

用于AlGaIn基DUV LED封装的高反射镀铝DPC陶瓷基板

杨宇铭, 李燕, 郑怀文, 于飞, 杨华, 伊晓燕, 王军喜, 李晋闽

引用本文:

杨宇铭, 李燕, 郑怀文, 等. 用于AlGaIn基DUV LED封装的高反射镀铝DPC陶瓷基板[J]. 液晶与显示, 2020, 35(10): 991-999.

YANG Yu-ming, LI Yan, ZHENG Huai-wen, et al. High-reflection Al-plated DPC ceramic substrate for AlGaIn-based DUV LED packaging[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(10): 991-999.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203510.0991>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

柔性显示用纸质基板的研究进展

Research progress of paper substrate in flexible display

液晶与显示. 2018, 33(5): 365-374 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183305.0365>

折射率匹配对绿光发光二极管微显示光学性能影响

Effect of refractive index matching on optical performance of green LED microdisplay

液晶与显示. 2020, 35(9): 900-907 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203509.0900>

磁控溅射法制备的MoO_x薄膜材料特性

Properties of MoO_x thin films prepared by magnetron sputtering

液晶与显示. 2020, 35(3): 211-218 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203503.0211>

基于微结构阵列基板的高效顶发射OLED器件

High-efficiency top-emitting OLEDs based on microstructure array substrate

液晶与显示. 2019, 34(8): 725-732 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193408.0725>

原子层沉积方法制备低温多层Al₂O₃/TiO₂复合封装薄膜的研究

Low-temperature multi-layer Al₂O₃/TiO₂ composite encapsulation thin film by atomic layer deposition

液晶与显示. 2016, 31(6): 532-539 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163106.0532>

文章编号:1007-2780(2020)10-0991-09

用于 AlGaN 基 DUV LED 封装的高反射 镀铝 DPC 陶瓷基板

杨宇铭^{1,2}, 李 燕^{1,2}, 郑怀文¹, 于 飞¹, 杨 华^{1,2*}, 伊晓燕^{1,2}, 王军喜^{1,2*}, 李晋闽^{1,2}

(1. 中国科学院 半导体研究所 半导体照明研发中心, 北京 100083;

2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要:传统的直接镀铜(DPC)陶瓷基板的焊盘上镀有 Ni/Au 金属覆盖层,它会强烈吸收紫外(UV)光。为了提高深紫外发光二极管(DUV LED)的光提取效率(LEE),设计并制备了镀 Al 的双层金属镀层 DPC 陶瓷基板。这种基板拥有一层完全覆盖基板焊盘的 Ni/Au 镀层为 LED 提供电互连,以及一层部分覆盖 Ni/Au 镀层的高反射 Al 镀层为 UV 光提供优异的反射。测量了分别由镀 Al 的 DPC 陶瓷基板和仅有一层 Ni/Au 镀层的传统 DPC 陶瓷基板所封装的 DUV LED 的光学、电学和热学性质,并建立了 LED 封装体的模型并进行了分析。结果表明,通过使用镀 Al 的 DPC 陶瓷基板,DUV LED 的光输出功率(LOP)提高了 19.2%,功率效率(WPE)和外量子效率(EQE)则分别提高为传统封装的 1.20 和 1.19 倍。此外,经过 160 h 的老化测试,使用镀 Al 的 DPC 陶瓷基板封装的 LED 表现出了更好的可靠性。这种镀 Al 的双层金属镀层 DPC 陶瓷基板为通过封装改善 DUV LED 的 LEE 提供了可行的方法。

关键词: DUV LED 封装; DPC 陶瓷基板; 光学特性; 热阻

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/YJYXS20203510.0991

High-reflection Al-plated DPC ceramic substrate for AlGaN-based DUV LED packaging

YANG Yu-ming^{1,2}, LI Yan^{1,2}, ZHENG Huai-wen¹, YU Fei¹, YANG Hua^{1,2*},
YI Xiao-yan^{1,2}, WANG Jun-xi^{1,2*}, LI Jin-min^{1,2}(1. *Research and Development Center for Semiconductor Lighting ,
Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China ;*2. *College of Materials Science and Optoelectronics Technology ,
University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)*

Abstract: Ni/Au coating films plated on traditional direct plated copper (DPC) ceramic substrates will strongly absorb ultraviolet (UV) light. To enhance light extraction efficiency (LEE) of deep ultraviolet light emitting diodes (DUV LEDs), a DPC ceramic substrate plated with two metal coating films was designed and prepared. A Ni/Au film covering the pad of the DPC ceramic substrate can provide electrical interconnection for LEDs, and a high-reflection Al film partly covering the Ni/Au film can

收稿日期: 2020-03-31; **修订日期:** 2020-04-08.

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2017YFB0403801)

Supported by National Key R&D Plan of China(No. 2017YFB0403801)

* 通信联系人, E-mail: huayang@semi.ac.cn; jxwang@semi.ac.cn

provide superior reflection for UV light. Optical, electrical and thermal properties of the DUV LED packaged by the Al-plated DPC ceramic substrate and traditional DPC ceramic substrate with only one Ni/Au coating film were measured, and models of the packaged LED were established and analyzed. As a result, by using the Al-plated DPC ceramic substrate, the light output power (LOP) of the DUV LED is enhanced by 19.2%, while the wall plug efficiency (WPE) and the external quantum efficiency (EQE) are enhanced by 1.20 and 1.19 times, respectively. Furthermore, after aging tests for 160 h, LEDs packaged by Al-plated DPC ceramic substrates showed better reliability. This Al-plated DPC ceramic substrate provides a feasible way to improve the LEE of DUV LEDs by packaging.

