

• 光电器件与材料 •

## 低温共烧结制备 $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$ 荧光玻璃的研究

王子明<sup>1</sup>, 黄笑彤<sup>2</sup>, 杨波波<sup>2</sup>, 刘伟明<sup>1</sup>, 邹军<sup>2</sup>, 钱幸璐<sup>2</sup>, 张灿云<sup>2</sup>,  
石明明<sup>2</sup>, 周贺雨<sup>1</sup>, 刘自转<sup>2</sup>, 郑飞<sup>2</sup>

(1. 上海应用技术大学 材料科学与工程学院, 上海 201418; 2. 上海应用技术大学 理学院, 上海 201418)

**摘要:** 以  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$  为基质玻璃的原料组分, 制备工艺采用传统的熔融冷却法, 溶制温度  $950\text{ }^\circ\text{C}$  制备出基质玻璃。再通过低温共烧结法在基质玻璃中成功掺入  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 绿色荧光粉制备出绿色荧光玻璃。利用 stc-4000 快速光谱仪和 PMS-80 可见光谱分析系统研究了不同电流下的 LED 器件光效、色温、色坐标的变化情况。结果表明, 随着驱动电流从  $10\text{ mA}$  逐渐升高到  $30\text{ mA}$ , LED 器件的测试光效大约下降  $16\%$ , 相关色温变化较小, 色坐标未发生漂移。由于缺少红光成分, 实验在绿色荧光玻璃上通过旋转涂覆一层红色荧光薄膜制备出高显色指数的暖白光 LED, 进一步推动绿色荧光玻璃在白光 LED 中的应用。

**关键词:** 低温共烧结; 荧光玻璃; 暖白光 LED

中图分类号: 0743.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-06-0039-05

## Preparation of $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$ Phosphor in Glass by Low-temperature Co-sintering Method

WANG Zi-ming<sup>1</sup>, HUANG Xiao-tong<sup>2</sup>, YANG Bo-bo<sup>2</sup>, LIU Yi-ming, ZOU Jun<sup>2</sup>, QIAN Xing-lu<sup>2</sup>, ZHANG Can-yun<sup>2</sup>,  
SHI Ming-ming<sup>2</sup>, ZHOU He-yu<sup>1</sup>, LIU Zi-zhuan<sup>2</sup>, ZHENG Fei<sup>2</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. School of Science, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

**Abstract:** The bismuthate glass is prepared by conventional melting-quenching method at  $950\text{ }^\circ\text{C}$ , which is composed of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$  and  $\text{ZnO}$ . The  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  phosphor in glasses (PIGs) is prepared by low-temperature co-sintering bismuthate glass frits and  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) phosphors. The luminous efficiency, correlated color temperature, CIE coordinates of the LED device is studied under different current by stc-4000 high accuracy array spectroradiometer and PMS-80 visible light spectroscopy analyzing system. Research results show that the luminous efficiency of the light emitting diode (LED) device decreases about  $16\%$ , significantly less variation in correlated color temperature, CIE coordinates without shift with the current gradually increasing from  $10\text{ mA}$  to  $30\text{ mA}$ . Being lack of red light component, the warm white-LED with high color rendering index (CRI) is constructed by coating a layer red phosphor film in spinning method on green phosphor glass in the experiment, which promotes further the application of green phosphor glass in white-LED.

**Key words:** low-temperature co-sintering; phosphor in glass; warm white light emitting diode (LED)

白光 LED 具有的高效节能、绿色环保、使用寿命长等一系列优点, 使其成为新一代照明光源<sup>[1-3]</sup>,

世界各国都已经积极加入到 LED 照明计划中, 我国在科技部“863 计划”支持下, 在照明领域启动了“国

收稿日期: 2017-09-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51302171); 上海市学科能力建设项目(14500503300); 上海市产学研合作项目(沪 CXY-2013-61).

