



基于离子注入制备的InGaN横向Micro-LED阵列

谭毅, 庄永漳, 卢子元, 张晓东, 赵德胜, 蔡勇, 曾中明, 张宝顺

引用本文:

谭毅, 庄永漳, 卢子元, 等. 基于离子注入制备的InGaN横向Micro-LED阵列[J]. *发光学报*, 2021, 42(2): 215-222.

TAN Yi, CHONG Wing-cheung, LU Zi-yuan, et al. InGaN-based Lateral-structured Micro-LED Array Fabricated by Ion Implantation[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(2): 215-222.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200355>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Eu掺杂GaN薄膜的阴极荧光特性

Cathodoluminescence of Eu-implanted GaN Thin Films

发光学报. 2018, 39(9): 1268-1271 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183909.1268>

中高温GaN插入层厚度对蓝光LED光电性能的影响

Effect of Medium-high Temperature Interlayer Thickness on The Optical and Electrical Properties of Blue Light Emitting Diodes

发光学报. 2016, 37(7): 829-835 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163707.0829>

高效率GaN基高压LED芯片的制备及COB封装

High Efficiency GaN-based High-voltage Light-emitting Diode Chips and Its Chip-on-board Packaging

发光学报. 2015, 36(6): 692-698 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153606.0692>

ITO表面粗化提高GaN基LED芯片出光效率

Light-output Enhancement of GaN-based Light-emitting Diodes with Surface Textured ITO

发光学报. 2014, 35(5): 613-617 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143505.0613>

刻蚀深度对GaN基微尺寸LED芯片RC特性的影响

Influence of Isolation Etching Depth on RC Characteristic of GaN-based Micro-LED Chip

发光学报. 2018, 39(9): 1297-1304 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183909.1297>

文章编号: 1000-7032(2021)02-0215-08

基于离子注入制备的 InGaN 横向 Micro-LED 阵列

谭 毅^{1,2}, 庄永漳², 卢子元², 张晓东^{1,2},
赵德胜², 蔡 勇², 曾中明^{1,2}, 张宝顺^{1,2*}

(1. 中国科学技术大学 纳米技术与纳米仿生学院, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 多功能材料与轻巧系统重点实验室, 江苏 苏州 215123)

摘要: 采用离子注入工艺在 InGaN/GaN 量子阱蓝光 LED 结构的 p-GaN 层形成高阻态隔离区域, 实现了最小 4 μm 超小尺寸高光效 Micro-LED 阵列的制备, 并系统研究了氟离子注入隔离工艺制备的横向结构 Micro-LED 阵列的电学和光学性能。实验结果表明, 在采用的离子注入能量范围内, 氟离子在 p-GaN 层中的注入深度越深, 对应器件的电学和光学隔离效果越好。当离子注入能量为 60 keV 时, Micro-LED 阵列具有相对最佳的光电效果, 同时基于该离子注入能量制备的 4 μm 超小尺寸 Micro-LED 阵列的光功率密度高达 200 W/cm^2 , 展现了离子注入工艺在新一代 Micro-LED 微显示芯片中的应用潜力。

关键词: 蓝光 Micro-LED; 离子注入隔离; 氮化镓; 横向结构; 高光功率密度;

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **DOI:** 10.37188/CJL.20200355

InGaN-based Lateral-structured Micro-LED Array Fabricated by Ion Implantation

TAN Yi^{1,2}, CHONG Wing-cheung², LU Zi-yuan², ZHANG Xiao-dong^{1,2},
ZHAO De-sheng², CAI Yong², ZENG Zhong-ming^{1,2}, ZHANG Bao-shun^{1,2*}

(1. School of Nano-Tech and Nano-Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Key Laboratory of Multifunctional Nanomaterials and Smart Systems, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics,

Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China)