Key words: DUV LED packaging; DPC ceramic substrate; optical property; thermal resistance

1 引言

与汞灯相比,基于 AlGaIn 材料的紫外发光二极管(UV LED)具有体积小、高效率、低能耗、安全环保、波长可调节等优势^[1-2],在杀菌消毒、除臭净水、UV 固化、光医疗、光催化、全光谱照明、新型显示与健康照明等领域有着广泛的应用^[3-5],并被寄希望以在未来完全替代汞灯。然而,目前大多数 UV LED 的外量子效率(EQE)仍低于 6%,仅有少数报道获得了高于 10%的 EQE^[6-8]。UV LED 极差的 EQE 很大程度上源于封装工艺的限制带来的低光提取效率(LEE)。在传统白光 LED 封装中大量使用的有机材料在 UV 波段表现出极差的透射率与可靠性,很难直接在 UV LED,尤其是深紫外(DUV, $\lambda \leq 300$ nm)LED 封装中使用^[9-10]。同时,DUV LED 的自发热现象也十分严重。这些因素使封装后的 DUV LED 器件大多表现出极差的光提取效率与可靠性,这极大地制约了 DUV LED 的发展。

直接镀铜(DPC)陶瓷基板具有高导热性和高图形精度,可以提供与 LED 间的良好电接触,可直接用于倒装 LED 封装^[11]。目前 Al_2O_3 与 AlN 基 DPC 陶瓷基板已经广泛用于商业 LED 封装。最近也有很多研究致力于通过改进 DPC 基板来提升 UV LED 的光效。Xu 等人^[12]通过增加基板内部的 Cu 金属通孔数量降低了基板的热阻。Pai 等人^[13]制作了高反射的 Al 金属围坝并将其粘合在陶瓷基板上。Sun 等人^[14]提出利用高岭土悬浮液直接油墨书写在平面 DPC 基板上构建坝。Yang 等人^[11]通过电镀在 DPC 基板上制作了 Ni 金属围坝,形成了 3DPC 基板。但是现在还很少见到关于在 DPC 基板的焊盘表面金属镀层

上进行改进的报道,而焊盘表面的金属会对 UV LED 的光性能产生很大的影响。

当下常见的用于商业 UV LED 封装的 DPC 陶瓷基板的 Cu 焊盘表面都镀了 Ni/Au 金属覆盖层,以提高其可焊性和抗氧化性^[15]。然而 Au 金属在 UV 波段反射率极低,大部分的 UV 光都被吸收,这将极大地影响器件的光提取。而 Al 是常见金属中在 UV 波段反射率最高的一种,在整个 UV 波段反射率始终超过 80%,是 UV 光的理想反射器。有许多研究者已经致力于将 Al 运用到 UV LED 芯片的电极中。Maeda 等人^[16]通过使用透明 p-AlGaIn 接触层和 Ni/Al 电极替代 p-GaN 接触层和 Ni/Au 电极。Lobo 等人^[17]设计了一种 p 型电极结构,包括一个 Pd 欧姆接触像素阵列和覆盖在该阵列之上的 Al 反射层。还有许多研究组将 Al 金属运用在全向反射器中^[18-20]。然而,商业倒装 UV LED 中使用的 p-GaN 层对 DUV 波段的光有强烈的吸收作用,只有极少的 DUV 光能够达到电极反射镜处。因此,这些芯片层级上的电极改进必须在使用了透明 p-AlGaIn 接触层的 LED 上才能产生显著效果,而现在高质量的 p-AlGaIn 是难以得到的,这限制了这条技术路线在 DUV 波段的发展和应用。

Al 金属及其合金也已经被用于 UV LED 封装中。例如,铝合金在 UV 波段内可以提供比 Au 更高的反射率,因而已被用作 UV LED 封装围坝。此外,由 Al 制成的金属基板已用于 UV 封装多年,但由于金属基板中存在有机物层,其相比陶瓷基板在稳定性方面存在较多不足。在这种情况下,找到在 DPC 陶瓷基板封装技术中利用 Al 金属的优秀光学性能的途径势在必行。最直接的想法是使用 Al 金属镀层代替 Ni/Au 金属镀

层。但是由于 Al 金属表面覆盖的氧化膜的影响,导致其与锡膏等焊料浸润性极差,也不兼容共晶焊接工艺,无法直接与倒装 UV LED 芯片实现电接触。因此这种方案也是不可行的,需要进行进一步的研究,探索能够兼顾光学性能和倒装焊接工艺的基板焊盘设计方案。

在这项工作中,我们设计了一种镀有双层金属覆盖层的 DPC 陶瓷基板焊盘结构,它在 Cu 焊盘之上拥有一层完全覆盖它的 Ni/Au 金属覆盖层和一层局部覆盖 Ni/Au 金属层的图形化 Al 金属覆盖层,下层的 Au 在图形化 Al 金属层的窗口中暴露出来。在封装过程中通过窗口中暴露出的 Au 金属部分实现电接触,而大面积的表面 Al 金属则可以提供良好的漫反射。实验结果表明,与传统结构相比,这种新型的基板可以使 DUV LED 的光输出功率(LOP)得到较大的提升,从而提升了芯片的功率效率(WPE)和 EQE,同时还能保证芯片的热学性能和可靠性不因结构的改变而下降。

