

文章编号: 1000-7032(2014)02-0213-05

51 V GaN 基高压 LED 的热分析

俞 鑫, 郭伟玲*, 樊 星, 白俊雪, 程顺波, 韩 禹

(北京工业大学 光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 设计并制备了 51 V 高压 LED。对器件进行了大电流冲击试验并对器件的损毁原因进行了分析。运用有限元分析软件 ANSYS 对 LED 关键结构部位进行参数化建模及热分布模拟, 得到其稳态的温度场分布; 然后经过与红外热像仪成像图对比, 得出电极烧毁的原因在于芯粒连接处的电极过薄过窄而导致的电阻过大, 为后续设计更可靠的高压 LED 提供了参考。对芯片分别进行蓝光及色温 5 000 K 的白光封装, 并分别测量了热阻, 涂覆荧光粉的白光灯珠的热阻要比没有涂覆荧光粉的蓝光灯珠高约 4 °C/W。同时, 51 V 高压 LED 的热阻比 1 W 大功率 LED 要高, 说明高压 LED 的散热性能比常规 LED 要差, 这可能与高压 LED 具有深沟槽及众多的互联电极结构有关。

关键词: 高压 LED; 热分析; ANSYS; 热阻; 深沟槽

中图分类号: TN383+.1 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20143502.0213

Thermal Analysis of 51 V GaN-based High Voltage LED

YU Xin, GUO Wei-ling*, FAN Xing, BAI Jun-xue, CHENG Shun-bo, HAN Yu

*(Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)*** Corresponding Author, E-mail: guoweiling@bjut.edu.cn*

Abstract: 51 V high voltage LED (HV LED) was designed and fabricated. Firstly, the HV LED was tested by large current attack, then the damage reason was analyzed. The key part's thermal parameters distribution model of HV LED was simulated by using finite element analysis software ANSYS, and the steady distribution of temperature was achieved. By analyzing the infrared thermal image, the reason of HV LED failure after large current attack was gotten. The core particle electrode burned at the connection part which was thin and narrow, so the resistance was large. It provided a good reference for the sequence design of more reliable HV LED. Meanwhile, the chips were packaged into white lamp with color temperature of 5 000 K and blue lamp, respectively. The thermal resistance of the white lamp was about 4 °C/W higher than the blue lamp without phosphor coating, and it was also higher than the conventional 1 W LED. The deep groove structure and numerous interconnected electrode structure of HV LED may be the reason of the thermal performance of high voltage LED worse than the conventional 1 W LED.

Key words: high voltage LED; thermal analysis; ANSYS; thermal resistance; deep groove structure

1 引 言

LED 作为一种节能环保的固态半导体光源,已经越来越得到各国政府的重视,优异的性能使其在照明领域扮演着越来越重要的角色^[1-2]。大功率 LED 是目前应用最广泛的^[3],但是传统大功率 LED 需大电流驱动,导致器件出现严重的热耗,光出射效率低, Droop 效应严重,电流扩展差^[4-7]。以上这些现象都会导致器件严重老化甚至烧毁。同时,大电流驱动对于散热铝壳要求比较严格,导致照明灯具成本居高不下,限制了 LED 的照明普及^[8]。为了解决大电流驱动带来的问题,人们提出了高压 LED 的概念。简单而言,高压 LED 就是把一个芯片的外延层分割成数个独立的芯粒单元,并通过电极互连而构成的新型 LED 芯片。由于使用的是低电流驱动,高压 LED 器件具有更高的可靠性,同时又简化了匹配电源,可使用具有更少电子元器件的驱动电源,减小了电源中元器件之间能量转换的损失。在相同功率条件下,高压直流 LED 所用的驱动电流远小于传统大功率 LED 器件,大大减小了 AC-DC 转换效率的损失。采用直流高压 LED 还可以大幅降低对散热外壳和散热系统的设计要求^[8],意味着整体 LED 的成本降低了许多。

高压 LED 的很多特性还没有被深入研究,如热特性等。本文制备了 16 个晶粒互连的 51 V 高压 LED,重点分析了高压 LED 芯片热分布、大电流冲击芯片损毁原因及热阻等现象。