* Corresponding Author, E-mail: bszhang2006@sinano.ac.cn

Abstract: In this paper, an ion implantation process is used to form a high-resistance isolation region on the p-GaN layer of the InGaN/GaN quantum well blue LED structure. This method has been used to realize the preparation of ultra-small size and high luminous efficiency Micro-LED arrays with a minimum size of 4 μm . The electrical and optical properties of lateral structure Micro-LED arrays prepared by fluoride ion implantation isolation process are systematically studied. Experimental results show that higher fluoride ion implantation energy can improve optical and electrical isolation between Micro-LEDs. When the ion implantation energy is 60 keV, the Micro-LED array has the relatively best photoelectric effect. And the 4 μm ultra-small size Micro-LED array prepared based on this ion implantation energy has an optical power density of up to 200 W/cm^2 , demonstrating the application potential of ion implantation technology in a new generation of Micro-LED based micro-display chips.

收稿日期: 2020-11-23; 修订日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(U1830112); 江苏省自然科学基金(BK20191195); 微波毫米波单片集成和模块电路重点实验室开放项目(6142803180407)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China(U1830112); Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20191195); Science and Technology on Monolithic Integrated Circuits and Modules Laboratory, Nanjing Electronic Devices Institute(6142803180407)

Key words: blue micro-LED; ion implantation isolation; GaN; lateral structure; high optical power density

1 引 言

微型发光二极管 (Micro-LED) 凭借其低延时、低功耗、高自发光效率和宽工作温度范围等特性被认为是十分具有潜力的显示器件, 在新型微显示^[14]、AR (增强现实)/VR (虚拟现实)^[5]、光通信^[6]、固态照明^[7] 和军事航天^[8] 各个领域都有着极其重要的应用。常规的 LED 尺寸均大于 50 μm , 而微型发光二极管具有更小的像素尺寸, 这有助于提高采用微型发光二极管集成的显示器的分辨率和清晰度。然而, 像素尺寸的微缩存在着一些问题^[9-10], 比如尺寸效应^[11-12]、像素间的光学串扰^[13] 以及像素的光均匀性等。众所周知, 当发光二极管的尺寸从数百微米微缩至数十微米、乃至十微米及其以下时, 辐射复合在载流子复合中的占比大大降低, 外量子效率快速下降, 最终无法获得良好的发光效果。原因在于常规干法蚀刻需要在起辉时产生氯基等离子体, 然后加速等离子体使其高速轰击 GaN 基 LED 外延片并与之反应以达到蚀刻的目的。在这个过程中, 等离子体对 LED 外延片表面的物理轰击会造成微型发光二极管侧壁表面数十纳米深度范围内大量的晶格损伤, 同时在起辉时会产生紫外光, 使得在侧壁上发生光子诱导从而引入更多的缺陷; 并且随着像素尺寸的减小, 像素单位面积的侧壁损伤与缺陷数量会越来越高, 这将潜在影响器件的寿命和可靠性^[14-15]。因此, 需要一种新的工艺制备方案来提高 Micro-LED 器件的性能。

在现有的制备手段当中, 离子注入是一种常用的隔离工艺, 具有大尺寸、重复性高、均匀性好和易于控制等适用于大规模工业化生产的优点, 常用于氮化镓基高迁移率晶体管^[16]。也有研究人员将该方法用于垂直结构 Micro-LED 阵列的制备^[17], 但暂没有采用离子注入的新颖方法进行横向结构超小尺寸 Micro-LED 阵列的制备研究。因而我们选择在 LED 外延片上通过引入特定区域的高阻态以隔离出所需要的器件工作区域, 从而实现基于离子注入隔离的微型发光二极管的制备。同时, 常规 ICP 干法蚀刻制备的微型发光二极管阵列, 其像素阵列具有明显的侧壁和沟槽结

