

# GaN 基 LED 芯片电极结构的优化及制备

晁鹏飞<sup>1</sup>, 许英朝<sup>2,3\*</sup>, 刘春辉<sup>2</sup>, 吴天雨<sup>1</sup>, 李洋洋<sup>1</sup>, 刘建宁<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024;

<sup>2</sup> 厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024;

<sup>3</sup> 厦门理工学院福建省光电技术与器件重点实验室, 福建 厦门 361024

**摘要** 针对 GaN 基正装结构的 LED 芯片存在电流分布不均匀的问题, 对传统的电极结构进行优化设计。通过建立有限元分析软件 COMSOL 的三维仿真模型, 对传统结构和优化电极结构的芯片有源层电流分布进行了仿真, 结果表明优化后的芯片电流分布更均匀。然后制备了不同结构的 LED 芯片进行光电性能测试, 发现将 N 电极形状改变为扇形结构能提高 LED 的出光效率, 在输入电流为 20 mA 时, LED 芯片的输出光功率为 31.84 mW, 出光效率为 52.03%, 相比传统 LED 芯片出光效率提高了 6.14%。

**关键词** LED 芯片; 三维仿真模型; 电极结构; 出光效率

中图分类号 TN383+.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.072301

## Optimization and Preparation of GaN-Based LED Chip Electrode Structure

Chao Pengfei<sup>1</sup>, Xu Yingchao<sup>2,3\*</sup>, Liu Chunhui<sup>2</sup>, Wu Tianyu<sup>1</sup>, Li Yangyang<sup>1</sup>, Liu Jianning<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China;

<sup>2</sup> School of Optoelectronics and Communication Engineering, Xiamen University of Technology,  
Xiamen, Fujian 361024, China;

<sup>3</sup> Fujian Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Devices, Xiamen University of Technology,  
Xiamen, Fujian 361024, China

**Abstract** Aiming at the problem of uneven current distribution in GaN-based LED chip, the traditional electrode structure is optimized. By establishing a three-dimensional simulation model based on finite element analysis software COMSOL, the current distribution in the active layer of chip electrode with optimized structure and traditional structure is simulated respectively. The results show that the current distribution in the chip with optimized structure is more uniform. Then, LED chips of various structures are prepared and tested for photoelectric performance. Experimental results show that changing the shape of the N electrode to a fan-shaped structure can improve the light output efficiency of the LED. When the input current is 20 mA, the output light power of the LED chip is 31.84 mW, and the light extraction efficiency is 52.03%, which is 6.14% higher than that of the conventional LED chip.

**Key words** LED chips; three-dimensional simulation model; electrode structure; light extraction efficiency

**OCIS codes** 230.0250; 230.3670

## 1 引言

据统计, 全球照明用电量约占总用电量的

20%<sup>[1]</sup>。GaN 基半导体发光二极管(LED)因具有功耗低、寿命长、体积小等特点, 广泛应用于绿色照明领域<sup>[2-3]</sup>。相比倒装和垂直的 LED 芯片, GaN 基正装结

收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2019-10-30; 录用日期: 2019-11-06

基金项目: 福建省教育厅中青年教育科研项目资助省属高校专项(JK2017036)、福建省自然科学基金面上项目(2019J01876)、厦门市科技计划项目(3502Z20183060)、厦门市科技计划重大项目(3502ZCQ20191002)

\* E-mail: 376876168@qq.com

构 LED 芯片具有制备工艺简单、成本低、良率高等优点。由于在固态照明和背光产业主要考率成本与量产性,因此目前仍以传统的正装芯片为主。但正装结构 LED 芯片的 P 电极和 N 电极处于 LED 同侧,电流需横向传输,存在电流扩展不均匀导致的电流拥挤现象,从而造成 LED 的发光效率低,且影响芯片的使用寿命<sup>[4-5]</sup>。相比其他提高 LED 芯片发光效率的方法,如蒸镀反射镜<sup>[6]</sup>、光子晶体技术<sup>[7]</sup>和表面粗化技术<sup>[8]</sup>,优化芯片电极结构改善器件中电流分布均匀性的方法具有工艺简单、操作方便、性能高等优点,因此成为该领域内重要的研究方向。如潘华璞等<sup>[9]</sup>采用插指型电极结构的 LED 芯片使电流扩展更均匀、串联电阻更小。刘丽等<sup>[10]</sup>在垂直 LED 芯片中制备出具有螺旋状环形电极,提高了 LED 芯片的出光效率。

