

文章编号: 1000-7032(2023)10-1842-07

高气密性的深紫外LED半无机封装技术

万垂铭^{1,2}, 曾照明², 肖国伟², 蓝义安², 谢子敬³, 王洪^{1,3*}

(1. 华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640;

2. 广东晶科电子股份有限公司, 广东广州 511458;

3. 中山市华南理工大学现代产业技术研究院, 广东中山 528437)

摘要: 深紫外LED可通过物理方式破坏病毒和细菌的结构,从而获得高效消毒的效果。相比于工艺成熟的蓝光LED,如何提高深紫外LED的封装可靠性和出光率仍是关键问题。本文采用基底预热方式微固化封装胶,结合阵列点胶方式将石英玻璃固定在镀铜围坝,制备了半无机封装的深紫外LED。该器件的输出波长为275 nm,半峰宽约为11 nm。对比传统类透明材料封装的器件,石英封装的深紫外LED有更高的出光率。在真空红墨水和氦气漏率实验中,采用本文提出的半无机封装技术的深紫外LED器件表现出高密封性。此外,在加速老化测试中,该封装器件的光衰速率在20%以内。实验结果表明,对比有机封装的深紫外LED器件,在基底预热条件下,采用阵列点胶固定石英玻璃是现阶段提高深紫外LED可靠性的一种封装方法。

关键词: 深紫外LED; 可靠性; 出光率; 基底预热; 阵列点胶

中图分类号: TN383.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230156

Semi-inorganic Packaging Technology of DUV-LEDs with High-vapor Tightness

WAN Chuiming^{1,2}, ZENG Zhaoming², XIAO Guowei², LAN Yian², XIE Zijing³, WANG Hong^{1,3*}

(1. School of Electronics and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. APT Electronics Co. Ltd., Guangzhou 511458, China;

3. Zhongshan Institute of Modern Industrial Technology, South China University of Technology, Zhongshan 528437, China)

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

Abstract: Deep ultraviolet light-emitting diodes (DUV-LEDs) can physically destroy the structure of viruses and bacteria, thus achieving efficient disinfection. Compared with the mature blue LED process, how to improve the packaging reliability and light output efficiency of DUV-LEDs is still a key problem. In this paper, a semi-inorganic packaging DUV-LED was prepared by using substrate preheating method of micro-cured encapsulation adhesive and combining with array dispensation method to bond quartz glass in plated dam copper. The output wavelength of the device is 275 nm and its half-peak width is approximately 11 nm. Quartz-packaged DUV-LEDs have higher light output than traditional devices packaged with transparent materials. DUV-LED devices using the packaging technique presented herein exhibit high air hermeticity in vacuum red ink and helium environments. Moreover, in the accelerated aging test, the light decay rate of this packaged device is less than 20%. Experimental results show that using array dispensing to bond quartz glass under substrate preheating is a packaging method to improve the reliability of DUV-LEDs compared with organic packaging.

Key words: DUV-LEDs; reliability; light output efficiency; substrate preheating; array dispensing

收稿日期: 2023-06-29; 修订日期: 2023-07-17

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); 广东省科技计划项目(2020B010171001) Guangzhou Municipal Science and Technology Plan Project(202103030002); Nansha District Science and Technology Development Project of Guangzhou(2021ZD001); Science and Technology Plan Project of Guangdong Province(2020B010171001)

1 引 言

基于Ⅲ族氮化物材料的深紫外 LED (200~280 nm) 具有体积小、功耗低和绿色环保等优点, 在光通信、生物检测、杀菌消毒等领域具有重要的应用价值^[1-5]。尤其是在杀菌消毒的应用领域, 深紫外 LED 通过物理方式破坏微生物的核酸结构^[6], 实现灭活微生物的效果。深紫外 LED 的消毒方式是绿色环保的, 对环境无污染而且功耗比传统汞灯低。随着新型冠状病毒的影响, 深紫外 LED 的市场需求在逐年递增^[7-9]。深紫外 LED 可以作为汞灯的替代品, 深紫外 LED 器件具有功耗低、寿命长和启动快等特性, 更容易被公众接受^[10]。深紫外 LED 器件的性能直接受到深紫外 LED 封装的影响, 优化深紫外 LED 封装是提高深紫外 LED 出光率的关键因素之一。