2 高压 LED 样品的制备

LED 的外延片通过金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 系统生长在蓝宝石衬底上。其结构包含一个非掺杂的 GaN 缓冲层,一个硅掺杂的 N 型 GaN 层, InGaN/GaN 多量子阱结构,一个 Mg 掺杂 P 型 AlGaIn 电子阻挡层,一个 Mg 掺杂的 P 型 GaN 层。为了达到很好的隔离效果,我们通过 ICP 刻蚀出了一个深度达到 5.5 μm 的深沟。接着通过 PECVD 系统在表面镀上一层 450 nm 厚的 SiO_2 作为绝缘层,随后蒸发一层 240 nm 厚度的铟锡氧化物 (ITO) 作为电流传输透光层,经过退火处理后再通过蒸镀电极连接 16 个芯粒。最后的电极互连如图 1 所示,整个芯片平面尺寸为 1.1 mm \times 1.1 mm。

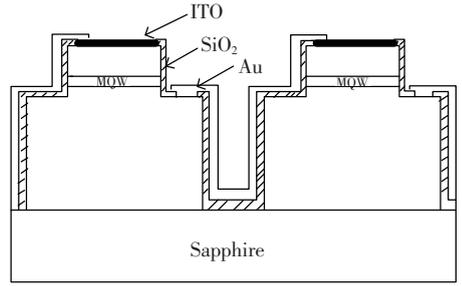


图 1 电极互连图

Fig. 1 The connected electrode

白光 LED 灯珠的封装流程如图 2 所示。对于蓝光 LED 灯珠,由于不需要在芯片上点荧光粉,所以配粉和点胶两道工序可以省去。



图 2 封装流程图

Fig. 2 Flow chart of the package process

3 结果与讨论

3.1 高压 LED 芯片表面热分布测试及分析

图 3 为高压 LED 芯片制备完成后在探针下的点亮图,可以看出发光分布比较均匀。经测试对比发现,器件的驱动电压达到了 48 V ($I = 20 \text{ mA}$),单颗电压仅为 3.0 V,表明欧姆接触比较理想。

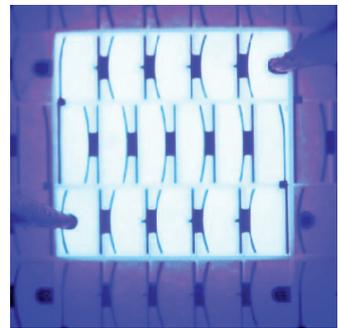


图 3 高压 LED 点亮图

Fig. 3 Chip micrograph tested by probe

将裸芯片在探针台下进行 10 A 大电流冲击后,显微镜下观察发现芯片烧毁,晶粒之间的沟道连接处的电极已经完全烧断,如图 4 所示。图 5 为高压 LED 沟槽区的扫描电子显微镜照片,可以清晰地看到沟槽处的电极以及 SiO_2 钝化层的分布。

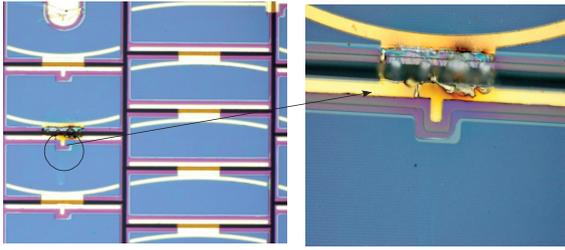


图4 高压 LED 电极烧毁图

Fig. 4 Burned electrode micrograph of HV LED

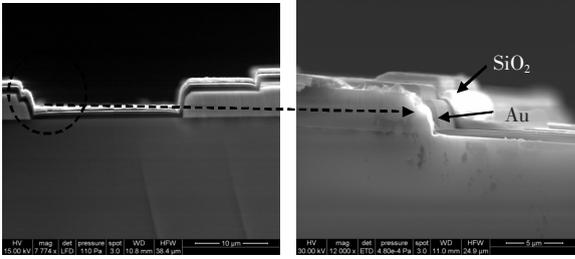


图5 器件沟槽区的扫描电子显微镜(SEM)照片

Fig. 5 SEM images of the trench area of HV LED

本文采用 ANSYS 软件模拟高压 LED 的一组相邻晶粒的深沟槽三维热稳态分布。有限元分析一般用两种方法来进行模拟:精确模型和简化模型。为了提高速度和计算的精确性,本文选择简化模型,如图6所示。简化模拟结构包括5个部分:芯片结构、SiO₂ 钝化层、金属电极结构、蓝宝石衬底和铜热沉。各材料的导热系数如表1所示。

