

# 电流阻挡层对大功率 LED 光电热特性的影响

杨 新, 郭伟玲\*, 王嘉露, 邓 杰, 郇建鹏, 孙 捷

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** LED 芯片作为 LED 光源的核心, 其质量直接决定了器件的性能、寿命等, 因此在内量子效率已达到高水平的情况下, 致力于提高光提取效率是推动 LED 芯片技术发展的关键一步。由于蓝宝石衬底具有绝缘特性, 传统 LED 将 N 和 P 电极做在芯片出光面的同一侧, 而芯片出光面上的 P 电极焊盘金属会遮挡吸收其正下方发光区发出的大部分光而造成光损失, 为改善这一现象并缓解 P 电极周围的电流拥挤效应, 本文设计制备了在 P 电极正下方的氧化铟锡(ITO)透明导电层和 p-GaN 之间插入 SiO<sub>2</sub> 薄膜作为电流阻挡层(CBL)的大功率 LED, 并与无 CBL 结构的大功率 LED 相比较。对未封装的有无 CBL 结构的 LED 在 350 mA 电流下进行正向偏压, 辐射通量, 主波长等裸芯性能测试, 结果显示两种芯片的正向偏压均集中在 3~3.1 V, 而有 CBL 结构的 LED 光输出功率有明显提升, 这是因为 CBL 阻挡了电流在 P 电极正下方的扩散, 减少流向有源区的电流密度, 故减小了 P 电极对光的吸收和遮挡, 且电流通过 CBL 引导至远离 P 电极的区域, 缓解了电极周围的电流拥挤。对两种芯片进行相同结构和工艺条件的封装, 并对封装样品进行热特性及 10~600 mA 的变电流光电特性测试, 得到两种器件的发光光谱及光功率等光学特性。结果表明随着电流增加, 两种器件的光谱曲线均发生蓝移, 且有 CBL 结构的 LED 主波长偏移量较无 CBL 结构 LED 少 10 nm, 可见有 CBL 结构的 LED 光谱受驱动电流变化的影响更小, 因此其显色性能更为稳定。而在小电流条件下, CBL 对器件光功率的影响不大, 随着工作电流的增大, CBL 对器件光功率的改善效果逐渐提升。在大电流条件下, 无 CBL 结构的 LED 结温更高, 正向电压更低, 随电流的增大二者之间的电压差增大。在 25 °C 的环境温度, 350 mA 工作电流下, 加入 CBL 结构使器件电压升高约 0.04 V, 但器件光功率最高提升了 9.96%, 且热阻明显小于无 CBL 结构器件, 说明有 CBL 结构 LED 产热更少。因此 CBL 结构大大提高了器件的光提取效率, 并使其光谱漂移更小, 显色性能更为稳定。

**关键词** 大功率 LED; 电流阻挡层(CBL); 光功率; 光谱; 热阻

**中图分类号:** O462.3    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)02-0368-05

## 引 言

发光二极管(LED)由于其高效节能, 体积小, 寿命长等优点, 被广泛应用于室内照明, 屏幕显示等领域。芯片的内量子效率和光提取效率决定了 LED 芯片的外量子效率, 随着宽禁带半导体材料 GaN 的迅速发展, LED 的内量子效率达到 80%, 甚至更高, 但其光提取效率却没有随着内量子效率的提高而显著的改善, 外量子效率仍然偏低。因此, 如何提高 LED 芯片的光提取效率成为现阶段 LED 芯片发展的主要问题。

