

文章编号: 1000-7032(2013)02-0133-06

白光 LED 用新型 $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 透明陶瓷的发光性能

贺龙飞¹, 范广涵^{1*}, 雷牧云²,娄载亮², 郑树文¹, 苏 晨¹, 肖 瑶¹, 陈志武¹, 张 涛¹

(1. 华南师范大学 光电子材料与技术研究所, 广东 广州 510631; 2. 烁光特晶科技有限公司, 北京 100018)

摘要: 采用金属醇盐法制备 MgAl_2O_4 前驱体, 通过高温煅烧 2~4 h 得到纯相 MgAl_2O_4 粉体, 再将其与 YAG:Ce 荧光粉均匀混合, 利用热压烧结并结合热等静压处理得到 $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 透明陶瓷。利用 X 射线衍射、紫外-可见分光光度计等测试手段对样品进行表征。样品由 MgAl_2O_4 和 YAG 两相组成, 在 340 nm 和 475 nm 有两个激发峰。发射光谱在 533 nm 有一宽峰, 属于 Ce^{3+} 的 $5d \rightarrow 4f$ 特征跃迁发射。该透明陶瓷封装蓝光芯片所得白光 LED 器件在 35 mA 驱动下的发光效率为 $133.47 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, 其寿命及色温稳定性优于采用传统方式封装的白光 LED。实验结果表明 $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 透明陶瓷是一种可用于白光 LED 的新型荧光材料。

关键词: YAG; 铝酸镁; 透明陶瓷; 白光 LED

中图分类号: TN383

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20133402.0133

Luminescent Properties of New $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ Transparent Ceramics for White LED Applications

HE Long-fei¹, FAN Guang-han^{1*}, LEI Mu-yun², LOU Zai-liang²,ZHENG Shu-wen¹, SU Chen¹, XIAO Yao¹, CHEN Zhi-wu¹, ZHANG Tao¹

(1. Institute of Opto-electronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. Bright Crystals Technology, Inc., Beijing 100018, China)

* Corresponding Author, E-mail: gfan@sclu.edu.cn

Abstract: High-purity ultrafine MgAl_2O_4 powder was synthesized by metal-alkoxide method and calcining for 2~4 h. After mixing the YAG:Ce phosphor with MgAl_2O_4 powder, $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ transparent ceramics were obtained by hot-pressed sintering and hot isostatic pressed sintering technique. The transparent ceramics were characterized by X-ray diffraction and UV-Vis spectrometer. The crystal phase of the transparent ceramic was composed of MgAl_2O_4 and YAG. The excitation spectra had a weak band at 345 nm and a strong band at 475 nm. The broad emission peaks at about 533 nm can be attributed to $5d \rightarrow 4f$ transition of Ce^{3+} ions. The luminous efficacy of the white LED which packaged by the transparent ceramic and blue LED chip was $133.47 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ at 35 mA, and its color temperature are not varied with the change of driving current. It had better performance in stability and lifetime than that packaged in traditional ways under the same condition. All results show that $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ transparent ceramic may be a promising fluorescent material for white LEDs.

Key words: YAG; MgAl_2O_4 ; transparent ceramic; white LED

收稿日期: 2012-09-20; 修订日期: 2012-10-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61176043); 广东省战略性新兴产业专项资金 LED 产业项目(2010A081002005, 2011A081301003, 2012A080304016)资助项目

作者简介: 贺龙飞(1988-), 男, 湖南衡阳人, 主要从事发光材料与器件的研究。

E-mail: hl8888@126.com

1 引 言

在 20 世纪 90 年代, Nakamura 等^[1] 采用 MOCVD 成功制备了世界上首个高亮度 InGaN 蓝光 LED, 使得 LED 形成三基色完备的发光体系。发光二极管(LED)作为 21 世纪的新型固态光源, 具有体积小、节能环保、响应速度快、使用寿命长等优点, 被认为是“第四代绿色照明光源”。传统白光 LED 实现的主要方法是采用 YAG: Ce 荧光粉与环氧树脂或硅胶以一定的比例混合涂覆在 InGaN 蓝光 LED 芯片上。由于芯片功耗及荧光粉光转换过程中的能量损失会转化为热能, 芯片和荧光粉涂层温度会随之升高, 传统封装材料在高温和短波光长期照射下透过率下降, 产生严重老化现象^[2]。尤其在大电流驱动下, 芯片温度升高会使荧光粉性能劣化以致于荧光转换效率降低^[3], 以及白光 LED 色坐标发生大幅度偏移, 影响到光品质的稳定性, 器件寿命也因此缩短^[4-5]。