深紫外 LED 的封装主要分为有机封装、全无机封装和半无机封装。有机封装是采用有机材料灌封深紫外 LED 芯片; 全无机封装是用无机材料作为封装载体和蓝宝石玻璃盖板(带金属环)的密封剂; 半全无机封装是用有机材料作为封装载体和石英玻璃盖板的密封剂。有机封装的灌封材料选用有机硅材料, 但硅材料在深紫外光的长时间照射下会裂化分解^[11-12], 导致深紫外 LED 的可靠性降低; 全无机封装不会出现材料裂化分解的问题, 气密性要比有机封装高, 但是蓝宝石玻璃的紫外透过率较低(小于 90%), 且制备成本高, 并不适用于量化生产; 与有机封装和全无机封装相比, 半无机封装通过有机材料密封石英玻璃(透光率大于 95%)和陶瓷基板^[13-15], 且有机密封材料不会被深紫外光直接照射。同时, 为了提高半无机封装的出光率, 研究者们提出许多不同的优化方案。

例如, 采用三维石英盖板提高深紫外 LED 的发光角度^[16]; 采用三维陶瓷基底改善封装的气密性^[17]以及采用侧面填充方法提高封装的侧面出光率^[18]等。而封装技术是影响深紫外封装可靠性的主要因素, 因此, 优化半无机封装技术是提高深紫外 LED 可靠性的关键。

本文提出了一种基底预热、阵列点胶的深紫外 LED 半无机封装方法, 实现了石英玻璃盖板与封装载体的稳定粘合, 提高了深紫外 LED 的气密性。

2 实 验

2.1 封装载体制备

封装载体结构包括陶瓷基底和镀铜围坝。图 1 是封装载体制备示意图。首先通过铜金属电镀技术在 AlN 陶瓷基板顶部和底部形成铜盘; 再采用通孔工艺在基板内部填充铜, 实现基板顶部和底部铜盘的连接; 最后通过金属电镀工艺在基板表面形成铜围坝。图 2 为封装载体模型图, 封装载体的整体尺寸为 3.5 mm × 3.5 mm × 1.49 mm。围坝的尺寸为 3.5 mm × 3.5 mm × 1.49 mm。实验所用的石英玻璃厚度为 0.3 mm, 所以围坝的台阶深度设计为 0.3 mm, 用于容纳密封剂和固定石英片。在基板顶部 2.0 mm × 2.0 mm 的中心区域内设置电镀层为 Cu/Ni/Pd/Au 的功能区, 功能区分为正极区和负极区, 呈长条形分布对称。通过功能区, 深紫外 LED 芯片与封装载体实现电连接和机械连接。如图 2(b) 所示, 基板底部侧边为电极焊盘, 中间为散热焊盘, 通过在铜柱与功能区连接。图 2(c)、(d) 分别是石英玻璃密封前和密封后的模型图。在围坝出口处设置台阶, 用于阵列点胶和限制石英片移动位置; 齐纳二极管反接在功能区, 防止芯片静电击穿。

