

文章编号: 1000-7032(2015)04-0424-05

红色荧光粉 $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}, \text{W}^{6+}$ 的制备及发光性能

刘 永, 程 萍, 杨至雨, 张天觉, 郭 强, 马 讯, 汪正良*

(云南民族大学化学与生物技术学院 民族地区矿业资源综合利用重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘要: 采用高温固相法合成出 $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}, \text{W}^{6+}$ 系列红色荧光粉, 其结构为立方晶系的 $\beta\text{-La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ 。在 395 nm 光激发下, 样品 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$ 发射出很强的红光, 最强发射峰位于 616 nm 处。适量地掺杂 W^{6+} 离子可以提高样品的激发和发射强度, 在 395 nm 光激发下, $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}, 0.16\text{W}^{6+}$ 荧光粉的 Eu^{3+} 的 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 跃迁发射强度最大, 是样品 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$ 的 1.23 倍。最后, 将 $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$ 荧光粉与 ~ 395 nm 发射的 InGaN 芯片一起制作成红光发光二极管(LED), 该 LED 发射出很强的红光。

关键词: 红色荧光粉; 发光二极管; 发光性能; $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20153604.0424

Preparation and Luminescence Properties of $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}, \text{W}^{6+}$ Red-emitting Phosphors

LIU Yong, CHENG Ping, YANG Zhi-yu, ZHANG Tian-jue, GUO Qiang, MA Xun, WANG Zheng-liang*

(Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Mineral Resources in Ethnic Districts,

School of Chemistry and Biotechnology, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China)

* Corresponding Author, E-mail: wzhl629@163.com

Abstract: Red-emitting phosphors $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}$ and $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}, \text{W}^{6+}$ were synthesized by the conventional solid state method. The structure and luminescent properties of these phosphors were investigated. The results indicate that these phosphors are of single phases with cubic crystal structure. $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}$ and $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}, \text{W}^{6+}$ can be efficiently excited by near ultraviolet light, and the strongest excitation peak is at 395 nm. The emission intensity of $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}$ can be enhanced by introducing W^{6+} ions. $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$ exhibits the strongest red emission, which is about 1.23 times than that of $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$. The red light emitting diode (LED) was fabricated by coating InGaN chip (~ 395 nm emission) with the phosphor $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$, and red bright light could be observed from the LED. Hence $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$ maybe find application on near-UV InGaN-based white LEDs.

Key words: red phosphor; LED; luminescent properties; $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$

收稿日期: 2014-12-08; 修订日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(21261027); 云南民族大学本科生 SRT 创新项目(2013HXSRT12)资助

1 引言

与传统的白炽灯及荧光灯相比,白光发光二极管(LED)具有寿命长、耗能少、效率高、绿色环保等显著优点^[1-2]。近年来,白光LED发展迅速,应用领域广泛,成为最具发展前景的“绿色”照明光源。目前,实现白光LED的技术主要有3种^[3-5]:(1)红、绿、蓝三基色LED芯片组装实现白光,但是其技术成本高,白光色坐标容易漂移;(2)用蓝色LED芯片激发黄色荧光粉(如 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$),发出白光,但由于缺少能调节白光色温及改善显色性的红色光源成分,因此显色指数较低;(3)近紫外光LED芯片激发红、绿、蓝三基色荧光粉,目前存在的问题是缺少能被近紫外光有效激发的荧光粉,尤其是红色荧光粉。因此,开发能被近紫外光有效激发的红色荧光粉是当前白光LED领域的一项重要课题。

钼酸盐由于其化学性质稳定、合成温度低等特点,常常被作为荧光粉的基质^[6-7]。在我们的早期工作中^[8-10],合成了稀土四钼酸盐和二钼酸盐掺 Eu^{3+} 离子的红色荧光粉,在近紫外光激发下,它们都表现出高效的红光发射。稀土钼酸盐 $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ ^[11-13]具有两种不同的结构,分别是单斜相的 $\alpha\text{-La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ 和立方相的 $\beta\text{-La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ 。近期有少量关于此类钼酸盐掺 Eu^{3+} 荧光粉的报道^[11],但尚缺乏更深入的研究。

本文选择 $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ 作为基质,采用高温固相法合成了 $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}$ 和 $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+},\text{W}^{6+}$ 荧光粉,研究了它们的结构和发光性能。最后,将发光性能良好的荧光粉涂于发 $\sim 395\text{ nm}$ 近紫外光的InGaN芯片,制作成单一红光LED,得到了明亮的红光。