基于目前白光 LED 出现的上述问题, 人们开始研发具有高稳定性的透明陶瓷作为荧光转换材料。Zych 等^[6] 采用热压法在 1 700 °C、 3.4×10^7 Pa 压力下热压 10 h, 制备了 Ce: YAG 荧光透明陶瓷。Yanagida 等^[7] 真空烧结制备了掺杂摩尔分数分别为 0.005%、0.05% 和 0.5% 的 Ce: YAG 透明陶瓷, 在大于 500 nm 波段的透过率接近 80%, 其发光性能与单晶相当。潘裕柏等^[8] 在 1 750 °C 真空烧结 10 h 制备了 Ce: YAG 透明陶瓷, 在可见光区 500 ~ 900 nm 的直线透过率可达 80% 左右。Nishiura 等^[9] 用氢氧化物采用共沉淀法合成了 Ce: YAG 粉体, 在 1 780 °C 真空烧结 20 h 获得 Ce: YAG 透明陶瓷, 并与蓝光 LED 芯片进行封装, 制备出的白光 LED 在 10 mA 电流驱动下的发光效率为 72.5 lm/W。国内外报道的透明陶瓷均采用纯相 YAG: Ce 粉末进行烧结获得, 其封装的白光 LED 发光效率并不高, 且尚未对这种新型白光 LED 器件的光学性能参数进行更加深入的研究。

荷兰飞利浦公司在 2006 年专利报道了将荧光粉掺杂到氧化铝多晶陶瓷中, 通过烧结可以得到荧光粉体积分数为 0.01% ~ 20% 的多晶氧化铝陶瓷, 并实现了其与蓝光 LED 的封装^[10]。但由于氧化铝陶瓷为六方结构, 所以只能做到半透明, 从而影响了器件的发光效率。与之相比, MgAl₂O₄ 与 Y₃Al₅O₁₂ 有相同的立方晶体结构, 均

具有很高的对称性, 以其制备透明陶瓷可以在一定程度上减少非对称性对入射光的散射, 提高透过率。本文采用金属醇盐法制备了 MgAl₂O₄ 陶瓷粉体, 并将其与 YAG: Ce 荧光粉混合, 通过真空热压(HP)烧结技术结合热等静压处理制备出 MgAl₂O₄/Ce: YAG 透明陶瓷。采用异种组分粉体经过混合烧结获得具有特殊性能的透明陶瓷在国内外的报道中十分少见。这种由 MgAl₂O₄ 和 YAG 组成的复相透明陶瓷具有优异的荧光性能和透过率, MgAl₂O₄ 透明陶瓷作为基质用于透过部分蓝光和 Ce: YAG 发射的黄光组合成白光, 有望在白光 LED 领域广泛应用。

2 实 验

采用金属铝、镁按照一定比例和异丙醇进行反应获得金属醇盐产物, 再经过减压蒸馏提纯分馏, 并在烘箱烘干和高温煅烧 2 ~ 4 h, 得到颗粒大小为纳米级的 MgAl₂O₄ 粉体。然后将 MgAl₂O₄ 粉体与美国英特美公司产品 YAG: Ce 荧光粉(型号: YAG-04)以一定比例进行混合, 球磨 2 ~ 4 h 后放入干燥箱中烘烤, 再进行过筛处理。将均匀混合后的粉体先放入钢模中进行冷压成型, 经冷等静压成型得到素坯。再将样品置于真空热压炉进行热压烧结, 真空度 10^{-2} Pa, 温度 1 500 ~ 1 700 °C。接着对样品在氢气条件下进行热等静压处理, 温度 1 600 ~ 1 800 °C, 压力 150 ~ 200 MPa。最后将试样表面进行研磨和抛光处理, 即可获得高致密、高透明的 MgAl₂O₄/Ce: YAG 陶瓷。将上述样品进行加工, 按照大功率白光 LED 的支架尺寸对其进行切割并对陶瓷片进行研磨和抛光, 控制 MgAl₂O₄/Ce: YAG 透明陶瓷片的厚度在 0.5 mm, 与 InGaN 蓝光 LED 芯片结合, 封装成白光 LED 器件。

