

· 光电器件与材料 ·

## InGaN基高压LED和传统大功率LED的发光效率比较

姚琦, 林思棋, 郭自泉, 陈国龙, 张纪红, 吕毅军

(厦门大学电子科学系; 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 主要从三个不同角度探究并分析了基于InGaN材料的高压LED的发光效率优于传统大功率LED的原因。为了保证实验结论的可靠性, 文中所采用的实验样品具有相同的芯片尺寸和材料以及相同的封装结构。经过大量的实验证明, 更均匀的电流分布和小芯片间隙的出光, 使得高压LED的发光效率优于传统大功率LED。结果显示, 在相同的1 W输入功率下, 高压LED的发光效率比传统大功率LED高大约4.5%。

**关键词:** 高压LED; 传统大功率LED; 发光效率; 电流密度; 结温

中图分类号: TN313.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-02-0037-05

## Comparison of Luminous Efficiency of InGaN-based High-voltage LED with Traditional High Power LED

YAO Qi, LIN Si-qi, GUO Zi-quan, CHEN Guo-long, ZHANG Ji-hong, LV Yi-jun

(Department of Electronic Science, Fujian Engineering Research Centre for Semiconductor Lighting, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The reasons of the luminous efficiency of InGaN-based high-voltage light-emitting diode (HV-LED) better than that of traditional high power (THP) LED are researched and analyzed from three different aspects. The experimental sample with same chip size, material and package structure is adopted to ensure the reliability of experiment conclusions. Experiments show that the luminous efficiency of HV-LED is better than that of THP LED for uniform current distribution and the light from the microchip gap. The results show that the luminous efficiency of HV-LED is approximately 4.5% higher than that of THP-LED under 1 W input power.

**Key words:** high-voltage light-emitting diode (LED); traditional high power (THP) LED; luminous efficiency; current density; junction temperature

发光二极管(light-emitting diode, LED)具有体积小, 寿命长, 环保节能等优点, 近几十年来, 得到了广泛的应用, 并将成为下一代的照明设备<sup>[1-3]</sup>。但是, 许多研究表明, 传统大功率发光二极管(traditional high power light-emitting diodes, THP-LEDs)经常发生效率Droop现象(即发光效率随着电流密度的增大而下降), 阻碍了THP-LEDs发光效率的进一步提高<sup>[4-5]</sup>。另一方面, 随着高压发光二极管(high

voltage light-emitting diodes, HV-LEDs)的出现, 较小的工作电流减轻了电流聚集所带来的热效应, 从而发光效率更高, 而且更小的电流会使得器件更加安全可靠, 将有更广阔的商业应用前景<sup>[6-10]</sup>。因此, 研究InGaN基高压LED的发光效率并与传统大功率LED进行比较是具有深远意义的。

关于高压LED的发光效率, Wang等利用实验获得芯片表面的光分布和仿真获得芯片表面的电

收稿日期: 2015-03-16

基金项目: 国家863项目(2013AA03A107); 福建省产学研重大科技项目(2013H6024)和福建省重点科技项目(2012H0039)资助

作者简介: 姚琦(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体光电检测及特性; 郭自泉(1985-), 男, 助理教授, 博士, 主要研究方向为半导体照明测试技术和光色设计。

流分布,证明了更高的电压,更小的芯片尺寸会有更高的发光效率(luminous efficiency, LE)<sup>[11]</sup>。Zhang 等也解释了更均匀的电流密度和更小的电极面积使得 HV-LEDs 有更高的发光效率<sup>[12]</sup>。在上述的研究中,他们都把均匀的电流密度作为高压 LED 的发光效率优于传统大功率 LED 的主要原因。文中主要从芯片表面电流密度、芯片间隙出光和结温三个方面研究它们各自对 HV-LEDs 和 THP-LEDs 发光效率的影响。实验结果表明, HV-LEDs 之所以有更高的发光效率,不仅与均匀的电流密度有关,而且和芯片间隙的出光有密切关系。

