

文章编号: 1000-7032(2024)03-0516-08

大功率白光LED荧光胶和荧光片玻璃封装的光热性能

曾照明¹, 万垂铭^{1,2}, 肖国伟¹, 林宏伟³, 王 洪^{2,3*}

(1. 广东晶科电子股份有限公司, 广东 广州 511458;

2. 华南理工大学物理与光电学院 广东省光电工程技术研究开发中心, 广东 广州 510640;

3. 华南理工大学 微电子学院, 广东 广州 510640)

摘要: 大功率白光LED封装主要分为玻璃荧光片封装和荧光粉胶封装。本文提出一种用荧光胶封装大功率白光LED的方法, 优化白光LED的发光面的均匀性, 并分析了荧光胶封装和用荧光片封装的大功率白光LED的光热性能。实验结果表明, 在1 400 mA电流驱动下, 荧光胶封装白光LED的光通量为576.07 lm, 比荧光片封装白光LED的光通量高15.5%, 光转换效率为35.8%。在温度从25 °C提升到125 °C的过程中, 荧光胶封装器件的亮度衰减了20%, 色温从5 882.11 K提高到6 024.22 K。荧光胶封装的白光LED在常温下的热阻为1.7 K/W, 与玻璃荧光片封装的热阻接近。在840 h高温高湿老化和1 600 h高温老化实验中, 荧光胶封装的相对光衰均能稳定在97%。

关键词: 大功率白光LED; 玻璃荧光片; 荧光粉胶; 光热性能; 热稳定性

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230312

Photothermal Performance of High-power White LED Packaged with Phosphor-in-silicone and Phosphor-in-glass

ZENG Zhaoming¹, WAN Chuiming^{1,2}, XIAO Guowei¹, LIN Hongwei³, WANG Hong^{2,3*}

(1. APT Electronics Co. Ltd. Guangzhou 511458, China;

2. Engineering Research Center for Optoelectronics,

School of Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. School of Microelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

* Corresponding Author, E-mail: pphwang@scut.edu.cn

Abstract: The primary packaging of high-power white LEDs (WLEDs) is divided into phosphor-in-glass (PiG) package and phosphor-in-silicone (PiS) package. We proposed a PiS packaging method to optimize the uniformity of the light-emitting surface of high-power WLEDs, and analyze the photothermal performance. The experimental results show that the luminous flux of the WLED packaged by PiS is 576.07 lm at 1 400 mA, which is 15.5% higher than that of the WLED packaged by PiG. During the process of temperature increase from 25 °C to 125 °C, the luminance of the PiS packaged device decreased by 20%, and the color temperature increased from 5 882.11 K to 6 024.22 K. The thermal resistance of the PiS package is 1.7 K/W at 25 °C, which is close to that of the PiG package. The relative light intensity of PiS package remains stable at 97% during 840 h of high temperature and high humidity aging and 1 600 h of high temperature aging test.

Key words: high power WLEDs; PiG; PiS; photothermal performance; thermal performance

收稿日期: 2023-12-08; 修订日期: 2023-12-17

基金项目: 广州市科技计划项目(202103030002); 广州南沙区重点领域科技项目(2021ZD001)

Supported by Guangzhou Municipal Science and Technology Plan Project(202103030002); Nansha District Science and Technology Development Project of Guangzhou(2021ZD001)

1 引言

白光发光二极管(White light emitting diodes, WLEDs)具有体积小、光电转换率高、使用寿命长和绿色环保等优点,在植物灯、矿井照明和汽车照明等领域有巨大的经济收益和应用价值^[1-3]。自白光LED问世以来,在各国政府的推动下,白光LED产品化取得了快速发展,以白光LED为主体的半导体固态光源逐步取代了白炽灯的市场地位^[4]。近年来,白光LED在背光市场表现出较高的商用性,随着半导体白光固态光源的产业化发展,大功率白光LED逐渐成为研究热点之一^[5-6];而且伴随着应用场景的细分化,大功率白光LED发光面的亮度均匀性也成为了重要的性能指标之一。

