

## GaN 基微缩化发光二极管尺寸效应和阵列显示\*

郜建鹏 郭伟玲† 李梦梅 邓杰 陈佳昕

(北京工业大学, 光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124)

(2020 年 2 月 27 日收到; 2020 年 5 月 28 日收到修改稿)

设计制备了不同大小的单颗微缩化发光二极管 (Micro-LED) 和 Micro-LED 阵列. 其中, 单颗 Micro-LED 尺寸为 40—100  $\mu\text{m}$ , 其电极结构为共 N 极, P 极单独引出; 阵列像素数量为  $8 \times 8$ , 被动驱动结构, 像素大小为 60  $\mu\text{m}$ . 器件制备过程中使用厚光刻胶作掩膜, 刻蚀 N 型 GaN 外延片至衬底, 形成隔离槽. 通过优化电极结构和厚度, 提高了 P 电极在隔离槽爬坡处的可靠性; 使用现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 对 Micro-LED 被动阵列进行了驱动显示. 对于不同尺寸的单颗 Micro-LED 进行了电学、光学、热学等方面的测试分析. 结果表明: 随着尺寸的减小, Micro-LED 所能承受的电流密度越大; Micro-LED 与普通蓝光 LED 相比具有较大的  $k$  系数, 并且随着尺寸的减小,  $k$  系数的数值增大, 热稳定性不如传统蓝光 LED. FPGA 可以实现对 Micro-LED 被动阵列的良好驱动.

**关键词:** 微缩化发光二极管, 尺寸效应,  $k$  系数, 被动驱动

**PACS:** 73.61.Ey, 73.40.-c, 73.90.+f, 73.43.Cd

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200305

## 1 引言

微缩化发光二极管 (Micro-LED) 相比有机发光二极管 (OLED)、液晶显示器 (LCD) 具有响应速度快、对比度高、亮度高、使用寿命长等优势, 在显示领域的应用优势明显. 由于 Micro-LED 尺寸小, 因此可以制备成高像素密度 (PPI) 的显示面板, 在增强现实 (AR)、虚拟现实 (VR) 等领域也有着巨大发展空间. 因此对 Micro-LED 的研究显得十分重要.

以蓝光 LED 为例, 普通小功率 GaN 蓝光 LED 尺寸为 6 mil  $\times$  8 mil (约为 150  $\mu\text{m}$   $\times$  200  $\mu\text{m}$ ), 驱动电流为 10—30 mA. 而 Micro-LED 尺寸普遍小于 100  $\mu\text{m}$   $\times$  100  $\mu\text{m}$ , 随着 Micro-LED 尺寸的减小, 尺寸效应越来越明显. 2010 年, Gong 等<sup>[1]</sup>研究了 400 nm InGaN LED 尺寸对 LED 光输出、光谱位移、自加热的影响. 2012 年, Tian 等<sup>[2]</sup>制造了尺寸为 105—106  $\mu\text{m}$  的蓝光 LED, 并研究了尺

寸效应与 Droop 效应的关系. 2017 年, Olivier 等<sup>[3]</sup>研究了尺寸效应对辐射和非辐射复合的关系, 并发现 LED 的尺寸对 Shockley-Read-Hall Recombination (SRH) 影响很大. 对俄歇复合没有影响. 2018 年, Zhan 等<sup>[4]</sup>通过开尔文探针力显微镜 (KPFM) 和微光致发光等测试技术, 验证了在多量子阱 (MQWs) 区域, 小尺寸 Micro-LED 比大尺寸 LED 拥有更好的应力缓解和更低的极化程度.