采用德国 Bruker 公司的型号为 D8 Advance 多晶 X 射线衍射仪对试样的晶体结构进行表征, 使用铜靶, 扫描速度每步 17.7 s, 扫描步长 0.02°, 范围 $2\theta = 5^\circ \sim 90^\circ$ 。用日本 Hitachi 公司的 F4500 型荧光分光光度计测试样品的激发光谱和发射光谱。采用中国杭州远方公司的 LED 光色电综合测试系统进行白光 LED 的光色电性能表征。样品的所有测试均在室温下进行。

3 结果与讨论

图 1 为 MgAl₂O₄/Ce: YAG 透明陶瓷样品的

XRD 谱, (a)、(b) 分别是 Ce: YAG 质量分数为 10% 和 40% 的样品的 X 射线衍射谱。通过对比发现, 该结果与 JCPDF 标准衍射卡片中的 Y₃Al₅O₁₂ (No. 33-0040) 和 MgAl₂O₄ (No. 21-1152) 特征峰是一致的。陶瓷样品中的 Y₃Al₅O₁₂ 的空间群为 *Ia3d* (230), 仍属于钇铝石榴石结构; MgAl₂O₄ 的空间群为 *Fd3m* (227), 仍属于尖晶石结构。从图 1 中还可以看出, Ce: YAG 的含量对所得陶瓷样品的 XRD 衍射峰的强度产生影响, 当 Ce: YAG 的质量分数为 10% 时, 除有 MgAl₂O₄ 相的主峰外, 同时出现衍射峰强度相对较弱的 YAG 相主峰, 这主要是因为 Ce: YAG 的含量相对较少; 当 Ce: YAG 的质量分数增加至 40% 时, YAG 相的衍射峰变得特别明显。实验结果证实试样经混合并高温烧结后成分并未发生变化, 仍为 Y₃Al₅O₁₂ 和 MgAl₂O₄ 这两种组分。

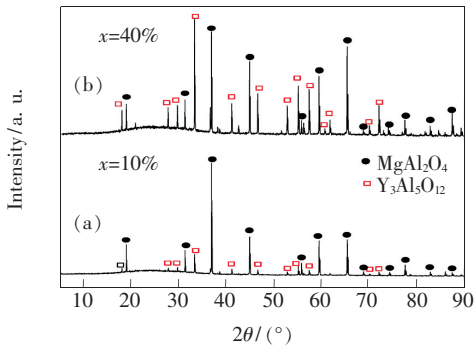


图 1 (1-x)MgAl₂O₄/xCe:YAG 透明陶瓷的 XRD 图
Fig.1 XRD patterns of transparent (1-x)MgAl₂O₄/xCe:YAG transparent ceramic

图 2 为 MgAl₂O₄/Ce: YAG 透明陶瓷的 4 个样品的照片, 从左往右样品的 Ce: YAG 的质量分数分别为 10%、20%、30%、40%。从照片中可以看到陶瓷下面的字迹, 说明样品具有良好的透光性; 且随着 YAG: Ce 掺杂量的增加, 样品变得越来越黄。MgAl₂O₄/Ce: YAG 陶瓷样品在 520 ~

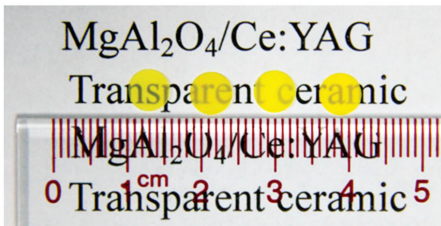


图 2 MgAl₂O₄/Ce: YAG 透明陶瓷样品的照片
Fig. 2 Appearance of mirror-polished MgAl₂O₄/Ce:YAG transparent ceramic