目前,白光LED光源主要是通过蓝光激发黄色荧光层的光转换方式形成^[7-8]。市面上的大功率白光LED封装转换技术主要有两种方式,第一种是以陶瓷基底结合荧光玻璃片(Phosphor in glass, PiG);第二种是陶瓷基底结合荧光粉胶(Phosphor in silicone, PiS)。市面上主流的白光LED封装方式是荧光粉胶封装,而在细化的市场应用中有荧光片封装的需求。同时,学者们在如何优化白光LED封装的问题上提出了许多参考方案。张稀雯等报道了一种PiG芯片级封装方法,通过玻璃荧光片的芯片级封装制备了高光密度和低色温的白光LED^[9];Zhang等提出一种采用高反射围坝结合玻璃荧光片的封装方式去提升白光LED的出光效率^[10];Yang等提出了一种环形鳍鱼状封装结构用于增强大功率白光LED的散热性能^[11]。除了用蓝光芯片激发黄色荧光片产生白光光源的方式,科研人员也提出了通过近紫外芯片激发蓝色/绿色荧光粉的方式去产生白色光源^[12-14]。在深紫外LED封装领域,Lin等提出的ASFCS封装结构和Wan等提出的EMC封装结构也为大功率白光LED封装提供了参考方向^[15-16]。蓝光芯片的光电转换效率(大于60%)高于近紫外光芯片的转换效率(小于50%),所以在工业生产中常选用蓝光芯片作为荧光片激发光源。玻璃荧光片封装的白光LED在发光面中心的发光强度较高,但其发光面光效强度的均匀性依旧有优化的空间。

从大功率白光LED的工业生产角度出发,本文提出了一种用荧光胶封装(PiS)白光LED的方

法,对比玻璃荧光片封装(PiG)的白光LED器件,荧光胶封装的白光LED的发光面亮度分布较为均匀,能在工业生产中为有均匀发光需求的白光LED提供一种低成本的封装方法。

2 实验

2.1 样品制备

封装基板选用尺寸为5 mm × 5 mm × 0.42 mm的AlN陶瓷基板,陶瓷基板表面的金属电镀层是Cu/Ni/Pb/Au。芯片选用三安光电股份有限公司生产的蓝光LED芯片,尺寸为1.45 mm × 1.6 mm × 0.18 mm,主波长为442.5 ~ 460 nm,半宽高为18 nm,最大正向直流电流为5 A。封装白胶选用有机硅封装胶。荧光胶由黄色荧光粉($Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$, YAG, Intematix, USA)和硅胶按1:5比例混合后离心搅拌制成。玻璃荧光片厚度为0.18 mm,荧光粉和玻璃粉比例为1:5。图1是荧光胶PiS封装和荧光片PiG封装大功率白光LED的工艺流程。首先是固晶回流工艺,先将陶瓷基板进行等离子清洗,等离子清洗完成后将垂直蓝光芯片通过助焊剂与金属焊盘键合,依次通过温度为240, 330, 160 °C的加热区进行回流焊接;然后将完成固晶的基板浸入异丙醇溶液清洗基板残余的助焊剂杂质,用纯净水清洗后进行1 h的120 °C高温除湿;接下来是固齐纳,通过回流焊工艺将齐纳焊接到焊盘上,回流后无需清洗和烘烤。齐纳用于保护芯片,防止芯片被静电击穿。完成固晶和固齐纳后进行焊线,选用直径为0.03 mm纯金线将P-Contact焊盘分别与芯片和齐纳连接,焊线后制备得到待封装的白光LED。最后将待封装的白光LED分别进行荧光胶封装和荧光片封装。通过点胶设备将白胶覆盖到基板上,形成厚度为0.5 mm白胶围坝,然后依次在60 °C和120 °C的烤箱中烘烤2 h和8 h,烘烤定型后在中心直径2 mm的圆形区域灌封荧光胶,再依次进行60 °C和120 °C高温烘烤2 h和8 h,制备得到荧光胶封装的大功率白光LED;荧光片通过硅胶与芯片粘合,高温烘烤结束后在基板上点白胶形成白胶围坝,再依次在60 °C和120 °C的烤箱中烘烤2 h和8 h,得到荧光片封装的大功率白光LED。

图2(a)是在固晶完成后基板上点白胶形成的圆环围坝外观,圆环围坝的内直径约为2 mm。图2(b)为荧光胶层,荧光胶层是半透明状态,从图中可以观测到荧光胶层中无明显气泡产生。这