## 1 实验

实验中所使用到的芯片都是 Epistar 公司生产的 45×45×5.9 mil 的 InGaN 蓝光发光二极管。它们的外延片是利用金属有机物化学气相沉积设备(MOCVD)在蓝宝石(Sapphire)衬底上生长的。如图 1a 所示。其结构包括一个 4.5 μm 的 N 型 InGaN 层, 0.8 μm 的 InGaN 多量子结构(multi-quantum wells, MQWs), 一个 0.2 μm 的 P 型 InGaN 层, 蒸发 0.5 μm 钢锡氧化物(indium tin oxide, ITO)作为电流传输透光层。并且 HV-LEDs 是在 THP-LEDs 的基础上经过电感耦合等离子体技术(inductively coupled plasma, ICP)刻蚀出一个 12 μm 宽的深沟槽, 芯片表面镀 SiO<sub>2</sub> 绝缘层, 镀电极连接 17 个小芯片等工序制作, 得到的 HV-LEDs 芯片如图 1b 所示。

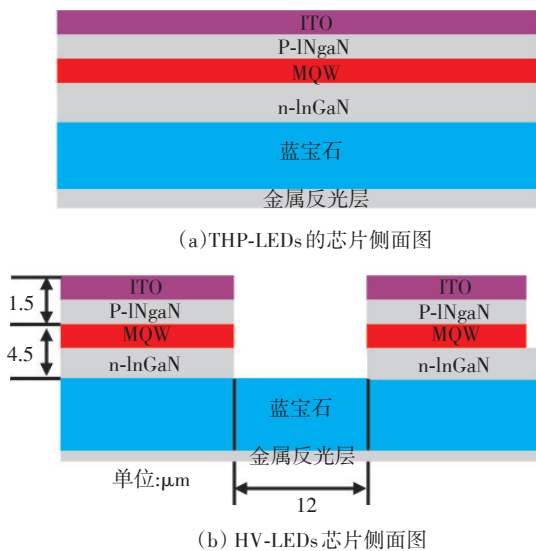


图1 THP-LEDs 的芯片侧面图和 HV-LEDs 芯片侧面图

LED 的 LE 定义为它的输出光功率( $P_{opt}$ )和输入电功率( $P_{elec}$ )之比,即

$$LE = \frac{P_{opt}}{P_{elec}} \times 100\% \quad (1)$$

为了消除其他因素对样品 LE 的影响,两种芯片由华联电子统一封装成如图 2 所示的裸芯片结构。

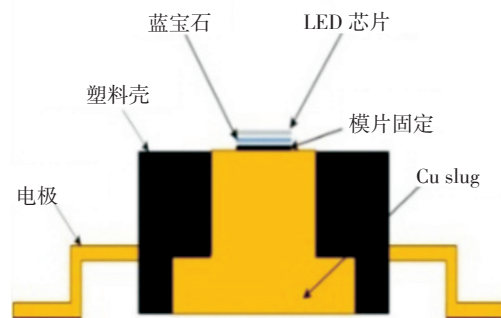


图2 样品侧面图

为了对比两种类型的蓝光 LED 的发光效率,测试了它们各自的光谱。蓝光 LED 的光谱测试系统如图 3 所示。利用 Yokogawa 公司的恒流/恒压源 GS610 给样品提供电流,德国 IS (instrument systems) 公司的 LED 850 TEC 温控仪和 Keithley 2510 结合控制热沉的温度, IS 的 LEDGON 100 光强角分布测试仪控制样品转动, IS 的 Spectro 320 和直径为 500 mm 的 ISP500 积分球测量光谱。另外,实验中还采用 Micred 公司的 T3Ster 瞬态热阻测试仪器测试样品的热阻。

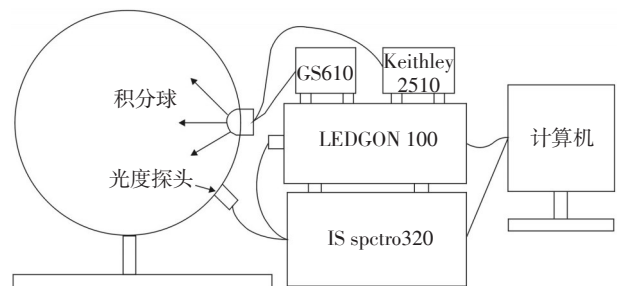


图3 光谱测试系统

## 2 结果与讨论

两种样品的 I-V 特性曲线如图 4 所示。HV-LEDs 的正常工作电流为 20 mA, 对应的电流密度为 253 mA/mm<sup>2</sup>, 此时电压为 51.4 V (17 个小芯片电压之和), 输入功率为 1.0 W; 于此对应的相同输入功率下的 THP-LEDs 的电流近似为 330 mA, 相应的电流密度也为 253 mA/mm<sup>2</sup>, 此时电压为 3.13 V。

