

基于离子注入隔离的微缩化发光二极管阵列性能*

高承浩¹⁾²⁾ 徐峰^{2)3)†} 张丽²⁾ 赵德胜²⁾ 魏星²⁾
车玲娟²⁾ 庄永漳²⁾ 张宝顺^{2)‡} 张晶^{1)‡‡}

1) (长春理工大学光电工程学院, 长春 085202)

2) (中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 纳米加工平台, 苏州 215123)

3) (南京大学扬州光电研究院, 扬州 225009)

(2019年9月18日收到; 2019年10月28日收到修改稿)

基于F离子注入隔离技术实现一种新型微缩化发光二极管 (micromicro-LED) 阵列器件, 并系统研究注入能量及发光孔径对 micro-LED 阵列器光电性能的影响. 研究表明: 相比于F离子 50 keV 单次注入器件, 50/100 keV 两次注入器件具有更好的光电性能, 器件反向漏电流降低 8.4 倍, 光输出功率密度提升 1.3 倍. 同时, 在不同的发光孔径 (6, 8, 10 μm) 条件下, 器件反向漏电流均为 3.4×10^{-8} A, 但正向工作电压随孔径增大而减小, 分别为 3.3, 3.1, 2.9 V. 此外, 器件不同发光孔径的有效发光面积比 (实际发光面积与器件面积之比) 分别为 85%, 87%, 92%. 与传统台面刻蚀 micro-LED 器件相比, 离子注入隔离技术实现的 micro-LED 器件具有较低反的向漏电流密度、较高的光输出密度及有效发光面积比.

关键词: 微缩化发光二极管阵列, 离子注入隔离, 注入能量, 发光孔径

PACS: 78.20.-e, 78.55.Cr, 78.60.Fi

DOI: 10.7498/aps.69.20191418

1 引言

微缩化发光二极管 (micro-LED) 具有高电流密度、高光输出密度、高响应频率、高响应带宽和电流扩展均匀等优势, 在光显示^[1-3]、可见光通讯^[4]、光镊^[5]及神经医疗^[6]等领域发挥着重要作用. 其中, 在光显示领域, 与液晶显示 (LCD)^[7]、有机发光二极管 (OLED)^[8-10]等显示技术相比, micro-LED 显示技术具有高亮度、高对比度、高分辨率、高可靠性、长寿命、低能耗等优势^[10,11], 被认为是新一代光显示技术, 在显示屏幕、柔性显示屏幕、

头戴显示、增强及虚拟现实^[12,13]等方面有着广泛的应用前景.

通常, 台面刻蚀是实现氮化镓 (GaN) 基 micro-LED 器件间隔离的主要方法^[14], 但台面刻蚀隔离不可避免地会引入侧壁刻蚀损伤, 同时产生侧壁悬挂键^[15], 导致器件反向漏电流增大; 另一方面, 台面刻蚀还会引入深能级缺陷, 形成非辐射复合中心, 使器件非辐射复合速率增大、外量子效率降低, 从而减小器件有效工作面积^[16,17]; 并且随发光孔径的减小, 侧壁损伤对器件上述性能的影响更加显著, 因此侧壁损伤问题极大地限制 micro-LED 器件的发展与应用. 2012年, Tian等^[18]研

* 吉林省重大科技招标专项 (批准号: 20170203014G)、国家自然科学基金 (批准号: U1830112, 61774014)、江苏省博士后科研资助计划 (批准号: 2018K008C) 和苏州市重点产业技术创新项目 (批准号: SYG201928) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fxu2018@sinano.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: bszhang2006@sinano.ac.cn

‡‡ 通信作者. E-mail: zhangjingcust@cust.edu.cn

究 micro-LED 外量子效率与器件尺寸的关系, 研究表明小尺寸 micro-LED 器件在低电流密度下, 外量子效率主要受侧壁损伤的影响; 2017 年, Hwang 等^[19] 研究不同钝化方式对 micro-LED 器件的外量子效率影响, 发现通过原子层沉积 (ALD) 的方法生长 SiO_2 钝化层可以有效减小侧壁损伤引起的漏电与非辐射复合, 从而增大了器件外量子效率. 鉴于常规台面刻蚀制备的 micro-LED 器件都存在严重的侧壁损伤, 所以有效降低或避免侧壁损伤的产生是提高器件性能的一个重要途径.