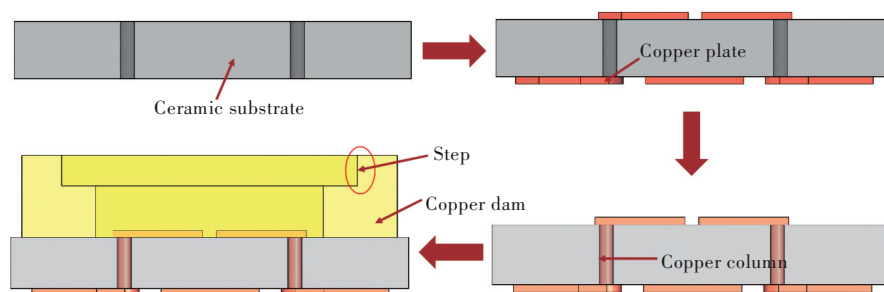


图 1 封装载体制备流程

Fig.1 Preparation process of the packaging carrier

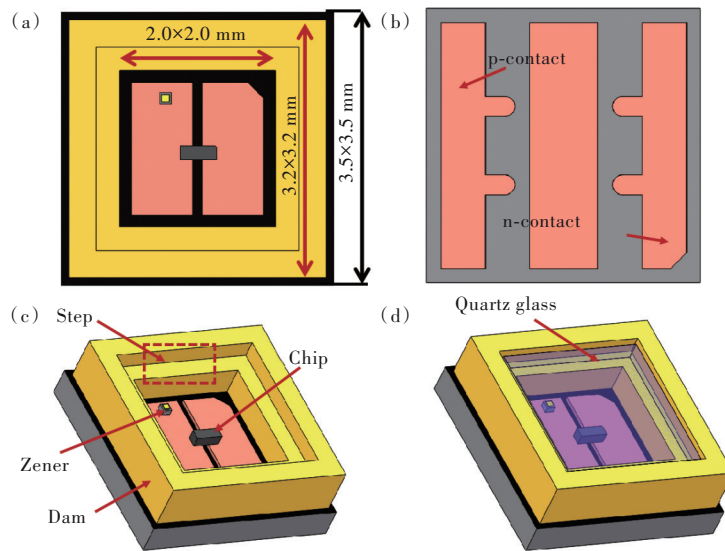


图2 封装载体模型图:(a)顶面;(b)底面;(c)无石英盖板的模型;(d)带石英盖板的模型。

Fig.2 Structure diagram of top view(a), bottom view(b). Structural model without quartz glass(c), with quartz glass(d).

2.2 材料与设备

有机封装的灌封材料选用氟树脂和有机硅,氟树脂在 275 nm 波长的透光率大约为 97%,有机硅类材料的透光率大约为 85%,石英玻璃透光率大约为 95%^[15,19],有机封装的样品选用氟树脂和有机硅灌封;半无机封装的样品选用石英玻璃作为密封盖板,硅胶作为密封胶。

半无机封装采用基底预热、阵列点胶的封装

技术制备。图3是预加热处理、阵列点胶封装技术原理示意图。首先将封装载体固定在加热板上进行预热处理;然后待围坝的温度稳定后,使用点胶头将胶滴以阵列分布的形式点涂在围坝的台阶上,胶滴在台阶加热下实现微固化,按压石英盖板,使石英盖板与围坝台阶贴合密封;最后将样品放置在 100 °C 烤箱中烘烤 1 h 后,转入 150 °C 的烤箱烘烤 3 h。

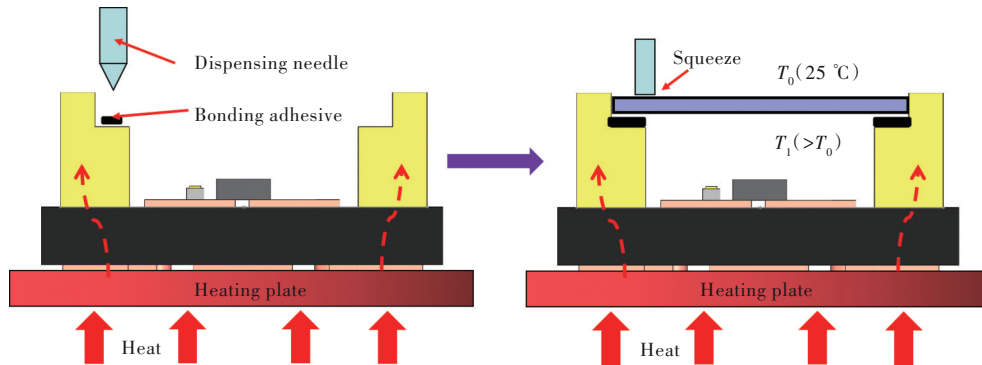


图3 基底预加热、阵列点胶的深紫外LED封装技术原理。

Fig.3 Schematic illustration of the DUV-LED packaged by substrate pre-heating with array dispensing

固晶和点胶设备选用新益昌公司的GS100BH-PAL型固晶机;固晶回流选用Falcon 5C型氮气回流炉;固齐纳选用ASM焊线。深紫外LED封装的光电性能测试选用远方PCE-2000UV型紫外测试系统。