目前, 通过改变芯片形状, 表面粗化<sup>[1]</sup>等方法可以达到

提高芯片出光效率的目的。此外, 在 LED 芯片的电极和 p-GaN 之间蒸镀一层氧化铟锡(indium-tin-oxide, ITO)也是改善电流扩展的主要方式<sup>[2]</sup>, 但由于 ITO 方块电阻比 n-GaN 更大, 使得 P 电极附近的电流仍然很大。为进一步提高 LED 的光提取效率, 刘梦玲等采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术, 在金属电极正下方的透明导电层和 p-GaN 之间沉积一层绝缘层介质(如 SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 等)作为电流阻挡层(current blocking layer, CBL), 以改善 LED 芯片内电流密度分布, 并减轻电流在 P 电极附近的拥挤现象, 从而提高光提取效率及芯片的整体性能<sup>[3]</sup>。2014 年, 马莉<sup>[4]</sup>等在常规的 AlGaInP 系 LED 基础上引入了电流阻挡层、DBR 反射镜和复合电流输运增透窗口层, 其中阻挡层为 SiO<sub>2</sub> 薄膜。在 20

收稿日期: 2018-12-25, 修订日期: 2019-04-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0403102)资助

作者简介: 杨 新, 1993 年生, 北京工业大学光电子技术省部共建教育部重点实验室硕士研究生 e-mail: youngxin0210@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: guoweiling@bjut.edu.cn

mA 电流下, 新型 LED 的光功率约为常规 LED 的 1.8 倍。陈才佳<sup>[5]</sup>等制备了 5 组不同的电极结构, 其中对比了有无 CBL 结构 LED 的光功率, SiO<sub>2</sub> CBL 使光功率提升了 4.9%, 电压增加了约 0.05 V。目前, 使用 PECVD 形成的 SiO<sub>2</sub> 层作为 CBL 是应用最为广泛的, 但仍有学者在研究工艺更为简单, 性能提升更高的 CBL 技术, Chiou<sup>[6]</sup>等采用氩等离子体处理技术, 选择性破坏了 P 电极下的 P-GaN 表面作为 CBL。Chiou 认为氩等离子体处理比 PECVD 技术制备 SiO<sub>2</sub> CBL 更为容易。然而尽管氩等离子体处理的 LED 提高了器件的光提取率, 但其抗 ESD 能力却是最差的。

本文采用 PECVD 在 P 电极正下方的 ITO 透明导电层和 p-GaN 之间沉积一层 SiO<sub>2</sub>, 并通过湿法腐蚀制备了具有与金属电极相同形状的电阻挡层, 并与无 CBL 结构的 LED 器件分别进行封装前的裸芯性能对比, 及封装后的热特性及变电流光电特性对比, 讨论分析了 CBL 结构对大功率 LED 光电热特性的影响。

## 1 实验部分

实验使用通过金属有机化合物化学气相沉淀(MOCVD)技术在蓝宝石衬底上生长的 InGaN/GaN 多量子阱外延片。首先外延片用丙酮和无水乙醇各煮沸两次进行清洗, 并用大量去离子水清洗, 氮气吹干, 以排除外延片上的油污等对后续工序的影响。然后使用 PECVD 在外延片上生长 SiO<sub>2</sub> 作掩膜, 光刻 mesa 图形, 湿法腐蚀 SiO<sub>2</sub>, 去胶在外延片上得到 mesa 图形, 再通过感应耦合等离子刻蚀(ICP)方法刻蚀 N 台面, 深度约为 1.2 μm。

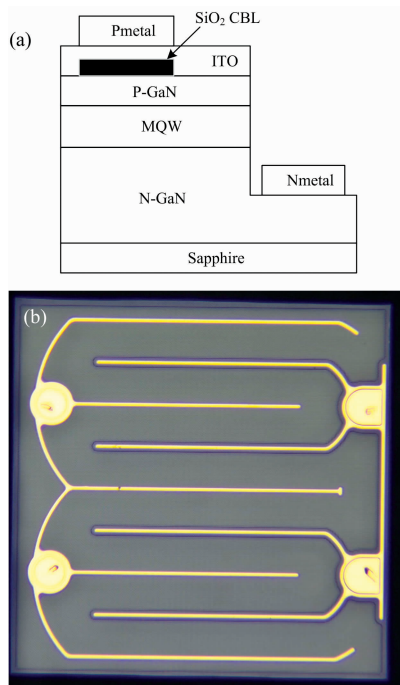


图 1 (a) LED 结构示意图; (b) 实际 LED 器件图

Fig. 1 (a) The schematic structures of LED;