除了台面刻蚀隔离, 离子注入是目前实现 GaN 半导体器件有效隔离方法, 该方法已成功应用于高电子迁移率晶体管 (HEMT) 器件中^[20]. 离子注入隔离是将具有一定能量的离子注入到 GaN 材料中, 可以精准地控制离子注入面积及深度, 引起 GaN 材料的晶格损伤, 并引入大量深能

级缺陷, 降低注入区域载流子浓度^[21,22], 形成可以达到电学隔离效果的高阻态区域. 与台面刻蚀隔离相比, 离子注入隔离为平面工艺, 可以避免侧壁损伤引入和侧壁悬挂键的产生, 减少侧壁非辐射复合中心和降低反向漏电流. 因此本文针对避免台面刻蚀造成的侧壁损伤, 提出一种通过氟 (F) 离子注入技术实现 micro-LED 阵列器件的新型制备方法.

2 器件结构制备及测试

本文中 micro-LED 阵列器件采用工作波长为 463 nm 的蓝宝石衬底 LED 外延片, 在不同离子注入能量下制备了 6, 8, 10 μm 三种发光孔径阵列器件, 阵列器件具体结构示意图如图 1(a) 所示, 阵列包含 25×25 个发光孔, 不同发光孔径阵列中发光孔间隔分别为 14, 12, 10 μm .

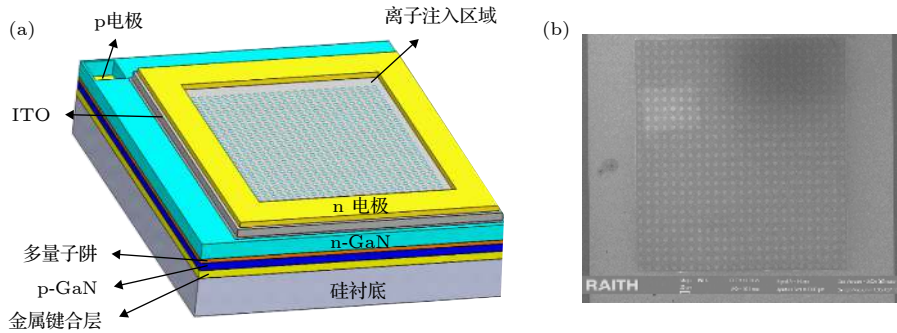


图 1 (a) micro-LED 阵列结构图; (b) 10 μm micro-LED 阵列表面 SEM 图像

Fig. 1. (a) Schematic structure of micro-LED array; (b) SEM image of 10 μm micro-LED array surface.

器件具体制备工艺流程如下: 首先通过倒装键合技术, 将 LED 外延片键合在硅 (Si) 衬底上, 并使用激光剥离蓝宝石衬底, 形成垂直结构 LED; 然后利用感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀样品至 n-GaN, 刻蚀出金属键合层, 将其作为 micro-LED 阵列 p 型电极; 随后通过 F 离子注入工艺对器件进行隔离, 样品 A 为单次注入, 注入能量为 50 keV, 样品 B 为两次注入, 注入能量分别为 50, 100 keV, 以 10 μm 阵列为例, 注入后样品扫描电镜 (SEM) 图如图 1(b) 所示; 最后在 n-GaN 表面沉积 200 nm 的 ITO, 并在 ITO 上蒸镀 Ti/Au(50/150 nm) 金属作为 n 型电极, 并在氮气氛围下 300 $^{\circ}\text{C}$ 退火 2 min. micro-LED 阵列样品的电流-电压 (I - V) 电学特性通过安捷伦高压探针台 B1505A 测试, 注入区域隔离区域方块电阻通过圆形传输线模型

(CTLTM) 表征, 光输出功率通过积分球测试系统测得.

3 实验结果与讨论

3.1 F 离子注入能量对 micro-LED 阵列光电性能的影响

以 6 μm 发光孔径的 micro-LED 阵列器件为例, 在不同能量注入条件下, 其光电特性如图 2 所示, 图 2(a) 为器件 I - V 特性, 插图为样品半对数坐标下反向 I - V 特性曲线, 图 2(b) 为光输出密度-电流密度关系曲线.