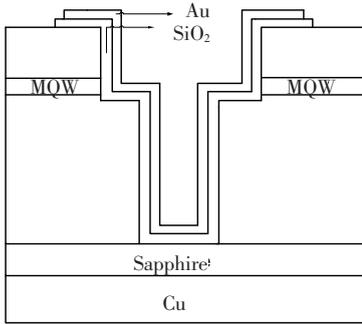


图6 简化的深沟槽模型

Fig. 6 Simplified model of the trench

表1 不同材料的导热系数

Table 1 Thermal conductivity of different materials

Materials	Thermal conductivity/(W · m ⁻¹)
Cu	400
Au	317
SiO ₂	1.4
GaN	130
Al ₂ O ₃	46

简化的参数如下:芯片深沟槽的区域面积 450 μm × 450 μm;蓝宝石厚度 200 μm;Cu 热沉的尺寸 20 mm × 20 mm × 1.7 mm;SiO₂ 的厚度 300 nm;Au 的厚度 300 nm。环境温度设为 25 °C,空气对流换热系数设为 10 W/(m² · °C)。生成热 H_C 可以通过公式(1)进行计算:

$$H_C = \frac{P_D}{V} = \frac{1 \times 80\%}{0.1 \times 0.45 \times 5 \times 10^{-12}} = 3.56 \times 10^{12} \text{ W/m}^3, \quad (1)$$

其中 P_D 为散热功率, V 为有效外延层体积。

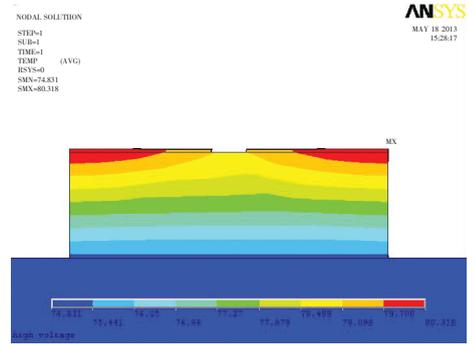


图7 ANSYS 仿真侧面图

Fig. 7 Side image of the deep groove structure simulated by ANSYS

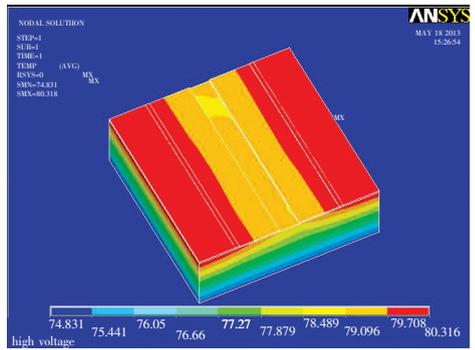


图8 ANSYS 仿真俯视图

Fig. 8 Top view of the deep groove structure simulated by ANSYS

为了使计算精确度更高,简化结构将量子阱设为唯一的热源。从图7和图8可以看出,整个结构中有源区温度最高,图8中深沟槽部分的温度没有呈现明显的聚集性,比有源区的温度还要低些。

为了将模拟结果与实际的热分布进行对比,我们将高压 LED 裸芯放置于 FLIR 公司的具有显微放大功能的 S5700 型红外热像仪上,并通一 5 mA 小电流,观察其稳态情况下的表面热分布情

况,如图 9 所示。越靠近主电极(压焊电极),连接的电极温度就越高,且深沟槽及其附近区域的温度高于芯片表面其他部位,有源层表面温度低于沟槽附近的温度。沟槽附近呈现的高温分布可能是由于沟槽及其附近表面覆盖的 SiO_2 钝化层使电极产生的热难以散发而导致;而有源区上面没有覆盖 SiO_2 钝化层,其产生的热能很快通过空气对流散发出去,故其热分布温度相对较低。