800 nm 范围的透过率在 57% 以上^[11]。

图 3 为 MgAl₂O₄/Ce: YAG 透明陶瓷的激发光谱和发射光谱。样品激发光谱用 533 nm 波长监测, 测试范围为 300 ~ 520 nm; 发射光谱分别用 342、460、475 nm 波长激发, 测试范围为 480 ~ 680 nm。由激发光谱可知, 样品分别在 342 nm 和 475 nm 处存在宽激发峰, 其中 475 nm 处的非对称宽峰是由 440 nm 和 475 nm 的两个激发峰组合而成。这两个较宽激发峰是由于电荷从 Ce³⁺ 的 4f 基态到 5d 激发态的跃迁引起的。340 nm 和 475 nm 的激发峰分别对应于²F_{5/2}至 5D 激发态的最低和第二低的能级跃迁^[12-13]。样品发射光谱为可见光区内的宽谱, 范围为 500 ~ 600 nm, 最强发射峰位于 533 nm, 属于 Ce³⁺ 的 5d→4f 特征跃迁发射。高斯拟合显示, 该发光峰具有双重带特征, 分别对应于 Ce³⁺ 离子 5d 最低能量激发态向基态 4f¹ 的两个子能级²F_{7/2}和²F_{5/2}的跃迁^[14]。由于最强激发峰和发射峰都与最低 5d 态能级相关, 而激发态 5d 电子的径向波函数可以很好地扩展到 5s²5p⁶ 闭壳层之外, 所以能级受外场的影响较大, 得到的激发和发射光谱均表现为宽峰^[15]。采用不同波长的激发光并没有改变发射光谱的峰值和峰形, 其发射光相对强度在 λ_{ex} = 475 nm 处达到最大值。

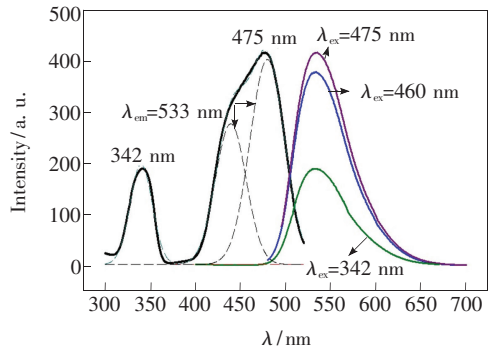


图 3 MgAl₂O₄/Ce: YAG 透明陶瓷的激发光谱和发射光谱
Fig. 3 The excitation and emission spectra of MgAl₂O₄/Ce:YAG transparent ceramic

采用 80% MgAl₂O₄/20% Ce: YAG 透明陶瓷片 (2 mm × 2 mm × 0.5 mm), 结合 InGaN 蓝光 LED 芯片, 采用热电分离结构进行封装, 得到新型白光 LED。为了比较, 我们采用相同的芯片、支架、热沉以及散热基板, 并用 YAG: Ce 荧光粉混合有机

硅(传统封装方式)进行封装。图 4 为蓝光 LED 芯片激发 $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 透明陶瓷照片,样品在 50 mA 电流驱动下获得了白光。图 5 为 $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 陶瓷和传统封装白光 LED 在 50 mA 电流驱动下的 EL 谱,其发射光谱形状十分相近,InGaN 蓝光芯片的发射峰位于 460 nm,两种荧光材料均被蓝光激发产生 550 nm 的黄光宽峰,

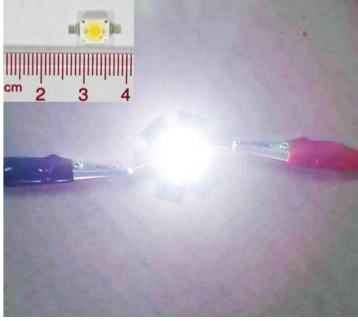


图 4 蓝光 LED 芯片激发 $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 透明陶瓷照片

Fig. 4 Photo of $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ transparent ceramic excited by blue LED chip

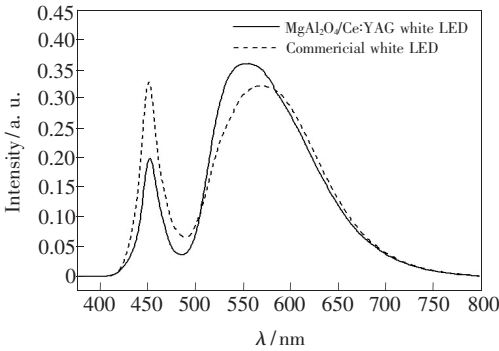


图 5 $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 陶瓷和 $\text{YAG}:\text{Ce}$ 荧光粉封装的白光 LED 的 EL 谱($I=50\text{ mA}$)