发光孔径为 6 μm 的 micro-LED 阵列器件在 20 mA 下正向工作电压、-5 V 时反向漏电流和 2264 A/cm^2 时的光输出密度如表 1 所示.

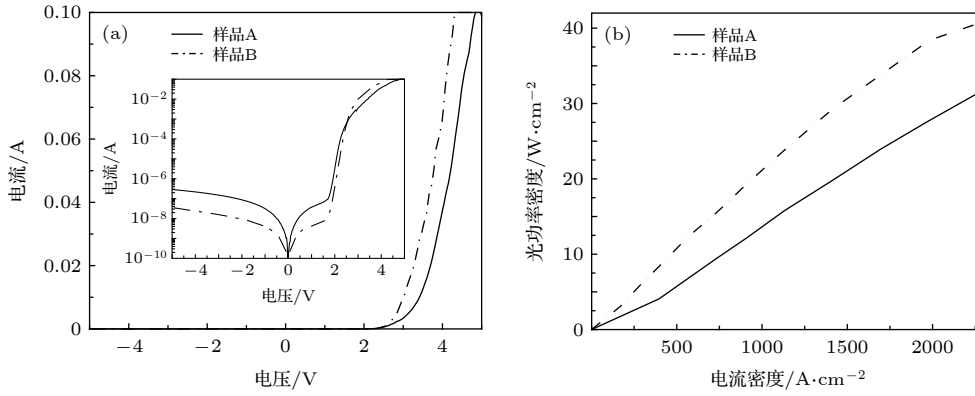


图2 样品A和B 6 μm阵列的(a) *I-V*特性和(b)光输出密度-电流密度特性

Fig. 2. (a) The *I-V* and (b) light output power density-current density characteristics of 6 μm arrays of samples A and B.

表1 6 μm micro-LED阵列光电性能参数

Table 1. The photoelectric properties of 6 μm micro-LED array.

样品	工作电压(20 mA)/V	反向漏电流(-5 V)/A	光输出密度(2264 A/cm ²)/W·cm ⁻²
A	3.69	2.89×10^{-7}	31.34
B	3.27	3.43×10^{-8}	40.59

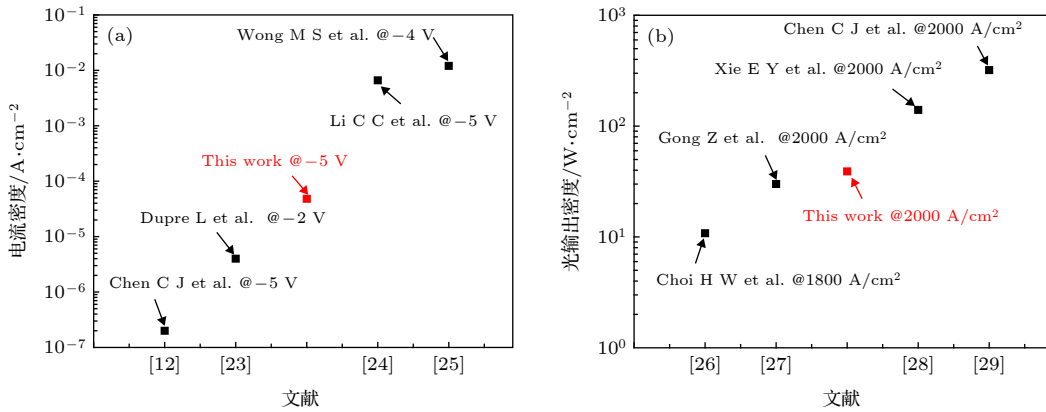


图3 注入隔离 micro-LED 器件与台面刻蚀器件 (a) 反向漏电流和 (b) 光输出密度比较

Fig. 3. Comparison of (a) reverse leakage current and (b) light output density between implanted isolated micro-LED devices and mesa etching devices.

对比表1中样品A和B的各项光电特性参数可知:与样品A相比,样品B具有更好的光电性能,具体表现为正向工作电压降低了11%,反向漏电流降低了88%,光输出密度增大了23%.

