



## GaN基白光二极管漏电失效分析

左文财, 文尚胜, 周悦, 王翌鑫, 于婧雅, 方方

引用本文:

左文财, 文尚胜, 周悦, 等. GaN基白光二极管漏电失效分析[J]. *发光学报*, 2020, 41(11): 1431–1437.

ZUO Weng-cai, WEN Shang-sheng, ZHOU Yue, et al. Failure Mechanism Analysis of Reverse Leakage in GaN-based White LED[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(11): 1431–1437.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200211>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### GaN基白光LED可靠性研究与失效分析

Invalid Analysis and Dependability Research of GaN-based White LED

发光学报. 2018, 39(12): 1705–1713 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183912.1705>

### 电流拥挤效应与LED器件可靠性分析

Study of Current Crowding Effect and Reliability of LED Devices

发光学报. 2013, 34(8): 1051–1056 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133408.1051>

### 基于显微红外热点定位系统的发光二极管失效分析

Failure Analysis of Light Emitting Diode Based on Microscopic Infrared Hot Spot Location System

发光学报. 2019, 40(9): 1185–1191 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194009.1185>

### 人体静电放电对有机发光二极管的影响

Analysis of Organic Light Emitting Diode Under Electrostatic Discharge Stresses

发光学报. 2018, 39(2): 169–174 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183902.0169>

### 低偏振高功率1 310 nm超辐射发光二极管的液相外延生长

1 310 nm Polarization-insensitive High Power Superluminescent Diodes Fabricated by Liquid Phase Epitaxy

发光学报. 2015, 36(1): 69–74 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153601.0069>

文章编号: 1000-7032(2020)11-1431-07

## GaN 基白光二极管漏电失效分析

左文财<sup>1</sup>, 文尚胜<sup>1\*</sup>, 周悦<sup>1</sup>, 王翌鑫<sup>1</sup>, 于婧雅<sup>1</sup>, 方方<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广东 广州 510640;

2. 广东金鉴检测科技有限公司, 广东 广州 511300)

**摘要:** 芯片漏会对 LED 灯珠稳定性和寿命造成很大影响, 为此本文对 LED 样品的漏电失效机理进行了研究。在微光显微镜观测下, 样品的芯片正电极位置存在漏电异常。利用氩离子精密刻蚀系统对样品进行截面制样, 并采用扫描电镜进行观察, 分析可能导致漏电的原因。SEM 下观测到漏电样品芯片正极出现空洞, 且空洞对应的外延层出现较明显的裂缝。分析认为, 在焊接时电极产生空洞, 在后续高温回流焊、封装和使用过程中压力和应力集中在裂缝处, 使 GaN 外延层受损导致漏电。研究结果为 LED 芯片漏电检测手段、机理分析提供了良好的参考方案, 并为解决芯片裂缝和空洞问题提供了理论参考方向。

**关键词:** 发光二极管; 失效分析; 漏电; 静电

中图分类号: TN383<sup>+</sup>.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20200211

## Failure Mechanism Analysis of Reverse Leakage in GaN-based White LED

ZUO Weng-cai<sup>1</sup>, WEN Shang-sheng<sup>1\*</sup>, ZHOU Yue<sup>1</sup>, WANG Yi-xin<sup>1</sup>, YU Jing-ya<sup>1</sup>, FANG Fang<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Gold Medal Analytical & Testing Group, Guangzhou 511300, China)

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

**Abstract:** The failure mechanism of leakage in LED samples was studied. Since leakage has a negative impact on LED quality, it is necessary to analyze how the process works on the leakage. Two groups of failure samples were selected for study. Through testing, there are abnormal leakage at the positive electrodes under the emission microscope. The section of the sample was prepared by fully automated argon ion polishing system and observed by scanning electron microscope. SEM observation showed that in the chips there were holes in electrodes and obvious cracks in the epitaxial layer corresponding to the holes. According to the analysis, electrode cavity is generated during welding. In the subsequent high-temperature reflow welding, packaging also using process, pressure and stress are concentrated at the crack, which causes damage of GaN epitaxial layer and leads to electric leakage. It provides a good reference scheme for LED chip leakage detection means and mechanism analysis. What's more, it provides a theoretical reference direction for reducing chip cracks and holes.