另外 HV-LEDs 的开启电压大约为 42.6 V, 两种样品的 I-V 特性曲线趋势基本一致。

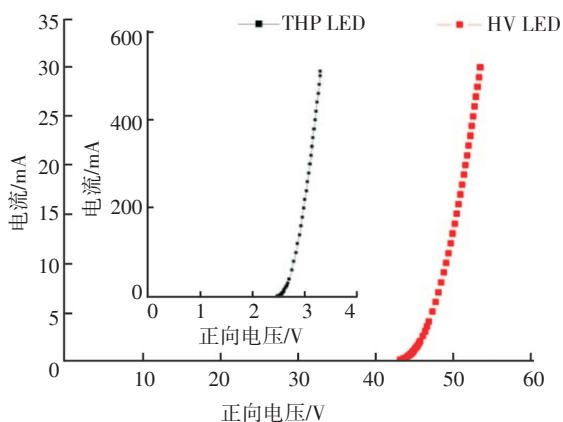


图4 HV-LEDs和THP-LEDs的I-V特性曲线

图5是HV-LEDs和THP-LEDs的LE以及输入功率随芯片电流密度的变化曲线。由图5可以发现, HV-LEDs和THP-LEDs效率发生Droop现象的起始电流密度基本一致, 但是HV-LEDs的LE明显要比THP-LEDs高一些。图5中右下角的插图中, 纵坐标代表两种样品的LE的差值百分比。可以发现, 随着电流密度的增大, 两种样品LE的差值百分比从9.3%逐渐减小到4.2%。另外右边纵坐标轴对应的两条曲线基本吻合, 表明两种样品在相同的输入电功率下, 虽然驱动电流不同, 但是它们的平均电流密度基本一致。

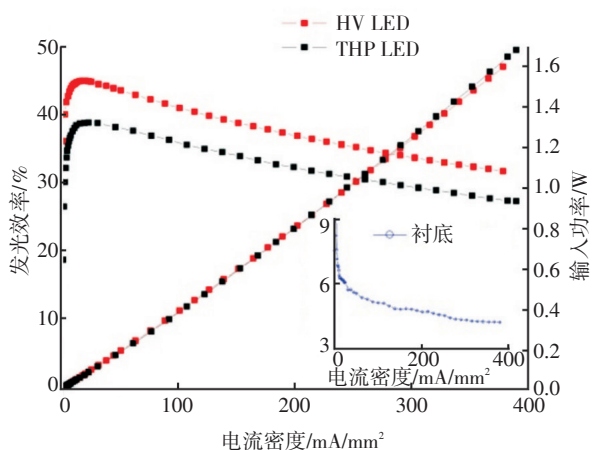


图5 HV-LEDs和THP-LEDs的LE以及输入功率随芯片电流密度的变化

## 2.1 电流密度分布对LE的影响

图6a和图6b是在显微镜下拍摄的两种样品在

输入功率均为1 W的情况下, 芯片表面的光分布图。可以发现, 在相同的输入功率下, HV-LEDs明显要比THP-LEDs亮一些。为了更清晰地观察芯片表面光分布, 用MATLAB软件首先读取图6a和图6b的RGB数据, 然后转化为对应的灰度数据, 最后再利MATLAB软件自带的pcolor函数绘制出图6c和图6d。