2.3 样品可靠性测试

样品的可靠性测试包括:真空红墨水测试和加速老化测试。真空红墨水测试用于检验不同预热温度下石英玻璃盖板和围坝贴合度。测试时将

样品浸泡在红墨水中,放置在密闭的容器内,抽干容器内的空气,观察样品封装内腔的红墨水渗入情况,用红墨水渗入率表征样品的不良率。为了进一步验证通过预热处理、阵列点胶封装的深紫外LED的可靠性,分别进行高温老化实验(环境温度 60 °C)和高温高湿老化实验(环境温度 60 °C,相对湿度 90%),样品老化过程均在烤箱中进行,老化电流为 100 mA,共老化 3 000 h。

3 结果与讨论

3.1 样品的外观

图 4 为有机封装和半无机封装的外观图。图 4(a) 为镀铜围坝的侧视图; 图 4(b) 为围坝台阶的正视图; 图 4(c) 是通过基底预热、阵列点胶封装技术制备的半无机封装样品; 图 4(d) 是有机封装样品, 封装载体与半无机封装保持一致。

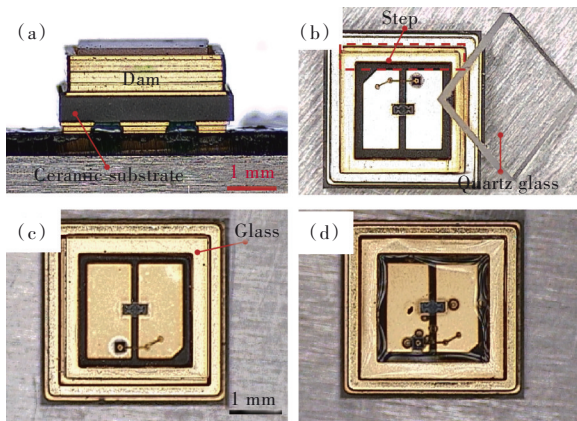


图 4 (a) 围坝侧面外观; (b) 围坝台阶; (c) 半无机封装样品; (d) 有机封装样品。

Fig.4 Pictures of the sectional view of dam (a), the step of dam (b). (c) Semi-inorganic packaging. (d) Organic packaging.

3.2 基底预热温度

半无机封装样品在不同基底预热温度对应的不良率如图 5 所示。样品的不良率 (Not given ratio, NG ratio) 用红墨水渗入率表征。基底预热温度为 60, 80, 100, 120 °C 对应的不良率为 61.5%、18%、0%、74.4%。图 6(a) 是红墨水渗入封装内腔的外观; 预热温度为 100 °C 时石英玻璃与围坝台阶贴合度如图 6(b) 所示, 贴合度良好, 并无气

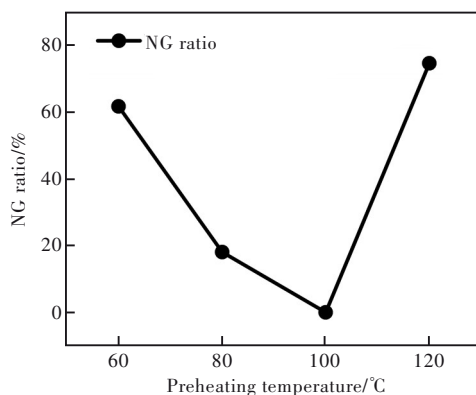


图 5 不同基底预热温度与样品不良率的关系

Fig.5 Relationship between different substrate preheating temperatures and the adverse rate of samples

道产生; 预热温度高于 100 °C 和低于 100 °C 时产生的气道分别如图 6(c)、(d) 所示。由实验可知, 最佳预热温度为 100 °C, 在最佳温度下石英玻璃与台阶的贴合度最优, 不易产生气道。预热温度低于最佳温度时, 密封胶无法微固化, 在台阶处具有流动性, 在烘烤时易产生气道; 预热温度高于最佳温度时, 在放置石英玻璃前密封胶就已完全固化。