**Key words:** light emitting diode; failure analysis; leakage; static

收稿日期: 2020-07-17; 修订日期: 2020-08-20

基金项目: 广东省科技计划(2017B010114001); 广东省扬帆计划(2015YT02C093); 中山市科技计划(2017C1011, 2018A10013); 惠州市科技计划(2019SX0111011)资助项目

Supported by Science and Technology Plan Programs of Guangdong Province(2017B010114001); Sail Plan Special Innovative Entrepreneurial Teams in Guangdong Province(2015YT02C093); Science and Technology Plan Programs of Zhongshan(2017C1011, 2018A10013); Huizhou Science and Technology Planning Project(2019SX0111011)

## 1 引 言

发光二极管(LED)作为新一代光源具有寿命长、驱动电压低、响应快、光谱范围宽、绿色环保等优点,其在照明、显示、可见光通讯等领域中均有广泛的应用和良好的发展前景<sup>[1-4]</sup>。理论上LED的寿命可达十万小时以上<sup>[5]</sup>,但现实生活中常常出现各种各样的LED提前失效的例子<sup>[6]</sup>。高可靠性是LED广泛应用的基础,因此对LED产品控制品质、提升可靠性的研究具有深远的意义<sup>[7-10]</sup>。

对LED可靠性分析常常需要先对其失效原因进行分析,漏电是LED失效因素中常见的一种。正常情况下,将LED接入反向电压,由于PN结的单向导通性,LED将截止,此时流过LED的漏电流极小,处于nA级别。当LED发生漏电时,其芯片亮度将明显下降甚至闪烁。漏电现象将进一步损害LED结构从而导致更严重的漏电现象,当LED漏电达到mA级时,芯片将彻底熄灭<sup>[11]</sup>。此外,由于单颗LED的光通量不足,现在应用中常采用LED阵列形式,在阵列中单颗LED芯片的漏电常常会引起整个阵列的寿命和可靠性下降<sup>[12]</sup>。因此对LED漏电原因进行分析具有很好的参考价值,通过了解漏电原因可以有效规避LED常见故障,并针对出现的失效问题改进生产工艺,从而提升器件的整体稳定性。

本文对失效GaN基LED进行了分析,结合数字源表、显微光分布系统和热点检测微光显微镜确定了失效原因并锁定了漏电位置。为寻找芯片漏电原因,采用扫描电镜(SEM)对焊点和引线进行了观察,采用防静电测试仪分析了试验样品抗静电能力并将击穿位置与漏电位置进行比对,进一步排除了漏电原因。然后对样品进行了聚焦离子束切割(FIB)和氦离子截面制样,发现实验样品存在电极空洞和外延层破裂现象。最后对样品失效机制进行了分析,提出了相应的解决办法。

## 2 实 验

通过前期实验了解到国内某公司一款2835型白光GaN基LED贴片后使用普遍存在亮度降低、闪烁乃至死灯的现象。为探究其失效原因,选取15枚两组该型号LED的灯珠作为实验样品,

其电参数分别为6000K(1.5W-450mA-3V)和3000K(0.5W-150mA-3V)。该芯片采用传统水平电极结构,其结构图如图1所示。实验过程中我们先对实验样品进行非破坏性检验,在封装完好的情况下对实验样品进行电性检测,验证漏电现象。为确定样品漏电位置,先对产品进行化学开封。使用道康宁LED硅胶溶解剂DY-711去除封装胶与荧光粉。将样品浸泡在DY-711溶液中,设置加热台加热温度140℃,加热时间为20~30min,待固化的封装胶全部溶解后,将样品取出,用蒸馏水清洗产品。