本文通过建立有限元分析软件 COMSOL 仿真模型<sup>[11-12]</sup>,模拟不同电极结构 LED 芯片的电流密度分布,根据电流分布的扩散区域优化 LED 芯片的电极结构,改善了芯片中电流密度分布的均匀性,从而提高芯片的出光效率。对制备的样品进行光电性能测试,结果表明,相比水滴状 N 电极结构的 LED 芯片,扇形 N 电极结构的出光效率有明显提升。

## 2 理论分析与仿真模型

### 2.1 理论分析

正装 LED 芯片内部电流路径示意图如图 1 所示。其中 A 和 B 分别表示电流从 P 电极流通到 N 电极传输路径的两种极端情况, $l$  和  $L$  分别为电流横向穿过透明导电层和 N-GaN 层的长度,芯片的结构由下到上依次为蓝宝石衬底(sapphire)、N-GaN 层、有源层(MQW)、P-GaN 层、透明导电层(ITO)。

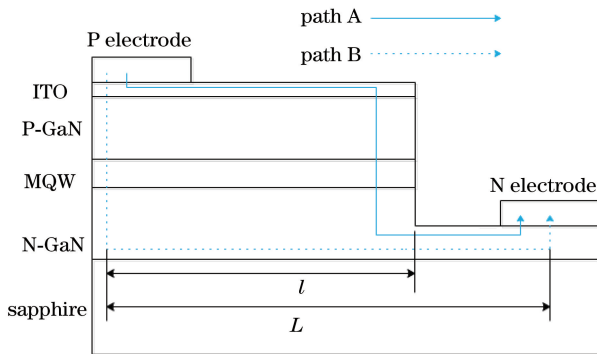


图 1 正装 GaN 基 LED 芯片内部电流路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of internal current path of a GaN-based LED chip

为了简化模型,忽略金属电极和芯片的接触电阻,将器件的总压降认为是横向压降和纵向压降之

和,电流的流动路径是 A 和 B 两条路径中的任意一条<sup>[13]</sup>,则器件中透明导电层的电压  $V_s$  可表示为

$$V_s = V_{s1} + V_{s2} = I_1 R_1 + I_2 R_2 = (J t_s \omega) \left( \frac{\rho_s l}{t_s \omega} \right) + (J l \omega) \left( \frac{\rho_s t_s}{l \omega} \right) = J \rho_s t_s + J \rho_s l, \quad (1)$$

式中, $V_{s1}$  和  $V_{s2}$  分别为水平和垂直方向的压降, $I$  为内部电流, $R$  为接触电阻, $J$  为电流密度, $\rho_s$  为透明导电层的电阻率, $t_s$  为透明导电层的厚度, $\omega$  为器件的宽度。通过 A、B 任意一条通路的总压降可表示为

$$V_T = V_s + V_P + V_j + V_N = J \rho_s (t_s + l) + J \rho_P (t_P + l) + V_j + J \rho_N (t_N + L), \quad (2)$$

式中, $V_P$  为 P-GaN 层的压降, $V_j$  为 P-N 结的压降, $V_N$  为 N-GaN 层的压降, $\rho_P$  和  $\rho_N$  分别为 P-GaN 层和 N-GaN 层的电阻率, $t_P$  和  $t_N$  分别为 P-GaN 层和 N-GaN 层的电阻率的厚度。电流可以从 A、B 任一路流进透明导电层,则通路 A、B 的压降可表示为

$$V_{TA} = J \rho_s l + J \rho_P t_P + V_j + J \rho_N (L - l), \quad (3)$$

$$V_{TB} = J \rho_P t_P + V_j + J \rho_N L. \quad (4)$$

由(3)式减去(4)式得

$$V_{TA} - V_{TB} = J (\rho_s - \rho_N) l. \quad (5)$$

考虑到电流流动规律,当通过路径 A 和 B 的压降相等,即  $V_{TA} = V_{TB}$  时,LED 器件内部电流的均匀性最好,因此要尽量使  $J (\rho_s - \rho_N) l$  的值趋于零。