Fig. 5 EL spectra of the WLED packaged by $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ ceramics and $\text{YAG}:\text{Ce}$ phosphor($I=50\text{ mA}$)

GaN 芯片透射出的部分蓝光混合黄光形成白光。

表 1 为两种不同封装方式的白光 LED 光电性能参数。其中 $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 陶瓷封装的白光 LED 在 50 mA 电流驱动下,其色坐标为(0.388 4, 0.456 4),色温为 4 285 K,光通量为 17.915 lm,发光效率达到 $131.19\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$;而采用传统封装的白光 LED 发光效率仅为 $121.56\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ 。图 6 为 $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 陶瓷和传统封装白光 LED 的发光效率随注入电流的变化,在小电流驱动下,随着电流增大,芯片发出的蓝光增多,这两种荧光转换材料特别是外表面被激发的几率大大提高。发光强度迅速增大,因此白光 LED 发光效率迅速提高。在 35 mA 时, $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 陶瓷封装的 LED 的光效达到 $133.47\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ 。但是,当注入电流超过一定值时,两种方式封装的白光 LED 发光效率随着注入电流的增大而迅速下降,主要原因是大电流注入条件下引起的量子效率衰落(Droop)。目前,对这一现象的解释主要有高电流下俄歇复合^[16]、缺陷引进隧道电流^[17]和压电极化引起电子空穴分离^[18-19]等,缺少统一的理论解释。结合表 1 和图 6,在同等色温水平下, $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 陶瓷封装的白光 LED 相比传统封装在发光效率方面略高。这有可能是 $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 透明陶瓷经过高温烧结和高温等静压处理,YAG:Ce 颗粒晶格缺陷减少,晶型逐步完善,以及 Ce^{3+} 扩散性增强,会以固溶体的形式充分进入 YAG 的晶格中,其荧光转换效率得到提高; $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ 透明陶瓷在可见光波段的折射率在 1.7~1.8 左右,比有机硅(约 1.5~1.6)有较大提高,也能进一步提高 LED 的光提取效率。

表 1 两种不同封装方式的白光 LED 光电性能参数

Table 1 The photoelectric performance parameters of two WLEDs with different packaging modes

	I/mA	CIE1931(x, y)	Color temperature/K	Luminous flux/lm	Luminous efficacy/ ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$)	V/V
$\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ white LED	50	(0.388 4, 0.456 4)	4 285	17.915	131.19	2.73
Commercial white LED	50	(0.373 8, 0.392 2)	4 290	16.538	121.56	2.72
$\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Ce}:\text{YAG}$ white LED	350	(0.381 9, 0.434 8)	4 315	101.09	93.69	3.08
Commercial white LED	350	(0.366 2, 0.379 9)	4 431	93.823	88.22	3.04

对于白光,通常用色温来表征其色度的差异,人眼能分辨的色温差异为 50~100 K^[20-21]。图 7

为不同封装方式白光 LED 的色温随注入电流的变化,在小于 100 mA 电流下,两种样品的色温均

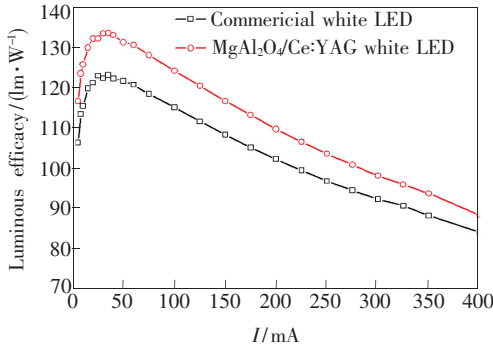


图6 两种不同封装方式的白光 LED 的发光效率随注入电流的变化

Fig. 6 Luminous efficacy of WLEDs with different packaging modes under different injection current

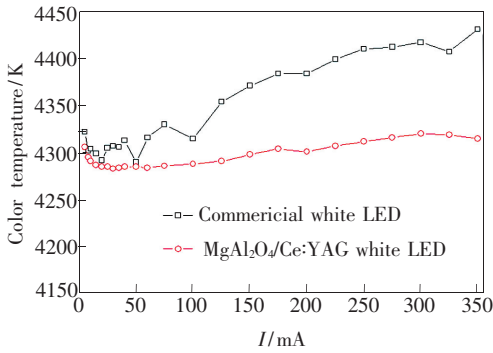


图7 不同封装方式的白光 LED 的色温随注入电流的变化

Fig. 7 Color temperature of WLEDs with different packaging modes under different injection current