作者简介: 王子明(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电材料及 LED 封装方面的研究; 杨波波(1990-), 男, 硕士, 实验员, 主要研究方向为光电材料以及 LED 器件方面的研究; 邹军(1978-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为半导体材料与器件方面的研究。

家半导体照明工程”。白光LED已经在舞台照明、液晶显示、广告宣传等领域有了很大的应用<sup>[4-6]</sup>。白光LED的实现方式可以分成两类:一类无荧光粉型主要通过混合三基色LED的发光区域来实现白光,另一类有荧光粉型,又称为荧光转换型白光LED,是一种基于蓝光或紫外光、近紫外光激发荧光粉的光转换型器件。荧光粉在蓝光芯片或紫外光、近紫外光的激发下产生绿色和红光,或蓝色、绿色、红光等,混合得到白光<sup>[7-8]</sup>。近几年,世界各国的科学家为实现白光LED做了大量的工作,但关于荧光粉转换型白光LED仍存在一些问题,市场上一般都会采取增加单频LED的输出功率,而LED光电转换效率较低,大约在20%左右<sup>[9]</sup>,其余的电能以热量的形式释放出去,导致PN结温度升高,芯片的温度会高达150~200℃,涂覆在芯片上的LED荧光粉发生温度猝灭效应,用于封装的环氧树脂易老化黄化,从而致使白光LED色坐标漂移,光衰严重,影响LED产品的稳定性与寿命<sup>[10-12]</sup>。为使白光LED具有良好的稳定性和发光效率,需要一种新型无机材料代替有机树脂进行封装<sup>[2]</sup>。荧光玻璃是通过低温共烧结法<sup>[13-15]</sup>将荧光粉均匀掺入到基质玻璃中,荧光玻璃具有荧光粉和玻璃的基本性能:(1)可以在相同波长激发荧光粉,同时有效地避免温度对荧光粉的热失效影响;(2)具有透明性好,机械强度高,热膨胀系数可调,耐磨耐腐蚀,化学稳定性和热稳定性好等特性。荧光玻璃作为一种新型无机材料,其优良特性可以进行白光LED封装。

随着LED行业的发展,对LED产品的要求越来越高,高显色指数的暖白光LED也成为一热点研究方向。文中通过低温共烧结法制备出掺入不同Y取代Lu的 $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ )荧光玻璃,将制备出的荧光玻璃封装到LED蓝光芯片上并进行stc-4000快速光谱仪测试,研究在不同电流驱动下的LED器件光效、色温、色坐标的变化情况。由于缺少红光成分,实验在绿色荧光玻璃上通过旋转涂覆一层红色荧光薄膜制备出高显色指数的暖白光LED。

## 1 实验

### 1.1 样品制备

将氧化物原料 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}$ 按一定的摩尔质

量分数配比,充分混合均匀,将原料混合粉倒入刚玉坩锅中并放置于马弗炉内进行烧结,设置马弗炉的温度为950℃,保温2h后得到玻璃溶液;将熔融的玻璃液倒入温度为室温的铸铁模上,快速退火至室温后把基质玻璃研磨成玻璃粉末,并过200目筛;用研磨得到的玻璃粉末与已通过高温固相法制备出的 $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ )荧光粉以质量分数5%混合;混合的粉末置于马弗炉中,温度设置为650℃,保温20min后形成绿色荧光玻璃。红色荧光粉与传统硅胶(A、B胶)混合均匀,利用旋转涂覆机,当托盘旋转时通过离心力的作用,均匀涂覆在绿色荧光玻璃上。

### 1.2 样品表征

采用日本Rigaku的Ultima IV型X射线衍射仪( $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda=1.5406\text{nm}$ )对荧光玻璃的晶向组成进行分析,衍射角度 $2\theta$ 从 $10^\circ\sim 60^\circ$ ,扫描速率 $0.02^\circ/\text{步}$ 和 $4^\circ/\text{min}$ 。激发光谱和荧光光谱采用Edinburgh荧光光谱仪,氙灯泵浦。EL谱图采用stc-4000快速光谱仪和PMS-80可见光谱分析系统进行测试。

