

## 具有新型电极结构的功率发光二极管

方奥琪, 郭伟玲\*, 许昊, 邓杰, 陈佳昕, 孙捷

北京工业大学光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124

**摘要** 为进一步提高 GaN 基发光二极管(LED)的光效,以改进电极结构为研究点,设计并制备了具有叉指型电极形状,并在 P/N 电极下刻蚀出电极孔的新型电极结构。该结构使金属电极在 P/N 电极孔处分别与 ITO 层和 N-GaN 层直接接触,进而提高了器件的电流扩展能力和发光效率。为了得到更优的电流阻挡层(CBL)结构、电极孔尺寸和电极孔间距,设计了 7 种不同的器件,并对其进行了光电性能测试。测试结果表明:在 150 mA 工作电流下,不连续 CBL 结构不能够有效改善 LED 的发光性能;P 电极孔尺寸对器件的性能影响不大,当 P 电极孔间距由 20  $\mu\text{m}$  增大为 30  $\mu\text{m}$  时,外量子效率(EQE)和光电转换效率(WPE)分别提升了约 5.0% 和 3.8%;当 N 电极孔尺寸由 17  $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  减小为 10  $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  时,EQE 和 WPE 分别提升了约 6.5% 和 3.0%;当 N 电极孔间距由 45  $\mu\text{m}$  减小为 40  $\mu\text{m}$  时,并未有效改善器件的发光性能。

**关键词** 光学器件; GaN 基发光二极管; 光电特性; 热可靠性

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1923003

## Power Light-Emitting Diode with Novel Electrode Structure

Fang Aoqi, Guo Weiling\*, Xu Hao, Deng Jie, Chen Jiaxin, Sun Jie

Key Laboratory of Opto-Electronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

**Abstract** In order to further improve the luminous efficiency of GaN-based light-emitting diodes (LEDs), a novel electrode structure with an interdigitated electrode and electrode holes etched under the P/N electrode is designed and fabricated, with the improvement of the electrode structure as the research point. In this structure, the metal electrodes are in direct contact with the ITO and the N-GaN layers at the P/N electrode holes respectively, so as to improve the current spreading capacity and luminous efficiency of the device. In order to obtain better current blocking layer (CBL) structure, electrode hole size and electrode hole spacing, seven different devices are designed, and their photoelectric properties are tested. The test results show that under the working current of 150 mA, the discontinuous CBL structure cannot effectively improve the luminescence performance of LEDs. The size of the P electrode hole has little effect on the properties of the device. When the spacing of the P electrode hole increases from 20  $\mu\text{m}$  to 30  $\mu\text{m}$ , the external quantum efficiency (EQE) and wall-plug efficiency (WPE) increase by about 5.0% and 3.8%, respectively. When the size of the N electrode hole reduces from 17  $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  to 10  $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ , the EQE and WPE increase by about 6.5% and 3.0%, respectively. When the spacing of the N electrode hole reduces from 45  $\mu\text{m}$  to 40  $\mu\text{m}$ , the luminescence performance of the device is not effectively improved.

**Key words** optical devices; GaN-based light-emitting diodes; photoelectric properties; thermal reliability

## 1 引言

作为一种固态光源, GaN 基半导体发光二极管(LED)因具有功耗低、寿命长和体积小的特点,被广泛应用于绿色照明、汽车照明、交通信号显示和高分辨率显示器等领域中<sup>[1-4]</sup>。自 GaN 基 LED 产生以来,随

着人们研究的深入和科学技术的发展, LED 的研发技术不断地得到创新和突破,其能效也得到了快速提升<sup>[5]</sup>。目前,白光 LED 主要采用蓝光 LED 芯片与掺杂钪铝石榴石(Ce:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, 简称 Ce:YAG)黄色荧光转换材料封装形成<sup>[6]</sup>。2008 年,沈光地等<sup>[7]</sup>发现具有优化的环形叉指电极结构的 GaN 基 LED 表面温度分

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-03-26; 录用日期: 2022-04-18

基金项目: 国家科技重大专项(2017YFB0403102)

