 K。为了更好地说明此类荧光粉在制作白光 LED 上的优势, 我们比较了商业化由 460 nm 蓝光 LED 搭配 YAG: Ce 而制成的白光 LED 的光学性能。传统的白光 LED 由于是蓝光与黄光复合形成白光, 在红光方面显色较弱, 显色指数一般都在 75 以下, 而 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 中 Eu^{3+} 的 $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ 的跃迁所形成的 610 nm 的线状荧光发射主峰非常匹配人眼在红光区域的敏感性曲线, 同时也大大提高了制成的白光 LED 的显色指数。由这类荧光粉搭配 365 nm 的近紫外 LED 的制成的 LED 发光效率也可达到 100 lm/W。传统白光 LED 随着使用时间的延长, 蓝光芯片发光出现不稳定, 会出现明显的色差; 而近紫外 LED 搭配 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 制成的白光 LED 却不会出现类似问题, 因为激发光是不可见的。由表 1 不同 Eu^{3+} 掺杂浓度的 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 样品的 CIE 色品坐标值 (激发波长 $\lambda_{\text{em}} = 365 \text{ nm}$)

Table 1 Comparison of CIE chromaticity coordinates of $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ emission with different Eu^{3+} concentrations ($\lambda_{\text{em}} = 365 \text{ nm}$)

$x_{\text{Eu}^{3+}}$	(x, y)
0.005	(0.27, 0.26)
0.01	(0.33, 0.34)
0.03	(0.42, 0.35)
0.05	(0.45, 0.36)
0.07	(0.46, 0.39)

参 考 文 献:

- [1] Kim J S, Jeon P E, Choi J C, et al. Warm-white-light emitting diode utilizing a single-phase full-color $\text{Ba}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ phosphor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(15):2931-2933.
- [2] Li Huijuan, Shao Qiyue, Dong yan, et al. The thermal quenching of YAG: Ce^{3+} phosphors for white LED application [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(6):984-988 (in Chinese).
- [3] Li Xu, Yang Yong, Yang Zhiping, et al. Fabrication and properties of Eu^{3+} doped $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ red phosphor [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(1):93-96 (in Chinese).
- [4] Yang Yi, Jin Shangzhong, Shen Changyu, et al. Spectral properties of alkaline earth composite silicate phosphors for white LED [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(5):800-804 (in Chinese).
- [5] Sato Y, Takahashi N, Sato S. Full-color fluorescent display devices using a near-UV light-emitting diode [J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2*, 1996, **35**(7A):L838-L841.
- [6] Bayer G. The reaction of metal carbonyls and amines. I. Iron carbonyl with piperidine and n-butylamine. The initial stages

如上结果可以预测, $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 作为一种可被近紫外光激发的单一相白光发光粉, 在照明领域具有一定的应用前景。

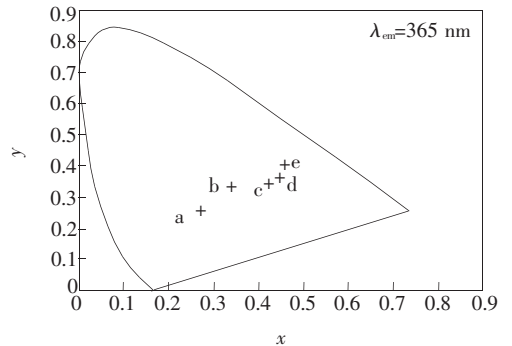


图 5 不同 Eu^{3+} 掺杂摩尔分数的 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}$ 样品发光的 CIE 色坐标

Fig. 5 CIE chromaticity coordinates of $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ emission with different Eu^{3+} concentrations (a) 0.005; (b) 0.01; (c) 0.03; (d) 0.05; (e) 0.07.

4 结 论

我们采用高温固相法在不同温度下合成了 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 单一相白光发光粉, 其中 900 $^{\circ}\text{C}$ 是较好的烧结温度。此荧光粉在近紫外光激发下呈现由两个谱带组成的发射光谱, 分别归结为 $[\text{VO}_4]^{3-}$ 的宽幅发射谱和 Eu^{3+} 的发射谱, 通过调整 Eu^{3+} 的掺杂浓度, 可调整两个发射谱带的相对强度, 从而可使它们混合形成不同颜色的光。在 Eu^{3+} 掺杂摩尔分数为 0.01 时, 样品呈现白色。 $\text{LiCa}_3\text{MgV}_3\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$ 荧光粉易于制备、成本低廉, 利用该发光粉和具有近紫外光发射的 InGaN 管芯可制得白光 LED。

of the reaction [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1965, **48**(12):600-605.

- [7] Blasse G, Bri A, Hypersensitivity of the $^5D_0-^7F_2$ transition of trivalent europium in the garnet structure [J]. *J. Chem. Phys.*, 1967, **47**(12):5442-5443.
- [8] Blasse B, Brill A. Study of energy transfer from Sb^{3+} , Bi^{3+} , Ce^{3+} to Sm^{3+} , Eu^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+} [J]. *J. Chem. Phys.*, 1967, **47**(6):1920-1926.
- [9] Judd B R. Optical absorption intensities of rare earth ions [J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(3):750-761.
- [10] Setlur A A, Comanzo H A, Srivastava A M. Spectroscopic evaluation of a white light phosphor for UV-LEDs- $Ca_2NaMg_2V_3O_{12}:Eu^{3+}$ [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2005, **152**(12):H205-H208.
- [11] Srivastava A M, Duggal A R, Comanzo H A, *et al.* Single phosphor for creating white light with high luminosity and high CRI in a UV LED device: U. S, 6, 522,065 [P]. 2003-02-18.

A Single Phase White-light-emitting Phosphor Suitable for UV-LED Excitation

YAN Xiao-song, LI Wan-wan, LIU Ji, SUN Kang

(State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The luminescence of a single phase material $LiCa_3MgV_3O_{12}:Eu^{3+}$ are reported and discussed as a potential phosphor excited by UV-LED. The photoluminescence spectra show two bands with peaks at 530 nm and 610 nm, which are attributed to $(VO_4)^{3-}$ and Eu^{3+} , respectively. By mixing the colors of the two bands, the (x,y) coordinates vary systematically due to the different Eu^{3+} concentration. When the mol fraction of Eu^{3+} is 0.01, the (x,y) coordinate is (0.33,0.34). This single phosphor is capable of converting the ultra-violet emission of a UV-LED into white light-emitting.

Key words: phosphor; near UV excitation; white-light-emitting diode

CLC number: O482.31

PACS: 78.55.Hx

PACC: 3250F; 7855

Document code: A