(b) Actual LED device

其次在外延片上生长 100 nm 的 SiO<sub>2</sub>, 光刻并使用 BOE 湿法腐蚀出 CBL 图形, 为达到最好的输出光功率和光电转换效率提升, 制备的电阻挡层与电极形状相同<sup>[7]</sup>, 其宽度为 15 μm。腐蚀出 CBL 图形后, 在其上使用反转胶光刻出 ITO 图形, 采用溅射台溅射 120nm ITO 作为透明导电层, 超声剥离得到 ITO 的图形。芯片在氮气环境下 350 °C 快速退火 30 s, 使 ITO 与 P-GaN 之间形成良好的欧姆接触。在 P 台面和 N 台面上使用反转胶光刻电极图形, 溅射金属 Cr/Al/Cr/Pt/Au 后采用超声剥离形成金属电极, 极条宽度为 5 μm。最后将芯片进行减薄、划片、裂片, 并压焊测试。另一组除了无 CBL 结构外, 芯片制备工艺过程和结构均相同。器件示意图及实际器件如图 1 所示, 芯片尺寸规格为 32 mil × 32 mil (800 μm × 800 μm)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 封装前裸芯性能测试分析

将晶圆进行研磨、划片切成晶粒后, 得到有 CBL 结构的晶粒颗数 3 030 颗, 无 CBL 的为 3054 颗。将晶粒翻转至蓝膜上, 进行整体的光电参数测试, 主要测试了芯片的正向偏压 ( $V_F$ ), 亮度 (LOP) 及主波长 ( $W_D$ )。在测试电流 350 mA 下得到芯片分布如图 2 所示。

由图 2 可知, 无论有无 CBL 结构的 LED 芯片, 正向偏压均主要集中在 3~3.1 V 内, 其中无 CBL 结构的芯片占其总数的 93.58%, 有 CBL 结构的芯片有 91.95%。无 CBL 结构的 LED 芯片有 31.11% 光功率在 340~350 mW, 53.77% 在 350~360 mW 之间; 而有 CBL 的芯片光功率主要集中在 360~370 mW。据器件的结构, SiO<sub>2</sub> 电阻挡层位于 P 电极正下方, 透明导电层与 P-GaN 之间, 阻挡了电流朝 P 电极正下方的扩散, 减少流向 P 电极金属下有源区的电流密度, 故减小了由 P 电极对光吸收和遮挡造成的光损失。并通过 CBL 将电流引导至远离 P 电极的区域, 减小电极周围的电流拥挤<sup>[8]</sup>。可见 CBL 结构在 LED 芯片的光提取效率方面有明显的改善作用。而两种芯片的主波长均主要集中在 460~462.5 nm 之间, 说明插入 CBL 结构对 LED 芯片的出光品质基本没有影响。

### 2.2 封装后热特性及变电流光电特性测试分析

裸芯性能测试后将芯片封装在 SMD3535 的支架上制备白光 LED, 最后将其焊接在 5630 铝基板上。两种样品各随机选取 4 支, 利用浙大三色 LED-201 测试仪进行热特性及变电流光电特性测试。

首先在环境温度 25 °C, 350 mA 工作电流下, 测得样品的光电参数及热阻。4 支封装后无 CBL 结构 LED 器件的平均工作电压为 3.123 V, 有 CBL 结构 LED 为 3.16 V。二者较裸芯工作电压均略有增加, 这是因为将芯片封装后, LED 器件内部存在 PN 结-金属热沉-PCB 板这一路径的串联电阻<sup>[9]</sup>, 器件内部电阻大于裸芯内阻, 因此电压增加。同时由于插入 CBL 结构使 ITO 与 p-GaN 之间的欧姆接触面积减小, 增大了电流传输路径中的串联电阻, 有 CBL 结构的 LED 器件比无 CBL 结构高约 0.04 V。比较有无 CBL 结构器