构^[18], 不利于器件的后续结构制备及封装集成等。与离子注入工艺相比, 这种干法蚀刻工艺与传统的平面硅工艺的兼容性更差, 且离子注入获得的平滑表面还有着提升光输出的潜力^[19]。因此, 本文采用离子注入工艺在 InGaN/GaN 量子阱 LED 结构的顶层 p-GaN 中引入可实现有效电学隔离的高阻态区域, 完成了像素周期为 20 μm 且像素排布为 25 \times 25 的 Micro-LED 芯片阵列的制备。需要说明的是, 用于显示领域的常规 Micro-LED 阵列都是采用倒装结构, 而本文研究的是正装结构的 Micro-LED 阵列, 这将为后续研究基于离子注入工艺的倒装结构 Micro-LED 微显示阵列奠定基础。

2 实 验

2.1 样品制备

本文中 Micro-LED 器件结构是基于工作波长为 455 nm 的商用蓝光 LED 外延片, 其中顶层 p-GaN 厚度为 115 nm, 多量子阱 (MQW) 为 9 个 InGaN/GaN 量子阱 (厚度为 117 nm), MQW 以下是 n-GaN (厚度达数微米) 和蓝宝石衬底。采用该 LED 外延片, 基于不同氟离子注入能量分别同时制备了 4, 6, 8, 10 μm 四种发光孔径的 Micro-LED 器件阵列, 器件阵列示意结构如图 1 (a) 所示, 唯一不同的是实际像素阵列中包含的是间距为 20 μm 的 25 \times 25 个具有相同发光孔径的像素。Micro-LED 器件阵列具体制备工艺流程如下: 首先采用感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀 LED 外延片至 n-GaN 层以形成台面结构并露出需要制备 n 电极的区域; 然后通过氟离子注入工艺对台面区域进行选区注入隔离以制备出具有电学隔离特征的 Micro-LED 阵列; 接着使用光学镀膜机在整个台面区域沉积厚度为 200 nm 的透明 ITO 并进行 ITO 与 p-GaN 的欧姆接触退火; 最后在 ITO 表面和第一步中 ICP 刻蚀出的 n-GaN 区域通过电子束蒸发设备蒸镀 Cr/Al/Ti/Au (10/100/50/100 nm) 金属层, 并在氮气氛围下 300 $^{\circ}\text{C}$ 退火 2 min 以获得良好的欧姆接触。本次实验一共有 3 个样品, 分别是由 40 keV 离子注入能量 (样品 A)、60 keV 离子注入能量 (样品 B)、120 keV + 60 keV 离子注入能量 (样品 C) 制备的 Micro-LED 阵列, 其中

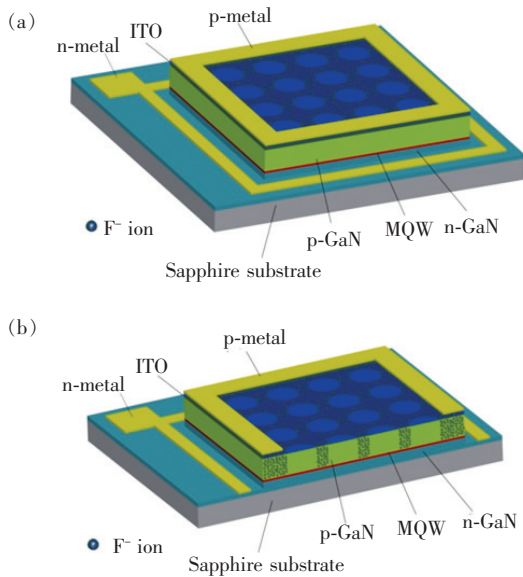


图 1 Micro-LED 阵列结构(a) 及其截面结构示意图(b)
Fig. 1 Schematic diagram of Micro-LED array structure (a) and its cross-sectional structure (b)

120 keV + 60 keV 离子注入能量是在制备样品 C 时先做 120 keV 的高能注入, 再进行 60 keV 低能注入。

2.2 样品表征

采用扫描电子显微镜 (SEM) 进行样品表面形

貌的观察。采用 Keysight B1505A 对所制备样品进行电学特性测试, 其中氟离子注入区域的方块电阻通过圆形传输线模型 (CTLM) 提取。LED 光电测试系统用于测试样品的光输出功率和计算光功率密度。