2 实 验

通过传统 DPC 工艺制备出 Cu 焊盘表面镀有 Ni/Au 金属覆盖层的 AlN 陶瓷基板。制备的基板为 3535 型号,即其尺寸为 $3.5\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$ 。基板陶瓷厚 0.5 mm ,其上表面焊盘的直径为 2.6 mm 。其制备过程如下:首先,在裸露的 AlN 陶瓷板上钻两个腔,每个空腔的直径为 $90\text{ }\mu\text{m}$ 。通过溅射将 Ti/Cu 种子层镀在陶瓷基板表面和空腔内壁上。然后,将干膜光刻胶粘附在基板表面并进行曝光、显影以形成电路图案。随后进行电镀铜来填充空腔以获得导电通路,并且将基板的表面电路加厚至 $70\text{ }\mu\text{m}$ 从而形成 Cu 金属焊盘。接下来,在 Cu 焊盘上蒸镀 Ni/Au 覆盖层,Au 层的厚度为 $0.05\text{ }\mu\text{m}$ 。最后,剥离干膜并蚀刻去除金属籽晶层。制备得到的 DPC 陶瓷基板的结构如图 1 (b)所示。

图 1(b)~(f)显示了增镀了 Al 镀层的双层金属镀层 DPC 陶瓷基板的制备和封装流程。实验中所使用的 LED 为 Photon Wave 公司的 280 nm DUV LED,LED 的额定电流为 20 mA ,尺寸为 $530\text{ }\mu\text{m} \times 270\text{ }\mu\text{m}$,其电极的尺寸为 $180\text{ }\mu\text{m} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ 。首先在制备好的 DPC AlN 陶瓷基板的

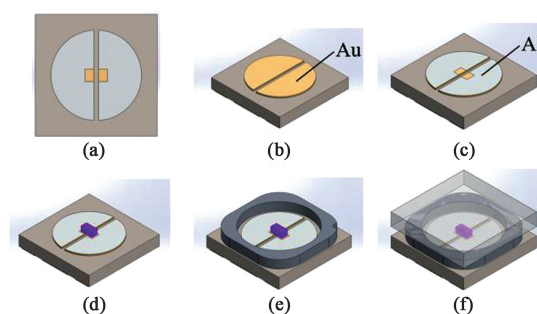


图 1 (a)双层金属镀层 DPC 陶瓷基板俯视图;(b)传统的 DPC 陶瓷基板;(c)蒸镀图形化的 Al 金属层得到双层金属镀层 DPC 陶瓷基板;(d)将 LED 芯片焊接在基板上;(e)将围坝粘贴在基板上;(f)将石英玻璃粘贴在围坝上。

Fig.1 (a) Top view of the Al-plated DPC ceramic substrate; (b) Traditional DPC ceramic substrate; (c) Al-plated DPC ceramic substrate; (d) LED was soldered on the substrate; (e) Dam was pasted on the substrate; (f) Quartz glass was pasted on the dam.

焊盘表面通过光刻与电子束蒸镀(EB)的方法得到一层 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚的图形化的 Al 金属层,Al 层的表面粗糙,照射到 Al 表面的 DUV 光可以发生良好的漫反射。在 Al 金属层的中心部分留有一个 $680\text{ }\mu\text{m} \times 400\text{ }\mu\text{m}$ 大的窗口,该窗口略大于芯片尺寸,窗口中暴露出下层的 Au 金属。接下来在这一窗口上点涂锡膏,将芯片的电极通过锡膏贴在焊盘上面,通过回流焊工艺进行固化。锡膏与 Au 金属之间有极佳的可焊性,可以将芯片牢牢焊在基板上。然后,以相同的方式将陶瓷基板和六角形 Al 散热器焊接在一起,以实现电互连和实验过程中的散热。在焊盘外围使用固晶胶粘接高反射的 Al 合金围坝,再在围坝上沿粘接平面石英玻璃透镜。最后,将带有坝和透镜的基板在 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温下烘烤固化 30 min ,得到封装好的 LED 器件。对没有蒸镀 Al 金属层的商业 DPC 基板进行同样的锡焊固晶、粘接围坝、粘接石英透镜步骤,作为对照组。图 2 展示了焊接在这两种基板上的 LED 的照片。用作表面镀层的金属 Au、金属 Al 和用作围坝的 Al 合金在 UV-可见光波段的反射率如图 3 所示,Au 金属在 280 nm 处的反射率仅为约 30% ,而金属 Al 在该波段反射率高达约 90% ,其合金材料在 280 nm 处反射率也有约 50% 。对两组样品分别进行光电性能和

热阻测试,从而分析镀 Al 的 DPC 陶瓷基板对封装器件的效率和可靠性带来的影响。

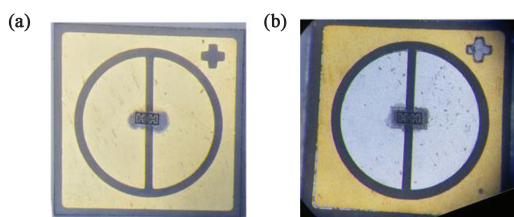


图 2 将 LED 分别焊接在(a)传统和(b)双层金属镀层 DPC 陶瓷基板上

Fig. 2 LEDs soldered on (a) traditional DPC ceramic substrate and (b) Al-plated DPC ceramic substrate