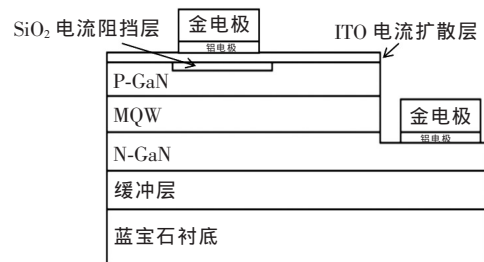


图1 实验样品结构图

Fig.1 Sample structure drawing

借助显微光分布测试系统(GMATG-M4)和THEMOS-1000型热点检测微光显微镜(Emission Microscope, EMMI)对样品进行漏电点定位。为了进一步确定芯片漏电原因,使用扫描电镜(日立公司Hitachi 3400 N型)对漏电芯片的焊点进行形貌和位置的观察,并采用EDS能谱分析仪(Horiba公司7021-HEDS)和SEM对该芯片键合引线进行分析。采用LED防静电测试仪(台湾焯钺仪器ZY910型)对实验样品进行人体放电(HBM)模式静电释放(ESD)测试,并对ESD测试后样品进行SEM检测。对开封后实验样品采用聚焦离子束电镜(Zeiss Auriga Compact型)对试

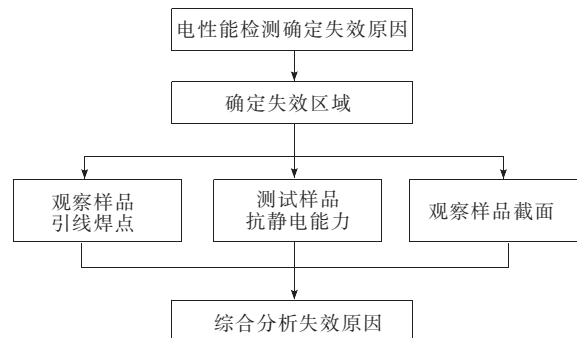


图2 检测流程

Fig.2 Testing process

验样品焊球边缘位置外延层进行切割并对截面分析。并采用精密刻蚀镀膜系统 (Gatan PECS II 685) 对漏电样品的电极进行氩离子截面制备, 分析其截面状况。最后综合各项结果分析样品漏电原因。

### 3 结果与讨论

电性检测中, 发现 LED 连通正向电压瞬间存在灯珠亮一下然后熄灭的现象, 采用 KEITHLEY 2430 数字源表对其在反向 5 V 电压下进行检测, 发现存在明显的漏电现象。

LED 芯片的电学特性和 PN 结类似, 如公式 (1)、(2):

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right), \quad (1)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \approx 0.026 \text{ V} \quad (T=300 \text{ K}), \quad (2)$$

其中  $I_D$  为流过 PN 结的电流,  $V_D$  为 PN 结两端电压, 当  $V_D < 0$  时,  $I_D$  近似等于反向饱和电流  $I_s$ , 且近似等于 0。本次实验中, 正常 LED 在 5 V 反向偏压下漏电流小于 100 nA, 而失效样品的漏电流达到 1 mA 以上, 图 3 为正常样品和失效样品的  $I-V$  曲线对比图。

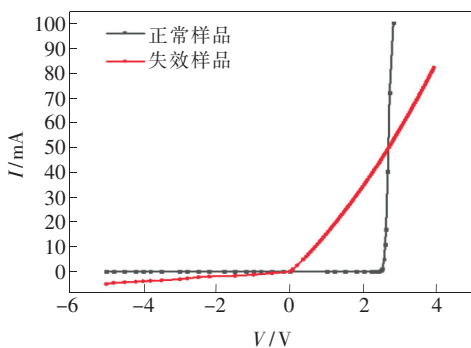


图 3 正常样品和失效样品的  $I-V$  曲线  
Fig. 3  $I-V$  curves of normal and failed sample

为确定漏电对 LED 芯片的影响, 观察 10 mA 恒定电流驱动下芯片光分布, 如图 4 所示, 可以观察到失效样品正极区域发光强度较弱, 该区域可能存在问题。图 5 为失效样品反向驱动下的热点微光显微镜图, 观测到芯片正极位置存在漏电异常。引起芯片漏电的原因有很多, 总体可分为生产工艺缺陷、静电击穿、芯片缺陷三大类<sup>[13]</sup>。为探究实验样品具体的漏电原因, 我们进行了更进一步的实验。