因  $\rho_N$  为表征材料的自身参数,难以改变。而减小  $l$ ,意味着增大电极的长度和面积,会导致电极增大对光的吸收,提高 LED 芯片制作成本。因此要使  $J (\rho_s - \rho_N) l \approx 0$ ,可以考虑减小  $J$ ,通过改变电极结构的形状,减小 N 电极面积,增大透明导电层的面积最终减小  $J$ ,实验中通过这种方式达到提高电流均匀性的目的。

### 2.2 仿真模型

采用三维器件仿真软件模拟器件的特性,得到器件内部电流密度的分布情况,比较不同电极结构对电流分布的影响。采用 COMSOL 软件仿真不同电极结构 LED 芯片的电流密度分布,首先在稳恒电场下建立三维电学分析模型,将有源层等效为一个发光二极管,电流密度可用肖克莱曲线方程表示为<sup>[14]</sup>

$$J = J_s \exp \left( \frac{e V_i}{nkT} - 1 \right), \quad (6)$$

式中, $J_s$  为反向饱和电流密度, $V_i$  为二极管的压降, $e$  为电子电量, $k$  为玻尔兹曼常数, $T$  为热力学温

度,  $n$  为理想因子, 芯片有源层的电流密度符合电流连续性方程<sup>[14]</sup>

$$\nabla J(r) + \frac{\partial n}{\partial t} = 0, \quad (7)$$

式中,  $\nabla$  为梯度,  $J(r)$  为位置  $r$  处的电流密度,  $\partial n / \partial t$  为理想因子对时间的偏导数。

通入大电流时, 二极管的 I-V(电流-电压)特性呈线性关系, 可表示为

$$V_i = \rho_a d_a J(r) + V_a, \quad (8)$$

式中,  $\rho_a$ 、 $d_a$  和  $V_a$  分别为有源层的电阻率、厚度和接触电阻造成的正向匹配常数。忽略其他材料层的内部载流子复合, 各层材料的电流密度满足欧姆定律

$$J(r) = -\sigma \cdot \nabla \phi, \quad (9)$$

式中,  $\sigma$  和  $\nabla \phi$  分别为电导率和电势梯度。

模拟芯片的尺寸为  $150 \mu\text{m} \times 255 \mu\text{m}$ , 注入电流为 20 mA, 芯片结构参数如表 1 所示。

由于有源层和透明导电层的厚度非常小, 而影

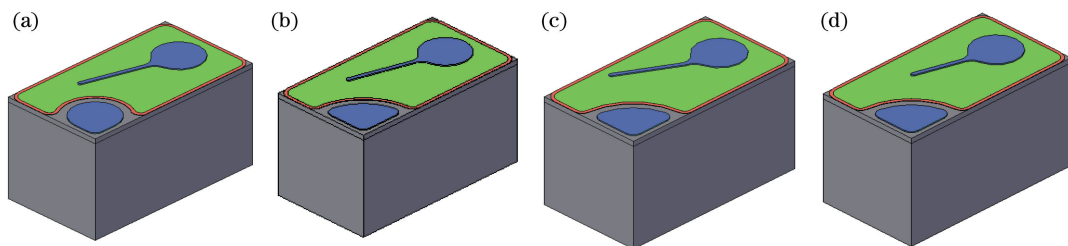


图 2 不同电极结构 LED 芯片的三维模型。(a)原始结构;(b)改变 N 极的结构;(c)改变 N 极、偏移 P 极的结构;(d)改变 N 极、缩短 P 极的结构

Fig. 2 Three-dimensional diagram of LED chips with different electrode structures. (a) Primitive structure; (b) change N electrode structure; (c) change N electrode and offset P electrode structure; (d) change N electrode and shorten P electrode structure