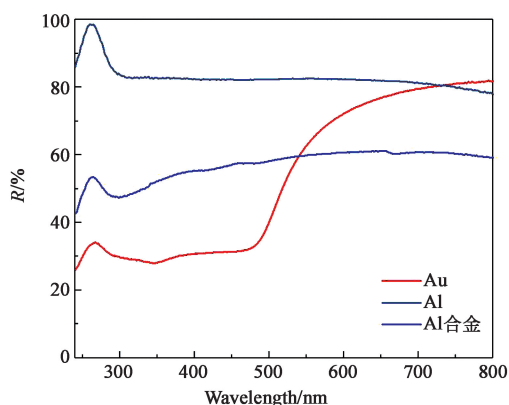


图 3 金属 Au、金属 Al 和 Al 合金在 UV-可见光波段的反射率。

Fig.3 UV-visible reflectance of Au, Al and Al alloy.

实验中使用的锡膏是 Earlysun 的 ES-1000 SnAgCu 锡膏。回流焊工艺使用了 TORCH 的 T200C 回流焊机。封装器件的光电性能测试结果由 EVERFINE 的 HAAS-2000 积分球提供。热学测试结果由 Mentor Graphics 的 T3Ster 提供,实验中使用的加热电流和测试电流分别为 40 mA 和 1 mA,通过 T3Ster Master 软件分析热阻测试数据。图 3 中的反射率测试结果由 Hitachi 的 UH4150 分光光度计提供。

3 结果与讨论

3.1 光学性能

两组样品在 5~200 mA 的正向输入电流下的光电测试结果如图 4 所示,实验组和对照组分别标记为 Group Al 和 Group Au,每组包含 7 个

样品,对每组样品的测试结果取平均值并添加误差棒。图 4 (a)展示了两组样品的 I - P 曲线,实验组的平均 LOP 相比对照组得到了极大的提升。在 20 mA 正向输入电流下,平均 LOP 由 1.71 mW 提升到 2.03 mW,提升了 18.7%;在 40 mA 正向输入电流下,平均 LOP 达到最大提升,由 3.20 mW 提升到 3.81 mW,提升了高达 19.2%。当测试电流大于 100 mA 后,LOP 的提升程度开始缓慢下降,但在 200 mA 的大电流下,LOP 仍存在 11.3% 的提升,由 10.26 mW 提升到 11.42 mW。随着测试电流从 20 mA 增加到 200 mA,实验组中所有样品的 LOP 都始终比对照组样品更高,且两组之间的差距始终大于组内偏差。因此可以断定,LOP 的提升是由 DPC 基板的改进带来的。

图 4 (b)展示了样品的 I - V 曲线,所有样品

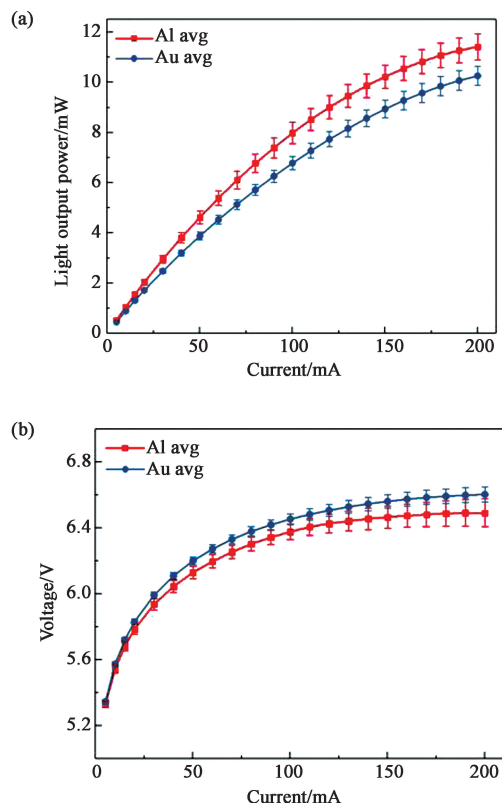


图 4 分别使用传统(Au)和双层金属镀层(Al)DPC 陶瓷基板封装的两组 LED 样品的(a) I - P 与 (b) I - V 曲线

Fig.4 (a) I - P characteristics and (b) I - V characteristics of LEDs packaged by Al-plated DPC ceramic substrates (Group Al) and traditional DPC ceramic substrates (Group Au).

的电压均在约 150 mA 处达到饱和。在相同的电流下,实验组的平均电压略低于对照组,但其差距始终保持在 1.5% 以内,且两组之间的差距小于组内偏差。因此可以认为这是芯片质量造成的误差,且不会对 LED 的光学及热学性能产生足够的影响。

通过以上数据计算了每个样品的 WPE 与 EQE,来表征两组样品的效率。LED 的 WPE 定义为 LED 的 LOP 与输入功率之比,即

$$\eta_{\text{power}} = P/IV, \quad (1)$$

式中: P 表示 LED 的 LOP, I 和 V 分别表示 LED 的驱动电流和工作电压。

EQE 定义为单位时间内发射到 LED 外部的光子数与单位时间内注入 LED 的电子-空穴对数之比,为内量子效率(IQE)和 LEE 的乘积,即

$$\eta_{\text{ext}} = \eta_{\text{int}} \eta_{\text{extraction}} = (P/h\nu)/(I/e), \quad (2)$$