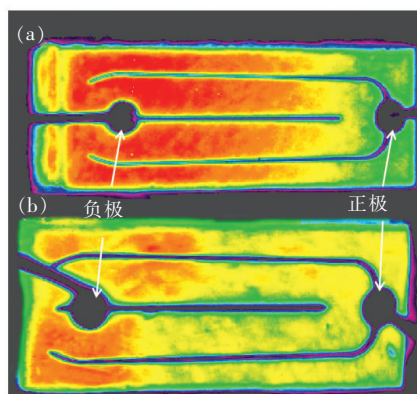


图 4 显微光分布图。(a) 失效样品; (b) 正常样品。  
Fig. 4 Light distribution. (a) Failure sample. (b) Normal sample.

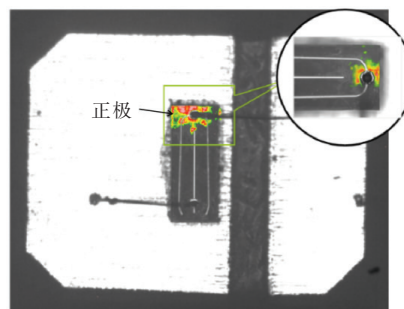


图 5 失效样品热点检测微光显微镜图  
Fig. 5 Hotspot emission microscope image of failed samples

#### 3.1 漏电原因分析

##### 3.1.1 引线焊点情况分析

首先, 为判断样品漏电是否与引线及焊点工艺相关, 对漏电样品引线焊点进行了观察分析。焊点处焊球大小厚度均匀, 仅有一焊点处焊球存在轻微偏焊现象, 但焊球边缘未观察到电极受到

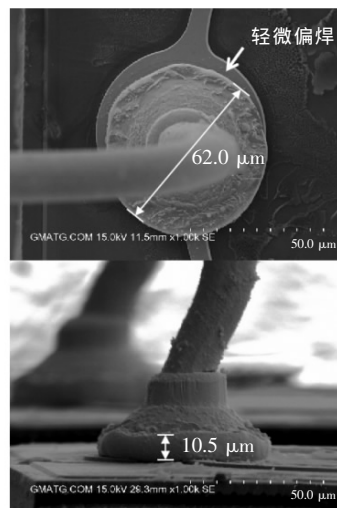


图 6 漏电样品焊点扫描电子显微镜图  
Fig. 6 SEM of solder joints of leakage sample



挤压飞溅,因此推测引线键合过程中焊球未出现对芯片电极压力过大的现象。通过 EDS 能谱分析仪和 SEM 对该芯片键合引线的分析如图 6 所示,该芯片采用直径为  $19\ \mu\text{m}$  金线,外观上无物理损伤和断裂且引线键合良好。因此初步推测漏电原因与引线和焊点无关。

### 3.1.2 抗静电能力分析

除了引线焊点键合不牢以外,静电击穿也可能造成芯片的漏电现象。由于静电场会使 LED 材料的缺陷态密度增大,强电流集中于某一个区域而导致该区域升温,该区域载流子浓度将显著增大并进一步提升区域温度,最终导致该区域过热形成熔融通道而漏电。漏电现象产生后将不断正反馈诱导 LED 逐渐发展为光衰、死灯<sup>[14]</sup>。采用 LED 抗静电测试仪对实验样品进行人体放电 (HBM) 模式 ESD 测试,初始测试电压设置为 500 V,并以 500 V 为 1 个电压递增档,由初始测试电压开始逐档往上递增,最大测试电压 10 kV。样品经过某一电压测试后,其性能出现下降则该电