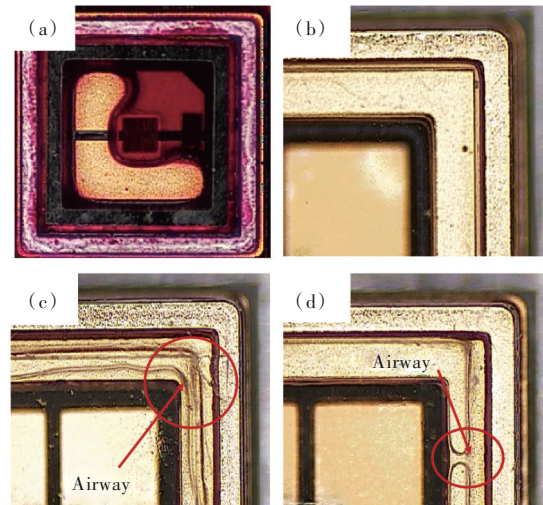


图 6 (a) 红墨水渗入内腔的外观; (b) 100 °C 预热温度时石英玻璃与台阶贴合度; (c) 预热温度高于 100 °C 时形成气道; (d) 预热温度低于 100 °C 时形成气道。

Fig.6 (a) Appearance of red ink bleed. Airway generation at 100 °C (b), greater than 100 °C (c) and less than 100 °C (d).

基底预热处理是阵列点胶的前置条件, 在整个预热过程中, 围坝内外会产生气压差, 使石英片紧贴台阶。优化后的预热温度可以让围坝台阶的密封胶达到最佳的微固化状态, 不易产生气道。基板底部两侧的铜盘与加热板直接接触, 通过热

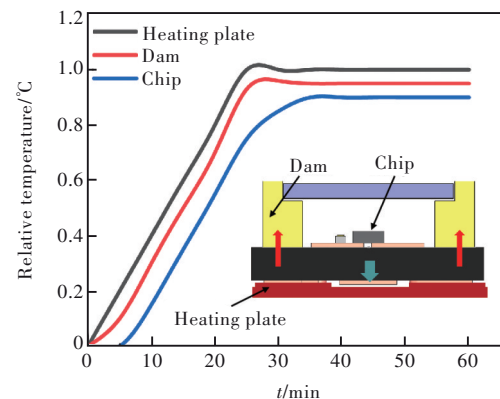


图 7 基底预热时封装载体不同区域的相对稳定温度

Fig.7 Relative temperature of different regions of the encapsulation carrier under substrate preheating

传导提高围坝的温度,基板底部的中间铜盘不与加热板接触,从而减少在封装过程中高温对芯片的影响。图7为预热处理过程中深紫外LED封装载体不同区域的相对温度变化。预热温度稳定后,芯片区域的相对温度要低于其他两个区域的温度,围坝的相对温度接近加热板的温度。

3.3 阵列点胶

在围坝台阶处采用阵列点胶工艺,胶滴分布如图8所示。通过改变胶滴数量优化阵列点胶的工艺,优化胶滴数量分别为12,14,16。用不同胶滴数封装的深紫外LED良率如表1所示。点胶数为12时,样品不良率为10%;点胶数为14时,不良率为0%;点胶数为16时,不良率为20%。胶滴数为12时,胶滴间距过大,石英玻璃封盖后形成气道;胶滴数为16时,胶滴间距过小,微固化时会发生胶滴间粘合,使部分胶滴尺寸增大,台阶处存在未粘合的胶滴,胶滴间尺寸不均匀,从而形成气道。实验表明,阵列点胶工艺在胶滴数目为14时,样品封装的气密性最好。且该样品的氦气漏率大约为 $(1.8 \sim 3.2) \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$,电子密封氦气漏率的标准是 $5.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ 以内,市场上的深紫外产品的氦气漏率大约 $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ 。对比可知,样品的气密性满足元器件气密性的标准要求。

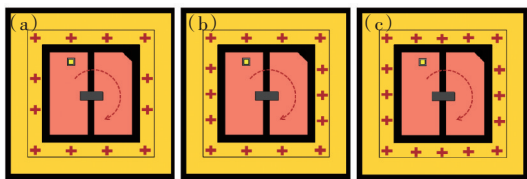


图8 点胶数示意图:(a)12点;(b)14点;(c)16点。

Fig.8 Schematic diagram of dispensing quantity for 12(a), 14 (b) and 16(c).