式中: h 、 ν 和 e 分别表示普朗克常数、LED 发射的光的频率以及基本电荷。

实验用的芯片具有相同的 IQE,因此可以用 EQE 的提升来表示 LEE 的提升,EQE 增强系数等于 LEE 增强系数。两组样品的平均 WPE 和 EQE 分别表示在图 5 (a)和(b)中。由于较高的 LOP,实验组器件的 WPE 得到了较大的提升。在 20 mA 的正向输入电流下,相比对照组样品,实验组样品的平均 WPE 从 1.47% 提升至 1.76%,WPE 增强系数达到了 1.20。同时,20 mA 下的平均 EQE 从对照组的 1.95% 提升至实验组的 2.32%,EQE 增强系数达到了 1.19。在 200 mA 的大电流下,EQE 增强系数仍高达 1.11。显然,通过使用双层金属镀层 DPC 陶瓷基板可以提高 DUV LED 的效率,这归因于光学性能的极大提升。

图 6 显示了使用 DPC 陶瓷基板封装后的 LED 器件的几种典型光路。对于使用传统 DPC 陶瓷基板封装的样品,只有向上方发射或散射的光线①~③能够提取出样品。而由于 Au 层对 UV 光的严重吸收,在石英玻璃表面产生的反射光线④,在围坝表面发生漫反射而向下方反射的光线⑤,以及大量的直接出射到基板焊盘上的光线⑥等向其他方向发射或散射的光线,都会被焊盘表面的 Au 金属吸收而无法提取出样品。但是,在镀了 Al 金属层后,这些光线在 Al 金属层表面将会发生漫反射,从而得以出射至样品外部,

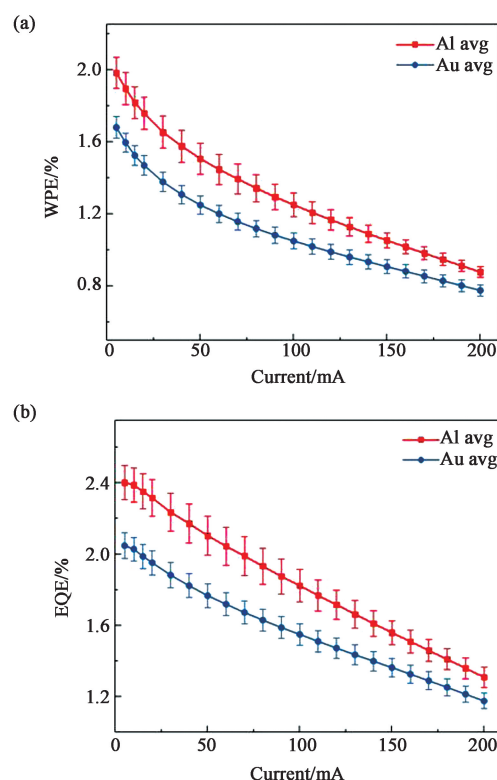


图 5 分别使用传统(Au)和双层金属镀层(Al)DPC 陶瓷基板封装的两组 LED 样品的(a) WPE 与 (b) EQE 曲线

Fig.5 (a) WPE and (b) EQE of LEDs packaged by Al-plated DPC ceramic substrates (Group Al) and traditional DPC ceramic substrates (Group Au)

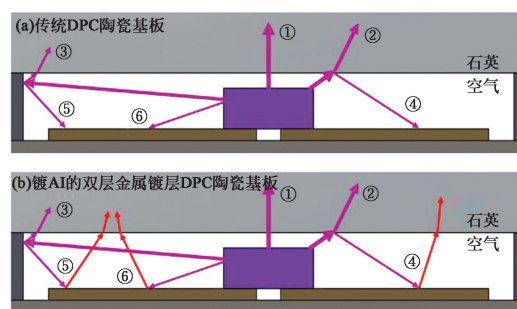


图 6 分别使用(a)传统和(b)镀 Al 的双层金属镀层 DPC 陶瓷基板封装的 LED 的典型光路

Fig. 6 Several typical optical paths of LEDs packaged with (a) traditional DPC ceramic substrates and (b) Al-plated DPC ceramic substrates.

成功得到收集利用。这解释了实验组器件 LOP 得到极大提升的原因。

建立了使用这两种基板封装的 LED 封装体的模型,使用光学射线追迹仿真软件进行仿真,两模型唯一的差别是基板焊盘表面是否具有 Al 反射层。仿真得到的光路图如图 7 (a)和(b)所示,图中显示的光线数为实际仿真光线的 1%。可以看到,图 7 (a)所示的传统 DPC 陶瓷基板中大部分入射到基板焊盘上的光都终止在焊盘表面的 Au 层上,而图 7 (b)所示的镀 Al DPC 陶瓷基板中入射到焊盘表面 Al 层上的光却几乎全部被反射。两种基板封装的 LED 出光面处的光分布如图 7(c)和(d)所示,传统基板封装的 LED 提取效率较低且光线在中心部分较为集中,而镀 Al 基板封装的 LED 提取效率相比传统基板有较大提升,LEE 增强系数达到 1.24,与实验结果有较好的一致性,可以作为实验结果的良好验证。