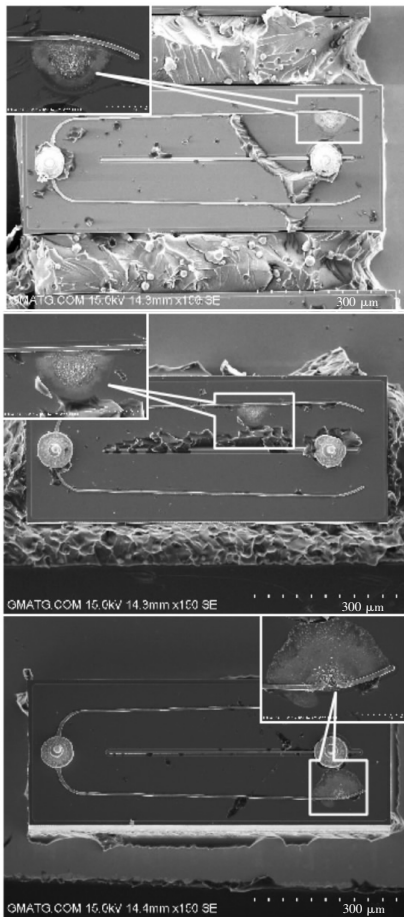


图 7 静电击穿处 SEM 图

Fig. 7 SEM of electrostatic breakdown

压为样品的耐受电压。

送检样品的最低耐受电压为 4 kV,部分样品可达 10 kV。参照美国国家标准协会 (ANSI)/静电放电 (ESD) 协会标准 S20.20-2007,可知这批样品符合耐受电压在 4~8 kV 的 3 A 抗静电等级,该实验样品抗静电能力强,难以受到静电击伤,但在极端环境下仍有一定的击穿可能。为判断芯片漏电现象是否与静电击穿有关,我们采用扫描显微镜对 ESD 测试后出现击穿的样品进行了观察,并将静电击穿位置与漏电位置进行比较,如图 7 所示,ESD 测试后样品金道附近出存在熔融击穿样貌,但与芯片漏电位置不重合。因此推断该类芯片漏电与静电击穿关联较小。

### 3.1.3 芯片内部形貌分析

芯片各层质量和形貌较差也可能造成漏电现象。为进一步寻找潜在的漏电原因,对解除封装后的漏电灯珠芯片的焊球边缘位置外延层进行 FIB 切割并分析。如图 8 所示,切割截面平整,未观察到空洞裂纹和粗糙颗粒,外延层形貌正常。因此初步推测漏电位置不在芯片表面,而位于芯片内部。

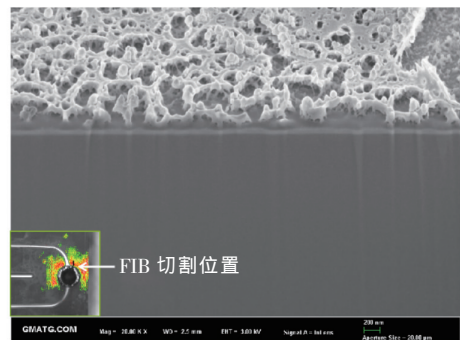


图 8 焊球边缘处聚焦离子束切割截面图

Fig. 8 Focus ion beam cutting cross section at the edge of welding ball

化学开封后去除漏电处的电极,采用 SEM 对解封装后样品进行观察,如图 9(a) 所示。结果显示芯片 P 电极下面发现一个明显的坑洞,外延层形貌受损。为排除偶然状况,对剩余漏电样品漏电极正电极处进行氩离子切割,并采用 SEM 观察其图像,如图 9(b)、(c) 所示。漏电芯片电极出现空洞,且空洞对应的外延层位置出现了较明显的裂缝。因此初步推测芯片漏电与外延裂缝和电极空洞有关。