2 实验

2.1 $\text{La}_{2(1-x)}\text{Mo}_2\text{O}_9:2x\text{Eu}^{3+}$ 和 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_{2(1-y)}\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+},2y\text{W}^{6+}$ 系列荧光粉的合成

本工作所使用的原料 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和 WO_3 的纯度为分析纯, La_2O_3 和 Eu_2O_3 的纯度为99.99%。红色荧光粉 $\text{La}_{2(1-x)}\text{Mo}_2\text{O}_9:2x\text{Eu}^{3+}$ ($x=0.20,0.25,0.30,0.35,0.40$)的合成过程如下:按化学计量比称取 La_2O_3 、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 Eu_2O_3 ,将其在玛瑙研钵中研磨均匀,装入

刚玉坩埚,放入马弗炉中,600℃预烧4h,最后在950℃下煅烧4h,自然冷却,磨细即得所需的荧光粉样品。

荧光粉 $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{2(1-y)}\text{O}_9:2y\text{W}^{6+}$ ($y=0,0.04,0.06,0.08,0.10$)参照 $\text{La}_{2(1-x)}\text{Mo}_2\text{O}_9:2x\text{Eu}^{3+}$ 的合成方法制备。

2.2 单一红色LED的制作

将所合成的发光性能良好的荧光粉和硅胶按一定的质量比例混合均匀,然后均匀地涂覆在已接好电极引线的波长约为395nm的InGaN芯片上,烘干,再用透明的环氧树脂封装、固化,最后得到红色LED管。

2.3 荧光粉的表征

采用日本理学电机RIGAKU/Dmax-2200型号的X射线衍射仪测定样品的XRD图谱($\text{Cu K}\alpha$ 射线, $\lambda=0.15403\text{ nm}$,扫描范围为 $10^\circ\sim 70^\circ$)。样品的激发光谱和发射光谱在Varian公司的Cary Eclipse FL1011M003荧光分光光度计上测定,激发光源为氙灯(450W)。LED的光谱强度分布采用HSP6000LED快速高精度光色电测试系统进行测试。所有测试均在室温下进行。

3 结果与讨论

3.1 物相分析

图1所示为样品 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$ 和 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+},0.16\text{W}^{6+}$ 的XRD衍射图。与 $\beta\text{-La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ 标准卡片(JCPDS No. 28-0509)对照可知,样品 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$ 的XRD谱图与 $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ 标准谱图基本一致,掺杂 Eu^{3+} 没有引起基质晶体结构的改变,样品具有P213的空间群结构,属于立方晶系,晶格参数为

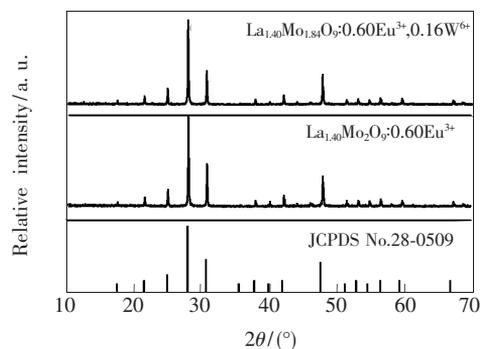


图1 样品的XRD谱图

Fig. 1 XRD patterns of the samples

$a = b = c = 0.7155 \text{ nm}$, 所合成的荧光粉为单一晶相的 $\beta\text{-La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ 。样品 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_{1.8409} : 0.60\text{Eu}^{3+}$, 0.16W^{6+} 的 XRD 图也与标准卡片基本吻合, 没有观察到明显的杂相, 表明 Eu^{3+} 和 W^{6+} 离子的掺入也没有引起基质晶体结构的变化。由于 Eu^{3+} 离子电荷与 La^{3+} 离子电荷相同, 半径相近, 因此在该晶格中, Eu^{3+} 占据 La^{3+} 离子的格位。同样, W^{6+} 离子占据着 Mo^{6+} 离子的格位。

3.2 荧光光谱分析

3.2.1 $\text{La}_{2(1-x)}\text{Mo}_2\text{O}_9 : 2x\text{Eu}^{3+}$ 系列红色荧光粉

$\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9 : 0.60\text{Eu}^{3+}$ 的室温激发和发射光谱如图 2 所示。曲线 a 为在 616 nm 监测下的 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9 : 0.60\text{Eu}^{3+}$ 的激发光谱, $200 \sim 380 \text{ nm}$ 之间的宽峰为基质中 Mo-O 的电荷迁移带, $380 \sim 550 \text{ nm}$ 之间的尖峰对应于 Eu^{3+} 离子的 $4f$ 轨道之间的跃迁。我们的目标是寻找新的适合于近紫外光 LED ($\lambda_{\text{em}} = 395 \text{ nm}$) 的荧光粉, 所以重点研究了样品在 395 nm 光激发下的发射光谱 (曲线 b)。从曲线 b 上可以看到一系列的尖峰: ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_0$