件的光功率可知,有 CBL 结构的 LED 提升了 9.96%。

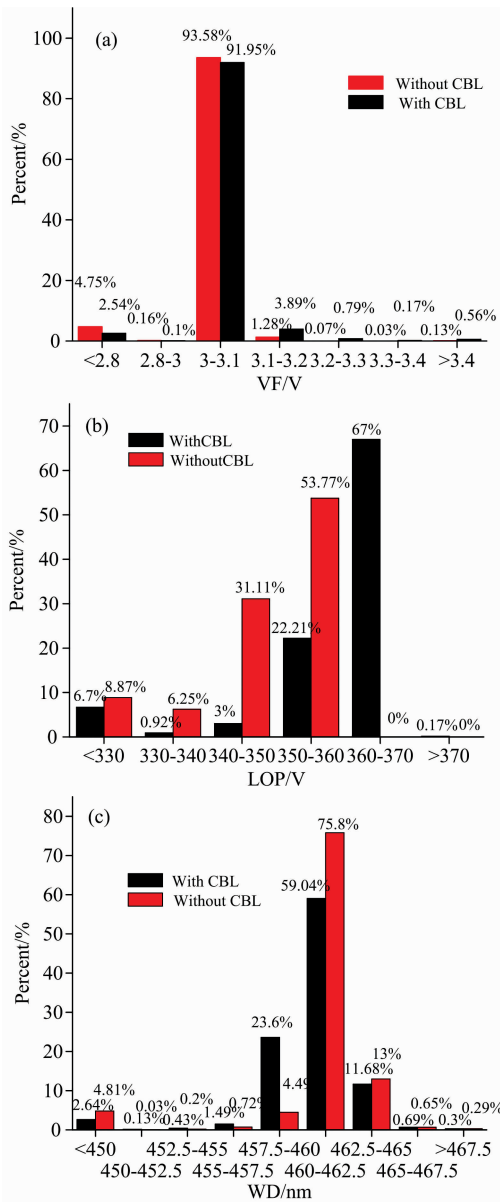


图 2 (a) 芯片电压分布统计图; (b) 芯片输出光功率分布统计图; (c) 芯片主波长分布统计图

Fig. 2 (a) Chip voltage distribution chart; (b) Chip light output power distribution chart; (c) Chip main wavelength distribution chart

图 3 为有无 CBL 结构 LED 的归一化热阻。图中可看出有 CBL 结构的 LED 热阻较无 CBL 器件低 22%，由上述器件结构可知，CBL 结构能缓解大电流下 P 电极附近的电流拥挤效应，使电流分布更均匀，减少器件发热<sup>[10]</sup>。因此 CBL 结构使器件产热大大减少，结温降低，热阻明显小于无 CBL 结构的 LED 器件。