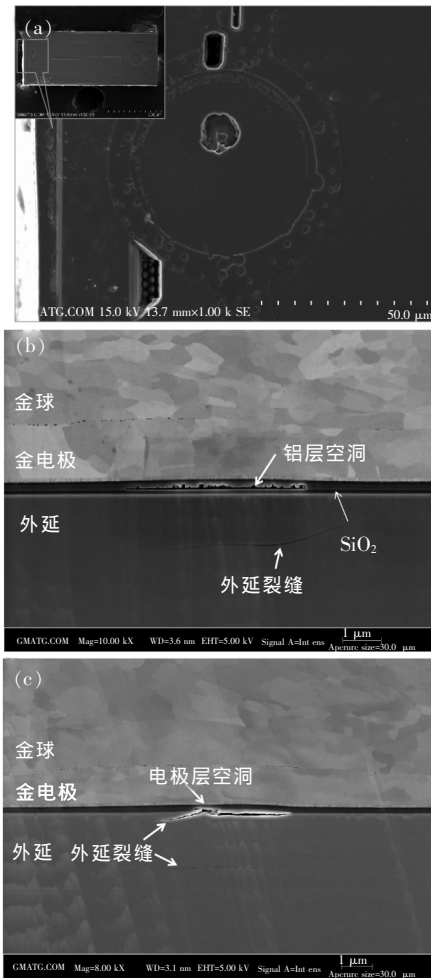


图 9 电极空洞和外延裂缝。(a) 电极下方空洞;(b) ~ (c) 漏电芯片正电极截面处 SEM 图。

Fig. 9 Electrode cavity and epitaxial layer crack. (a) Cavity beneath the positive electrode. (b) - (c) SEM image at the positive electrode cross section of the leakage chip.

### 3.2 失效机制分析

结合试验和厂商提供的信息,了解到该芯片采用金铝双层金属电极结构,该结构可以获得较低的接触电阻<sup>[15]</sup>,将具有高反射率的 Al 置于下层可反射照射在 Al 电极的部分光线,从而有效减少热量积累并提高光提取效率<sup>[16]</sup>。同时在 P 电极下部镀一层薄 SiO<sub>2</sub> 作为电流阻挡层,有利于电流均匀扩散至整个芯片。该结构在提升稳定性和寿命的同时也可以增大光的出射率<sup>[17]</sup>。

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] MUELLER-MACH R, MUELLER G O, KRAMES M R, *et al.*. High-power phosphor-converted light-emitting diodes based on III-nitrides [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2002, 8(2): 339-345.

漏电实验样品漏电处出现在 P 电极处,相比于 N 电极,实验样品 P 电极下方存在 ITO 和电流阻挡层 SiO<sub>2</sub>。这两层材料质地较脆,可能在焊线的压力和热应力下破裂产生裂缝<sup>[18]</sup>。在微小的裂缝产生后,在后续生产使用过程中,热应力和电应力常常集中在空洞和裂缝附近,压力热量分布不均会造成局部热膨胀差异过大,导致芯片界面开裂。随着应力的进一步集中,芯片外延层和电极还可能出现二级裂缝、屈曲、脱层等现象<sup>[19]</sup>,从而影响 GaN 外延层,最终导致 PN 结外延之间产生位错和缺陷形成漏电通道,造成 PN 结漏电<sup>[20]</sup>。

在芯片生产中出现大规模漏电失效的情况首先应当及时检查生产工艺流程中的焊接温度压力,优化工艺参数,并抽样送检。对于该类漏电问题,可以通过优化芯片结构进行解决,垂直结构的芯片可以在无需电流阻挡层的条件下帮助电流扩散均匀,并且在一定程度上可以改善接触状况<sup>[21]</sup>。此外,还可以使用透明导电的纳米银线<sup>[22]</sup>代替芯片中的 ITO 作为电流扩散层,其在不易产生裂缝的同时还能缓解不同层的应力,降低芯片失效概率。