将四种仿真模型导入 COMSOL 中, 计算出的 LED 芯片有源层电流密度分布结果如图 3 所示。利用全范围内的电流密度分布分析芯片电流扩展情况, 可以得到各个位置的电流密度扩展状况<sup>[15]</sup>。从图 3 中可以看出, 电流从芯片 P 极到 N 极经过的路径较长, 因此在流通过程中越靠近 N 极电流密度越小。对于四种不同电极结构的 LED 芯片, 图 3(b) 中将 N 电极由水滴状改变为扇形时, 电流扩散的效果最好, N 电极附近区域的电流密度更均匀, 电流的扩散明显有所改善; 对比图 3(b) 和图 3(d) 可以看出, 缩短 P 电极的长度, 电流分布明显不均匀, N 电极区域密度较低, 原因是电流横向扩展所需的路径长度较大, 芯片内部电流难以从 P 型电极底下扩散开, 导致芯片出现局部过热现象, 从而影响芯片出光

表 1 COMSOL 电学模型的结构参数

Table 1 Structural parameters of COMSOL electrical model

Material	Thickness / $\mu\text{m}$	Resistivity / $(\Omega \cdot \text{cm})$
P-GaN	0.33	$5 \times 10^{-3}$
N-GaN	3.00	5
Electrode	1.65	$2 \times 10^{-8}$

响电流扩展的主要原因是 P-GaN 层存在电流的横向扩展。为了减小 COMSOL 中对 LED 芯片模型网格分割及有限元分析的难度, 建模时未画出有源层和透明导电层。

仿真设计的四种不同电极结构的 LED 芯片模型如图 2 所示。图 2(a) 为未做改变的电极结构, 作为对照组; 图 2(b) 仅改变 N 电极的结构形状, 目的是通过减小电极的面积, 增大有源层的面积, 提高发光效率; 图 2(c) 改变 N 电极结构形状的同时将 P 电极偏移, 目的是让 P 电极有更多区域接近 N 电极, 增大电流横向扩展的速度; 图 2(d) 改变 N 电极结构形状的同时缩短了 P 电极, 目的是减小电极对光线的吸收。

效率。对图 3(c), 当 P 电极向上稍微偏移时, P-N 电极的横向距离也有少许增加, 从而导致电流分布不均。

### 3 实验样品的制备

选取 4 片在同种条件下生长的外延片, 先采用电感耦合等离子 (ICP) 干法蚀刻设备 (Samco RIE-200P) 蚀刻出芯片的 N 型台面, 然后采用英国 OXFORD 公司制造的等离子体化学气相沉积 PECVD 设备 (plasmapro 800 plus) 在芯片表面沉积一层厚度为 140 nm 的  $\text{SiO}_2$ , 利用台湾富林科技的电子束蒸镀设备 (FU-16PEB) 在其表面蒸镀厚度为 33 nm 的 ITO, 然后通过电子束蒸镀 Cr/Al/Ti/Pt/Au 金属薄膜, 结合金属剥离技术制备 P 电极和 N

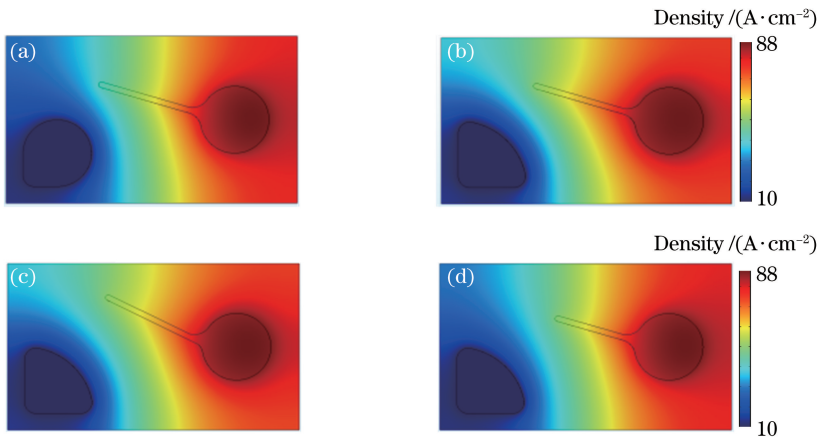


图3 不同电极结构的LED芯片有源层电流密度分布。(a)原始结构;(b)改变N极的结构;(c)改变N极、偏移P极的结构;(d)改变N极、缩短P极的结构

Fig. 3 Current density distribution of active layer of LED chip with different electrode structures. (a) Primitive structure; (b) change N electrode structure; (c) change N electrode and offset P electrode structure; (d) change N electrode and shorten P electrode structure