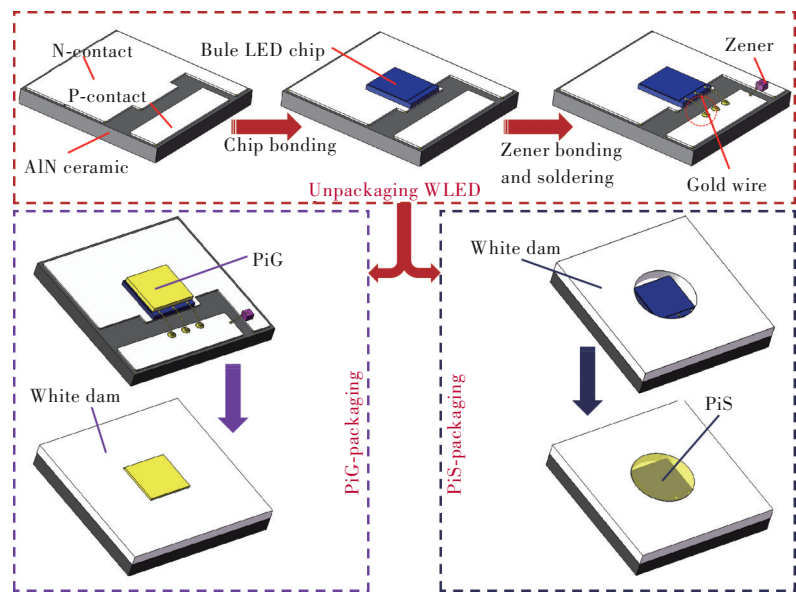


图1 大功率白光LED封装工艺流程

Fig.1 Fabrication process of high-power WLED

是由于在灌封荧光胶过程中,整个基板处于 60 ℃ 环境中,从而加速了胶体内部的空气排出;而且荧光胶是流体状态,能均匀分布在圆形围坝内,再通

过高温固化,进而得到相对致密的结构。图 2(c) 为荧光胶封装白光 LED 的侧面结构,从图中可观测到荧光胶层和白墙围坝贴合紧密。

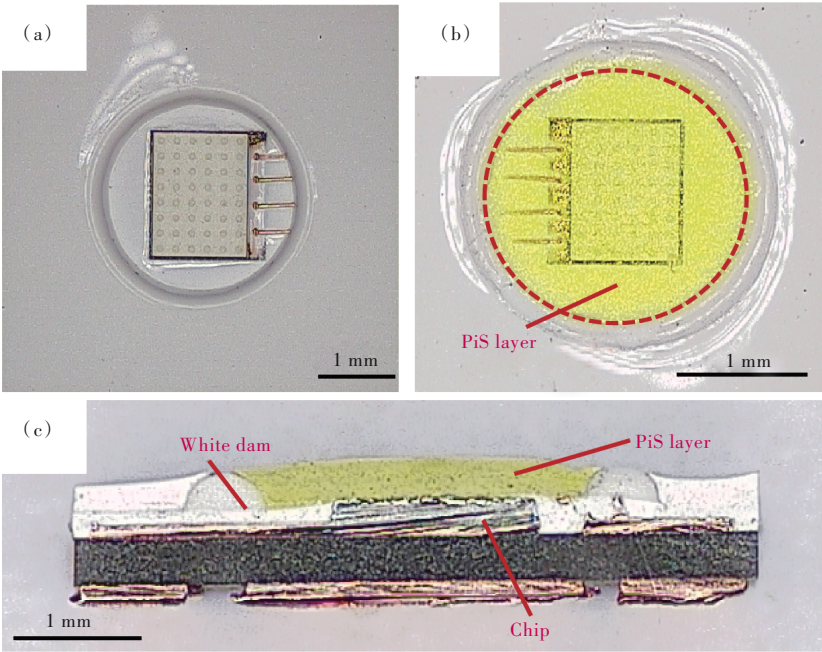


图2 (a)白胶围坝;(b)荧光胶层外观;(c)白光LED侧面

Fig.2 (a)Pictures of white dam. (b)PiS layer. (c)Sectional view

2.2 样品性能表征

我们使用 LED 自动控温光电分析测量系统 (杭州远方光电信息股份有限公司,ATA-1000) 分析荧光胶封装和荧光片封装的大功率白光 LED 样品的发射光谱和光效等光电性能,并采用彩色成像亮度计 (杭州远方光电信息股份有

限公司,CX-3)分析样品的亮度色度均匀性。荧光胶封装和荧光片封装的热阻采用热瞬态测试仪 (T3Ster Master Graphics, USA) 测试。通过三维显微镜 (佛山市科丰精密仪器股份有限公司, KfV-CV200) 观察荧光胶封装的白光 LED 的结构。