## 2 分析与讨论

实验首先制备出了掺入 $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ )荧光粉的不同荧光玻璃,其中选取 $\text{Lu}_{2.74}\text{Y}_{0.2}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$ 荧光粉和对应荧光玻璃进行XRD测试。如图1所示, $\text{Lu}_{2.74}\text{Y}_{0.2}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$ 荧光粉和对应荧光玻璃的XRD衍射图谱。

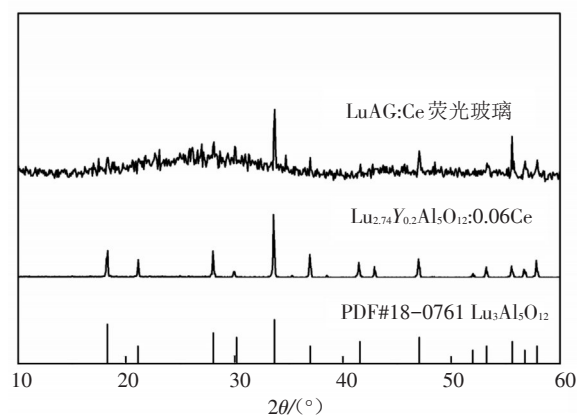


图1  $\text{Lu}_{2.74}\text{Y}_{0.2}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$ 荧光粉和对应荧光玻璃的XRD衍射图谱

其中,荧光玻璃的XRD色是数据呈现一个明显

的馒头峰(玻璃的特征峰),对比JCPDS卡片(PDF# 18-0761)发现  $33.67^\circ$  的最强峰都存在三个衍射谱中,荧光玻璃中其他峰也符合荧光粉和JCPDS卡片中的对应峰,说明  $\text{Lu}_{2.74}\text{Y}_{0.2}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  荧光粉可以成功掺入钽酸盐基质玻璃中,实验结果表明,该荧光玻璃中不仅保持原有的LuAG晶体结构,而且在共烧后无杂质峰呈现。 $\text{Lu}_{2.74}\text{Y}_{0.2}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  荧光粉在  $650^\circ\text{C}$  可以通过低温共烧法成功地掺入基质玻璃中。

图2是掺入不同  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 荧光玻璃的发射谱。

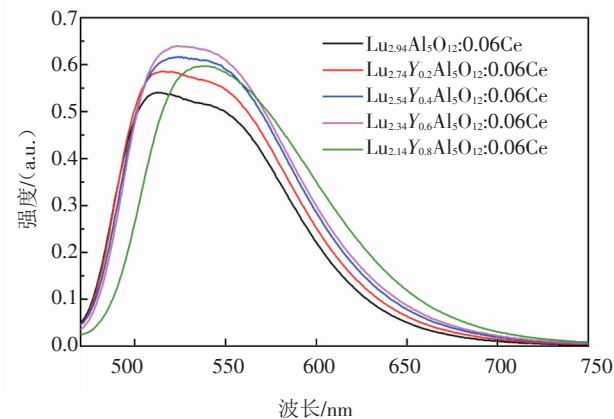


图2 不同  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  荧光玻璃的PL谱图

从图中可以看出,  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 五条不同曲线中,当  $X=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  时,PL谱图的中心波长分别为  $512.4\text{ nm}, 514.4\text{ nm}, 518.7\text{ nm}, 524.1\text{ nm}, 536.6\text{ nm}$ 。查相关文献[16]可以发现,  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 荧光粉的PL谱图对应的中心波长和本实验的  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 荧光玻璃相似,也说明  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 荧光粉成功掺入基质玻璃。 $X=0, 0.2, 0.4, 0.6$  时,可以看出,在  $500\text{ nm}$  波段附近的PL谱图曲线没有大的变化,说明在  $X=0, 0.2, 0.4, 0.6$  时荧光粉掺入基质玻璃后,发射谱中绿光波段部分未减少,而只是红光波段部分在一直增加。当  $X$  增加到  $0.8$  时,PL谱图变化较大,整体发生红移。可能是随着  $Y$  元素不断取代  $\text{Lu}$  元素,  $\text{YAG}$  晶格环境增加,一部分发光铈离子进入  $\text{YAG}$  的晶格环境,荧光玻璃发射峰位发生红移。