## 4 结 论

实验分析结果显示,该漏电芯片漏电位置集中于 P 极,其对应位置的引线焊点形貌正常,抗静电能力良好。去除电极后发现其芯片外延层存在空洞,对其他漏电样品漏电电极处采用氩离子切割进行截面制样也观察到电极和外延层存在裂缝和空洞现象。结合实验结果推测,芯片电极层存在空洞缺陷,由于热膨胀系数不匹配,在封装和焊线压力中导致外延受损,在回流焊高温作用下,外延在应力作用下进一步开裂导致产品漏电。

LED 漏电是一个综合性较强的问题,但在生产生活中常被忽视或者归因于静电击穿。本文为 LED 漏电检测提供了一个较为良好的参考思路。对于 LED 漏电问题不仅要对其进行抗静电能力检测,还要留意引脚和芯片形貌,综合多方面提升,以改善 LED 漏电问题。

- [ 2 ] MENEGHINI M, TREVISANELLO L R, ZEHNDER U, *et al.*. High-temperature degradation of GaN LEDs related to passivation [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2006, 53(12):2981-2987.
- [ 3 ] 邓健志, 孙科壮, 程小辉. LED 路灯可见光通信模型的研究 [J]. *光通信技术*, 2020, 44(5):53-57.  
DENG J Z, SUN K Z, CHENG X H. Research on visible light communication model of LED street lamp [J]. *Opt. Commun. Technol.*, 2020, 44(5):53-57. (in Chinese)
- [ 4 ] VIREY E H, BARON N. Status and prospects of microLED displays [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, 2018, 49(1):593-596.
- [ 5 ] 张楼英, 周丽, 张家雨, 等. 大功率 LED 的光衰机制研究 [J]. *半导体技术*, 2009, 34(5):474-477.  
ZHANG L Y, ZHOU L, ZHANG J Y, *et al.*. Research on mechanism of high-power LED luminous attenuation [J]. *Semicond. Technol.*, 2009, 34(5):474-477. (in Chinese)
- [ 6 ] 薛正群, 黄生荣, 张保平, 等. GaN 基白光发光二极管失效机理分析 [J]. *物理学报*, 2010, 59(7):5002-5009.  
XUE Z Q, HUANG S R, ZHANG B P, *et al.*. Analysis of failure mechanism of GaN-based white light-emitting diode [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2010, 59(7):5002-5009. (in Chinese)
- [ 7 ] 邹水平, 吴柏禧, 万珍平, 等. 电-热应力对 GaN 基白光 LED 可靠性的影响 [J]. *发光学报*, 2016, 37(1):124-129.  
ZOU S P, WU B X, WAN Z P, *et al.*. Effect of current-temperature stress on the reliability of GaN LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(1):124-129. (in Chinese)
- [ 8 ] 肖承地, 刘春军, 刘卫东, 等. 基于加速性能退化的 LED 灯具可靠性评估 [J]. *发光学报*, 2014, 35(9):1143-1153.  
XIAO C D, LIU C J, LIU W D, *et al.*. Reliability assessment of LED lamp based on acceleration degradation test [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(9):1143-1153. (in Chinese)
- [ 9 ] 夏云云, 文尚胜, 方方. GaN 基白光 LED 电极的失效机制 [J]. *发光学报*, 2016, 37(8):1002-1007.  
XIA Y Y, WEN S S, FANG F. Failure mechanism analysis of negative electrode in GaN-based white LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(8):1002-1007. (in Chinese)
- [ 10 ] 董丽, 刘华, 王尧, 等. 紧凑型 LED 配光设计中光源模型可靠性研究 [J]. *光子学报*, 2014, 43(2):0222003-1-5.  
DONG L, LIU H, WANG Y, *et al.*. Reliability of light source modeling for distribution design on compact LED [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(2):0222003-1-5. (in Chinese)
- [ 11 ] 何昀, 陈亮, 吕卫文, 等. 电极结构对倒装 LED 芯片漏电的影响 [J]. *电子工艺技术*, 2017, 38(5):249-253.  
HE Y, CHEN L, LV W M, *et al.*. Influence of electrode structure on leakage current in LED flip chip [J]. *Electron. Process Technol.*, 2017, 38(5):249-253. (in Chinese)
- [ 12 ] 吴艳艳, 冯士维, 乔彦斌, 等. 电流拥挤效应与 LED 器件可靠性分析 [J]. *发光学报*, 2013, 34(8):1051-1056.  
WU Y Y, FENG S W, QIAO Y B, *et al.*. Study of current crowding effect and reliability of LED devices [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(8):1051-1056. (in Chinese)
- [ 13 ] 李芳, 夏琦. LED 漏电失效探讨及解决方案 [J]. *电脑知识与技术*, 2014, 10(20):4867-4869.  
LI F, XIA Q. Discussion and solution of LED leakage failure [J]. *Comput. Knowl. Technol.*, 2014, 10(20):4867-4869. (in Chinese)
- [ 14 ] 涂辛雅, 季军, 郑益民, 等. LED 对 MM 和 HBM 静电放电敏感性的研究 [J]. *半导体技术*, 2012, 37(11):894-899.  
TU X Y, JI J, ZHENG Y M, *et al.*. Research on LED sensitivity to the MM and HBM ESD stress [J]. *Semicond. Technol.*, 2012, 37(11):894-899. (in Chinese)
- [ 15 ] SCHMITZ A C, PING A T, KHAN M A, *et al.*. Metal contacts to n-type GaN [J]. *J. Electron. Mater.*, 1998, 27(4):255-260.
- [ 16 ] 康香宁, 章蓓, 胡成余, 等. 高反射率 p-GaN 欧姆接触电极 [J]. *发光学报*, 2006, 27(1):75-79.  
KANG X N, ZHANG B, HU C Y, *et al.*. Ohmic contact of high reflectivity on p-type GaN [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2006, 27(1):75-79. (in Chinese)
- [ 17 ] 王洪, 叶菲菲, 黄华茂, 等. 高亮度 LED 芯片的反射型电流阻挡层设计与实现 [J]. *光电子·激光*, 2012, 23(6):1077-1081.  
WANG H, YE F F, HUANG H M, *et al.*. Design and realization of reflective current barrier for high-brightness LED chips [J]. *J. Optoelectron. · Laser*, 2012, 23(6):1077-1081. (in Chinese)
- [ 18 ] 孙立野. 正装 LED 焊线不良问题研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2018.