3 结果与讨论

3.1 发光特性

荧光胶封装的白光 LED 发射光谱和通电发光情况如图 3 所示,从图中可知,蓝光 LED 芯片的主波长为 450 nm,半宽高约为 18 nm。荧光胶激发的白光处在约 550 nm。荧光胶封装和荧光片封装白光 LED 的发光强度测试区域如图 4 所示,两种封装的光强测试区域保持一致。测试区域分为 9 个(A1~A9),A5 标记为中心区域。在 1 400 mA 电流驱动下,荧光胶封装的白光 LED 和荧光片封装的白光 LED 发光强度如图 5 所示。荧光胶封装的 LED 亮度在区域 A1 到区域 A4 的变化十分平缓,区域 A6 到区域 A9 的光强波动也较为平缓,而且中心区域 A5 与其他区域相对波段光强小于 1 000 cd/m²。荧光片封装的 LED 发光亮度在区域 A5 的数值高于其他区域,而且相对波动最高超过 2 500 cd/m²。实验结果表明,荧光片封装的大功率白光 LED 的中心发光强度较高,而荧光胶封装的 LED 发光面亮度比较均匀,这是因为荧光胶层的散射作用使光线均匀发射到封装体外。

在常温环境下,荧光胶封装和荧光片封装样

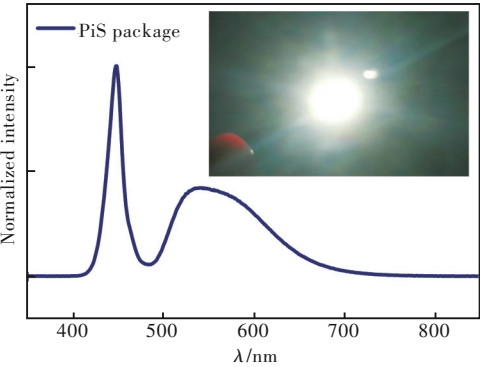


图 3 荧光胶封装白光 LED 的发射光谱
Fig.3 EL spectra of PiS package

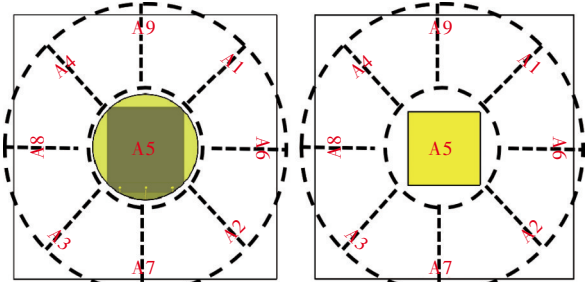


图 4 光效强度识别区域示意图
Fig. 4 The schematic of luminous intensity area

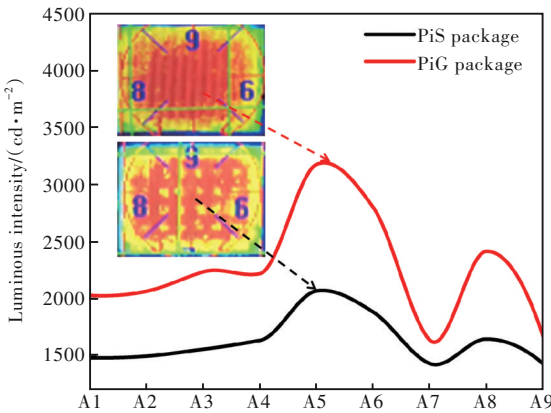


图 5 不同区域的光强分布情况
Fig.5 Distributional performance of luminous intensity in different regions

品的光通量及光电转换效率如图 6。各取样品数量 40 PCS 进行测试。在 1 400 mA 电流下,荧光胶封装白光 LED 的光通量为 576.07 lm,光电转换效率为 35.8%;荧光片封装的光通量为 498.46 lm,光电转换效率为 32.8%。从实验结果可知,荧光胶封装有更高的光通量和光电转换效率。这是因为荧光胶结构的发光面较大,且蓝光 LED 芯片周围被荧光粉包围,能激发更多荧光粒子。为了进一步研究荧光胶封装 LED 的出光效果,通过 TracePro 光学仿真软件分别对荧光胶结构和荧光片结构进行仿真。仿真的输入电流设置为 1 400 mA,输入电压为 3.3 V。从仿真结果看,荧光胶封装结构的出光角度(大约 170°)大于荧光片封装结构的出光角度(大约 120°),出光角度越大,从封装体内逃逸出的光线也越多;加上荧光胶层对蓝光的散射作用使光线均匀发射出封装体外,也验证了荧光胶结构的发光面亮度是均匀的。