表1 不同点胶工艺和对应深紫外LED样品的不良率

Tab.1 Different dispensing processes and NG ratio of DUV-LEDs

点胶数	不良率/%	胶滴尺寸/mil
12	10	22 ~ 26
14	0	22 ~ 26
16	20	22 ~ 26

3.4 光电特性和老化分析

图9是通过基底预热处理、阵列点胶封装技术制备出的深紫外LED的发射光谱和顶部视图。由图可知,样品在100 mA电流驱动下的峰值输出

波长为275 nm,半峰宽是11 nm。图10是有机关封装和半无机封装的深紫外LED的光功率和光电转换效率。两种封装均选用镀铜围坝的封装载体,有机封装的灌封材料为氟树脂和有机硅。在100 mA驱动电流下,氟树脂灌封的样品的输出光功率为19.4 mW;硅胶灌封的样品为16.1 mW;半无机封装的输出光功率为15.7 mW。光电转换效率(Wall plug efficiency, WPE)分别为3.28%、2.8%、2.7%。深紫外光电转换效率公式如下:

$$n_{\text{WPE}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{out}}}{I \times V}, \quad (1)$$

P_{out} 是输出光功率, P_{in} 是输入功率,其中输入电流 $I = 100 \text{ mA}$,输入电压为 $V = 6 \text{ V}$ 。

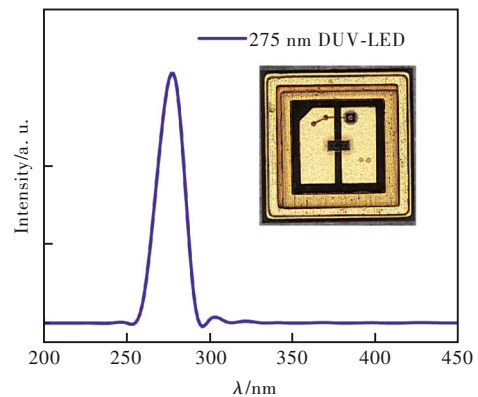


图9 光谱强度

Fig.9 Spectrum of DUV-LEDs

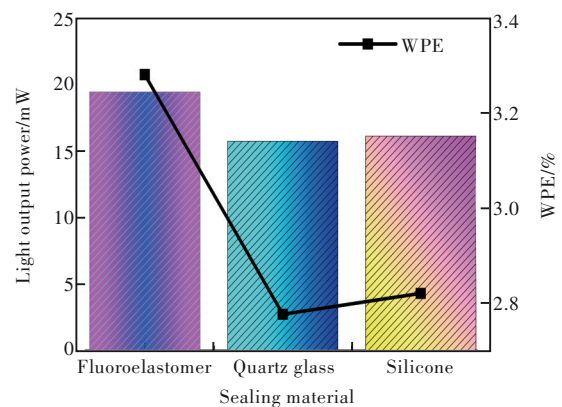


图10 不同密封材料的深紫外LED的输出光效和转换效率

Fig.10 Light output power and WPE of DUV-LED packaged by different sealing material under a driving current of 100 mA

实验结果表明,氟树脂封装的光功率最高,硅胶封装与半无机封装的光功率接近。有机封装所用的有机灌封材料在高能量紫外光照射下发生共价键断裂,密封体会干裂分解;而石英玻璃属于无

机材料,不会被深紫外光分解。制备半无机封装样品所用的密封胶为硅胶类,本文所提出的半无机封装技术是将胶滴点涂在台阶处,避免了深紫外光直接照射。

为进一步验证通过基底预热、阵列点胶技术封装的深紫外 LED 的可靠性,对样品进行加速老化测试。在 3 000 h 老化过程中,样品的相对光衰如图 11 所示。在 60 °C 环境下老化 3 000 h 后,输出光功率维持在 88%,相比老化前,输出光功率降低了 12%;在环境温度为 60 °C、相对湿度 90% 条件下,样品相对输出光功率为 84%,相比老化前,光功率降低了 16%。而硅胶灌封的深紫外 LED 在高温老化 1 000 h 后^[11],光功率衰减了 40%,而且硅胶表面出现裂化;氟树脂灌封的深紫外 LED^[19]在高温老化 600 h 后光功率衰减约 15%。与有机