3 结果与讨论

3.1 样品的 SEM 形貌照片

图 2 显示了样品 B 完成离子注入后单颗像素孔直径为 4, 6, 8, 10 μm 的圆形蓝光 Micro-LED 阵列的表面形貌。可以清楚地看到, 所有 Micro-LED 器件都是有序排列的, 并且相同尺寸下的 Micro-LED 阵列中所有单颗 Micro-LED 表面形貌相同, 这表明离子注入隔离制备的器件阵列在形状和尺寸上具有良好的均匀性和一致性, 与预期设计相符。其中 4 μm Micro-LED 阵列中单颗 Micro-LED 中心有小黑点是由于实验过程中采用的 MA6 光刻机最小曝光光线宽有限, 使得光刻胶掩膜在被曝光时, 像素中心点处受到衍射光斑的影响而被曝光; 并且像素尺寸越小, 衍射光斑影响越大。因而在离子注入过程中, 4 μm Micro-LED 中心点处被注入了氟离子, 而 6, 8, 10 μm 的 Micro-LED 不受此影响。

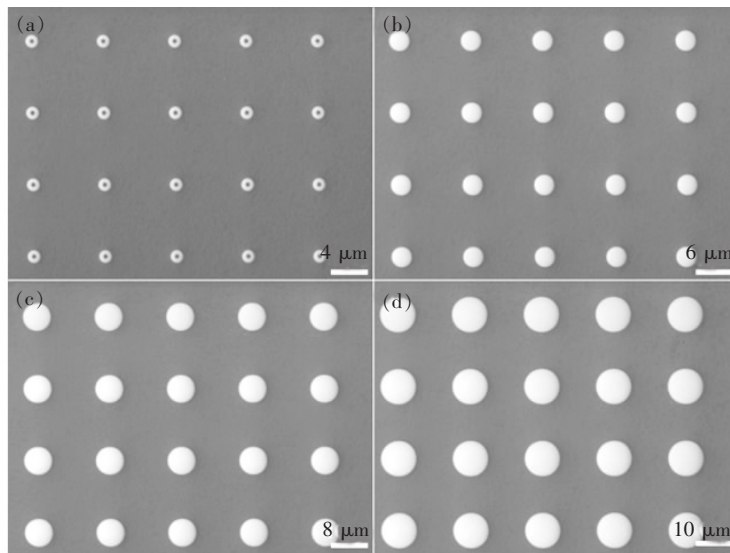


图 2 样品 B 中 4 μm (a)、6 μm (b)、8 μm (c) 和 10 μm (d) Micro-LED 阵列的表面形貌。

Fig. 2 Surface morphology of 4 μm (a), 6 μm (b), 8 μm (c) and 10 μm (d) Micro-LED arrays on sample B.

3.2 SIMS 测试分析

图 3 给出了样品 A、B 和 C 上氟离子注入区域的 SIMS 测试结果。In 和 Mg 两种元素的 SIMS 结果表明, LED 外延片结构与前述一致, 在 115 ~

232 nm 范围内存在着 9 个周期的 InGaN/GaN 量子阱。在 40 keV 单能离子注入情况下, 注入的氟离子仅存在于 p-GaN 层中; 在 60 keV 单能量离子注入情况下, 氟离子刚好穿透 p-GaN (见图 3(b)); 而

在 120 keV + 60 keV 双能量离子注入的情况下, p-GaN 层中的氟离子分布相对均匀(见图 3(c)),但是它已经穿透了 117 nm 厚的多量子阱区域(见图