在显微镜下观察发现,高压 LED 在大电流冲击后失效的原因是靠近主电极处的电极烧毁,且是沟道处烧断。这是因为沟道处的电极为爬坡结构,并且沟道上连接处的电极的宽度较窄,所以电阻较大。高压 LED 为晶粒串联结构,流经单个晶粒单元的电流相同。在相同的电流下,大电阻的电极产生更多的热从而更容易烧毁。并且沟道深处及电极周围覆盖了 SiO_2 ,其导热系数很低,所以热量多聚集在其所覆盖的沟槽处而难以散发出去。

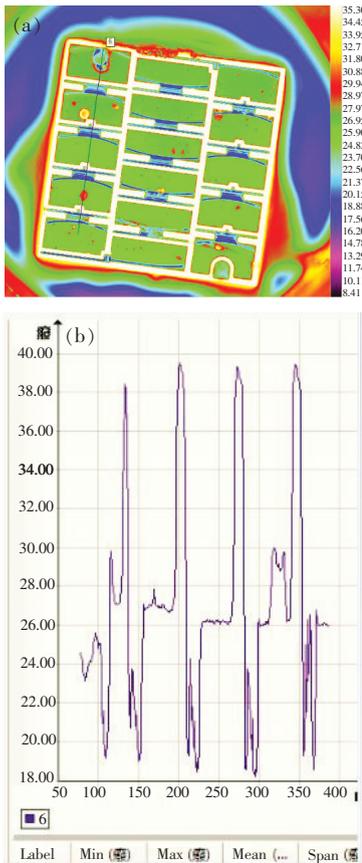


图 9 通过红外热像仪得到的高压 LED 表面温度分布。(a) 红外热像图;(b) 电极温度梯度值。

Fig. 9 Temperature distribution of HV LED surface obtained by infrared thermal imager. (a) Infrared thermal image. (b) Temperature gradient of the electrodes.

去。因此,为了得到可靠性更高的高压 LED,一方面应该使用导热系数更高的钝化层材料;另一方面还要优化电极图形,将沟槽连接处的电极做宽做厚以获得更低的电阻。

3.2 高压 LED 热阻比较测试及分析

热阻 R_{θ} 是导热介质两端的温度差与通过热流功率的比^[9]。通常将两个节点间单位热功率运输所产生的温度差定义为该两个节点间的热阻,其数学表达式为:

$$R_{\theta} = \frac{\Delta T}{P}, \quad (2)$$

其中 ΔT 为节点之间的温差, P 为两节点间的热功率流。热阻值越大,散热能力越差;反之,散热能力越强。

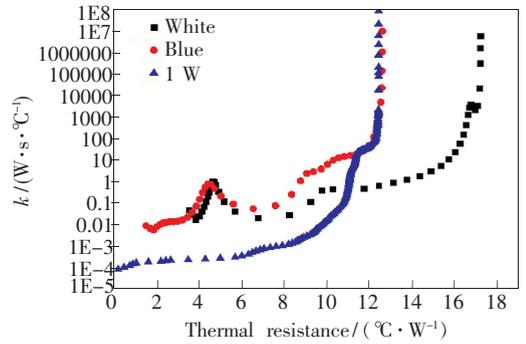


图 10 白光、蓝光高压 LED 灯珠以及 1 W 大功率 LED 灯珠的热阻。

Fig. 10 Thermal resistance of white, blue HV LED, and 1 W power LED.