应用方面, Micro-LED 在显示领域发展迅速, 相比阴极射线显像管 (CRT)、LCD、OLED 这些传统显示面板技术, Micro-LED 可以直接作为发光像素制作成显示面板. Micro-LED 阵列结构分为主动驱动 (positive) 结构和被动驱动 (passive) 结构, 郜建鹏和郭伟玲<sup>[5]</sup>总结了关于 Micro-LED 驱动结构、彩色化等技术. 2000 年, Jin 等<sup>[6]</sup>制作了尺寸为 12  $\mu\text{m}$ , 像素间距为 50  $\mu\text{m}$  的 Micro-LED 阵列. 接着出现了 Micro-LED 被动显示阵列技术<sup>[7-9]</sup>, 将 Micro-LED 用于显示. Liu 等<sup>[10-13]</sup>和 Deng 等<sup>[14]</sup>

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFB0403100, 2017YFB0403102) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guoweiling@bjut.edu.cn

也在主动驱动阵列和倒装基板方面成果很多. 对于被动驱动结构, Choi 等<sup>[15]</sup>使用电感耦合等离子体 (inductively coupled plasma, ICP) 刻蚀方法, 实现了  $128 \times 96$  数量的 Micro-LED 阵列像素隔离; Guo 等<sup>[16]</sup>使用“两步刻蚀法”优化了被动驱动 Micro-LED 阵列中 ICP 刻蚀工艺.

由于 Micro-LED 尺寸很小, 与传统 LED 相比, 其在光学、电学、热学方面有怎样的特点, 尺寸的变化对 Micro-LED 的影响如何, 这些都是本文研究的问题.

本文使用现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 开发板对 Micro-LED 被动阵列进行驱动显示, 其中开发板核心芯片为 Altera 公司的 EP4 CE10 F19 C8 芯片. 驱动采用逐行点亮方式. 行施加扫描选通信号, 列同步施加显示数据信号, 其中扫描所有行所需时间为 320 ns.

## 2 样品制备

本文采用商用 GaN 外延片, 其中 P 型 GaN 层厚为 43 nm, Mg 掺杂浓度为  $7 \times 10^{19}$ , 有源区厚为 150 nm, N 型 GaN 层厚 2.3  $\mu\text{m}$ , Si 掺杂浓度为

$2.6 \times 10^{19}$ , 缓冲层厚为 3.4  $\mu\text{m}$ . 首先, 使用 ICP 刻蚀外延片至 N 型 GaN 层, 形成不同尺寸的 Micro-LED N 面台阶; 然后再使用厚光刻胶做掩膜, ICP 刻蚀 N 型 GaN 至蓝宝石衬底形成单元隔离; 接着溅射锡氧化物半导体透明导电膜 (ITO), 用湿法腐蚀法腐蚀 ITO 并退火; 然后通过蒸镀剥离方法制备 N 电极 (Ti/Au); 使用等离子体增强化学的气相沉积 (PECVD) 制备  $\text{SiO}_2$  绝缘层后使用湿法刻蚀方法腐蚀 P-GaN 和 N 电极 Pad 上的绝缘层, 露出电流扩展层和 N 电极 Pad; 最后在电流扩展层上制备 P 电极. 其中不同尺寸的 Micro-LED 为共 N 极设计, 结构如图 1(a), (b) 所示; Micro-LED 阵列的行像素共 N 极, 列像素共 P 极, 结构如图 1(c), (d) 所示.

## 3 Micro-LED 测量结果与分析

### 3.1 光电特性测试

实验使用 Keithley-b1500 探针测试系统对不同尺寸的 Micro-LED 的  $I-V$  特性进行了测试; 在 Keithley2400 电流源变电流驱动下, 使用台湾尚泽光谱仪对 Micro-LED 进行了光学特性测试.