通信作者: \*guoweiling@bjut.edu.cn

布比较均匀,证明了芯片电流扩展均匀可减小焦耳热的产生,进而增强器件的可靠性。2013年,Zhou等<sup>[8]</sup>提出了一种具有不连续的N电极的结构,通过感应耦合等离子体(ICP)刻蚀,暴露出不连续的N台面,形成一个多孔式的结构,该结构减少了电极对有源区的损耗,从而减少了光损耗。在注入电流为350 mA下,发光效率较传统LED电极结构提升了6.7%。2016年,Liu等<sup>[9]</sup>发现螺旋状环形结构电极的环间距越小,电流密度分布越均匀,在350 mA电流驱动下,电极环间距为146.25 μm的芯片具有最大的光电转换效率(26.8%)。2017年,吕家将等<sup>[10]</sup>采用叉指型电极下方插入电流阻挡层(CBL)的结构提高了LED的电流扩展能力。2020年,晁鹏飞等<sup>[11]</sup>发现将N电极形状改变为扇形结构能提高LED的出光效率,当输入电流为20 mA时,相比传统LED芯片出光效率提高了6.14%。虽然关于LED电极的研究很多,但是对电极仍需进一步优化,如P/N电极开孔的大小和间距的优

化。此外,还要研究CBL的连续性对电极性能的影响等问题。

为了进一步探究具有优化电极结构的功率LED的光电特性,本文设计并制备了7种不同电极结构的LED,并在此基础上进行了5组对照实验,通过变量分析的方法来比较CBL的连续性、P/N电极孔间距和P/N电极孔大小对LED光电特性的影响。

## 2 具有新型电极结构的LED的制备

样品的制备流程如图1所示:1)外延片清洗后ICP刻蚀出N电极台阶和电极孔;2)淀积SiO<sub>2</sub>,光刻和腐蚀得到CBL图形,电子束蒸发ITO薄膜并对其进行光刻;3)生长SiO<sub>2</sub>钝化层,并光刻腐蚀得到钝化层(PV层)图形;4)溅射Cr/Al/Ti/Pt/Ti/Pt/Au金属电极,通过剥离工艺形成电极图形<sup>[12]</sup>。其中,MQW代表多量子阱。具体工艺步骤的剖面示意图如图1所示。

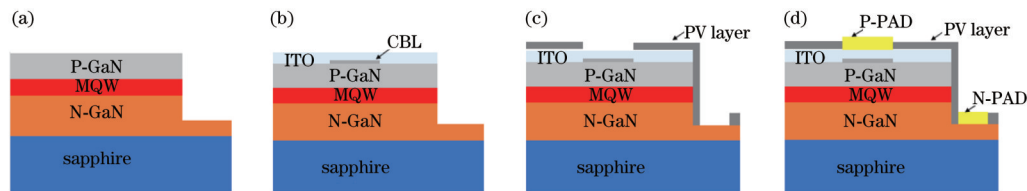


图1 GaN基LED的制备流程剖面示意图。(a)刻蚀N电极台阶;(b)淀积CBL并制备ITO层;(c)制备钝化层并刻蚀电极窗口;(d)制备金属电极

Fig. 1 Profile diagram of preparation process of GaN-based LED. (a) Etching N electrode step; (b) depositing CBL and preparing ITO layer; (c) preparing passivation layer and etching electrode window; (d) preparing metal electrode

本文制备的具有新型电极结构的LED的尺寸为700 μm×350 μm,是对蓝光LED芯片用黄色荧光粉封装形成的白光LED,其采用叉指型电极结构,CBL形状与P电极形状近似相同。不连续的P/N电极结构是通过在P/N电极上刻蚀出电极孔,从而使N电极(N-PAD)一部分溅射在N-GaN层上,另一部分溅射在钝化层(PV层)上,并使P电极(P-PAD)一部分与SiO<sub>2</sub>钝化层下方的ITO接触,一部分溅射在SiO<sub>2</sub>钝化层(PV层)上方形成的。不连续CBL结构是通过湿法刻蚀在原本与P电极形状近似的连续CBL上形成多个

间距、大小相同的间断点形成的。图2为不连续欧姆接触P/N电极在显微镜下的实物俯视图和CBL结构示意图。

为了分析新型电极结构对LED光电特性的影响并优化出最佳器件电极结构,设计并制备了7种具有不同电极结构的LED,其编号、参数和对照组的设置如表1所示。同时,进行了5组对比测试分析,即LED I和LED VII、LED I和LED VI、LED III和LED V、LED III和LED IV,以及7种具有不同电极结构的LED。