电极,随后在芯片表面沉积一层70 nm的 $\text{SiO}_2$ 作为钝化层,最后对蓝宝石衬底进行研磨和抛光后,通过切割和劈裂程序将其制为单颗芯片。

四种实验样品如图4所示,图4(a)为传统的LED芯片(样品A),不作改变,作为实验的对照组;图4(b)为改变N电极形状的LED芯片(样品B);图4(c)为改变N电极形状,且对P电极进行偏移的LED芯片(样品C);图4(d)为改变N电极形状,且对P电极进行缩短的LED芯片(样品D)。

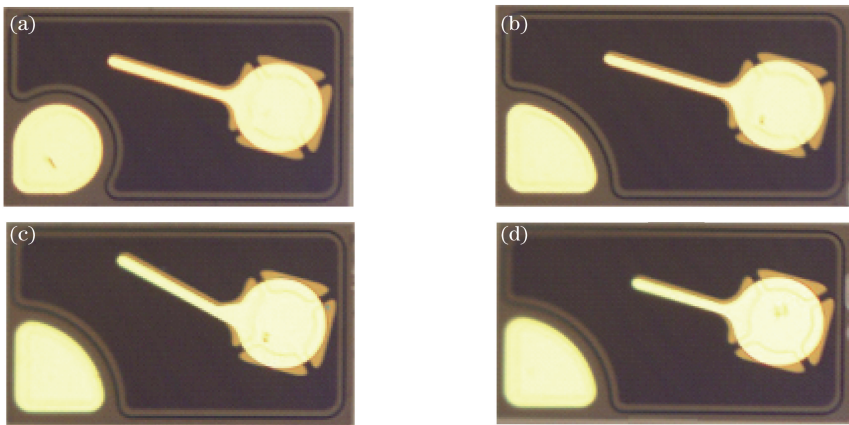


图4 制作后的样品实物照片。(a)原始结构;(b)改变N极的结构;(c)改变N极、偏移P极的结构;(d)改变N极、缩短P极的结构

Fig. 4 Photo of the sample after production. (a) Primitive structure; (b) change N electrode structure; (c) change N electrode and offset P electrode structure; (d) change N electrode and shorten P electrode structure

从四种不同电极结构的LED芯片中分别取出一颗光电性能正常的晶粒,通入20 mA电流后,对四种样品进行近场光学测试,结果如图5所示。

从图5可以看出,不同电极结构样品的发光强

## 4 实验结果与分析

为了直观体现出芯片发光的均匀程度,判断电极图案设计的优劣,明确改进方向,优化电极图案。使用广东金鉴实验室科技有限公司的近场光学测试设备(SIG-400)对LED芯片进行近场光学测试,通入一定电流后,从不同角度测试LED芯片的亮度分布,呈现出整体亮度分布及其光电性能数据<sup>[16]</sup>。

度分布与仿真的电流密度均匀性基本一致。由图5(b)图可以看出,改变N电极形状后,发光区域的面积有所增加,整体亮度也有所提升;对比图5(b)和图5(c)可以看出,P电极的偏移影响了电流

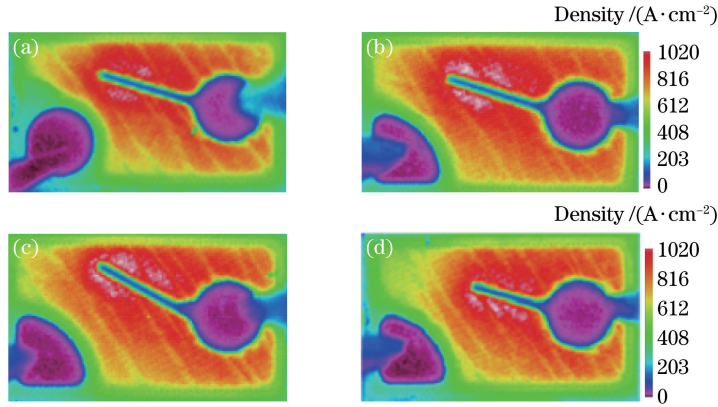


图5 样品的近场光学测试图。(a)原始结构;(b)改变 N 极的结构;(c)改变 N 极、偏移 P 极的结构;  
(d)改变 N 极、缩短 P 极的结构

Fig. 5 Near-field optical test chart of the sample. (a) Primitive structure; (b) change N electrode structure; (c) change N electrode and offset P electrode structure; (d) change N electrode and shorten P electrode structure