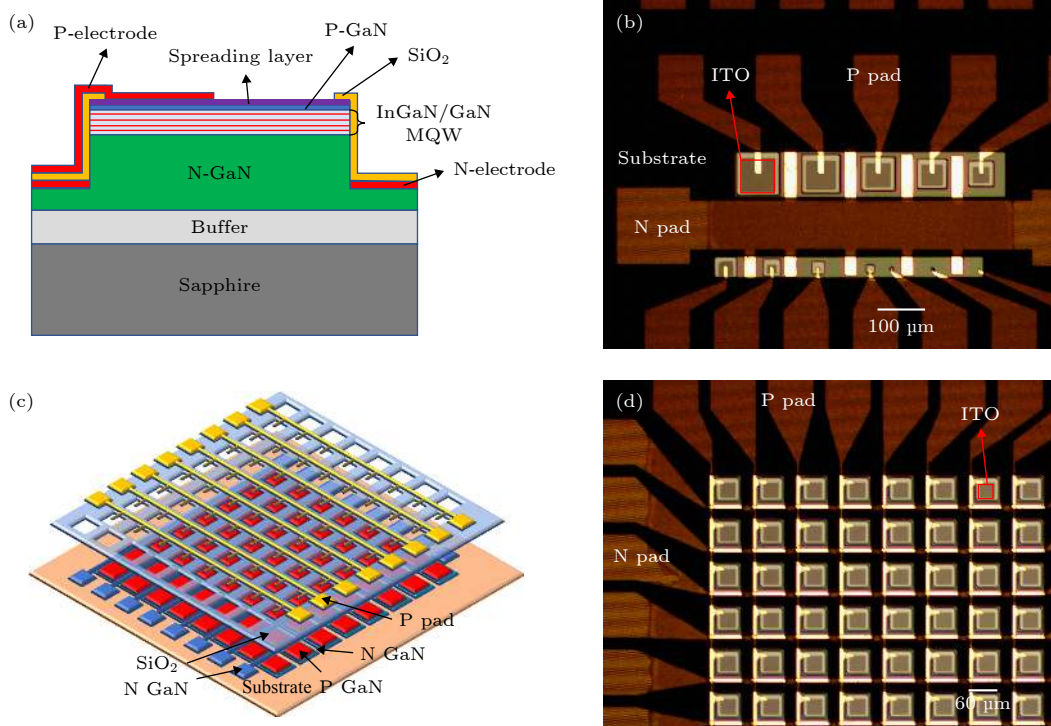


图 1 (a) Micro-LED 结构示意图; (b) 尺寸为 40—100  $\mu\text{m}$  的 Micro-LED 光学显微镜图; (c) Micro-LED 阵列 3D 结构图; (d) 阵列光学显微镜图

Fig. 1. (a) Schematic structure of single Micro-LED; (b) the optical micrograph of the Micro-LEDs with diameters from 40  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$ ; (c) 3D structure diagram of passive Micro-LED array; (d) optical micrograph.

图 2 是不同尺寸 Micro-LED 的  $I-V$  特性曲线, 可以看出 Micro-LED 开启电压在 2.6 V 左右, 随着尺寸的降低, 串联电阻增加. 原因是尺寸的减小导致 P 电极与 P GaN 接触面积减小, 从而导致

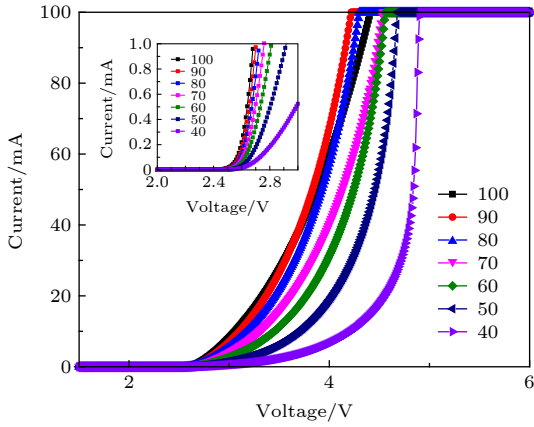


图 2 不同尺寸的 Micro-LED  $I-V$  曲线

Fig. 2. Size-dependent characteristics of current versus voltage ( $I-V$ ).