表1 器件的结构信息与编号

Table 1 Structure information and numbering of devices

Label	State of CBL	P electrode hole size / (μm×μm)	P electrode hole spacing / μm	N electrode hole size / (μm×μm)	N electrode hole spacing / μm
LED I	Discontinuous	5×15	20	17×15	37
LED II	Continuous	5×15	20	17×15	37
LED III	Discontinuous	5×15	25	10×5	45
LED IV	Discontinuous	5×15	25	10×5	40
LED V	Discontinuous	5×15	25	17×15	45
LED VI	Discontinuous	5×15	30	17×15	37
LED VII	Discontinuous	10×15	20	17×15	37

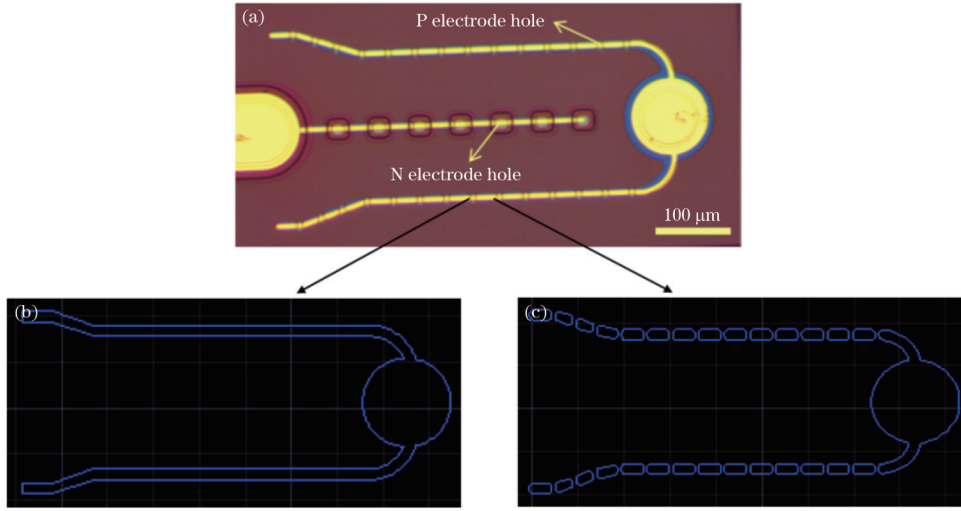


图 2 不连续欧姆接触 P/N 电极 LED 显微镜图像和 CBL 结构示意图。(a)不连续欧姆接触 P/N 电极 LED 显微镜图像;(b)连续 CBL 结构示意图;(c)不连续 CBL 结构示意图

Fig. 2 Microscope image of LED with discontinuous ohmic contact P/N electrode and structural diagram of CBL. (a) Microscope image of LED with discontinuous ohmic contact P/N electrode; (b) structural diagram of continuous CBL structure; (c) structural diagram of discontinuous CBL structure

### 3 实验结果

在环境温度为 25 °C,工作电流范围为 20~600 mA 的条件下,对设置的 5 组对照组进行变电流测试分析,其中每种 LED 采用了 4 个芯片结构不同的器件以使得实验结果更精确,在结果分析中采用 4 个 LED 的均值来分析性能的变化。

#### 3.1 不同 CBL 结构的 LED 的变电流测试分析

对常规(连续)CBL 结构 LED II 和不连续 CBL 结构 LED I 进行变电流测试,图 3 为其外量子效率(EQE)和光电转换效率(WPE)的变化曲线。在 150 mA 的工作电流下,LED I 相比 LED II 的 EQE 和 WPE 仅仅变化了 1.4% 和 0.3%。可以发现,不连续的 CBL 结构虽然能通过减少 SiO<sub>2</sub> 的用量来降低器件的电压,但是当 CBL 不连续时,通过 CBL 间隙所注入的载流子会在电极正下方的有源区中复合发光,并且这一部分光会被 P 电极吸收<sup>[13]</sup>,进而这部分光对整体的 EQE 与 WPE 的影响不大。