利用  $\text{stc-4000}$  快速光谱仪和  $\text{PMS-80}$  可见光谱分析系统分析五种不同  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 荧光玻璃在  $25\text{ mA}$  电流驱动时的光学

性能,得到如图3的EL谱图。

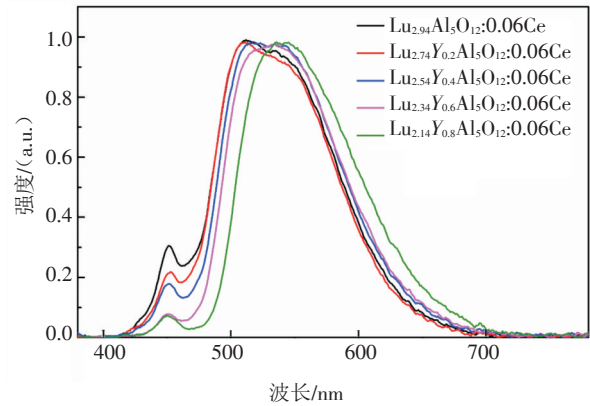
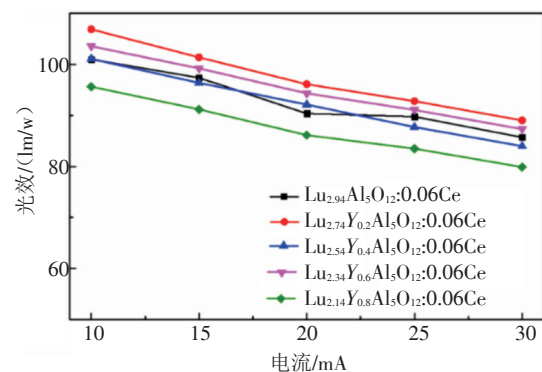


图3 不同  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  荧光玻璃在  $25\text{ mA}$  电流驱动下的EL谱图

可以看出,五种荧光玻璃在被蓝光激发后,发射峰的中心波长向红波段移动,其宽带峰是从  $470\sim 700\text{ nm}$  范围内,掺入的五种不同  $x$  值荧光粉的荧光玻璃样品,发射峰的半高宽几乎不变,说明荧光粉中  $Y$  元素对  $\text{Lu}$  元素的取代只改变了发射峰位置。由于发射峰的位置向红波段移动,荧光玻璃更难透过蓝光,所以在  $458\text{ nm}$  处的峰值随着  $X$  值的增加越来越低。

将荧光玻璃封装到LED蓝光芯片上通过  $\text{stc-4000}$  快速光谱仪测试分析,得到不同电流下的光效和色温等数据。如图4所示。实验结果表明,驱动电流在  $10\text{ mA}$  到  $30\text{ mA}$  范围内变化时,荧光玻璃的测试光效在驱动电流的升高时逐渐降低;五种不同  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 荧光玻璃样品中,当  $X$  值为  $0.2$  时,光效是五种荧光玻璃中最高的。五种不同荧光玻璃的色温分别为  $4\ 000\text{ K}, 5\ 500\text{ K}, 6\ 500\text{ K}$ ,其色温值并不随驱动电流的变化而变化。