对两种样品进行变电流光电参数测试，工作电流范围为 10~600 mA，在环境温度 25℃ 下测得发光光谱，光功率，电压参数变化趋势如图 4 所示。

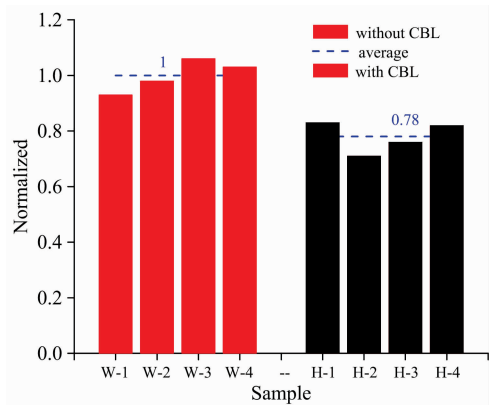
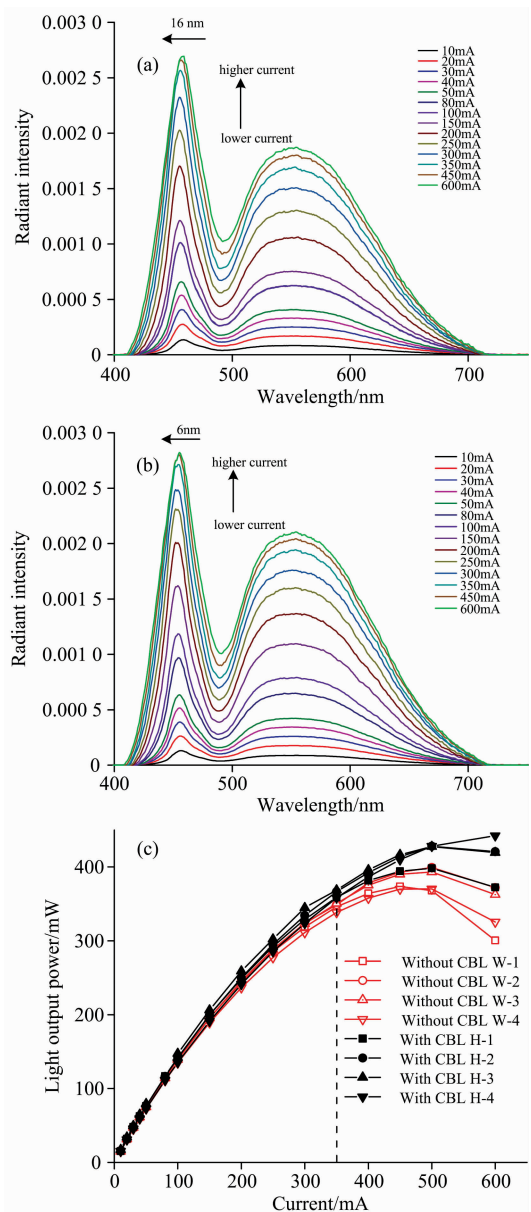


图 3 有无 CBL LED 归一化热阻

Fig. 3 Normalized thermal resistance of LED with CBL and without CBL



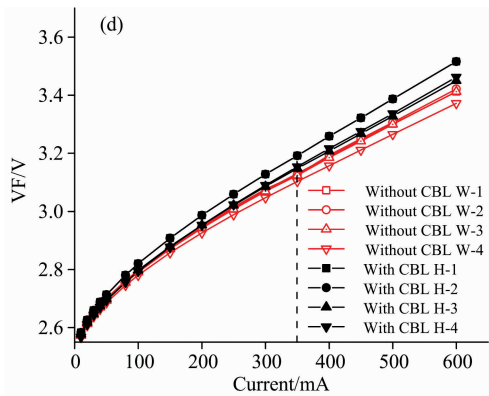


图 4 (a)无 CBL LED 光谱随工作电流的变化; (b)有 CBL LED 光谱随工作电流的变化; (c)光功率随工作电流的变化; (d)正向电压随工作电流的变化

Fig. 4 (a) Spectra of LED without CBL in different current; (b) Spectra of LED with CBL in different current; (c) Light output power with different current; (d) Forward voltage with different current

随着工作电流的变化,两种器件的光学性能均发生改变。图 4(a)和(b)显示有无 CBL 结构 LED 在不同驱动电流下的光谱曲线,从图可以看出光谱曲线随着电流的增加发光波长出现蓝移。这是因为当注入大电流时,高密度电子和空穴移向阱的不同方向,并产生与极化电场方向相反的电场,部分削弱量子阱中极化电场的强度,使发光波长发生蓝移<sup>[11]</sup>。而随着驱动电流的增加,有 CBL 结构的 LED 主波长由 563 nm 偏移至 557 nm,无 CBL 结构 LED 主波长由 561 nm 偏移至 545 nm,偏移量较有 CBL 结构 LED 多 10 nm,可见有 CBL 结构的 LED 光谱漂移更小,驱动电流变化对其显色性能影响程度也更小。