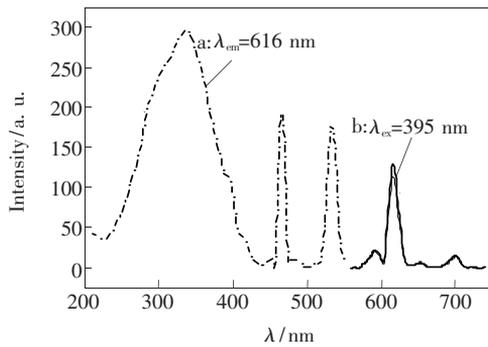


图 2 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9 : 0.60\text{Eu}^{3+}$ 的激发光谱和发射光谱
Fig. 2 Excitation and emission spectra of $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9 : 0.60\text{Eu}^{3+}$

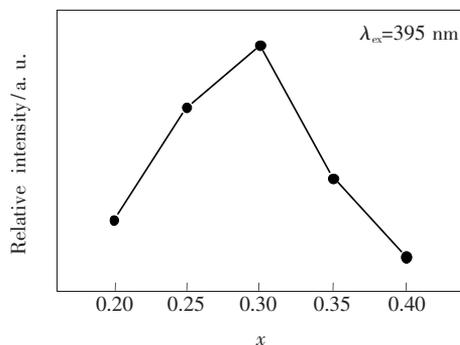


图 3 $\text{La}_{2(1-x)}\text{Mo}_2\text{O}_9 : 2x\text{Eu}^{3+}$ 的发光强度与 Eu^{3+} 摩尔分数的关系
Fig. 3 Concentration quenching curve of $\text{La}_{2(1-x)}\text{Mo}_2\text{O}_9 : 2x\text{Eu}^{3+}$ doped with different Eu^{3+} mole fractions

(565 nm), ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ (590 nm), ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ (616 nm), ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_3$ (650 nm), ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_4$ (700 nm), 这些尖的发射峰来源于 Eu^{3+} 离子的 $4f-4f$ 跃迁, 其中 616 nm (${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$) 处的红光发射峰最强。

图 3 为在 395 nm 光激发下, Eu^{3+} 离子在 $\text{La}_{2(1-x)}\text{Mo}_2\text{O}_9 : 2x\text{Eu}^{3+}$ 中的浓度猝灭曲线。由图可知, 当 Eu^{3+} 离子的摩尔分数 $x = 0.30$ 时, 其红光发射强度最大; 当 $x > 0.30$ 后, 则发生了浓度猝灭现象。

3.2.2 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_{2(1-y)}\text{O}_9 : 0.60\text{Eu}^{3+}, 2y\text{W}^{6+}$ 系列荧光粉

Eu^{3+} 周围的阴离子的改变也会影响到其晶体场的变化, 从而引起发光性能的改变。Mo 与 W 为同一周期元素, 化学性质上比较相似且离子半径接近, 于是我们利用 W^{6+} 取代部分 Mo^{6+} 制备出 $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{2(1-y)}\text{O}_9 : 2y\text{W}^{6+}$ 系列荧光粉。图 4 为 $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{2(1-y)}\text{O}_9 : 2y\text{W}^{6+}$ ($y = 0, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$) 在 616 nm 光监测下的激发光谱。从图中可以看出, W^{6+} 离子的引入没有引起样品激发峰形状的变化, $200 \sim 380 \text{ nm}$ 之间的宽峰为基质的电荷迁移带, $380 \sim 550 \text{ nm}$ 之间的尖峰也对应于 Eu^{3+} 离子的 $4f-4f$ 跃迁。但随着 W^{6+} 浓度的增大, 样品的激发峰得到增强, 当 W^{6+} 的摩尔分数为 0.08 时, 荧光粉的激发强度最大。图 5 为 $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{2(1-y)}\text{O}_9 : 2y\text{W}^{6+}$ 在 395 nm 光激发下的发射光谱, 最强发射峰也位于 616 nm 处, 对应于 Eu^{3+} 的 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 跃迁, 而其他跃迁强度相对较弱。与相应的激发光谱一致, 当 $y = 0.08$ 时, 样品的红光发射强度最大。