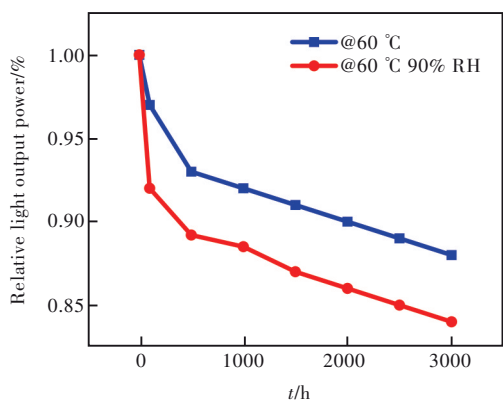


图 11 不同老化条件下样品的相对输出光功率

Fig.11 Relative light output power of the sample under different aging tests

封装对比可知,通过预热处理、阵列点胶的半无机封装样品的可靠性优于有机封装,在 3 000 h 高温高湿环境下,光功率大约维持在 84%;而有机硅灌封的深紫外 LED 的光功率在短时间高温下只能维持 60%,氟树脂灌封的光功率则仅在 600 h 光功率就降低到 85%。深紫外 LED 在 100 h 老化过程中,光功率快速衰减了 10% 左右,光衰主要受深紫外 LED 芯片的空穴注入、电子泄露^[20-21]以及封装的影响。若封装样品气密性差,长时间高温高湿老化过程中光功率会衰减 100%。

4 结 论

本文提出了基底预热处理、阵列点胶的深紫外 LED 封装方法,分别对封装载体和密封材料进行了研究。在陶瓷基板上电镀铜形成围坝,在围坝出口处设计台阶,限制石英玻璃的移动位置;优化阵列点胶工艺,采用胶滴数量为 14 的点胶方式。通过该封装技术制备出的样品进行真空红墨水测试,良率达到 100%,实验表明该封装的气密性较好。在 3 000 h 高温高湿老化实验中,该封装样品光衰率保持在 20% 以内。基底预热并结合阵列点胶的深紫外 LED 封装技术有望成为改善深紫外 LED 器件封装和提高气密性的一种方法。

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.20230156>.

参 考 文 献:

- [1] KNEISSL M, RASS J. III-Nitride Ultraviolet Emitters: Technology and Applications [M]. Cham: Springer, 2016.
- [2] HIRAYAMA H, MAEDA N, FUJIKAWA S, et al. Recent progress and future prospects of AlGaIn-based high-efficiency deep-ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2014, 53(10): 100209-1-10.
- [3] PENG Y, LIANG R L, MOU Y, et al. Progress and perspective of near-ultraviolet and deep-ultraviolet light-emitting diode packaging technologies [J]. *J. Electron. Packag.*, 2019, 141(4): 040804-1-11.
- [4] 彭洋, 陈明祥, 罗小兵. 深紫外 LED 封装技术现状与展望 [J]. *发光学报*, 2021, 42(4): 542-559.
 PENG Y, CHEN M X, LUO X B. Status and perspectives of deep ultraviolet LED packaging technology [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(4): 542-559. (in Chinese)
- [5] 梁延杰, 刘景伟, 闫劲, 等. 蓝光 LED 激发深紫外上转换发光材料的光学定位与追踪应用 [J]. *发光学报*, 2022, 43(9): 1436-1445.
 LIANG Y J, LIU J W, YAN S, et al. Blue LED-excitable deep ultraviolet upconversion phosphor for optical locating and tracking application [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(9): 1436-1445. (in Chinese)
- [6] 林岳, 陈华山, 陈灿和, 等. 深紫外发光二极管研究进展及其在杀菌消毒中的应用 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2020, 59(3): 360-372.