较低且稳定在 4 300 K 附近。当电流增大时, 蓝光逐渐增强以至于足够激发荧光材料, 白光光谱中蓝光成分较多, 颜色偏冷, 色温升高。电流在 100 ~ 350 mA 变化时, 传统封装白光 LED 的色温变化值为 116 K, 而 $MgAl_2O_4/Ce:YAG$ 陶瓷封装 LED 的色温变化值仅为 27 K。这是因为大电流导致芯片具有更高的温度, 而 $MgAl_2O_4/Ce:YAG$ 陶瓷在较高温度下也能保持高的荧光转换效率, 因此这种材料封装的白光 LED 其蓝光出射量与黄光产生量之间的比例保持十分稳定, 使得其色温也非常稳定。这也显示出 $MgAl_2O_4/Ce:YAG$ 陶瓷作为白光 LED 荧光材料在发光色度方面较好的稳定性和可靠性, 这种材料与 GaN 芯片结合可以产生高质量的白光 LED。

为了研究 $MgAl_2O_4/Ce:YAG$ 陶瓷封装的白光 LED 器件在光衰方面的性能, 对其在 350 mA 驱动电流下进行老化性能测试, 时间为 700 h, 环境温度为室温, 期间每隔一定时间对 LED 的光电

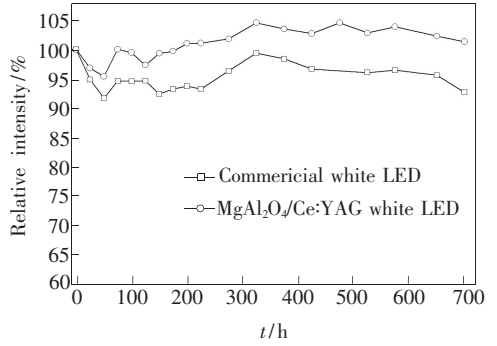


图8 在 350 mA 电流下相对光强随老化时间的变化关系 (设老化前光强为 100%)

Fig. 8 Relative intensity of white LEDs changes with aging time under 350 mA current (set the intensity before aging as 100%)

性能进行测量, 如图 8 所示。为了便于对比, 我们也对同一批蓝光芯片采用传统的硅胶混合荧光粉封装的白光 LED 做了相同的测试。 $MgAl_2O_4/Ce:YAG$ 陶瓷封装的白光 LED 经过 700 h 后几乎没有衰减, 而传统的白光 LED 平均衰减了 10% 左右。这主要是因为 $MgAl_2O_4$ 陶瓷在高温下性能十分稳定并保持良好的光学透过率, 不会像传统封装材料那样因芯片工作温度升高和蓝光照射而发生老化变色; 也可能是传统封装的白光 LED 其荧光粉的温度猝灭效应^[22], 而 $MgAl_2O_4/Ce:YAG$ 陶瓷在高温下能保持良好的荧光转换性能。这也表明, 使用 $MgAl_2O_4/Ce:YAG$ 陶瓷封装还可以明显地提高白光 LED 器件的寿命。

4 结 论

采用真空热压 (HP) 烧结结合热等静压处理的方式得到 $MgAl_2O_4/Ce:YAG$ 透明陶瓷。样品在近紫外 340 nm 和蓝光区 475 nm 处有两个宽激发峰, 且发射光谱为 500 ~ 600 nm 的宽谱, 最强发射峰位于 533 nm, 属于 Ce^{3+} 的 5d → 4f 特征跃迁发射。 $MgAl_2O_4/Ce:YAG$ 透明陶瓷与蓝光 LED 芯片封装成白光 LED, 在 35 mA 驱动下光效达到 133.47 $lm \cdot W^{-1}$, 其色温稳定性要远远好于传统 YAG:Ce 荧光粉封装的白光 LED, 在提升 LED 器件光品质稳定性的同时, 还可以明显地提高白光 LED 器件的寿命。这种材料能与蓝光 LED 芯片匹配, 制备高稳定性和高品质的白光 LED, 有望广泛应用到白光 LED 领域。