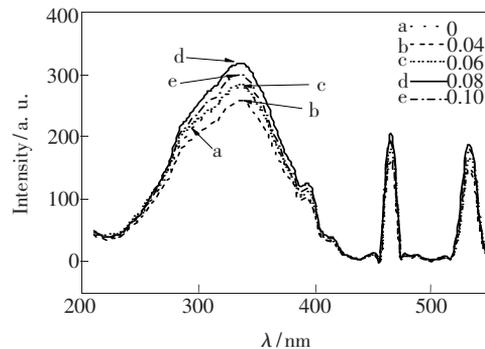


图 4 $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{2(1-y)}\text{O}_9 : 2y\text{W}^{6+}$ ($y = 0, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$) 在 616 nm 光监测下的激发光谱
Fig. 4 Excitation spectra of $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{2(1-y)}\text{O}_9 : 2y\text{W}^{6+}$ ($y = 0, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$) monitoring at 616 nm

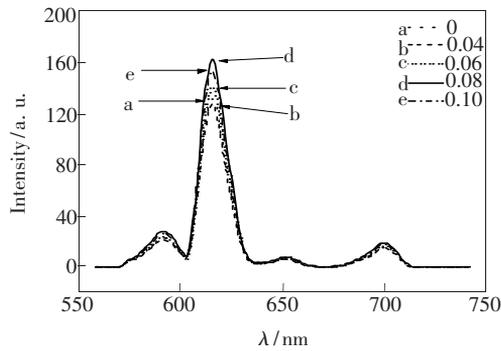


图 5 $\text{La}_{1.4}\text{Eu}_{0.6}\text{Mo}_{2(1-y)}\text{O}_9:2y\text{W}^{6+}$ ($y = 0, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$) 在 395 nm 光激发下的发射光谱

Fig. 5 Emission spectra of $\text{La}_{1.4}\text{Eu}_{0.6}\text{Mo}_{2(1-y)}\text{O}_9:2y\text{W}^{6+}$ ($y = 0, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$) under 395 nm excitation

表 1 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$ 和 $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$ 的色坐标和 Eu^{3+} 的 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 跃迁发射相对强度

Table 1 CIE chromaticity coordinates and ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ relative emission intensity of phosphors $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$ and $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$

Phosphors	CIE chromaticity coordinates		${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ relative intensity ($\lambda_{\text{ex}} = 395 \text{ nm}$)
	x	y	
$\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$	0.658	0.341	1.00
$\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$	0.659	0.341	1.23

3.2.3 荧光粉样品在 InGaN-LED 上的应用

我们将 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$ 和 $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$ 荧光粉分别与适当比例的硅胶混合,涂布于中心发射波长约为 395 nm 的 InGaN-LED 芯片上并且封管,制成相应的红光 LED。这

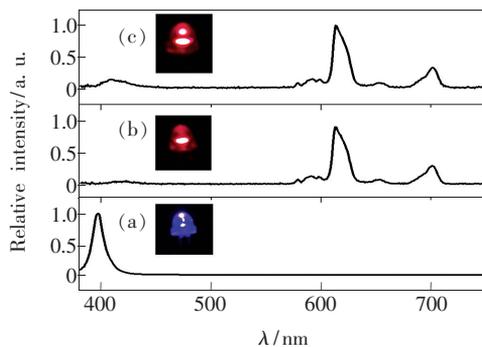


图 6 InGaN-LED 芯片 (a)、 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$ 基 LED (b) 以及 $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$ 基 LED (c) 在 20 mA 电流激发下的发光光谱,插图为它们对应的 LED 在 20 mA 电流激发下的照片。

Fig. 6 Electro-luminescent spectra of InGaN LED chip (a), red LED based on $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$ (b), and red LED based on $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$ (c), respectively. Insets are the images of these LEDs under 20 mA current excitation.

我们分别计算了 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$ 和 $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$ 的色坐标以及 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 跃迁发射的相对强度,结果如表 1 所示。在 395 nm 光激发下, $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$ 的红光发射强度约是 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$ 的 1.23 倍。根据它们的发射光谱可以计算出这两个样品的红光发射色坐标值。由于这两个荧光粉的发射光谱形状相似,所以它们的色坐标值没有明显的不同,都约为 (0.66, 0.34), 接近于标准红光的色坐标值 (0.67, 0.33), 说明所合成的红色荧光粉具有很高的色纯度。