- SUN L Y. *The Research of Wire Bonding Problem of Lateral Chip* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [19] 薛秀丽, 王世斌, 曾超峰, 等. 柔性基底上金属薄膜的失效行为及界面能测试方法研究进展 [J]. 材料导报, 2020, 34(1):1050-1058.
- XUE X L, WANG S B, ZENG C F, *et al.*. Failure behavior and test method of interface energy of thin metal films on flexible substrates: a review [J]. *Mater. Rep.*, 2020, 34(1):1050-1058. (in Chinese)
- [20] MENEHINI M, VACCARI S, TRIVELLIN N, *et al.*. Analysis of defect-related localized emission processes in InGaN/GaN-Based LEDs [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2012, 59(5):1416-1422.
- [21] LIU W J, HU X L, ZHANG J Y, *et al.*. Low-temperature bonding technique for fabrication of high-power GaN-based blue vertical light-emitting diodes [J]. *Opt. Mater.*, 2012, 34(8):1327-1329.
- [22] KIM S, HWANG B. Ag nanowire electrode with patterned dry film photoresist insulator for flexible organic light-emitting diode with various designs [J]. *Mater Des.*, 2018, 160:572-577.



左文财(1999 -),男,江西南昌人,在读本科生,主要从事 LED 相关的研究。  
E-mail: mswencai@mail.scut.edu.cn



文尚胜(1964 -),男,湖北黄冈人,博士,教授,2001 年于华南师范大学获得博士学位,主要从事植物照明技术、可见光通信技术的研究。  
E-mail: shshwen@scut.edu.cn