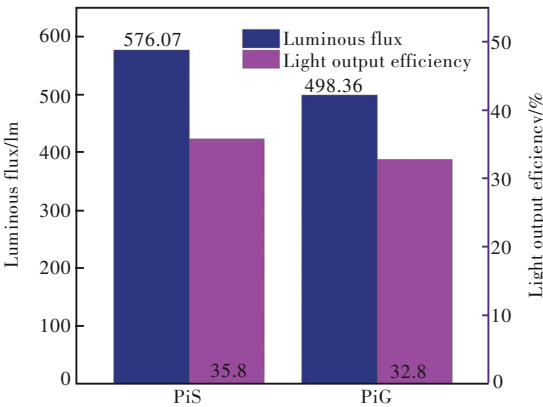


图 6 荧光胶封装和荧光片封装的光通量及光电转换效率
Fig. 6 The luminous flux and light output efficiency of PiG package and PiS package

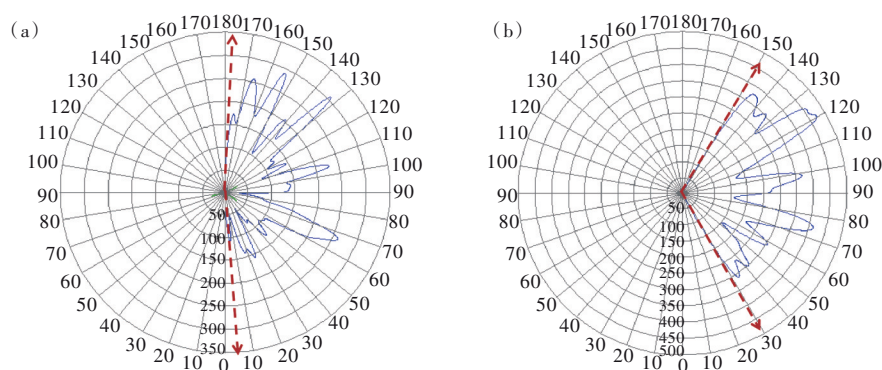


图7 (a)荧光胶封装光强分配;(b)荧光片封装光强分配

Fig. 7 The polar candela distribution of PiS package(a) and PiG package(b)

3.2 热稳定性

大功率白光LED在大电流驱动下产生的热量会间接影响LED器件的性能。若LED器件的散热性能差,器件工作期间的热量发生聚集,无法快速传导出封装体外会导致热损耗,从而影响其发光性能和可靠性。图8是荧光胶封装和荧光片封装LED在1 500 mA测试电流驱动下的热阻结构函数。在25℃环境下,荧光胶封装器件的结温约为45.25℃,温升为20.25℃,热阻为1.7 K/W;荧光片封装器件的结温约为45.68℃,温升为20.68℃,热阻为1.75 K/W。两种封装的热阻十分接近,芯片层和助焊剂连接层的热阻曲线几乎重合在一起。结果表明,荧光胶封装和荧光片封装器件的热阻接近,荧光胶封装器件的热阻比荧光片封装的热阻低2%。这两种封装选用的是AlN陶瓷基板,AlN陶瓷基板导热系数比较高(170~250 W/(m·K)),且高纯度的AlN的导热系数约为320 W/(m·K)。两种封装体所选用的基板均为陶瓷基板,器件工作时产生的绝大部分热量在垂直方向上通过陶瓷基板传导出,荧光片和荧光胶对器件整体的散热性能并无太大影响,使得这两种封装体的热阻十分接近。

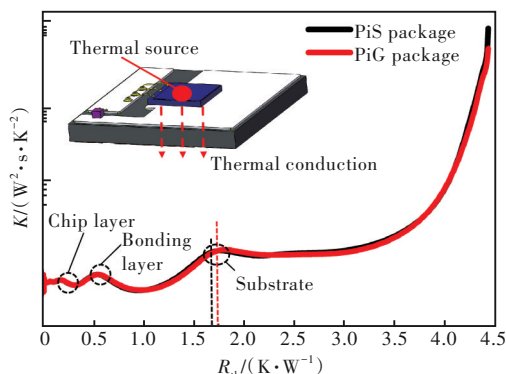


图8 热阻结构曲线

Fig. 8 The structure function of thermal resistance

为了进一步研究荧光胶封装的热稳定性,对两种封装的样品进行变温测试。在1 400 mA工作电流下,随着工作温度从25℃变化到125℃,荧光胶封装和荧光片封装的相对光衰、光通量、色温和色坐标的变化情况如图9~11和图12所示。在温度从25℃上升到125℃过程中,荧光胶封装的相对亮度衰减了20.5%;荧光片封装的相对亮度