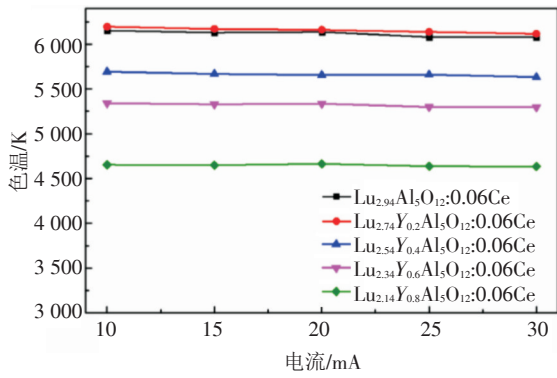
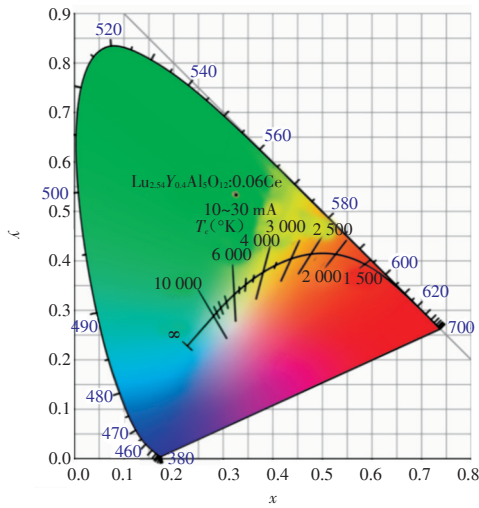
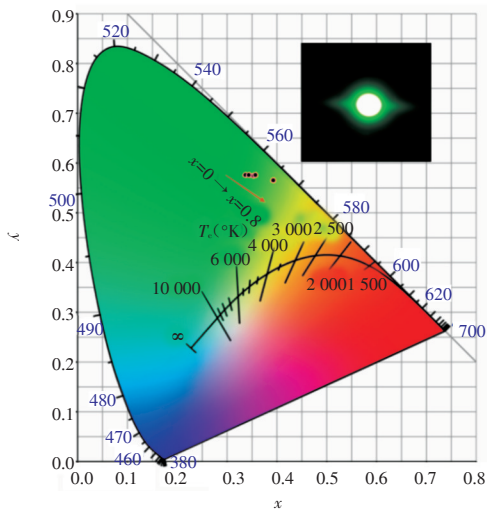


图4 Lu<sub>2.94-x</sub>Y<sub>x</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.06Ce 荧光玻璃在不同电流驱动下的光效和相关色温变化图



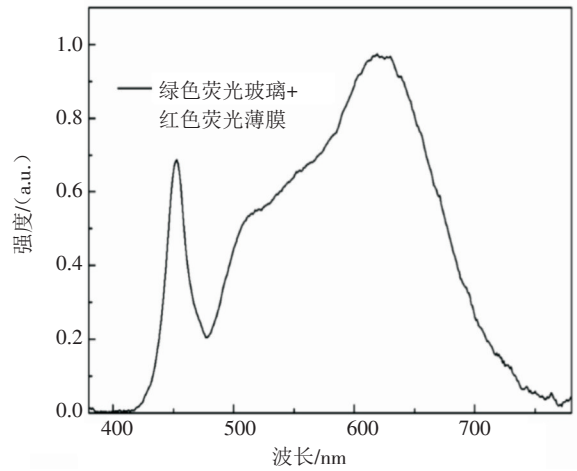
(a) 不同驱动电流下 Lu<sub>0.54</sub>Y<sub>0.4</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.06Ce 荧光玻璃的色坐标图