参 考 文 献:

- [1] Nakamura S J, Mukai T. High-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-green-light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, 76(12):8189-8191.
- [2] Steranka F M, Bhat J, Collins D, *et al.* High power LEDs—Technology status and market applications [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2002, 194(2):380-388.
- [3] Pan Y X, Wu M M, Su Q, *et al.* Tailored photoluminescence of YAG: Ce phosphor through various methods [J]. *J. Phys. Chem. Solids*, 2004, 65(5):845-850.
- [4] Wu H B, Wang C L. Experimental research on influence of packing materials of white LED on its luminous decay [J]. *Acta Opt. Sinica* (光学学报), 2005, 25(8):1091-1094 (in Chinese).
- [5] Qian K Y, Hu F, Wu Y H, *et al.* Packaging technique of high-power white LED [J]. *Semicond. Optoelectron.* (半导体光电), 2005, 26(2):118-120 (in Chinese).
- [6] Zych E, Brecher C. Temperature dependence of host-associated luminescence from YAG transparent ceramic material [J]. *J. Lumin.*, 2000, 90(3/4):89-99.
- [7] Yanagida T, Takahashi H, Ito T, *et al.* Evaluation of properties of YAG(Ce) ceramic scintillators [J]. *IEEE T. Nucl. Sci.*, 2005, 52(5):1836-1841.
- [8] Shi Y, Pan Y B, Feng X Q, *et al.* Fabrication and luminescence study of Ce^{3+} -doped YAG transparent ceramics [J]. *J. Inorg. Mater.* (无机材料学报), 2010, 25(2):125-128 (in Chinese).
- [9] Nishiura S, Tanabe S, Fujioka K, *et al.* Properties of ntransparent Ce: YAG ceramic phosphors for white LED [J]. *Opt. Mater.*, 2011, 33(5):688-691.
- [10] de Graaf J, Kop T A, Kop T, *et al.* Phosphor in polycrystalline ceramic structure and a light-emitting element comprising same: USA, US2008187746A1 [P]. 2008-08-07.
- [11] Lei M Y, Lou Z L, Li Z, *et al.* Study on $MgAl_2O_4$ transparent phosphor ceramic used in white LED [J]. *Vac. Electron.* (真空电子技术), 2011(2):43-46 (in Chinese).
- [12] Zhang K, Liu H Z, Wu Y T, *et al.* Temperature dependence of luminescence and decay time of YAG: Ce nanophosphor [J]. *J. Inorg. Mater.* (无机材料学报), 2008, 23(5):1045-1048 (in Chinese).
- [13] Ma L, Hu J G, Wan G J, *et al.* Effect of flux on YAG: Ce phosphors prepared by solid-state reactions [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2006, 27(3):348-352 (in Chinese).
- [14] Yang X B, Pan Y B, Xu J, *et al.* Optical and scintillation properties of Ce: YAG crystal and transparent ceramics [J]. *Acta Phys. Sinica* (物理学报), 2009, 58(11):8050-8054 (in Chinese).
- [15] Li Y X, Min Y L, You X Z, *et al.* Coating and stability of YAG: Ce^{3+} phosphor synthesized using inorganic-organic hybrid gel method [J]. *J. Inorg. Chem.* (无机化学学报), 2003, 19(11):1169-1174 (in Chinese).
- [16] Shen Y C, Mueller G O, Watanabe S, *et al.* Auger recombination in InGaIn measured by photoluminescence [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(14):141101-1-3.
- [17] Monemar B, Sernelius B E. Defect related issues in the current roll off in InGaIn based light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(18):181103-1-3.
- [18] Kunzer M, Baeumler M, Kohler K, *et al.* Injection level dependent luminescence characteristics of UV violet emitting (AlGaIn) NLED structures [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2007, 204(1):236-240.
- [19] Okamoto K, Kaneta A, Kawakami Y, *et al.* Confocal microphotoluminescence of InGaIn based light emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 98(6):064503-1-5.
- [20] Yu L S. *Semiconductor Heterojunction Physics* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2006:170 (in Chinese).
- [21] Liu L, Wu Q, Huang X, *et al.* Promoting of the phosphor-based white-LED and optical properties [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2007, 28(6):890-894 (in Chinese).
- [22] Li H J, Shao Q Y, Dong Y, *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).