图3(a)为不同课题组台面刻蚀制备的 micro-LED 器件反向漏电流密度,图3(b)为光输出密度,可以看出,离子注入制备的 micro-LED 阵列器件与台面刻蚀器件相比,反向漏电流密度与光输出密度已经达到文献报道水平.

进一步,通过SRIM软件模拟了不同能量F离子注入条件下注入损伤与注入深度的关系^[30],如图4所示,可以看出:在50和100 keV能量下

分别进行F离子注入,注入后损伤峰值分别出现在80 nm和182 nm处,表明单次注入只对n-GaN部分区域实现了隔离,在50 keV注入时,对较浅区域起到隔离,在100 keV注入时,对较深区域实现了隔离;50/100 keV能量F离子两次注入后,损伤峰值出现合并,这使得F注入隔离的整体损伤增大,有利于提升器件的电学隔离效果.由上述分析可知,不同能量下离子注入损伤峰值存在明显差异,且离子注入次数对损伤峰值也产生了显著影响,因此根据SRIM模拟结果初步判断单次注入隔离不完全是导致样品A性能较差的主要原因.

此外,通过CTLM测试验证不同能量F离子

对注入区域隔离效果的影响, 图 4 为 CTLM 测试原理图. 如图 5 所示, 内圆半径 r_0 为 70 μm , 且不随位置变化, 外圆半径为 r_1 从小到大依次分别为 80, 85, 90, 95, 105, 120 μm .

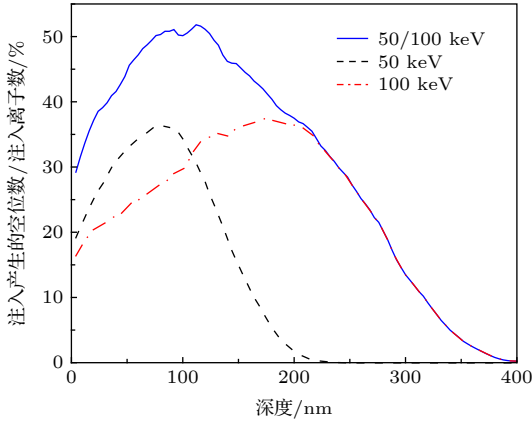


图 4 SRIM 模拟 F 离子不同注入能量下产生的损伤与注入深度关系

Fig. 4. The relationship between damage and implantation depth of F ion with different implantation energies with SRIM simulation.

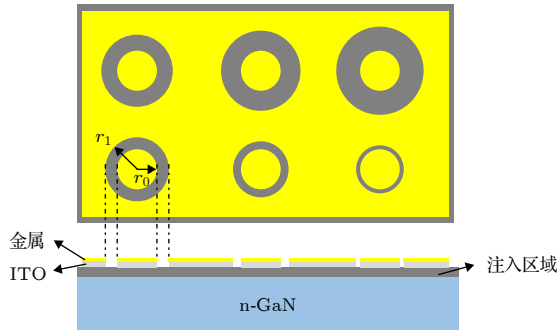


图 5 CTLM 测量原理图

Fig. 5. Schematic of CTLM test.

圆环内总电阻 R_T 可表示为

$$R_T \left(\frac{r_1 \cdot r_0}{r_1 + r_0} \right) = \frac{R_{SH}}{2\pi} \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right) \left(\frac{r_1 \cdot r_0}{r_1 + r_0} \right) + \frac{R_{SH}}{2\pi} L_T, \quad (1)$$

其中 R_{SH} 为方块电阻, L_T 为传输距离.

令 (1) 式中 $R_T \left(\frac{r_1 \cdot r_0}{r_1 + r_0} \right) = Y$, $\ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right) \left(\frac{r_1 \cdot r_0}{r_1 + r_0} \right) = X$, 可以得出方程

$$Y = \frac{R_{SH}}{2\pi} X + \frac{R_{SH}}{2\pi} L_T, \quad (2)$$

通过方程 (2) 可以拟合出 F 离子 50 keV 及 50/100 keV 注入区域 CTLM 线性曲线, 如图 6 所示, 拟合线性曲线方程分别为:

$$Y_1 = 8.07 \times 10^8 X_1 + 2.04 \times 10^{10}, \quad (3)$$

$$Y_2 = 3.54 \times 10^9 X_2 + 3.78 \times 10^{10}. \quad (4)$$

结合拟合方程 (2), (3), (4) 计算出 F 离子单次注入及两次注入区域方块电阻 R_{SH} 分别 $5.07 \times 10^9 \Omega/\square$ 、 $2.22 \times 10^{10} \Omega/\square$. 同理, 在无 F 离子注入 n-GaN 表面做出 CTLM 测试图形, 并通过上述方法测得无 F 离子注入 n-GaN 的方块电阻, 约为 $732.5 \Omega/\square$.