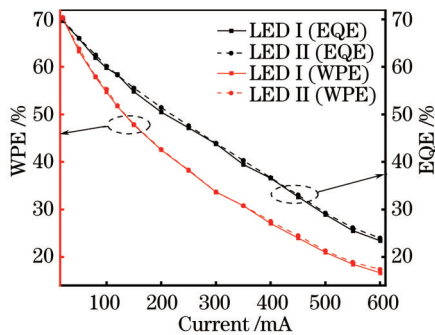


图 3 LED I 与 LED II 的 EQE 和 WPE 随电流的变化

Fig. 3 EQE and WPE of LED I and LED II varying with current

#### 3.2 具有不同 P 电极孔大小或间距结构的 LED 光电性能研究

##### 3.2.1 相同 P 电极孔间距、不同 P 电极孔大小的 LED 光电性能

对比实验 LED I 和 LED VII 的 P 电极孔尺寸分别为 5 μm × 15 μm 和 10 μm × 15 μm,测得的器件外量子效率(EQE)和光电转换效率(WPE)如图 4 所示。当 P 电极孔大小由 5 μm × 15 μm 增大到 10 μm × 15 μm,150 mA 电流下的 EQE 和 WPE 分别降低了约 1.2% 和 2.0%。综合误差考虑,认为 P 电极孔的尺寸对器件的综合性能影响不大。这是因为虽然 P 电极孔的尺寸增大能够使器件的 P 电极与 ITO 的欧姆接触面积增大,但相对于较小的 P 孔尺寸,增加的 P 孔尺寸反而对电流注入的均匀性起到负作用,而器件的电流注入更加均匀,可以减少器件有源区的产热<sup>[13]</sup>,所以综合来看 P 电极孔的尺寸对器件的发光性能影响不大。

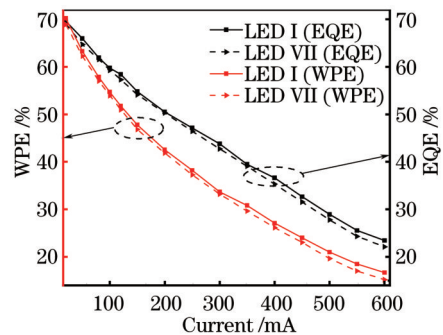


图 4 LED I 与 LED VII 的 EQE 和 WPE 随电流的变化

Fig. 4 EQE and WPE of LED I and LED VII varying with current

### 3.2.2 相同 P 电极孔大小、不同 P 电极孔间距的 LED 光电性能

对比实验 LED I 和 LED VI 的孔间距分别为  $20\ \mu\text{m}$  和  $30\ \mu\text{m}$ , 图 5 为该情况下 EQE 和 WPE 随电流的变化曲线。在  $150\ \text{mA}$  的工作电流下, 当 P 电极孔间距从  $20\ \mu\text{m}$  增大到  $30\ \mu\text{m}$  时, LED VI 比 LED I 的 EQE 和 WPE 分别提升了约  $5.0\%$  和  $3.8\%$ 。这是因为 P 电极孔间距由  $20\ \mu\text{m}$  增加到  $30\ \mu\text{m}$  时, 电流扩展均匀性更好, 即电流密度减小, 抑制了 LED 的 droop 效应, 此时发光性能有所提升。然而, 当 P 电极孔间距由  $20\ \mu\text{m}$  增加到  $30\ \mu\text{m}$  时, P 电极与 ITO 薄层的接触面积减小, 这会导致串联电阻增加, 进而可能会造成器件的热阻与结温升高, 但从器件的发光性能出发, 增加 P 电极孔的间距是一种有效提升 LED 性能的方法。

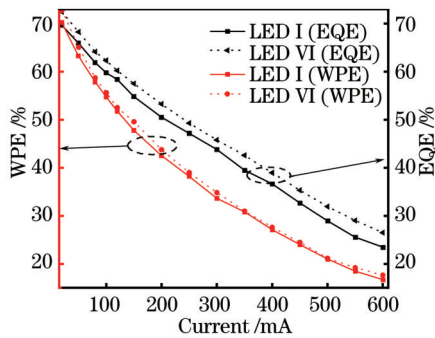


图 5 LED I 与 LED VI 的 EQE 和 WPE 随电流的变化

Fig. 5 EQE and WPE of LED I and LED VI varying with current

### 3.3 具有不同 N 电极孔大小或间距结构的 LED 光电性能研究

#### 3.3.1 相同 N 电极孔间距、不同 N 电极孔大小的 LED 光电性能

对比实验 LED III 和 LED V 的 N 孔尺寸分别为  $10\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  和  $17\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 。图 6 为两者 EQE 和 WPE 随电流的变化曲线, 随着 N 电极孔尺寸的减小, 有源区的有效发光面积在增大, LED III 的光电特性显著提升,  $150\ \text{mA}$  工作电流下的 EQE 和 WPE 相较 LED V 分别提升约  $6.5\%$  和  $3.0\%$ 。同时, N 孔尺寸的增加也有利于增大 N 电极与 N-GaN 层的欧姆接触面积, 使器件的电压降低, 并改善器件的结温和热阻。由此可见, 在一定程度上缩小 N 电极孔的尺寸, 是一种有效提升 LED 性能的方法。