- LIN Y, CHEN H S, CHEN C H, *et al.* Progress in the deep-ultraviolet light-emitting diode and its application on sterilization and disinfection [J]. *J. Xiamen Univ. (Nat. Sci.)*, 2020, 59(3): 360-372. (in Chinese)
- [7] 王佳乐. 深紫外LED的前景及市场应用价值探究 [J]. 现代信息技术, 2019, 3(8): 49-50.
- WANG J L. Research on the prospect and market application value of deep ultraviolet LED [J]. *Mod. Inf. Technol.*, 2019, 3(8): 49-50. (in Chinese)
- [8] YAMADA K, FURUSAWA Y, NAGAI S, *et al.* Development of underfilling and encapsulation for deep-ultraviolet LEDs [J]. *Appl. Phys. Express*, 2015, 8(1): 012101-1-3.
- [9] 吴峰, 戴江南, 陈长清. AlGa_N基深紫外发光二极管研究进展 [J]. 人工晶体学报, 2020, 49(11): 2079-2097.
- WU F, DAI J N, CHEN C Q. Research progress of AlGa_N based deep ultraviolet light emitting diodes [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2020, 49(11): 2079-2097. (in Chinese)
- [10] MURAMOTO Y, KIMURA M, NOUDA S. Development and future of ultraviolet light-emitting diodes: UV-LED will replace the UV lamp [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2014, 29(8): 084004-1-8.
- [11] KIM J, MA B, LEE K. Study on influence of silicone encapsulant for ceramic LED package after HTOL test [C]. *The 5th Electronics System-integration Technology Conference (ESTC), Helsinki, Finland*, 2014: 1-4.
- [12] BAE J Y, KIM Y, KIM H, *et al.* Ultraviolet light stable and transparent sol-gel methyl siloxane hybrid material for UV light-emitting diode (UV LED) encapsulant [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, 7(2): 1035-1039.
- [13] 王君从, 杨婷, 胡美玲. 电子封装用陶瓷材料研究现状 [J]. 工程建设, 2021, 4(10): 121-128.
- WANG J C, YANG T, HU M L. Research status of ceramic materials for electronic packaging [J]. *Eng. Constr.*, 2021, 4(10): 121-128. (in Chinese)
- [14] 杨宇铭, 李燕, 郑怀文, 等. 用于AlGa_N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 Y M, LI Y, ZHENG H W, *et al.* High-reflection Al-plated DPC ceramic substrate for AlGa_N-based DUV LED packaging [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2020, 35(10): 991-999. (in Chinese)
- [15] 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 Trans. Electron Devices*, 2016, 63(8): 3143-3146.
- [16] QIU J Y, PENG Y, MIN X H, *et al.* Enhanced light extraction of DUV LEDs by using a quartz lens with three-dimensional structure [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2021, 33(24): 1403-1406.
- [17] LIU J L, LIU J X, LI S, *et al.* Deep-ultraviolet LEDs with all-inorganic and hermetic packaging by 3D ceramic substrate [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2021, 33(4): 205-208.
- [18] 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 Photonics Technol. Lett.*, 2023, 35(17): 939-942.
- [19] PENG Y, GUO X, LIANG R L, *et al.* Enhanced light extraction from DUV-LEDs by AlN-doped fluoropolymer encapsulation [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2017, 29(14): 1151-1154.
- [20] 王玮东, 楚春双, 张丹扬, 等. 俄歇复合、电子泄漏和空穴注入对深紫外发光二极管效率衰退的影响 [J]. 发光学报, 2021, 42(7): 897-903.
- WANG W D, CHU C S, ZHANG D Y, *et al.* Impact of auger recombination, electron leakage and hole injection on efficiency droop for DUV LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(7): 897-903. (in Chinese)
- [21] 苏锡安, 高瑛, 姜锦秀. GaP:N LED中深能级对退化特性的影响 [J]. 发光学报, 1988, 9(2): 159-165.
- SU X A, GAO Y, JIANG J X. Effect of deep level on degradation characteristic in GaP:N LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 1988, 9(2): 159-165. (in Chinese)



万垂铭(1982-),男,江西南昌人,博士研究生,工程师,2010年于暨南大学获得硕士学位,主要从事深紫外LED和车规级LED封装技术的研究。

E-mail: 202011002174@mail.scut.edu.cn



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