结合 CTLM 测试及 SRIM 软件模拟结果可知: F 离子注入 n-GaN 后, 注入区域方块电阻增大了约 10^6 — 10^7 倍; 单次注入对 n-GaN 隔离不完全, 导致注入区域方块电阻较小, 其方块电阻仅为两次注入区域的 25%. 这说明了单次注入时样品 A 的隔离效果较差, 从而致使样品漏电流偏大、光输出密度偏小.

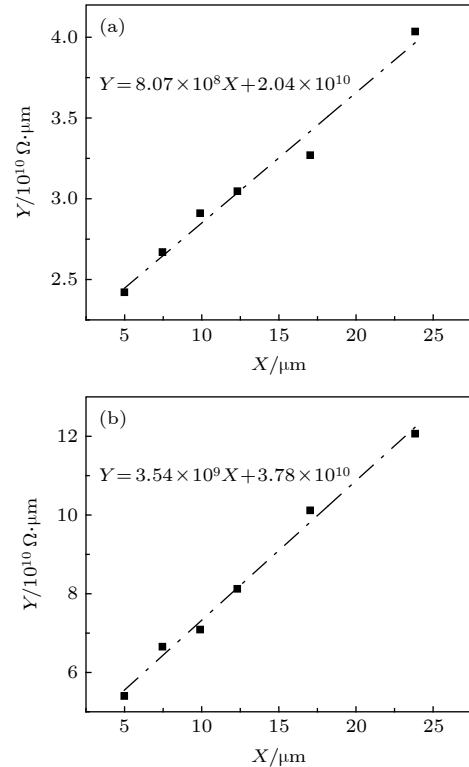


图 6 CTLM 线性拟合曲线 (a) 50 keV 能量注入; (b) 50/100 keV 能量注入

Fig. 6. The CTLM linear fitting curve at (a) the implantation energy of 50 keV and (b) 50/100 keV.

3.2 micro-LED 发光孔径对其光电性能的影响

进一步测试样品 B 中 6, 8, 10 μm 不同发光孔径 micro-LED 阵列电学性能. I - V 特性曲线如图 7

所示, 插图为样品半对数坐标下的反向 $I-V$ 特性曲线. 从图 7 可以得出: 随着器件发光孔径的减小, micro-LED 阵列正向工作电压从 2.95 V 增大到 3.26 V, 串联电阻分别为 14.3, 18.5, 22.2 Ω , 反向漏电流基本相同, 约为 3.40×10^{-8} A, 且不随发光孔径的变化而出现明显差异, 说明 micro-LED 阵列反向漏电流只与离子注入隔离条件有关, 与发光孔径无关.

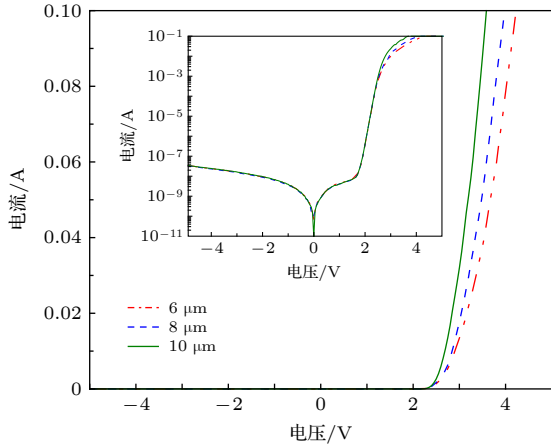


图 7 不同发光孔径阵列 $I-V$ 特性曲线

Fig. 7. $I-V$ characteristics of the different emission aperture arrays.