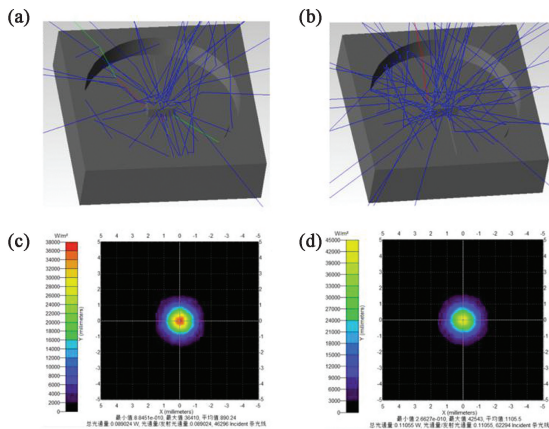


图 7 光学射线追迹仿真结果。(a)传统 DPC 陶瓷基板封装 LED 的仿真光路图;(b)镀 Al DPC 陶瓷基板封装 LED 的仿真光路图;(c)传统 DPC 陶瓷基板封装 LED 出光面处的光分布;(d)镀 Al DPC 陶瓷基板封装 LED 出光面处的光分布。

Fig.7 Simulation results of optical ray-tracing. (a) Light path diagram of traditional DPC ceramic substrate package LED; (b) Light path diagram of Al-plated DPC ceramic substrate package LED; (c) Light distribution of traditional DPC ceramic substrate package LED; (d) Light distribution of Al-plated DPC ceramic substrate package LED.

3.2 热模型与热阻

在大于 100 mA 的电流下,随着电流的增加,平均 LOP 和 EQE 的提升幅度有所减小,这很可

能是受到了热效应的影响。DUV LED 封装的热损耗功率约为总功率的 98%,这会对 LED 的光学特性产生极大的影响^[12]。

图 8 显示了样品的热模型与其主要散热途径。进行测试时的总热阻为:

$$R_{th} = R_{th-chip} + R_{th-solder1} + R_{th-ceramic} + R_{th-solder2} + R_{th-Al\ plate}, \quad (3)$$

式中: $R_{th-chip}$ 、 $R_{th-solder1}$ 、 $R_{th-ceramic}$ 、 $R_{th-solder2}$ 和 $R_{th-Al\ plate}$ 分别表示热源到芯片电极的热阻、芯片焊接点的热阻、DPC 陶瓷基板的热阻、基板和 Al 散热器间焊接点的热阻以及六角 Al 散热器的热阻。

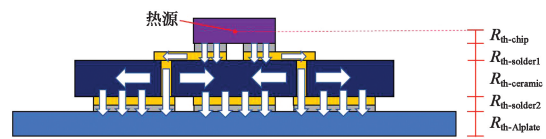


图 8 DPC 陶瓷基板封装的倒装 UV LED 的热模型与主要散热途径

Fig.8 Thermal model and main heat transfer path of flip-chip LED packaged by DPC ceramic substrate.

我们选取了一些样品进行瞬态热阻测试,将所挑选的典型样品按照封装时固晶步骤中所点涂的锡膏的量依次分成 3 组,锡膏量最少的记为 Group 1,最多的记为 Group 3,余下的一组则为 Group 2。每组有 2 个样品,分别由镀 Al 的 DPC 陶瓷基板和传统的 DPC 陶瓷基板封装。这 6 个样本分别记录为 Al.1、Au.1、Al.2、Au.2、Al.3 和 Au.3,对每组样品进行瞬态热阻测试和分析。测得的积分结构函数曲线如图 9 (a)所示,可以看出芯片焊接点热阻 $R_{th-solder1}$ 是影响总热阻 R_{th} 的主要因素。通过图 9 (a)读取出每个样品的 R_{th} 和 $R_{th-solder1}$,样品 Al.1、Au.1、Al.2、Au.2、Al.3 和 Au.3 的 R_{th} 分别约为 73,72,77,78,81,77 K/W,而它们的 $R_{th-solder1}$ 则分别约为 27,27,32,30,36,31 K/W,结果如图 9(b)所示。

数据表明,Group 1 和 2 中实验组与对照组的 R_{th} 和 $R_{th-solder1}$ 都相差不大,而且 Group 2 中两样品的 R_{th} 和 $R_{th-solder1}$ 均比 Group 1 大 4 K/W。因此可以判断, $R_{th-solder1}$ 几乎完全提供了 R_{th} 的增加。然而,Group 3 相对于 Group 2, Au.3 的 R_{th} 和 $R_{th-solder1}$ 均不再增加,但 Al.3 的 $R_{th-solder1}$ 却增加了 4 K/W,导致其 R_{th} 也随之增加了 4 K/W。由

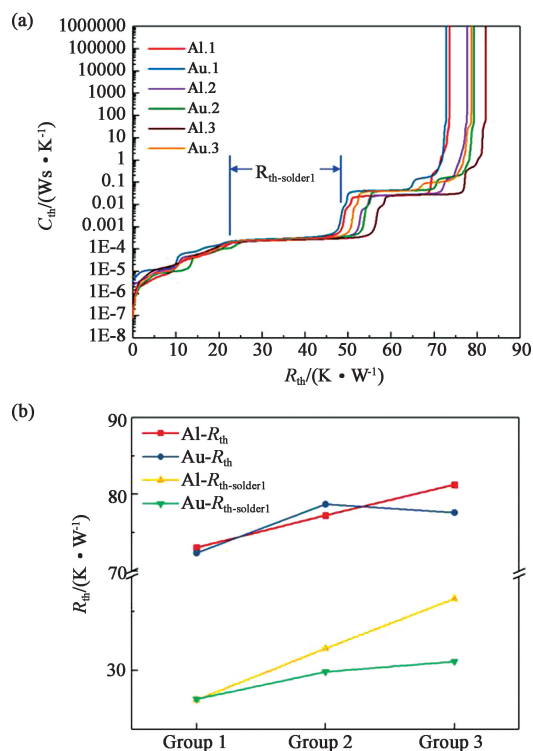


图 9 (a)被测样品的积分结构函数图; (b)样品的总热阻 R_{th} 与芯片焊接处热阻 $R_{th-solder1}$ 。

Fig.9 (a) Integral structure functions; (b) Total thermal resistance R_{th} and thermal resistance of die attach $R_{th-solder1}$ of the 6 samples.