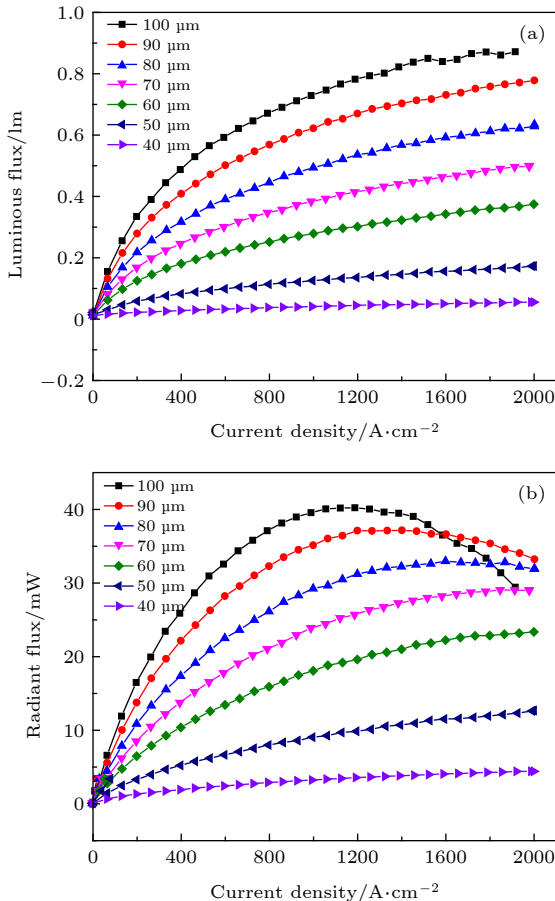


图 3 Micro-LED 的尺寸与光通量和辐射通量的关系 (a) 光通量与电流密度的关系; (b) 辐射通量与电流密度的关系

Fig. 3. Size-dependent characteristics of luminous flux and radiant flux: (a) Current density versus luminous flux; (b) current density versus radiant flux.

串联电阻的增加. 图 3(a),(b) 分别是 Micro-LED 的尺寸与光通量和辐射通量的关系. 可以看出, 从 50  $\mu\text{m}$  开始光通量和辐射通量有较大的下降, 原因是随着 Micro-LED 尺寸的减小电极面积对出光产生了较大的影响, 导致了辐射通量和光通量的下降. 从图 3(b) 中可以看出, 随着电流密度的增加辐射通量先增后降, 尺寸为 100, 90 和 80  $\mu\text{m}$  尤为明显, 主要原因是随着电流密度的增加 Droop 效应加剧, 效率下降导致量子阱处温度升高, 辐射通量下降. 也可以看出, 随着 Micro-LED 尺寸的减小, 其所能承受的电流密度越大, 其中 100, 90 和 80  $\mu\text{m}$  的峰值电流密度分别为 1189.5, 1402.1 和 1869.2  $\text{A}/\text{cm}^2$ .

### 3.2 热学特性

本实验对 40—100  $\mu\text{m}$  尺寸的 Micro-LED 进行不同温度下电压进行测量, 并拟合出在不同驱动电流下 Micro-LED 尺寸和  $k$  系数关系曲线, 如图 4 所示; 并且测量出环境温度与 Micro-LED 辐射通量的关系曲线, 如图 5 所示. 其中图 4(a)—(c) 分别是在测试电流 0.5, 2.0 和 5 mA 下测得的不同尺寸 Micro-LED 电压随温度变化, 图 4(d) 是由图 4(a)—(c) 拟合后得到的  $k$  系数曲线.