#### 3.3.2 相同 N 电极孔大小、不同 N 电极孔间距的 LED 光电性能

对比实验 LED III 和 LED IV 的 N 孔间距分别为  $45\ \mu\text{m}$  和  $40\ \mu\text{m}$ 。图 7 为不同电流下两者的 EQE 与 WPE 的对比图。可以发现, 当 N 电极孔间距由  $45\ \mu\text{m}$  减小为  $40\ \mu\text{m}$  时,  $150\ \text{mA}$  的工作电流下 EQE 和 WPE 仅提升约  $1.8\%$  和  $1.4\%$ 。性能提升的原因主要由两方面构成: 减小 N 电极孔的间距后, 电极孔数量会增加一个, N 电极与 N-GaN 层的接触面积增大, 器件的阻抗减小, 进而使器件的电压降低, 热阻与结温也可能会

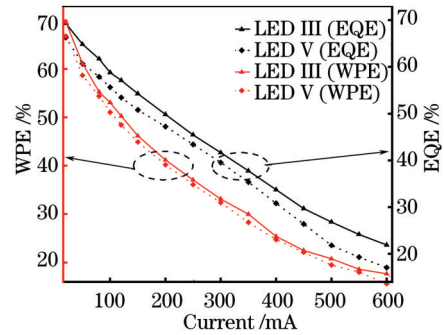


图 6 LED III 与 LED V 的 EQE 和 WPE 随电流的变化

Fig. 6 EQE and WPE of LED III and LED V varying with current

有所降低; N 孔数量的增加又会导致器件的有源区面积的损失。综合误差考虑, 认为 N 孔间距对改善器件发光特性的效果不明显。

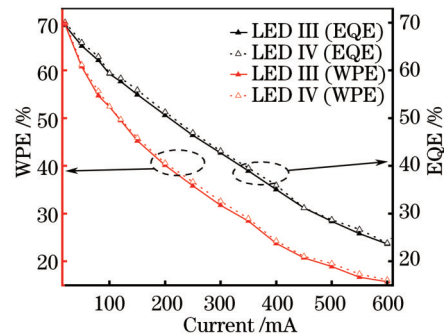


图 7 LED III 与 LED IV 的 EQE 和 WPE 随电流的变化

Fig. 7 EQE and WPE of LED III and LED IV varying with current

### 3.4 7 种不同结构 LED 的光效对比

为了获得 7 种 LED 器件的最佳结构, 图 8 为 7 种不同电极结构的 LED 的光效随电流的变化关系曲线。可以看出, CBL 的连续性、P 电极孔尺寸和 N 电极孔间距对器件的光电性能影响较小, 而改变 P 电极孔间距和 N 电极孔尺寸能够对 LED 的光电性能产生显著的影响。

## 4 结 论

设计并制备了不同电极形状的 LED, 并对其进行了光电热特性的测试分析研究。对 5 组对比实验数据进行作图和综合分析, 结果表明: LED 的电流阻挡层可以设计为与 P 电极形状相似的连续图形, 有利于提升器件的光电性能; P 电极孔尺寸的减小和 N 电极孔间距的减小在一定程度上可以提升 LED 性能, 但对总体光电性能的影响不大; P 电极孔间距和 N 电极孔尺寸的改变能够对 LED 的光电性能产生显著影响。在  $150\ \text{mA}$  的工作电流下: 当 P 电极孔间距从  $20\ \mu\text{m}$  增大到  $30\ \mu\text{m}$  时, 器件的 EQE 和 WPE 分别提升约  $5.0\%$  和  $3.8\%$ ; 当 N 电极孔尺寸由  $17\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  减小为  $10\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  时, 器件的 EQE 和 WPE 分别提升约  $6.5\%$  和  $3.0\%$ 。综合对比所制备器件的所有测试数