的扩散,导致临近 N 电极的区域亮度降低,但芯片整体亮度还是有所提升;从图 5(d)中可以看出,P 电极的缩短导致扩散到芯片尾端区域的电流较少,使末端的区域亮度较低,但整体的亮度较图 5(a)还

有所提升。  
将制备出的 LED 芯片通入 20 mA 的电流后,使用 FitTech 公司生产的晶圆点测机台(IPT6000)对每种样品大圆片上大约 80000 颗 LED 芯片的光学参数和电学参数进行测试,筛选剔除异常数据后,对数据进行统计平均,结果如表 2 所示,其中  $V_F$  为正向导通电压, $P_o$  为输出光功率, $\eta$  为出光效率, $\lambda$  为波长。

表 2 四组样品的测试数据

Table 2 Test data for four groups of samples

Sample	$V_F/V$	$P_o/mW$	$\eta/\%$	$\lambda/nm$
A	3.06	30.00	49.02	449.33
B	3.06	31.84	52.03	449.36
C	3.07	31.79	51.86	449.40
D	3.09	31.98	51.82	449.58

图 6 为四组样品正向电压(Forward voltage)随注入电流(Injection current)的变化特性曲线(I-V 曲线)。可以发现,四组样品的电压都随正向工作电流的增大而增大,当注入电流为 20 mA 时,样品 A, B, C, D 的工作电压分别为 3.06, 3.06, 3.065, 3.085 V,由高到低排列为样品 D>样品 C>样品 B=样品 A。样品 C 高于样品 B 的电压是由于电流分布不均导致串联电阻增大引起的,与仿真结果一致,在 N 电极结构不变的情况下缩短 P 电极或偏移 P 电极都会影响电流的扩散,导致电流分布不均匀。

图 7 为四组样品的输出光功率随注入电流的变

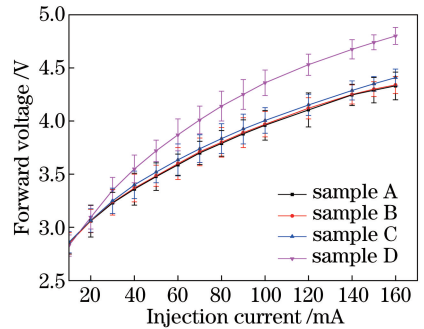


图 6 四种样品的 I-V 特性曲线

Fig. 6 I-V characteristics of four samples

化特性曲线(I-P 曲线)。可以看出,在输入电流在 0~120 mA 范围时,四组样品的输出光功率都随着输入电流的增加呈上升趋势;继续增大电流后,四组样品的输出光功率达到饱和并开始缓慢下降,这是由于通入大电流时,芯片尺寸过小,出现了电流拥挤。当输入电流为 20 mA 时,样品 B, C, D 相比样品 A 的输出光功率均有所提升,分别提高 6.13%, 5.97%, 6.58%,主要原因是 N 电极改为扇形结构后增加了 LED 芯片的出光面积;样品 D 相比样品 B 的输出光功率高,原因是 P 电极缩短减少了电极对光线的吸收,从而提高了芯片的输出光功率;而样品 B 相比样品 D 的出光效率高,是因为缩短 P 电极时,P-N 电极的横向距离增大,导致串联电阻增大,即正向导通电压增大,从而降低了出光效率,因此缩短 P 电极,虽然增大了输出光功率,但降低了出光效率;样品 B, C, D 相比样品 A 的出光效率分别提升了 6.14%, 5.79%, 5.71%,其中,样品 B 的出光效率提升最多,主要由于电极的分布更加合理,电流扩散均匀,利于芯片的整体出光。