样品 B 不同发光孔径阵列在 20 mA 电流下实际发光情况如图 8 所示, 可以看出不同发光孔径下的 micro-LED 阵列都具有良好的隔离效果, 且发光效果较为均匀.

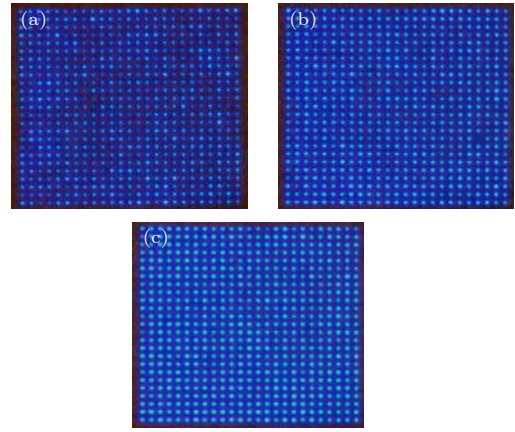


图 8 20 mA 下 (a) 6 μm , (b) 8 μm , (c) 10 μm 发光孔径阵列发光图像

Fig. 8. Light-emitting aperture arrays of (a) 6 μm , (b) 8 μm , and (c) 10 μm at 20 mA.

表 2 为单颗发光孔径实际发光效果, 可以看出器件实际发光孔径小于设计的发光孔径, 减小了约 0.47 μm , 主要原因是发光孔边缘区域产生了 0.24 μm 的注入损伤, 并且随发光孔径的减小, 有效发光面积比 (S_1/S_2) 从 92% 减小到 85%; 此外, 10 μm 台面刻蚀隔离器件存在约 0.5—1.1 μm 的侧壁损伤, S_1/S_2 仅为 $(70 \pm 10)\%$ ^[17]; 对比离子注入隔离器件与台面隔离器件实际发光效果可以得出, F 离子注入后对边缘产生的损伤减小了 0.26—0.86 μm , S_1/S_2 提高了 11%—31%, 表明 F 离子注入隔离可有效提高了 micro-LED 器件的有效发光面积.

表 2 样品 B 单颗发光孔径实际发光情况

Table 2. The actual emission condition of single light-emitting aperture in sample B.

器件尺寸/ μm	6	8	10	20 ^[16]	10 ^[17]
隔离方式	注入			台面刻蚀	
实际发光区域					
实际发光面积 $S_1/\mu\text{m}^2$	24.10	43.92	72.04	144	70 ± 10
器件面积 $S_2/\mu\text{m}^2$	28.26	50.24	78.50	400	100
$S_1/S_2/\%$	85%	87%	92%	36%	70 ± 10

4 总结

针对避免 micro-LED 台面刻蚀引起的侧壁损伤, 提出一种通过 F 离子注入实现 micro-LED 器

件电学隔离的方法, 并成功制备出 6, 8, 10 μm 3 种发光孔径阵列器件. F 离子注入隔离避免了侧壁损伤与侧壁悬挂键产生, 减少了侧壁非辐射复合中心与反向漏电流, 增大了有效发光面积. 通过 $I-V$ 特性测试、CTLM 测试及光输出功率测试, 研究

了 F 离子不同注入能量及发光孔径对阵列光电性能的影响. 研究发现, 对于 6 μm 发光孔径阵列器件, 不同 F 离子注入条件对阵列器件性能具有较大的影响, F 离子两次注入条件下的阵列器件具有更低的反向漏电流 (3.4×10^{-8} A)、更高的光输出密度器件 (40.59 W/cm^2), 注入隔离区域具有更高的方块电阻 ($2.22 \times 10^{10} \Omega/\square$), 且在相同注入能量下, 器件反向漏电流不随发光孔径变化而变化; 实际发光面积与器件面积比最高为 92%, 比相同尺寸台面刻蚀隔离器件提高了 11%—31%. 研究结果表明, F 离子两次注入相比单次注入具有更好的电学隔离效果, 并且与台面刻蚀隔离 micro-LED 器件相比具有较低反的向漏电流密度、较高的光输出密度、更高的有效发光面积. 因此在 F 离子注入隔离 micro-LED 器件基础上, 我们将进一步研究不同离子注入对器件反向漏电流、光输出密度、有效工作面积等性能的影响.