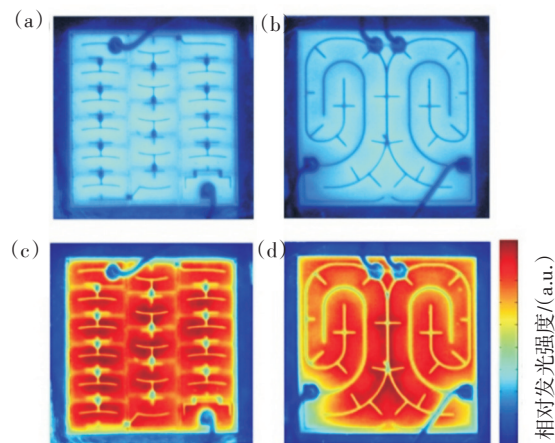


图6 (a) HV-LEDs和(b) THP-LEDs在1 W输入功率下的芯片发光强度图  
(c) HV-LEDs和(d) THP-LEDs经过MATLAB图像处理后的芯片灰度图

由图6可以清晰地发现, HV-LEDs小芯片之间的间隙的出光稍弱, 因为间隙位置本身并不发光, 它的出光主要受周围芯片的影响。另外比较图6c和图6d, 也可以明显的发现HV-LEDs小芯片上的光分布更加均匀, 说明HV-LEDs芯片表面的电流集聚效应更少, 即更加均匀的电流密度。同时很多资料也显示, 均匀的电流密度会产生更高的发光效率, 这也是图6a比图6b更亮的原因<sup>[13-14]</sup>。综上所述, 均匀的电流密度是HV-LEDs的LE高于THP-LEDs的原因之一。随着电流密度的增大直到饱和, 两种芯片表面电流密度均匀性差值变小则是引起LE差值逐渐变小的原因。

## 2.2 芯片间隙出光对LE的影响

发光效率角分布实验是在输入功率为1 W, 热沉温度为25℃下进行。图7是HV-LEDs和THP-LEDs的LE空间角分布以及它们的差值百分比。根据图7可以看出, HV-LEDs曲线是在THP-LEDs曲线之上的, 并且根据它们的差值百分比曲线可以发现, 随

着偏离 $0^\circ$ 角,两个样品的LE的差值从3.1%逐渐减小到几乎为0。也就是说,随着样品偏离 $0^\circ$ 角,HV-LEDs比THP-LEDs高出的那部分LE不见了。

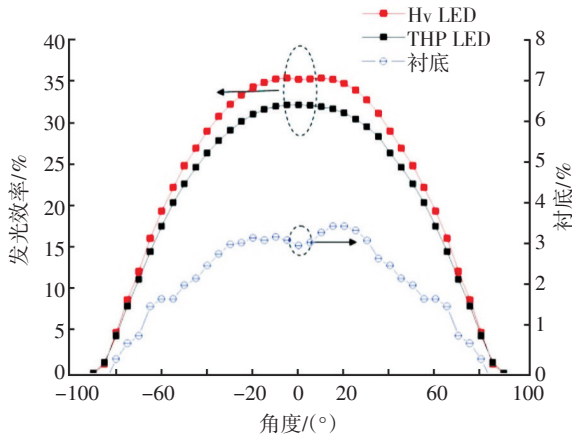


图7 HV-LEDs和THP-LEDs的LE空间角分布以及它们的差值百分比

可以认为原因是HV-LEDs的芯片间隙出光引起的。图8是HV-LEDs芯片间隙出光示意图。HV-LEDs的发光层MQW的发光是各向同性的,大致可以分为三部分:(1)上表面的光直接射出芯片;(2)下表面的光通过金属反光层(backside metal)反射出芯片;(3)少部分的光通过芯片两侧射出芯片。其中(1)部分的光和THP-LEDs是一样的,出光角大约为 $180^\circ$ ;(2)部分的光因为芯片间隙的存在而变得不同,例如在芯片间的沟槽中心选取一束光,这样根据芯片各层的尺寸计算,当它沿芯片最上层的边界出射时,角度大约为 $45^\circ$ (当角度小于 $45^\circ$ 时,这束光会重新进入芯片,芯片的平均折射率按2.4计算,容易求得这束光无法再从芯片上表面射出),蓝宝石层的折射率按1.76计算,可以得到这束光从金属反光层射出时的角度大约为 $24^\circ$ 。也就是说,沟槽中的这束光从芯片间隙射出的出光角度大约为 $48^\circ$ 。(3)部分的光从芯片侧面射出,从芯片间隙射出的出光角大约为 $90^\circ$ 。综上所述,HV-LEDs芯片间隙的出光角度远小于 $180^\circ$ ,芯片间隙的那部分出光会随着偏离 $0^\circ$ 角而显著变弱,而THP-LEDs因为不存在芯片间隙不会出现这个问题。在图5所示的测量两种样品发光效率的实验中,光纤探头都是正对着样品的。也就是说,芯片间隙的那部分出光引起了HV-LEDs的LE高于THP-LEDs。