此看出,锡膏的量对样品的热阻产生直接影响,且锡膏的量越多,实验组与对照组之间的热阻差越大。这是因为 Al 金属表面与锡膏的不浸润,导致固化后的锡膏被局限在 Al 金属层的窗口中,无法向覆盖了 Al 金属的部分扩展,从而使焊接层的厚度随着锡膏的增多而增加,其热阻 $R_{th-solder1}$ 也就随之增大。而对于没有镀 Al 层的对照组基板,其上的锡膏可以在 Au 金属层上扩散平铺,如图 2 (a) 所示,因此固化后的锡膏厚度在增加到一定程度之后不再增加,取而代之的是其固化后锡膏的表面积会随锡膏的量增大。由于 Al.3 的热阻较大,导致了其在高电流下 EQE 下降较快,相比对照组的提升幅度减小。

由热测试结果可知,实验组样品的热阻上升是由封装工艺过程中锡膏的量过多而引入的。只要在封装工艺中控制锡膏的量在一定的范围内,就可以消除这一影响,得到和对照组热阻相近的样品(如样品 Al.1)。

3.3 可靠性

使用 EVERFINE 的 DJ5000 LED Aging Tester 对上述的 6 个样品进行老化试验,在 20 mA 的驱动电流下老化了 160 h。老化过程中各组样品 LOP 的变化如图 10 所示,对结果进行了归一化处理。在 120 h 时 Au.3 的 LOP 就已经衰减到了初始的 70%, Au.2 的 LOP 也在 160 h 后衰减到了初始值的 92%。Au.3 可以被认为已经失效,推测失效可能是由于电极的退化所致,而电极的退化则可能是由于在较高的结温下电极中的 Au 和焊料中的 Sn 之间的热膨胀系数差异较大所造成的^[21]。因此认为 Au.3 的失效主要是由于热阻引起的结温过高。这说明对于对照组来说,焊接点热阻 $R_{th-solder1}$ 对器件的寿命有直接的影响,器件的 $R_{th-solder1}$ 越大,寿命越短。而 Au.1 不仅没有衰减,LOP 反而有所上升,在 160 h 老化后达到了初始值的 107%。这可能与掺杂剂 Mg 的激活引起的 p-GaN 中空穴浓度的增加有关^[22],而不是封装方面的影响。然而,与对照组不同,实验组的 3 个样品虽然热阻差别较大,但其归一化 LOP 却始终非常接近,与初始值相比都没有产生较明显的变化,在老化期间内始终保持稳定。老化 160 h 后,样品 Al.1、Al.2 和 Al.3 的归一化 LOP 分别为 102%、104% 和 104%。因此,与样品 Au.2 和 Au.3 相比,样品 Al.2 和 Al.3 的 $R_{th-solder1}$ 更大,却具有更好的可靠性。这一现象一般认为是反常规的。这很可能是由于实验组在相同电流下的 WPE 较大,因此在工作电压下工作时,实验组器件产生的总热量比对照组小很多,即

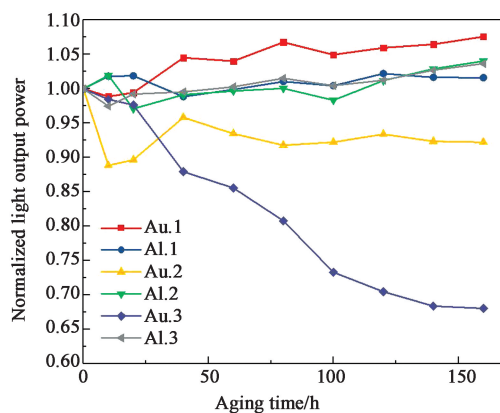


图 10 六组 LED 样品在老化期间的归一化 LOP
Fig.10 Normalized LOP of the 6 samples during the aging period

使散热能力较差,其作用在 LED 芯片上的热能仍小于对照组。因此,在工作电流下,使用双层金属镀层 DPC 陶瓷基板封装的 LED 样品虽然平均热阻较高,反而却获得了更好的可靠性和更长的寿命。

4 结 论

本文设计并制备了一种带有高反射 Al 金属

镀层的双层金属镀层 DPC 陶瓷基板,用于 DUV LED 的封装。实验结果显示,使用了这种封装基板的 LED 器件的 LOP 提升了 19.2%,其 WPE 增强系数达 1.20,EQE 增强系数达 1.19,均得到了极大的提升。此外,在焊接层较薄时,器件的热阻并不会明显增加,同时产生的热量却减少,从而使其工作电流下的可靠性得到提升。这些结果为通过封装来提升 DUV LED 的出光效率提出了一种新的可行的途径。

参 考 文 献:

- [1] GUO Y N, ZHANG Y, YAN J C, *et al.* Light extraction enhancement of AlGaIn-based ultraviolet light-emitting diodes by substrate sidewall roughening [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(1): 011102.
- [2] MA Z H, CAO H C, LIN S, *et al.* Degradation and failure mechanism of AlGaIn-based UVC-LEDs [J]. *Solid-State Electronics*, 2019, 156: 92-96.
- [3] LI D B, JIANG K, SUN X J, *et al.* AlGaIn photonics: recent advances in materials and ultraviolet devices [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2018, 10(1): 43-110.
- [4] 朱晓婷,朱哲欣,叶美英.微反应器中有机磷水样的光催化降解及总磷在线检测[J].分析化学,2019,47(1):106-111.
- [5] ZHU X T, ZHU Z X, YE M Y. Photocatalytic degradation of organic phosphorus in microreactor and on-line detection of total phosphorus [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(1): 106-111. (in Chinese)
- [6] 李炳乾,罗明浩,俞理云,等.COB封装全光谱 LED 光源及其光电特性[J].液晶与显示,2018,33(11):931-935.
- [7] LI B Q, LUO M H, YU L Y, *et al.* Full spectrum LED light in COB package and its characteristics [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(11): 931-935. (in Chinese)
- [8] TAKANO T, MINO T, SAKAI J, *et al.* Deep-ultraviolet light-emitting diodes with external quantum efficiency higher than 20% at 275 nm achieved by improving light-extraction efficiency [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(3): 031002.
- [9] HIRAYAMA H, MAEDA N, FUJIKAWA S, *et al.* Recent progress and future prospects of AlGaIn-based high-efficiency deep-ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53(10): 100209.
- [10] SHATALOV M, SUN W H, LUNEV A, *et al.* AlGaIn deep-ultraviolet light-emitting diodes with external quantum efficiency above 10% [J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(8): 082101.
- [11] LU C C, WANG C P, LIU C Y, *et al.* The efficiency and reliability improvement by utilizing quartz airtight packaging of UVC LEDs [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, 63(8): 3143-3146.
- [12] PENG Y, LIANG R L, MOU Y, *et al.* Progress and perspective of near-ultraviolet and deep-ultraviolet light-emitting diode packaging technologies [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2019, 141(4): 040804.
- [13] YANG Z Z, SUN Q L, CHENG H, *et al.* Preparation of three-dimensional ceramic substrate by multiple electroforming for UV-LED hermetic packaging [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(17): 22022-22028.
- [14] XU L L, LIANG R L, DAI J N, *et al.* Reduction of structural thermal resistance for deep ultraviolet light-emitting diodes fabricated on AlN ceramic substrate via copper-filled thermal holes [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2018, 8(12): 2107-2112.
- [15] PAI Y M, LIN C H, LEE C F, *et al.* Enhancing the light-extraction efficiency of AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes by optimizing the diameter and tilt of the aluminum sidewall [J]. *Crystals*, 2018, 8(11): 420.
- [16] SUN Q L, PENG Y, CHENG H, *et al.* Direct ink writing of 3D cavities for direct plated copper ceramic substrates with kaolin suspensions [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(9): 12535-12543.
- [17] CHENG H, MOU Y, PENG Y, *et al.* White LEDs with high optical consistency packaged using 3D ceramic sub-

- strate [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(22): 1818-1821.
- [16] MAEDA N, HIRAYAMA H. Realization of high-efficiency deep-UV LEDs using transparent p-AlGaIn contact layer [J]. *Physica Status Solidi (C)*, 2013, 10(11): 1521-1524.
- [17] LOBO N, RODRIGUEZ H, KNAUER A, *et al.* Enhancement of light extraction in ultraviolet light-emitting diodes using nanopixel contact design with Al reflector [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(8): 081109.
- [18] LEE K H, MOON Y T, SONG J O, *et al.* Light interaction in sapphire/MgF₂/Al triple-layer omnidirectional reflectors in AlGaIn-based near ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9717.
- [19] WON J Y, KIM D H, KANG D, *et al.* Improved light output power of GaN-based ultraviolet light-emitting diode using a mesh-type GaN/SiO₂/Al omnidirectional reflector [J]. *Physica Status Solidi (A)*, 2017, 214(8): 1600789.
- [20] OH S, LEE K J, LEE H J, *et al.* Periodic air-nanoplate-embedded AlGaIn/air/Al omnidirectional reflector for high efficiency ultraviolet emitters [J]. *Scripta Materialia*, 2018, 146: 41-45.
- [21] 徐瑾. 新型 GaN 基倒装 LED 芯片技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- XU J. Novel chip technologies for GaN-based flip-chip LED devices [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [22] FU J J, ZHAO L X, CAO H C, *et al.* Degradation and corresponding failure mechanism for GaN-based LEDs [J]. *AIP Advances*, 2016, 6(5): 055219.

作者简介:



杨宇铭(1995—),男,山东济宁人,硕士研究生,2017 年于山东大学获得学士学位,主要从事紫外 LED 封装研究。
E-mail: ymyang@semi.ac.cn



王军喜(1975—),男,陕西西安人,博士,研究员,2003 年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事氮化物材料生长和器件研究。E-mail: jxwang@semi.ac.cn



杨 华(1978—),男,河北廊坊人,博士,副研究员,2009 年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事半导体照明技术相关器件封装和应用技术研究。E-mail: huayang@semi.ac.cn