如图 4 所示, LED 电压随温度变化的物理机制和二极管方程有关<sup>[17]</sup>:

$$V_F = I_0 \exp \left[ \frac{q(V_F - R_S I_F)}{n k_B T} \right], \quad (1)$$

其中  $I_0$  是反向饱和电流,  $V_F$ ,  $I_F$  分别是输入电压和输入电流,  $q$  为电子电荷,  $R_s$  是等效串联电阻,  $n$  为理论因子,  $k_B$  为玻耳兹曼常数.

$$I_0 = A \exp \left[ \frac{-E_G(T)}{n k_B T} \right], \quad (2)$$

式中  $A$  是与 PN 结的类型、掺杂浓度、几何尺寸以及构成 PN 结的材料等有关的系数,  $E_G(T)$  是温度  $T$  时的能带宽度,

$$E_G(T) = E_G(0) - \beta T. \quad (3)$$

(3) 式是 Varsgni 公式<sup>[18]</sup>, 它简单地描述了能带宽度和温度的关系. 根据 (1) 式—(3) 式可以得出,

$$V_F = \frac{n k_B T}{q} \ln \left( \frac{I_F}{A} \right) + \frac{E_G(0) - \beta T}{q} + R_S I_F, \quad (4)$$

再对 (4) 式两侧同时求微分, 得出  $k$  系数公式:

$$k = \frac{dV_F}{dT} = \frac{n k_B}{q} \ln \left( \frac{I_F}{A} \right) - \frac{\beta}{q} + \frac{dR_S}{dT} I_F. \quad (5)$$

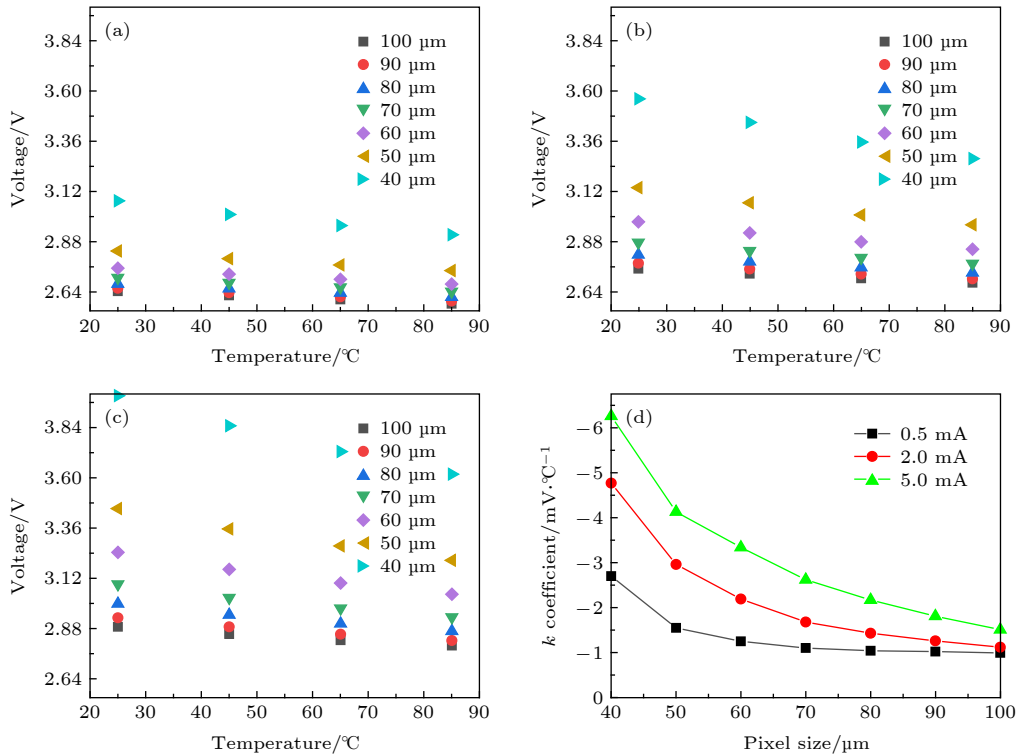


图 4 不同测试电流下温度与电压的关系, 以及  $k$  系数与 Micro-LED 尺寸的关系 (a) 0.5 mA 下温度与电压关系图; (b) 2 mA 下温度与电压关系图; (c) 5 mA 下温度与电压关系图; (d) 使用最小二乘法拟合图 (a)—(c) 得到的  $k$  系数与尺寸的关系曲线  
Fig. 4. Temperature versus voltage curves with various test current, and Micro-LED size versus  $k$  coefficient: (a) Temperature versus voltage curves at 0.5 mA; (b) temperature versus voltage curves at 2 mA; (c) temperature versus voltage curves at 5 mA; (d) size and drive current versus  $k$  coefficient.