由图 4(c)可知,由于辐射复合几率随着电流增大而增大,因此两种器件的光功率均随着工作电流而增加,当电流增大到一定程度后,辐射复合趋于饱和,故辐射通量的增加趋势渐缓,最终趋于饱和甚至略有下降<sup>[12]</sup>。观察两种样品的

光功率变化差异,发现在小电流条件下两种器件的光功率基本相同,随着电流增大,CBL 结构对器件光提取效率的改善愈发明显。在工作电流为 350 mA 下,有 CBL 结构的 LED 光功率提高了 9.96%,而在 600 mA 下,提高了 23.7%。可见 600 mA 下 CBL 结构对光功率的提升更可观。

图 4(d)为正向电压随工作电流的变化趋势。由图可知两种器件的正向电压均随工作电流的增大而增大,且在小电流条件下,两种器件的正向电压相差不大,而随着电流的增加二者之间的电压差呈增大的趋势。由上述热阻分析可知,CBL 结构使器件电流分布更均匀,减少了器件发热,而正向电压随温度的升高而下降<sup>[13]</sup>。因此相同的大电流下,无 CBL 结构的 LED 结温更高,正向电压更低,且随电流的增大二者之间的电压差增大。

### 3 结 论

实验通过在 P 电极正下方的 ITO 透明导电层和 p-GaN 之间沉积一层 SiO<sub>2</sub> 薄膜作为电流阻挡层(CBL),制备了有无 CBL 结构的两种大功率 LED 器件,并对器件分别进行了封装前的裸芯性能对比,及封装后的热特性及变电流光电特性对比。实验表明小电流条件下两种器件的光功率基本相同,随着电流增大,CBL 结构对器件光提取效率改善效果愈加明显;两种器件的光谱曲线均随电流增大发生蓝移,且有 CBL 结构的 LED 光谱漂移更小,故其显色性能受电流影响更小。在 350 mA 电流下,无 CBL 结构的 LED 结温更高,正向电压更低,且随电流的增大二者之间的电压差增大;而有 CBL 结构 LED 热阻明显小于无 CBL 器件,说明其产热更少。可以看出 CBL 结构改善了 LED 芯片有源区电流密度分布,并降低了流向 P 电极正下方有源区的电流密度,从而减少 P 电极对光的吸收,减轻了电流在 P 电极附近的拥挤现象,减少器件的产热量,最终使器件的光提取效率得到了较大的改善,并使其光谱漂移更小,显色性能更为稳定。

致谢:感谢湘能华磊光电股份有限公司对本次实验的技术支持,及周智斌先生对此次实验的悉心指导。

### References

- [ 1 ] ZHAO Jian-guo, ZHANG Heng, SUN Zhi-jiang(赵见国,张恒,孙智江). China Plant Engineering(中国设备工程), 2016, (14): 139.
- [ 2 ] Lai W C, Lin C N, Lai Y C, et al. Opt. Express, 2014, 22(S2): A396.
- [ 3 ] LIU Meng-ling, GAO Yi-lin, HU Hong-po, et al(刘梦玲,高艺霖,胡红坡,等). Chinese Journal of Luminescence(发光学报), 2017, 38(6): 786.
- [ 4 ] MA Li, SHEN Guang-di, CHEN Yi-xin, et al(马莉,沈光地,陈依新,等). Acta Phys. Sin. (物理学报), 2014, 63(3): 037201.
- [ 5 ] CHEN Cai-jia, LI Kun, WANG Jing-hui, et al(陈才佳,李坤,王静辉,等). Semiconductor Technology(半导体技术), 2014, 39(5): 361.
- [ 6 ] Chiou Y Z, Chiang T H, Kuo D S, et al. Semiconductor Science and Technology, 2011, 26(8): 085005.
- [ 7 ] CAO Wei-wei, ZHU Yan-xu, GUO Wei-ling, et al(曹伟伟,朱彦旭,郭伟玲,等). Chinese Journal of Luminescence(发光学报), 2013, 34(4): 480.
- [ 8 ] LI Qiang, LI Yu-feng, ZHANG Min-yan, et al(李强,李虞峰,张敏妍,等). Chinese Physics B, 2016, 25(11): 117102.
- [ 9 ] Alexeev A, Martin G, Hildenbrand V. IEEE 2017 33rd Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM), 2017. 283.
- [ 10 ] LIU Bo, ZHENG Wei, LI Hai-yang, et al(刘波,郑伟,李海洋,等). China Illuminating Engineering Journal(照明工程学报),