LED 的热阻使用北京工业大学半导体可靠性实验室自主研发的半导体器件热特性测试仪测试,用于测试的白光和蓝光高压 LED 采用完全相同的封装形式。样品在相同的条件下进行测试,这样就排除了其他散热条件可能带来的温升。图 10 为测试得到的白光、蓝光高压 LED 灯珠以及 1 W 大功率 LED 灯珠的热阻。从图中可见,未涂抹荧光粉的蓝光 LED 的热阻要小于白光 LED,蓝光 LED 热阻为 $12.5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$,白光 LED 为 $17.2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。其原因是白光 LED 芯片上涂覆了荧光粉,更不易于散热;而且蓝光激发荧光粉发出黄光时有能量损失,损失的能量以热的形式散发出去。

同时,我们将两种 HV LED 灯珠的热阻与 1 W 大功率灯珠的热阻进行了比较,该 1 W 大功率灯珠与高压 LED 采用相同的封装工艺。从图 10 发现,高压 LED 的热阻要大于 1 W 的热阻,1 W

大功率灯珠的热阻为 $12.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, 高压白光 LED 灯珠的热阻要比 1 W 白光 LED 灯珠大 $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, 而高压蓝光 LED 灯珠的热阻与 1 W 白光 LED 灯珠基本相当。这可能与高压 LED 的众多互联的电极以及深沟槽有关。

4 结 论

设计并制备了 51 V ($I=20\text{ mA}$) 高压 LED, 并对 51 V 高压 LED 进行大电流冲击, 通过 ANSYS 有限元分析软件仿真其深沟结构及附近热分布, 假定有源区作为唯一热源模拟得到其 3D 热分布图像, 并通过红外热像仪成像系统观察芯片实际表面热分布, 发现沟槽附近的温度最高, 晶粒间电极在深

沟连接处热分布温度明显高于电极其他部位, 与理论模拟进行对比分析得出大电流冲击芯片电极烧毁的原因在于芯片连接处的电极过窄过薄导致电阻过大, 且周围 SiO_2 钝化层导热系数较低, 不能良好传导热量导致深沟附近热大量聚集, 这为后续的高压 LED 的优化设计提供了很好的参考依据。同时, 分别将高压 LED 封装成白光和蓝光, 又与 1 W 常规大功率 LED 进行对比。测试结果表明: 高压涂覆荧光粉的白光灯珠的热阻明显大于没有涂覆荧光粉的灯珠, 高压白光 LED 的热阻要比 1 W 常规大功率 LED 的热阻要大, 表面高压 LED 散热可能没有常规大功率 LED 好, 这可能也与其具有深沟槽及众多互联的电极结构有关。

参 考 文 献:

- [1] Schubert E F. *Light-emitting Diodes* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006:64-66.
- [2] Huang E L, Wang Y N, Ni X X. Brightness enhancement in LED lighting sequential colorized projection systems [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2010, 21(4):508-511 (in Chinese).
- [3] Zhou Z, Feng S W, Zhang G C, et al. The aging characteristics of high-power GaN-based white light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(10):1046-1050 (in Chinese).
- [4] Kudryk Y Y, Zinovchuk A V. Efficiency droop in InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes with nonuniform current spreading [J]. *Semi. Sci. Technol.*, 2011, 26(9):095007-1-5.
- [5] Malyutenko V K, Bolgov S S, Podoltsev A D. Current crowding effect on the ideality factor and efficiency droop in blue lateral InGaN/GaN light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(25):251110-1-3.
- [6] Wang C H, Lin D W, Lee C Y, et al. Efficiency and droop improvement in GaN-based high-voltage light-emitting diodes [J]. *IEEE Elect. Dev. Lett.*, 2011, 32(8):1098-1100.
- [7] Kim M H, Schubert M F, Dai Q, et al. Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(18):183507-1-3.
- [8] Cao D X, Guo Z Y, Liang F B, et al. The fabrication and performance analysis of GaN-based HV LED [J]. *Acta Phys. Sinica* (物理学报), 2012, 61(13):511-517 (in Chinese).
- [9] Zhuang P. Thermal resistance measurement and structure identification for high-power LED [J]. *Adv. Disp.* (现代显示), 2008, 91:26-27 (in Chinese).



俞鑫(1989 -),男,江苏海门人,硕士研究生,2011年于南通大学获得学士学位,主要从事半导体发光器件的研究。

E-mail: 894096802@qq.com



郭伟玲(1966 -),女,山西垣曲人,博士,教授,2003年于北京工业大学获得博士学位,主要从事光电子和微电子器件及其可靠性的研究。

E-mail: guoweiling@bjut.edu.cn