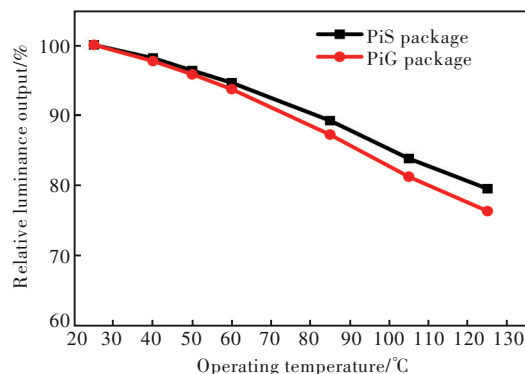


图9 不同环境温度下荧光胶封装和荧光片封装的相对光衰

Fig. 9 The relative light output of PiS and PiG at different operating temperature

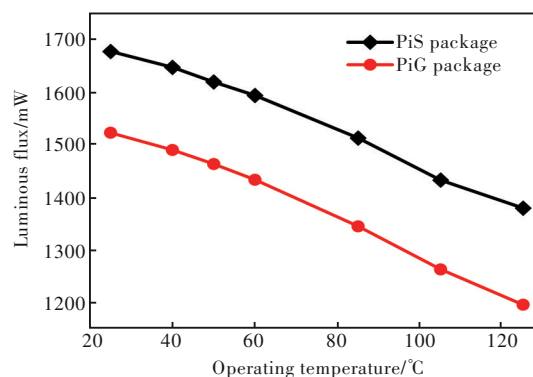


图10 不同环境温度下荧光胶封装和荧光片封装的光通量

Fig. 10 The luminous flux of PiS and PiG at different operating temperature

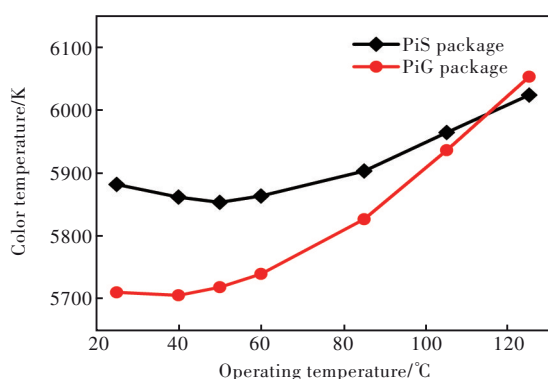


图11 不同环境温度下荧光胶封装和荧光片封装的色温
Fig. 11 The color temperature of PiS and PiG at different operating temperature

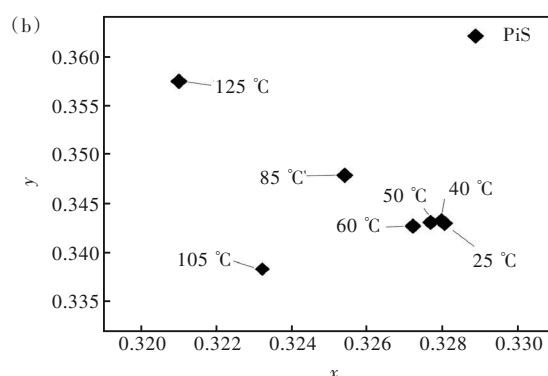
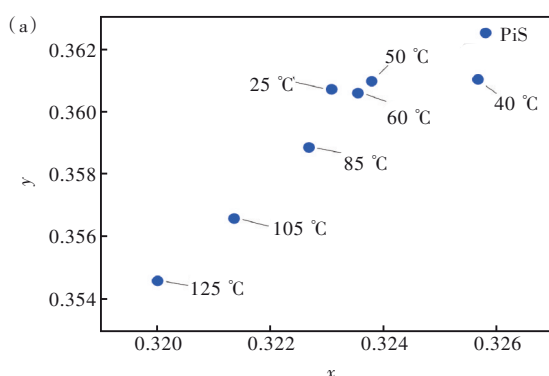


图12 不同环境温度下荧光胶封装(a)和荧光片封装(b)的色坐标

Fig. 12 The color coordinate of PiS(a) and PiG(b) at different operating temperature

荧光胶封装和荧光片封装LED的可靠性测试如图13所示。可靠性测试包括高温高湿老化和高温老化。将样品放置在温度为85℃、湿度为85% RH的烤箱中进行840 h的高温高湿老化测试。整个老化过程中,荧光胶封装LED样品的光衰从100%减少到97.38%;荧光片封装LED样品的光衰从100%减少到97.21%。高温老化过程中,样品放置在105℃的烤箱中进行1 600 h老