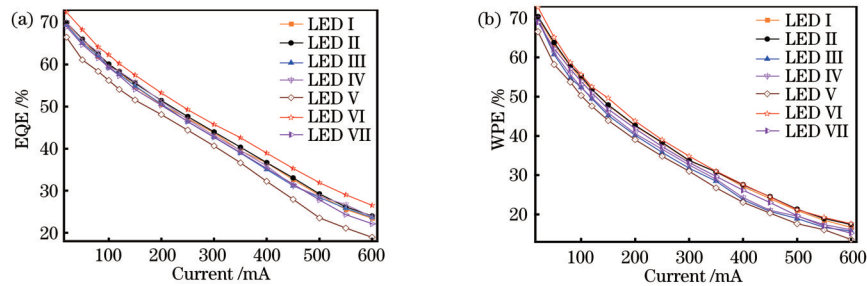


图 8 7 种不同电极结构的 LED 的 EQE 和 WPE 随电流的变化。(a) EQE; (b) WPE

Fig. 8 EQE and WPE of LED with 7 different electrode structures varying with current. (a) EQE; (b) WPE

据发现,改变 P 电极孔间距和 N 电极孔尺寸对 LED 光电性能的提升较为有效,而 P 电极孔尺寸和 N 电极孔间距对器件光电性能的影响较小。

#### 参 考 文 献

- [1] Tsai H Y, Su F C, Chou C H, et al. Wearable inverse light-emitting diode sensor for measuring light intensity at specific wavelengths in light therapy[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(5): 1561-1574.
- [2] Anthopoulou E, Doulos L. The effect of the continuous energy efficient upgrading of LED street lighting technology: the case study of Egnatia Odos[C]//Second Balkan Junior Conference on Lighting (Balkan Light Junior), September 19-21, 2019, Plovdiv, Bulgaria. New York: IEEE Press, 2019.
- [3] 江孝伟, 赵建伟, 武华. 高光提取效率倒装发光二极管的设计与优化[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 092302.  
Jiang X W, Zhao J W, Wu H. Design and optimization of flip-chip light-emitting diode with high light extraction efficiency[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 092302.
- [4] 班章, 梁静秋, 吕金光, 等. 微型倒装 AlGaInP 发光二极管阵列器件的光电性能[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0923001.  
Ban Z, Liang J Q, Lü J G, et al. Photoelectric characteristics of micro flip-chip AlGaInP light emitting diode array[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0923001.
- [5] 李梦梅, 胡小玲, 郭伟玲. GaN 基 LED 能效的研究进展[J]. 照明工程学报, 2020, 31(1): 8-15.  
Li M M, Hu X L, Guo W L. Research progress on energy efficiency of GaN-based LEDs[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2020, 31(1): 8-15.
- [6] 唐燕如, 赵帝, 易学专, 等. 电流与温度对蓝光 LED 和白光 LED 发光性能的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2103003.  
Tang Y R, Zhao D, Yi X Z, et al. Current and temperature effects on luminescence properties of blue and white LEDs[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2103003.
- [7] 沈光地, 张剑铭, 邹德恕, 等. 大功率 GaN 基发光二极管的电流扩展效应及电极结构优化研究[J]. 物理学报, 2008, 57(1): 472-476.  
Shen G D, Zhang J M, Zou D S, et al. Research on effects of current spreading and optimized contact scheme for high-power GaN-based light-emitting diodes[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(1): 472-476.
- [8] Zhou S J, Wang S F, Liu S, et al. High power GaN-based LEDs with low optical loss electrode structure[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 54: 321-325.
- [9] Liu L, Hu X L, Wang H. N-type electrode patterns design and device fabrication of GaN-based vertical structure LEDs[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(3): 338-345.
- [10] 吕家将, 郑晨居, 周圣军, 等. LED 电极结构优化设计与仿真计算[J]. 半导体光电, 2017, 38(4): 483-487.  
Lü J J, Zheng C J, Zhou S J, et al. Optimization design and simulation calculation of LED electrode structure[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(4): 483-487.
- [11] 晁鹏飞, 许英朝, 刘春辉, 等. GaN 基 LED 芯片电极结构的优化及制备[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 072301.  
Chao P F, Xu Y C, Liu C H, et al. Optimization and preparation of GaN-based LED chip electrode structure [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 072301.
- [12] 邓杰. 高效 LED 电极优化及器件制备技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.  
Deng J. Research on optimization of high energy efficiency LED electrode and fabrication technology[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.
- [13] 曹伟伟, 朱彦旭, 郭伟玲, 等. 不同形状的电流阻挡层对 GaN 基 LED 光效的影响[J]. 发光学报, 2013, 34(4): 480-483.  
Cao W W, Zhu Y X, Guo W L, et al. Improving luminous efficacy of the GaN-based light-emitting diodes by using different shapes of current blocking layer[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(4): 480-483.