3(d)),这将对器件的电性能产生不利影响。因此,本文后续部分将进一步分析量子阱破坏对 Micro-LED 器件阵列光电性能的影响。

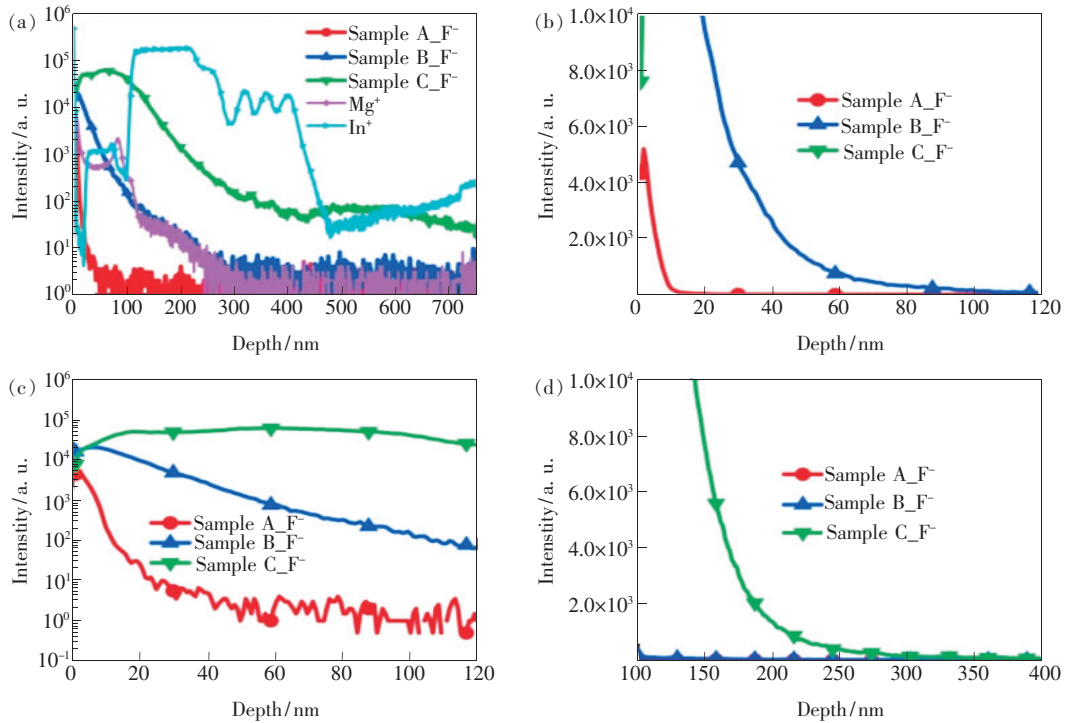


图 3 样品 A、B 和 C 中, F⁻、Mg⁺ 和 In⁺ 的 SIMS 深度分布图。(a)、(c)纵坐标 lg 后的离子强度与深度的变化关系;(b)、(d)纵坐标为线性变化的离子强度与深度的变化关系。

Fig. 3 SIMS depth profile of F⁻, Mg⁺ and In⁺ ions in samples A, B and C. (a), (c) Relationship between the ion intensity and the depth after the ordinate lg. (b), (d) Relationship between ion intensity and depth with a linear change in ordinate.

3.3 离子注入隔离区域 CTLM 测试分析

为了表征氟离子注入对器件阵列电隔离性能的影响,在完成前述 3 种不同能量的氟离子注入后,分别在样品 A、B 和 C 的氟离子注入区上方制备了一系列具有相同内直径(140 μm)的 CTLM

环,其外直径从小到大分别为 180, 200, 220, 240, 280, 340 μm。构成 CTLM 环的金属是 ITO/Cr/Al/Ti/Au (200/10/100/50/100 nm), CTLM 的制备过程与 Micro-LED 阵列制备中 ITO 和金属电极的制备工艺流程相同。图 4(a)是在 3 种不同离