所以实验和理论分析均证明,芯片间隙的出光也是造成HV-LEDs的LE高于THP-LEDs的主要原因之一。

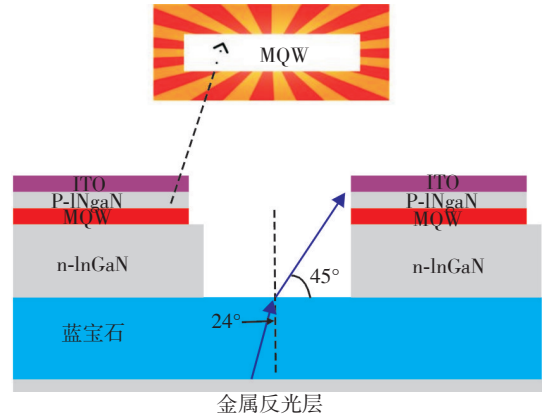


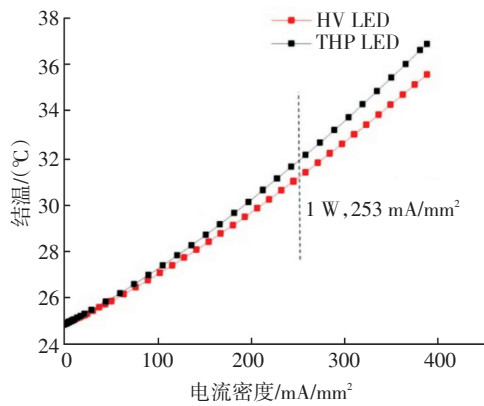
图8 HV-LEDs芯片间隙出光示意图

### 2.3 温度对LE的影响

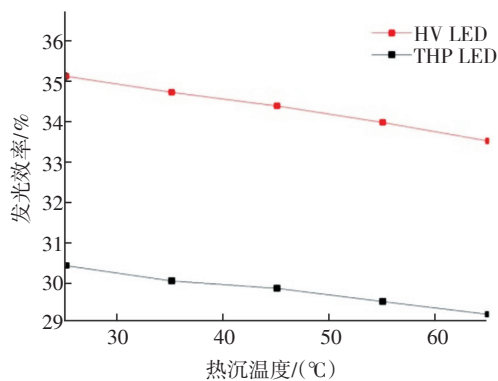
图9a为测量不同电流密度下两种样品的平均结温。该实验是在控制热沉温度为 $25^\circ\text{C}$ 的情况下利用T3Ster进行的。可以看出,在相同的电流密度下,即相同的输入功率下,HV-LEDs的平均结温比THP-LEDs要低。例如在1W的输入功率下,HV-LEDs的温升为 $6.3^\circ\text{C}$ ,THP-LEDs的温升为 $7^\circ\text{C}$ ,两种样品的结温相差 $0.7^\circ\text{C}$ 。下面分析原因,两种样品采用相同的封装结构,并且芯片的尺寸、材料都是一致的,可以说明它们的热阻是近似的,并且T3Ster实验也显示HV-LEDs热阻为 $9.8^\circ\text{C}/\text{W}$ ,THP-LEDs热阻为 $9.6^\circ\text{C}/\text{W}$ ,相差很小。但是因为相同的输入功率下,HV-LEDs比THP-LEDs有更高的LE,即更小的热功率,所以理论分析也可以证明HV-LEDs比THP-LEDs有更低的结温。