参考文献

- [1] Zhang L, Ou F, Chong W C, Chen Y J, Li Q M 2018 *J. Soc. Inf. Disp.* **26** 137
- [2] Day J, Li J, Lie D Y C, Bradford C, Y. Lin J, Jiang H X 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 031116
- [3] Zhang X, Li P A, Zou X B, Jiang J M, Yuen S H, Tang C W, Lau K M 2019 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **31** 865
- [4] Xie E Y, He X Y, Islim M S, Purwita A A, McKendry J J D, Gu E, Haas H, Dawson M D 2019 *J. Lightwave Technol.* **37** 1180
- [5] Alicja Z D, Steven L N, David M, Jonathan M, Bruce R R, Robert K H, Mervyn J R, Huabing Y, Jonathan M C, Erdan G, Martin D D 2011 *Opt. Express* **19** 3
- [6] McAlinden N, Massoubre D, Richardson E, Gu E, Sakata S, Dawson M D, Mathieson K 2013 *Opt. Lett.* **38** 992
- [7] Guo J X, Kwok H S 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1995 (in Chinese) [郭建新, 郭海成 2000 物理学报 **49** 1995]
- [8] Komoda T, Sasabe H, Kido J 2018 *25th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD)* Kyoto, Japan, July 3–6, 2018 p978
- [9] He J Q, He D W, Wang Y S, Liu Z Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 178801 (in Chinese) [何家琪, 何大伟, 王永生, 刘智勇 2013 物理学报 **62** 178801]
- [10] Son K R, Lee T H, Lee B R, Im H S, Kim T G 2018 *Small* **14** 1801032
- [11] Li P, Zhao Y, Li H, Li Z, Zhang Y, Kang J, Liang M, Liu Z, Yi X, Wang G 2019 *Nanotechnology* **30** 095203
- [12] Chen C J, Chen H C, Liao J Hao, Yu C J, Wu M C 2019 *IEEE J. Quantum Electron.* **55** 2
- [13] Ban Z, Liang J Q, Lv J G, Liang Z Z, Feng S Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **67** 070701 (in Chinese) [班章, 梁静秋, 吕金光, 梁中翥, 冯思悦 2013 物理学报 **67** 070701]
- [14] Jin S X, Li J, Li J Z, Lin J Y, Jiang H X 1999 *Appl. Phys. Lett.* **76** 631
- [15] Gong X, Lv L, Hao Y, Li P X, Zhou X W, Chen H F 2007 *Chin. J. Semiconductors* **28** 7 (in Chinese) [龚欣, 吕玲, 郝跃, 李培成, 周小伟, 陈海峰 2007 半导体学报 **28** 7]
- [16] Kou J Q, Shen C C, Shao H, Che J M, Hou X, Chu C S, Tian K K, Zhang Y G, Zhang Z H, Kuo H C 2019 *Opt. Express* **27** 643
- [17] Olivier F, Tirano S, Dupre L, Aventurier B, Langeron C, Templier F *Spring Meeting of the European-Materials-Research-Society (E-MRS)/Symposium M on Silicon Compatible Materials and Integrated Devices for Photonics and Optical Sensing* Lille, FRANCE, MAY 02–06, 2016 p191
- [18] Tian P F, McKendry J J D, Zheng G, Guilhabert B, Watson I M, Gu E, Chen Z Z, Zhang G Y, Dawson M D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 23
- [19] Hwang D, Mughal A, Pynn C D, Nakamura S, DenBaars S P 2017 *Appl. Phys. Express* **10** 032101
- [20] Zhang Z L 2017 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [张志利 2017 博士学位论文 (合肥: 中国科学院大学)]
- [21] Pearton S J, Abernathy C R, Vartuli C B 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 3042
- [22] Kucheyeva S O, Williams J S, Pearton S J 2001 *Mater. Sci. Eng. R-Rep.* **33** 51
- [23] Dupre L, Marra M, Verney V, Aventurier B, Henry F, Olivier F, Tirano S, Daami A, Templier F *Conference on Gallium Nitride Materials and Devices XII* San Francisco, CA, JAN 30–FEB 02, 2017 p1010422-1
- [24] Li C C, Zhan J L, Chen Z Z, Jiao F, Chen Y F, Chen Y Y, Nie J X, Kang X N, Li S F, Wang Q, Zhang G Y, Shen B 2019 *Opt. Express* **27** A1146
- [25] Wong M S, Hwang D, Alhassan A I, Lee C, Ley R, Nakamura S, DenBaars S P 2018 *Opt. Express* **26** 21324
- [26] Choi H W, Jeon C W, Dawson M D, Edwards P R, Martin R W, Tripathy S 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 5978
- [27] Gong Z, Massoubre D, McKendry J, Zhang H X, Griffin C, Guilhabert B, Gu E, Girkin J M, Dawson M D, Rael B R, Henderson R K *International Workshop on Nitride Semiconductors* Montreux, SWITZERLAND, OCT 06–10, 2008 p6
- [28] Xie E Y, Stonehouse M, Ferreira R, McKendry J J D, Herrnsdorf J, He X, Rajbhandari S, Chun H, Jalajakumari A V N, Almer O, Faulkner G, Watson I M, Gu E, Henderson Robert, O'Brien D, Dawson M D 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 1
- [29] Chen C J, Chen H C, Liao J H, Yu C J, Wu M C 2019 *IEEE J. Quantum Electron.* **55** 1
- [30] Stoller R E, Toloczko M B, Was G S, Certain A G, Dwaraknath S, Garner F A 2013 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms* **310** 75