两个红光 LED 管以及 InGaN 芯片裸管在 20 mA 电流激发下的发光光谱如图 6 所示。图 6 (a) 为 InGaN 芯片的电致发光光谱,芯片的发射峰位于 ~395 nm 处。与图 6 (a) 相比,图 6 (b) 和 (c) 在 ~395 nm 处的近紫外光发射很弱,而在 616 nm 和 700 nm 处均有很强的发射峰。这表明我们所合成的样品能被该 LED 芯片的近紫外光有效地激发,并表现出很强的红光发射。与前面荧光光谱的测试结果一致,利用 $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$ 制成的红光 LED 的发光效率要高于 $\text{La}_{1.40}\text{Mo}_2\text{O}_9:0.60\text{Eu}^{3+}$ 。图 6 中的插图为这些 LED 在 20 mA 电流激发下的照片,用肉眼可以观察到该二极管发出很强的红光。

4 结 论

利用高温固相法合成了 $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}$ 和 $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}, \text{W}^{6+}$ 红色荧光粉,它们均能被 395 nm 的近紫外光有效激发。 W^{6+} 离子的引入提高了 $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9:\text{Eu}^{3+}$ 的发射强度。荧光粉 $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$ 的红光发射效率最高,同时也具有很高的红光色纯度,色坐标为 (0.66, 0.34), 它与 ~395 nm 发射的 InGaN 芯片

所制作成的 LED 也表现出相当强的红光发射。在近紫外 InGaN 芯片的白光 LED 上。因此, $\text{La}_{1.40}\text{Eu}_{0.60}\text{Mo}_{1.84}\text{O}_9:0.16\text{W}^{6+}$ 有可能被应用

参 考 文 献:

- [1] Chen W T, Sheu H S, Liu R S, *et al.* Cation-size-mismatch tuning of photoluminescence in oxynitride phosphors [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134(19):8022-8025.
- [2] Dai Q L, Foley M E, Breshike C J, *et al.* Ligand-passivated Eu: Y_2O_3 nanocrystals as a phosphor for white light emitting diodes [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2011, 133(39):15475-15486.
- [3] Chen L, Lin C C, Yeh C W, *et al.* Light converting inorganic phosphors for white light-emitting diodes [J]. *Materials*, 2010, 3(3):2172-2195.
- [4] Hu Y S, Zhuang W D, Ye H Q, *et al.* A novel red phosphor for white light emitting diodes [J]. *J. Alloys Compd.*, 2005, 390(1):226-229.
- [5] Zhou L Y, Wei J S, Wu J R, *et al.* Potential red-emitting phosphor for white LED solid-state lighting [J]. *J. Alloys Compd.*, 2009, 476(1):390-392.
- [6] Laffez P, Chen X Y, Banerjee G, *et al.* Growth of $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ films on porous Al_2O_3 substrates by radio frequency magnetron sputtering [J]. *Thin Solid Films*, 2006, 500(1):27-33.
- [7] Geng X J, Tian Y W, Chen Y J, *et al.* Progress in studies on tungstate and molybdate red emitting phosphor used for white-LED [J]. *Mater. Rev.* (材料导报), 2010, 24(13):54-57 (in Chinese).
- [8] Zhang Y L, Xiong L, Li X F, *et al.* Luminescence investigation of Eu^{3+} activated molybdates red phosphors and their applications in near-UV light-emitting diodes [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2012, 177:341-344.
- [9] Wang Z L, He P, Wang R, *et al.* New red phosphor for near-ultraviolet light-emitting diodes with high color-purity [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2010, 45(2):240-242.
- [10] Wang Z L, Liang H B, Wang J, *et al.* Red-light-emitting diodes fabricated by near-ultraviolet InGaN chips with molybdate phosphors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(7):071921-1-3.
- [11] Li X, Yang Z P, Guan L, *et al.* Luminescent properties of Eu^{3+} -doped $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ red phosphor by the flux method [J]. *J. Cryst. Growth*, 2008, 310(12):3117-3120.
- [12] Khadasheva Z S, Venskovskii N U, Safronenko M G, *et al.* Synthesis and properties of $\text{La}_2(\text{Mo}_{1-x}\text{M}_x)_2\text{O}_9$ ($M = \text{Nb}, \text{Ta}$) ionic conductors [J]. *Inorg. Mater.*, 2002, 38(11):1168-1171.
- [13] Fang Q F, Wang X P. Low frequency internal friction of oxide ion-conductor $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ [J]. *Solid State Phenom.*, 2003, 89:293-298.



刘永(1988 -),男,云南大理人,硕士研究生,2014年于云南民族大学获得学士学位,主要从事无机发光材料方面的研究。
E-mail: 657499563@qq.com



汪正良(1977 -),男,安徽东至人,教授,2006年于中山大学获得博士学位,主要从事无机发光材料方面的研究。
E-mail: wzh1629@163.com