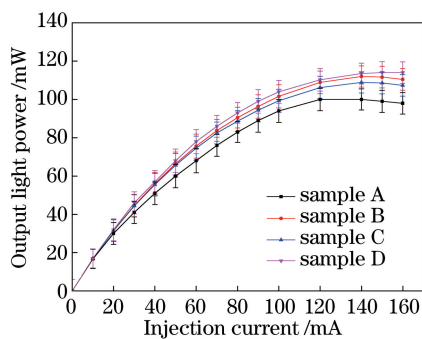


图7 四种样品的 I-P 特性曲线

Fig. 7 I-P characteristics of four samples

## 5 结 论

通过 COMSOL 软件仿真了不同结构 LED 芯片有源层的电流密度分布,发现相比普通结构的 LED 芯片,优化电极结构后的 LED 芯片表面的电流分布更均匀,且 N 电极为扇形结构的 LED 芯片改善效果最明显。制作了不同结构的四种样品,测试其光学参数和电学参数,实验结果表明,输入电流为 20 mA 时,只将 N 电极改变为扇形结构的 LED 芯片性能最好,输出光功率为 31.84 mW,出光效率为 52.03%,比普通结构 LED 芯片出光效率提高了 6.14%。实验结果与仿真一致,这表明了可通过优化电极结构改变电流分布提高芯片的出光效率。

## 参 考 文 献

- [1] Bergh A, Craford G, Duggal A, et al. The promise and challenge of solid-state lighting [J]. *Physics Today*, 2001, 54(12): 42-47.
- [2] 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.  
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.
- [3] 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.  
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.
- [4] Huang S J, Fan B F, Chen Z M, et al. Lateral current spreading effect on the efficiency droop in GaN based light-emitting diodes [J]. *Journal of*

*Display Technology*, 2013, 9(4): 266-271.

- [5] 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.  
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.
- [6] Nakada N, Nakaji M, Ishikawa H, et al. Improved characteristics of InGaN multiple-quantum-well light-emitting diode by GaN/AlGaIn distributed Bragg reflector grown on sapphire [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(14): 1804-1806.
- [7] Chen X L, Kong F M, Li K, et al. Study of light extraction efficiency of flip-chip GaN-based LEDs with different periodic arrays [J]. *Optics Communications*, 2014, 314: 90-96.
- [8] Liu M. Study of the mechanism of LED efficiency enhancement by periodical nano-scale structures[D]. Jinan: Shandong University, 2017: 80-82.  
刘萌. 纳米尺度周期结构提高 LED 发光效率机制的研究[D]. 济南: 山东大学, 2017: 80-82.
- [9] Pan H P, Huang L W, Li R, et al. Finite element model of GaN based LED and the optimization of the mesa structure[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2007, 28(1): 114-120.  
潘华璞, 黄利伟, 李睿, 等. GaN 基 LED 电流扩展的有限元模型及电极结构优化[J]. *发光学报*, 2007, 28(1): 114-120.
- [10] 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.  
刘丽, 胡晓龙, 王洪. GaN 基垂直结构 LED 的 N 型电极结构设计及芯片制备[J]. *发光学报*, 2016, 37(3): 338-345.
- [11] Tan J T, Zhang S F, Qian M C, et al. Effect of graphene/ZnO hybrid transparent electrode on characteristics of GaN light-emitting diodes [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(11): 114401.
- [12] Qian M C, Zhang S F, Luo H J, et al. Simulation on effect of metal/graphene hybrid transparent electrode on characteristics of GaN light emitting diodes [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(10): 104402.
- [13] Kim H, Park S J, Hwang H, et al. Lateral current transport path, a model for GaN-based light-emitting diodes: applications to practical device designs [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(7): 1326-1328.

- [14] Tsai P Y, Huang H K, Sung C M, et al. Reducing heat crowding in InGaN/GaN flip-chip light-emitting diodes with diamond-like carbon heat-spreading layers [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2016, 6(11): 1615-1619.
- [15] Kumar S, Singh S, Lunia A K, et al. Optimization of n-electrode pattern for p-side down vertical InGaN/GaN blue light emitting diodes [J]. Physica Status Solidi (a), 2014, 211(9): 2134-2141.
- [16] Lin T H, Wang S J, Tu Y C, et al. Improving the performance of power GaN-based thin-film flip-chip LEDs through a twofold roughened surface [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2016, 45: 69-75.