化。荧光胶封装LED器件的相对光衰从100%衰减到97.39%;荧光片封装LED器件的相对光衰从100%衰减到97.4%。在高温高湿和高温老化过程中,荧光胶封装和荧光片封装的光衰曲线几乎重合,两者的耐温和耐湿度能力接近。在长时间高温老化过程中,荧光胶封装器件和荧光片封装的光衰都能保持在97%以上,均表现出了较高的可靠性。

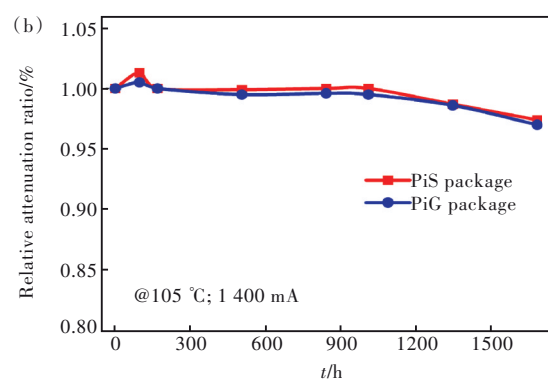
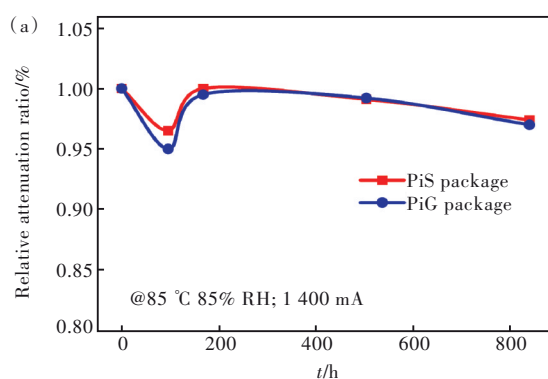


图13 (a)高温高湿老化;(b)高温老化

Fig. 13 Aging tests of high temperature and high humidity(a) and high temperature(b) at 1 400 mA

4 结 论

本文提出了荧光胶封装大功率白光 LED 的方法,并且分析了荧光胶封装和荧光片封装 LED 的光热性能。通过行星离心式搅拌的方式使荧光粉扩散到硅胶中形成荧光胶,通过高温固化的方式完成荧光胶封装。实验以及仿真结果表明,荧光胶封装 LED 的亮度均匀且发光角度大,光强峰值波动在 $1\,000\text{ cd/m}^2$ 以内。在 $1\,400\text{ mA}$ 电流驱动下,荧光胶封装器件的光通量和光电转换效率为 576.07 lm 和 35.8% ,分别比荧光片封装高 15.5% 和 3% 。在室温下,荧光胶封装器件的热阻

为 1.7 K/W ,与荧光片封装接近。荧光胶封装的光功率比荧光片封装高,在工作温度从 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 提高到 $125\text{ }^\circ\text{C}$ 过程中,前者表现出的热稳定性要优于后者:荧光胶封装的相对光衰减少了 20.5% ,色温提高了 2.4% ;荧光片封装相对光衰减少了 23.7% ,色温提高了 5.8% 。在大功率白光应用领域,本文提出的荧光胶封装方式为优化发光面亮度均匀性提供了一种研究方向。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230312>.

参 考 文 献:

- [1] PENG Y, LI R X, WANG S M, *et al.* Luminous properties and thermal reliability of screen-printed phosphor-in-glass-based white light-emitting diodes [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2017, 64(3): 1114-1119.
- [2] KIM Y H, VISWANATH N S M, UNITHRATTIL S, *et al.* Review: phosphor plates for high-power LED applications: challenges and opportunities toward perfect lighting [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2018, 7(1): R3134-R3147.
- [3] DANG P P, LIU D J, LI G G, *et al.* Recent advances in bismuth ion-doped phosphor materials: structure design, tunable photoluminescence properties, and application in white LEDs [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(16): 1901993.
- [4] XIA Z G, XU Z H, CHEN M Y, *et al.* Recent developments in the new inorganic solid-state LED phosphors [J]. *Dalton Trans.*, 2016, 45(28): 11214-11232.
- [5] 梁仁臻, 刘佳欣, 赵九洲, 等. 大功率 LED 纳米银烧结界面热阻和发光性能 [J]. *光学学报*, 2023, 43(2): 0216002.
LIANG R L, LIU J X, ZHAO J Z, *et al.* Thermal resistance and luminescence performance of nano-silver sintered interface in high-power LED [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2023, 43(2): 0216002. (in Chinese)
- [6] 李晋闽, 刘志强, 魏同波, 等. 中国半导体照明发展综述 [J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0116002.
LI J M, LIU Z Q, WEI T B, *et al.* Development summary of semiconductor lighting in China [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2021, 41(1): 0116002. (in Chinese)
- [7] 张瑞, 王伯阳, 王海. 白光 LED 用 Phosphor-in-Glass 荧光材料的研究进展 [J]. *无机材料学报*, 2017, 32(4): 337-345.
ZHANG R, WANG B Y, WANG H. Advances in phosphor-in-glass for white LED [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2017, 32(4): 337-345. (in Chinese)
- [8] CHO J, PARK J H, KIM J K, *et al.* White light-emitting diodes: history, progress, and future [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2017, 11(2): 1600147.
- [9] 张稀雯, 余子康, 牟运, 等. 荧光玻璃封装芯片级白光 LED 光热性能 [J]. *发光学报*, 2021, 42(12): 1961-1968.
ZHANG X W, YU Z K, MOU Y, *et al.* Photothermal performance of phosphor-in-glass packaged chip-scale white LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(12): 1961-1968. (in Chinese)
- [10] ZHANG X W, YU Z K, LI J J, *et al.* Enhancing optical performance of chip-scale packaged white LEDs by phosphor-in-glass with high-reflective dam [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2022, 69(12): 6799-6803.
- [11] YANG X, ZHOU S L, XIE B, *et al.* Enhancing heat dissipation of quantum dots in high-power white LEDs by thermally conductive composites annular fins [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2021, 42(8): 1204-1207.
- [12] 李香萍, 仲海洋, 程丽红, 等. 可用于白光 LED 的红色荧光粉 $\text{NaGdTiO}_4\text{:Eu}^{3+}$ 的制备及光学性质 [J]. *发光学报*, 2011, 32(2): 138-143.
LI X P, ZHONG H Y, CHENG L H, *et al.* Synthesis and photoluminescence of $\text{NaGdTiO}_4\text{:Eu}^{3+}$ red phosphors for white LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(2): 138-143. (in Chinese)

- [13] 付素月,朱烨程,马颖珊,等. 近紫外基白光LEDs用 $\text{KYBaSi}_2\text{O}_7:\text{Bi}^{3+}$ 蓝色荧光粉发光特性[J]. 发光学报, 2022, 43(07): 1078-1085.
- FU S Y, ZHU Y C, MA Y S, *et al.* Luminescence properties of blue emitting phosphor $\text{KYBaSi}_2\text{O}_7:\text{Bi}^{3+}$ for near-UV based white LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(7): 1078-1085. (in Chinese)
- [14] 黄晓松,姜荣云,杨健,等. 白光LED用 $\text{Li}^+/\text{La}^{3+}$ 共掺杂 $\text{BaSi}_2\text{O}_5:\text{Eu}^{2+}$ 绿光发射荧光粉的制备及其发光性能和热稳定性[J]. 发光学报, 2020, 41(3): 271-280.
- HUANG X S, JIANG R Y, YANG J, *et al.* Preparation, luminescence and thermal stability of $\text{Li}^+/\text{La}^{3+}$ co-doped single-phased $\text{BaSi}_2\text{O}_5:\text{Eu}^{2+}$ green emitting phosphors for white LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(3): 271-280. (in Chinese)
- [15] LIN H W, HUANG H M, WAN C M, *et al.* Enhancement of radiation efficiency for DUV-LEDs by AlN-doped silicone layer filled chip-side [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2023, 35(17): 939-942.
- [16] WAN C M, ZENG Z M, XIAO G W, *et al.* Efficiency improvement of UVC LEDs by epoxy molding compound with metalized reflector [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2023, 35(24): 1387-1390.



曾照明(1968-),男,四川隆昌人,博士,1999年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事集成电路和LED芯片及器件封装的研究。

E-mail: zmzeng@apt-hk.com



王洪(1964-),男,江苏无锡人,博士,教授,博士生导师,2004年于华南理工大学获得博士学位,主要从事微纳光电材料与器件、宽禁带半导体材料与器件,光通信网络与器件等领域的研究。

E-mail: phhwang@scut.edu.cn.