(5) 式前两项可以看作常数, 对  $k$  系数影响较大的是第三项, 等效串联电阻随温度的变化. 尺寸的减小导致串联电阻变大, 因此 (5) 式可以很好地解释图 4(d) 中的  $k$  系数曲线.

图 5 是不同电流下温度变化对 Micro-LED 辐射通量的影响关系曲线, 可以看出, 温度升高降低了 Micro-LED 的辐射通量, 而且在大电流下这个

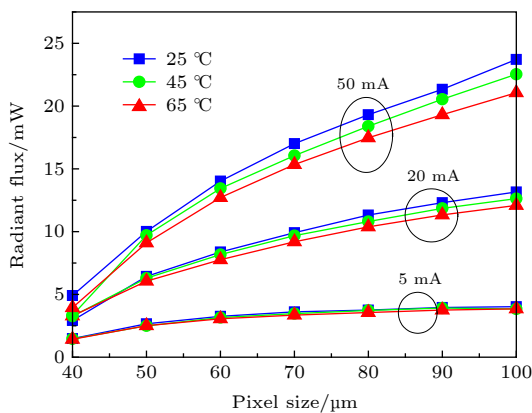


图 5 不同温度和测试电流下尺寸和辐射通量的关系  
Fig. 5. Micro-LED pixel size versus radiant flux with different temperature and test current.

现象更显著. 原因是温度升高会使内 InGaN/GaN 量子阱中的载流子泄漏显著增加, 减少了 Micro-LED 的发光效率.

#### 4 阵列的驱动显示

FPGA 作为一种半定制硬件电路, 具有运行稳定、抗干扰强、速度快、设计灵活等优点, 可以作为 Micro-LED 被动阵列的外围驱动源. 也有使用专用集成电路 (ASIC)、FPGA 对 Micro-LED 被动阵列进行驱动的研究 [19,20]. 这证明 FPGA 在 Micro-LED 被动阵列驱动领域具有一定研究价值和应用价值. 结合被动驱动电路成本低、设计周期短、功耗低、被动矩阵有机发光二极管 (PMOLED) 技术中 OLED 寿命短等特点, 未来 Micro-LED 被动阵列替代 PMOLED 在可穿戴显示屏、手机副屏、音乐播放器显示屏等低分辨率小尺寸市场将有着广泛的应用.

本文中使用了 FPGA 开发板对所制备的 Micro-LED 被动阵列进行了驱动显示, 其中图 6(a) 是显

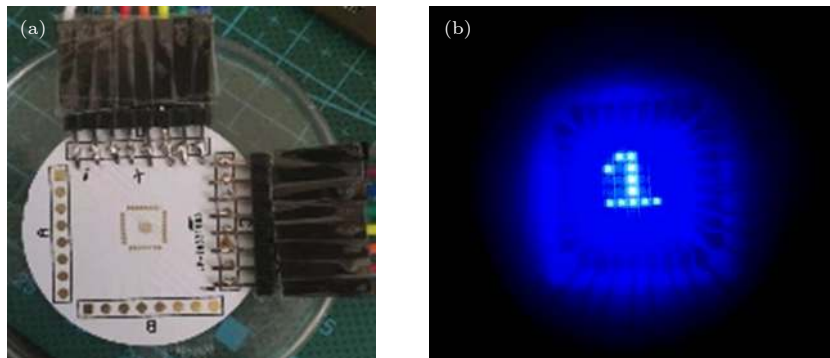


图 6 尺寸为  $60\ \mu\text{m}$  的被动 Micro-LED 阵列使用 FPGA 进行驱动点亮 (a) 显示样品; (b) 点亮的显示阵列

Fig. 6. Passive pico-LED array whose pixel size is  $60\ \mu\text{m}$ , driven and lighted by FPGA: (a) Display sample; (b) display array light.