2018, 29(2): 28.

[11] Cho C Y, Park S J. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7488.

[12] WANG Qiao, LIU Ning-yang, WANG Jun-jun, et al(王 巧, 刘宁扬, 王君君, 等). *Materials Research and Application(材料研究与应用)*, 2016, 10(3): 186.

[13] LIN Da-ru, LIU Qiang-hui(林达儒, 刘强辉). *China Light and Lighting(中国照明电器)*, 2017, (1): 14.

## Effect of Current Blocking Layer on Photoelectric Properties and Thermal Characteristics of High Power LEDs

YANG Xin, GUO Wei-ling\*, WANG Jia-lu, DENG Jie, TAI Jian-peng, SUN Jie

Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

**Abstract** As the core of LED light source, the quality of LED chip directly determines the performance, life and so on of the device. Therefore, the improvement of optical extraction efficiency is the key step to promote the development of LED chip technology when the internal quantum efficiency has reached a fairly high level. Due to the insulating property of sapphire, the N and P electrodes of normal LED are made on the same side of the light output surface of the chip. The P metal electrode on the light output surface absorbs most of the light emitted from the luminous region directly below it, and causes light loss. To improve this phenomenon and alleviate the current crowding around the P electrode, in this paper, we fabricated LED devices with SiO<sub>2</sub> current blocking layer(CBL)that was deposited between ITO transparent conductive layer and P-GaN, and another kind of LED without CBL. We tested voltage, light output power, main wavelength of the two kinds of chips without package under 350mA working current. The results showed that the forward voltage of the two kinds of chips are concentrated in 3~3.1V, while the light output power of the LED with CBL is obviously improved. CBL blocks the current from diffusing below the P electrode and reduces the current density flowing to the active region, thus reducing the absorption and shielding of light by the P electrode, and directing the current to the region far away from the P electrode through CBL, reducing current congestion around the electrode. Then the two kinds of chips were packaged in the same package structure and process conditions. The thermal characteristics and photoelectric properties of two samples were investigated under different current range from 10 to 600 mA, and the spectra and optical power of two kinds of devices were obtained. Results showed that main wavelength of the two samples blue shift with the increasing current, and the main wavelength blue-shifting of LED with CBL is 10nm less than the LED without CBL. It can be seen that the spectra of LED inserted CBL is less affected by the increasing current. Therefore, its color rendering properties is more stable. Under the low current, CBL structure has little effect on the optical power of the device. With the increase of current, the improvement effect of CBL on the optical power is improved gradually. Under the heavy current, the junction temperature of the LED without CBL is higher and the forward voltage is lower, and the voltage difference between the two kinds of devices increases with the increasing current. Under 25°C ambient temperature, 350 mA working current, the voltage of LED with CBL increases 0.04 V, but it improves optical power, the highest increase is 9.96%, and the thermal resistance is obviously smaller than the device without CBL structure, which indicates that the heat production of LED with CBL is less than the device without CBL structure. Therefore, the optical extraction efficiency of the device is improved by CBL structure. And the spectrum drifting is smaller and the color rendering properties is more stable.

**Keywords** Highpower LED; Current blocking layer(CBL); Light output power; Spectra; Thermal resistance

(Received Dec. 25, 2018; accepted Apr. 8, 2019)

\* Corresponding author