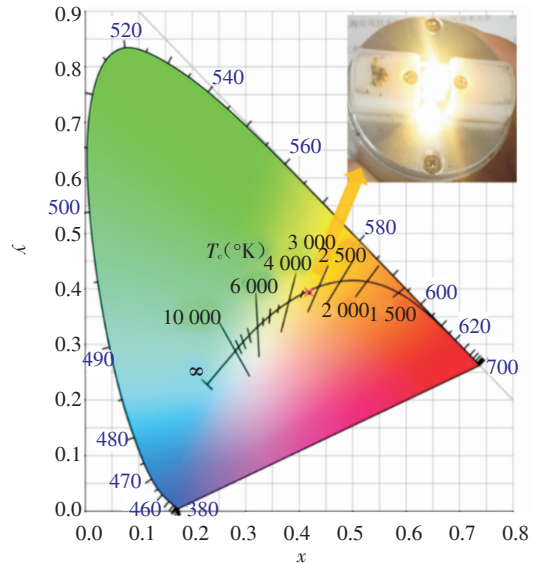
(b) 25 mA 驱动电流下 Lu<sub>2.94-x</sub>Y<sub>x</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.06Ce (X=0~0.8) 荧光玻璃的色坐标图

图5 不同驱动电流下 Lu<sub>0.54</sub>Y<sub>0.4</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.06Ce 荧光玻璃的色坐标图 及 25 mA 驱动电流下 Lu<sub>2.94-x</sub>Y<sub>x</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.06Ce (X=0~0.8) 荧光玻璃的色坐标图

如图 5 所示, 图 5a 是不同驱动电流下 Lu<sub>0.54</sub>Y<sub>0.4</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.06Ce 荧光玻璃的色坐标图。可以看到, 驱动电流在 10~30 mA 范围内色坐标未发生漂移。图 5b 是 25 mA 驱动电流下 Lu<sub>2.94-x</sub>Y<sub>x</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.06Ce (X=0~0.8) 荧光玻璃的色坐标图。其中色坐标变化趋势如图中直线所表示。当 X=0、0.2、0.4、0.6 时的 LuAG:Ce 荧光玻璃色坐标漂移不大, X=0.8 的 Lu<sub>2.34</sub>Y<sub>0.6</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.06Ce 荧光玻璃色坐标向红光移动变化较大, 也对应上图 2 的变化趋势。



(a) Lu<sub>2.94-x</sub>Y<sub>x</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.06Ce (X=0~0.8) 绿色荧光玻璃和红色荧光薄膜封装 LED 器件的 EL 谱图



(b) Lu<sub>2.94-x</sub>Y<sub>x</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.06Ce (X=0~0.8) 绿色荧光玻璃和红色荧光薄膜封装 LED 器件的色坐标图, LED 器件发光图

图6 Lu<sub>2.94-x</sub>Y<sub>x</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.06Ce (X=0~0.8) 绿色荧光玻璃和红色荧光薄膜封装 LED 器件的 EL 谱图及 Lu<sub>2.94-x</sub>Y<sub>x</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.06Ce (X=0~0.8) 绿色荧光玻璃和红色荧光薄膜封装 LED 器件的色坐标图, LED 器件发光图

如图 6a 所示,实验使用旋转涂覆技术在  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 绿色荧光玻璃上涂覆一层红色荧光薄膜,并封装到蓝光芯片上,利用 stc-4000 快速光谱仪测试封装后 LED 器件得到 EL 谱图,明显有两个峰,中心波长在 460 nm 的峰是透过封装荧光体的蓝光;另一个峰为一个宽带峰,其范围在 475~750 nm 内,对比图 3  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 绿色荧光玻璃的 EL 谱图,发现增加红色荧光薄膜后 EL 谱图中红色波段明显增加。图 6b 是 EL 谱图对应的色坐标图,其色坐标落在黑体辐射线上,色温大约在 3 500 K 附近,插图为封装后 LED 器件的发光图,发出耀眼的暖白光,实验证明,  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 绿色荧光玻璃和红色荧光薄膜封装的 LED 器件有潜力得到广泛应用。