示样品, 将划片好的显示芯片粘接在印有外围电路的铝基板上, 使用金丝压焊的方法将芯片上的 Pad 与铝基板上的 Pad 进行连接. 最终使用 FPGA 开发板的通用输入输出接口 (GPIO) 驱动芯片, 点亮的显示阵列如图 6(b) 所示, 可以实现动态数字显示.

## 5 结 论

本实验制备了不同尺寸的 Micro-LED 和一种 Micro-LED 被动驱动阵列. 对于不同尺寸的单颗 Micro-LED 进行了电学、光学、热学特性的测试. 结果表明: 随着尺寸的减小, Micro-LED 所能承受的电流密度越大; Micro-LED 与普通蓝光 LED 相比具有较大的  $k$  系数, 文献 [21] 中蓝光 LED 在  $20\ \text{mA}$  下的  $k$  系数为  $-2.9\ \text{mV}/^\circ\text{C}$ . 所以在相同测试条件下, Micro-LED 的  $k$  系数较大. 并且随着尺寸的减小,  $k$  系数的数值增大, Micro-LED 热稳定性不如传统蓝光 LED. Micro-LED 未来在显示领域将会有巨大的发展空间. 本文探索了 FPGA 对 Micro-LED 被动阵列驱动的可能性, 动态点亮了 Micro-LED 阵列, 说明 FPGA 在未来 Micro-LED 驱动应用中有着很大的潜力.

## 参考文献

- [1] Gong Z, Jin S R, Chen Y J, Jonathan M, David M, Ian M W, Erdan G, Martin D D 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 013103
- [2] Tian P F, Jonathan J D M, Gong Z, Benoit G, Ian M W, Erdan G, Chen Z Z, C, Zhang G Y, Martin D D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 231110
- [3] Olivier F, Daami A, Licitra C, Templier F 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 022104
- [4] Zhan J L, Chen Z Z, Jiao Q Q J, Feng Y L, Li C C, Chen Y F, Chen Y Y, Jiao F, Kang X N, Li S F, Wang Q, Yu T J, Zhang G Y, Shen B 2018 *Opt. Express* **26** 5265
- [5] Tai J P, Guo W L 2019 *China Illuminating Engineering Journal* **30** 18 (in Chinese) [邵建鹏, 郭伟玲 2019 照明工程学报 **30** 18]
- [6] Jin S X, Li J, Li J Z, Lin J Y, Jiang H X 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 631
- [7] Jeon C W, Kim K S, Dawson M D 2002 *Phys. Stat. Sol. (a)* **192** 325
- [8] Gong Z, Zhang H X, Gu E, Griffin C, Dawson M D, Poher V, Kennedy G, French P M W, Neil M A A 2007 *IEEE Trans. Electron Dev.* **54** 2650
- [9] Sun C W, Chao C H, Chen H Y, Chiu Y H, Yeh W Y, Wu M H, Yen H H, Liang C C 2012 *SID Symposium Digest of Technical Papers* **42** 1042
- [10] Li X B, Wu L, Liu Z J, Babar H, Chong W C, Lau K M, C. Patrick Y 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 3449
- [11] Liu Z J, Chong W C, Wong K M, Tam K H, Lau K M 2013 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **25** 2267
- [12] Liu Z J, Chong W C, Wong K M, Lau K M 2013 *J. Disp. Technol.* **9** 678
- [13] Liu Z J, Chong W C, Wong K M, Lau K M 2015 *J. Microelectronic Eng.* **148** 98
- [14] Deng P, Zhang K, Liu Z J 2016 *IEEE J. Electron Dev. Soc.* **5** 90
- [15] Choi H W, Jeon C W, Dawson M D 2004 *IEEE Electron Dev. Lett.* **25** 277
- [16] Guo W L, Tai J P, Liu J P, Sun J 2019 *J. Electronic Mater.* **48** 5195
- [17] Li B Q, Zheng T C, Xia Z H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7189 (in Chinese) [李炳乾, 郑同场, 夏正浩 2009 物理学报 **58** 7189]
- [18] Cao X A, Teetsov J M, D'Evelyn M P, Merfeld D W, Yan C H 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 7
- [19] Chong W C, Cho W K, Liu Z j, Wang C H, Lau K M 2014 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium La Jolla, October 19–22, 2014 p978
- [20] Deng P, Zhang K, Chao V S D, Mo W j, Lau K M, Liu Z J 2016 *J. Disp. Technol.* **7** 742
- [21] Li B Q, Bu L J, Gan X W, Fan G H 2003 *Acta. Photon. Sin.* **32** 1349 (in Chinese) [李炳乾, 布良基, 甘雄文, 范广涵 2003 光子学报 **32** 1349]