Ion implantation isolation based micro-light-emitting diode device array properties^{*}

Gao Cheng-Hao¹⁾²⁾ Xu Feng^{2)3)†} Zhang Li²⁾ Zhao De-Sheng²⁾ Wei Xing²⁾
 Che Ling-Juan²⁾ Zhuang Yong-Zhang²⁾ Zhang Bao-Shun^{2)‡} Zhang Jing^{1)††}

1) (*Institute of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 085202, China*)

2) (*Department of Physics, Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China*)

3) (*Institute of Opto-Electronic, Nanjing University & Yangzhou, Yangzhou 225009, China*)

(Received 18 September 2019; revised manuscript received 28 October 2019)

Abstract

Compared with conventional light-emitting diode (LED), micro-LED has excellent photo-electric properties such as high current density, light output power density, light response frequency. It has widespread application prospects in the field of light display, optical tweezers, and visible light communication. However, dry etching inevitably leads the sidewall to be damaged, which results in the degradation of device properties. In this letter, a micro-LED array device based on F ions implantation isolation technology is presented to avoid damaging the sidewall. We systemically investigate the influence of fluorine ion implantation energy and light-emitting apertures on the photoelectric properties of the micro-LED array device by testing the current-voltage characteristic and light output power. The investigation results show that comparing with F ion 50 keV single implantation device, the reverse leakage of 50/100 keV double implantation device decreases by 8.4 times and the optical output density increases by 1.3 times. When the light-emitting apertures are different (6, 8, 10 μm respectively), the reverse leakage current remains constant, and the forward operating voltage decreases from 3.3 V to 3.1 V and to 2.9 V with the increase of the aperture. Besides, the available area ratio, i.e. the ratio of actual light-emitting area to device area of single micro-LED with different light-emitting apertures are 85%, 87%, and 92%, respectively. The electrical isolation of the micro-LED array is realized by ion implantation isolation technology, and the micro-LED has some advantages over the conventional mesa etching micro-LED device, such as low reverse leakage current density, high optical output power density, and high effective light-emitting area ratio.

Keywords: micro-light-emitting diode, ion implantation isolation, implantation energy, emission aperture

PACS: 78.20.-e, 78.55.Cr, 78.60.Fi

DOI: 10.7498/aps.69.20191418

* Project supported by the Special Scientific Research Fund of Major Science and Technology Bidding in Jilin Province, China (Grant No. 20170203014G), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1830112, 61774014), the Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds, China (Grant No. 2018K008C), and the Key Industry Technology Innovation Program of Suzhou, China (Grant No. SYG201928).

† Corresponding author. E-mail: fxu2018@sinano.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: bszhang2006@sinano.ac.cn

†† Corresponding author. E-mail: zhangjingcust@cust.edu.cn