### 3 结 论

通过低温共烧结法在以  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$  基质玻璃中成功掺入  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 荧光粉,成功制备出五种  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 绿色荧光玻璃,分析研究了在 650 °C 烧结温度下制备出的绿色荧光玻璃的发光性能。结果表明,当  $X=0.6$  时  $\text{Lu}_{2.34}\text{Y}_{0.6}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  荧光玻璃的发射峰强度最强;而在不同电流下,五种  $\text{Lu}_{2.94-x}\text{Y}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.06\text{Ce}$  ( $X=0\sim 0.8$ ) 绿色荧光玻璃封装 LED 器件的光效大约下降 16%,相关色温变化不大,色坐标未发生漂移。主要原因:发光离子 Ce 的发光场从 LuAG 晶格环境慢慢变化成 LuYAG 晶格环境,当 Y 对 Lu 的取代逐渐增强时,晶体场分裂倾向于将最低的 5d 能带转移到较低的能带 4f。当 YAG 晶体的晶体强度增加时,Ce 离子的 5d 能带表现出较大的分裂,荧光玻璃的发射峰会向红光波段偏移。随着对蓝光危害的研究越来越深入,高显色暖白光 LED 的需求更加强烈,绿色荧光玻璃上涂覆一层红色荧光薄膜封装 LED 器件得到暖白光 LED 的方式会被广泛研究。

### 参考文献

- [1] 刘伟明,邹军,李文博,等.AC LED 光源的光电性能研究[J]. 光电技术应用,2016,31(5):27-31.
- [2] 林航,王波,王元生.白光 LED 用荧光微晶玻璃设计制备、显微结构与发光特性研究进展[J]. 应用化学,2016,33(10):1126-1139.
- [3] 姚琦,林思棋,郭自泉,等.InGaN 基高压 LED 和传统大功率 LED 的发光效率比较[J]. 光电技术应用,2015,30(2):37-41.
- [4] 徐奕斐.2014 年中国 LED 照明产业发展简析[J]. 工业技术创新,2014,1(3):283.
- [5] 刘虹,陈良惠.我国半导体照明发展战略研究[J]. 中国工程科学,2011,13(6):39-42.
- [6] 刘木清.LED 的特点及应用综述[C]//第七届中国国际半导体照明论坛,2010:414-417.
- [7] CHEN D, XIANG W, LIANG X, et al. Advances in transparent glass-ceramic phosphors for white light-emitting diodes-A review[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(3): 859-869.
- [8] 张延.大功率 LED 用荧光玻璃的制备与性能研究[D]. 上海:东华大学,2015.
- [9] 张灵改.LED 光电转换效率测试及应用研究[J]. 制造业自动化,2014,36(21):26-28.
- [10] Peng Y, Li R, Cheng H, et al. Facile preparation of patterned phosphor-in-glass with excellent luminous properties through screen-printing for high-power white light-emitting diodes[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 693: 279-284.
- [11] Luo X, Fu X, Chen F, et al. Phosphor self-heating in phosphor converted light emitting diode packaging[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 58(1): 276-281.
- [12] Ji E K, Song Y H, Lee M J, et al. Thermally stable phosphor-in-glass for enhancement of characteristic in high power LED applications[J]. Materials Letters, 2015, 157: 89-92.
- [13] Zhang R, Lin H, Yu Y, et al. A new-generation color converter for high-power white LED: transparent  $\text{Ce}^{3+}$ : YAG phosphor-in-glass[J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(1): 158-164.
- [14] Ma C, Cao Y, Shen X, et al. High reliable and chromaticity-tunable flip-chip w-LEDs with Ce: YAG glass-ceramics phosphor for long-lifetime automotive headlights applications[J]. Optical Materials, 2017, 69: 105-114.
- [15] 贺海平.白光 LED 荧光玻璃材料的合成及光学结构设计[D]. 西安:电子科技大学,2010.
- [16] Yang B, Zou J, Shi M, et al. Enhancement of thermal stability and reliability of green LuAG phosphors by appropriate Y substitution[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017, 28(5): 4075-4082.