# GaN based micro-light-emitting diode size effect and array display\*

Tai Jian-Peng Guo Wei-Ling<sup>†</sup> Li Meng-Mei Deng Jie Chen Jia-Xin

(*Optoelectronics Technology Lab, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

( Received 27 February 2020; revised manuscript received 28 May 2020 )

## Abstract

Single micro-light emitting diodes(LEDs) with different sizes and array micro-LED are designed and prepared, where the sizes of the single micro-LEDs are in a range of 40–100  $\mu\text{m}$ , their electrodes are all co-N electrodes, P electrode is drawn out alone; the number of array pixels is  $8 \times 8$ , which is a passively driving structure with a pixel size of 60  $\mu\text{m}$ . In the process of device preparation, N electrode and P electrode are fabricated by the sputtering & stripping method. The electrode thickness is 2.4  $\mu\text{m}$ . Thick photoresist 5120 is used as a mask, and N GaN is etched to the substrate by using the ICP dry etching to form an isolation trench. The PECVD technique is used to deposit an  $\text{SiO}_2$  insulating layer with a thickness of 10000  $\text{\AA}$ . By optimizing the electrode structure and thickness, the reliability of the P electrode at the slope of the isolation trench is improved, and the  $\text{SiO}_2$  insulating layer has good encapsulation; field programmable gate array (FPGA) is used to drive and display the micro-LED passive array. The single micro-LEDs of different sizes are tested and analyzed in the aspects of electrics, photics and thermotics and the results of which show that the current density corresponding to the peak radiation flux of 80  $\mu\text{m}$  micro-LED is 1869.2  $\text{A}/\text{cm}^2$ , which is 57.1% higher than that of 100  $\mu\text{m}$  micro-LED, indicating that the current density corresponding to the peak radiation flux of micro-LED increases as the size decreases; compared with the ordinary blue LED, the micro-LED has a large  $k$  factor, and with the size decreases, the value of the  $k$  factor increases, indicating that the micro-LED series resistance is larger, and the thermal stability is not so good as the traditional blue LED. Finally, the field programmable gate array (FPGA) can achieve a good drive for the micro-LED passive array. The driving principle is passive scanning driving, which is carried out in a row-by-row lighting mode. The FPGA clock is 50 MHz, and 320 ns is required for the circuit to scan all rows.

**Keywords:** micro-light-emitting diode, size effect,  $k$ -factor, passive

**PACS:** 73.61.Ey, 73.40.-c, 73.90.+f, 73.43.Cd

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200305

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2017YFB0403100, 2017YFB0403102).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [guoweiling@bjut.edu.cn](mailto:guoweiling@bjut.edu.cn)