图9b的实验在输入功率1W下进行,比较了不同热沉温度下两种样品的LE的大小。可以发现,HV-LEDs和THP-LEDs两种样品在热沉温度从 $25^\circ\text{C}$ 变为 $65^\circ\text{C}$ 的过程中(近似的表示两种芯片的结温都升高了 $40^\circ\text{C}$ ),LE分别下降了大概1.6%和1.2%,也就是每升高 $1^\circ\text{C}$ ,两种样品的平均LE下降分别约0.04%和0.03%。实验证明,随着结温的升高,样品的LE会降低。但是因为两种样品的结温相差较小,所以结温不是HV-LEDs比THP-LEDs的LE高的主要原因。





(a) HV-LEDs 和 THP-LEDs 的结温随电流密度的变化



(b) HV-LEDs 和 THP-LEDs 的 LE 随热沉温度的变化

图9 两种样品的结温随电流密度的变化及两种样品的 LE 随热沉温度的变化

### 3 结论

针对 HV-LEDs 和 THP-LEDs 两种样品,研究电流密度分布、芯片间隙出光、结温等三个方面对发光效率的影响并进行了对比。两种实验样品采用相同的芯片尺寸、相同的芯片材料以及相同的封装结构,使实验更有可比性,结论更加有说服力。实验结果表明,更加均匀的电流密度,虽然少但是不能被忽略的芯片间隙出光是 InGaN 基的 HV-LEDs 的发光效率优于传统大功率 LED 的主要原因,另外温度升高都会引起二者发光效率的降低。在未来的实际应用中,逐渐改善 HV-LEDs 这三方面的特性,将使 LED 的发光效率进一步提高,得到更加广泛的应用。

### 参考文献

[1] SCHUBERT E F, KIM J K. Solid-state light sources get-

ting smart[J]. Science, 2005, 308(5726): 1274-1278.

- [2] 徐示波,吕毅军,陈焕庭,等. 基于二分法的 RGB-LEDs 配色研究[J]. 光电技术应用, 2009, 24(6): 7-10.
- [3] 王凯,吕毅军,高玉琳,等. LCD 显示器三维色域测量和不同色空间应用对比[J]. 光电技术应用, 2011, 26(6): 18-21.
- [4] LI Yun-li, HUANG Yi-ru, LAI Yu-hung. Investigation of efficiency droop behaviors of InGaN/GaN multiple-quantum-well LEDs with various well thicknesses[J]. IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, 2009, 15(4): 1128-1131.
- [5] Saguatti D, Bidinelli L, Verzellesi G, et al. Investigation of efficiency-droop mechanisms in multi-quantum-well In-GaN/GaN blue light-emitting diodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, 59(5): 1402-1409.
- [6] HWU F S, SUNG T H, CHEN C H, et al. A numerical model for studying multi-microchip and single-chip LEDs with an interdigitated mesa geometry[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 6600515-1-15.
- [7] 俞鑫,郭伟玲,樊星,等. 51 V GaN 基高压 LED 的热分析[J]. 发光学报, 2014, 35(2): 214-217.
- [8] 毕建峰,邹念育,高英明,等. 交流 LED 与高压 LED 的特性实验研究[J]. 半导体光电, 2013, 34(6): 975-978.
- [9] 韩禹,郭伟玲,樊星,等. 静电对 GaN 基高压 LED 特性的影响[J]. 光子学报, 2014, 43(8): 0823003-1-16.
- [10] 肖华,吕毅军,高玉琳,等. 基于积分球的蓝光 LED 荧光粉测试系统[J]. 光电技术应用, 2013, 28(4): 21-25.
- [11] 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 Electron Device Letters, 2011, 32(8): 1098-1100.
- [12] LI Y L, HUANG Y R, LAI Y H. Characteristics of GaN-based high-voltage LEDs compared to traditional high power LEDs[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(9): 844-847.
- [13] LEE Y C, HWU F S, YANG M C, et al. Experimental and numerical analysis of p-Electrode patterns on the lateral GaN-based LEDs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(15): 2643-2648.
- [14] KIM H, CHO J, LEE J W, et al. Consideration of the actual current-spreading length of GaN-based light-emitting diodes for high-efficiency design[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43(8): 625-632.