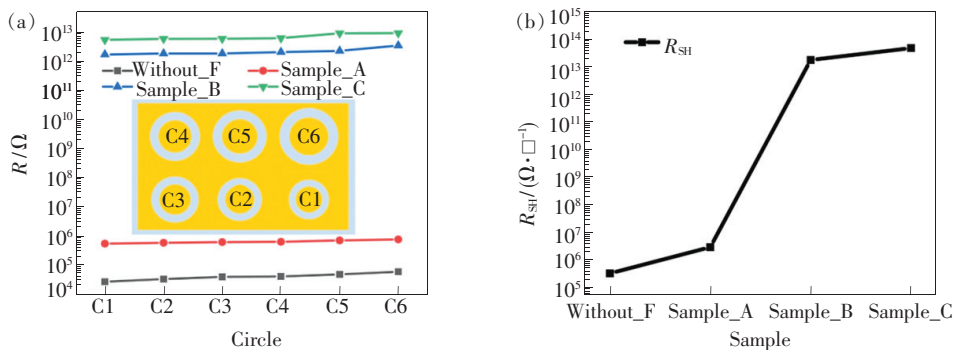


图 4 (a)各 CTLM 环在 -1 V 下的电阻值及测试用 CTLM 环组;(b)由样品 A、B 和 C 上 CTLM 环组提取出的方块电阻值。
Fig. 4 (a) Resistance value of each CTLM ring at -1 V and the test CTLM ring group. (b) Sheet resistance value extracted from the CTLM ring group on samples A, B and C.

子注入条件下,不同尺寸的 CTLM 环在相同电压 (-1 V) 下对应的电阻值。可以看出,同一组 CTLM 环的电阻值在同一量级,几乎不受 CTLM 环间距的影响。这表明,在某些注入条件下,可以认为离子注入区的电隔离效应与隔离间距无关。因此,离子注入隔离对于制备超小尺寸 Micro-LED 器件具有重要意义。图 4(b)为从图 4(a)所示的 3 种注入能量制备的 CTLM 环组中提取出的方块电阻值^[20],可以看出,从样品 A 的 CTLM 环组中提取的方块电阻值比从样品 B 和样品 C 中提取的方块电阻小 7~8 个数量级。这是由于样品 A 中氟离子注入能量较低,注入深度较浅,无法获得较好的电学隔离效果。当离子注入能量从 40 keV 增加到 60 keV 和 120 keV + 60 keV 时,方块电阻值呈指数增加,电学隔离效果越来越好。其中样品 B 和样品 C 中离子注入区的方块电阻值在同一数量级,但是后者稍大。

3.4 Micro-LED 阵列发光效果图

上述结果证明,将氟离子注入 LED 外延片可以获得显著的电学隔离效果。因此,为了直观地判断离子注入隔离制备的 Micro-LED 器件之间的光隔离效果,将相同的恒定直流电流 (1 mA) 连接至样品 A、B 和 C 上的 $10\text{ }\mu\text{m}$ Micro-LED 阵列。需要提前说明的是,因为拍照效果有限,三幅阵列都存在小幅度的畸形,但是仍能直观地看出其差异。从图中可以看出,样品 A 具有一定的光隔离特性(见图 5(a));但是不够明显;样品 B 和样品 C 具有非常明显的光隔离效果,其中样品 C 的光隔离效果更好(见图 5(c))。之所以出现这种光隔离的差异性,是因为当氟离子注入能量为 40 keV 时,氟离子被完全注入 p-GaN 的 15 nm 深度处,并且 p-GaN 没有被氟离子穿透(见图 3(b)),使得离子注入区下方无氟离子填充的 p-GaN 区域仍然能够发生载流子的大量迁移,从而载流子进一步迁移到离子注入区下方的 MQW 并进行发光复合。当离子注入能量为 60 keV 时,离子注入区的 p-GaN 层完全充满了氟离子,而 p-GaN 的严重损坏会导致氟离子注入区下方 MQW 区域中的载流子复合数量大幅减少。当离子注入条件为 120 keV + 60 keV 的双能注入时,氟离子不仅完全均匀地分布在 p-GaN 层中,而且完全注穿了 MQW 区域并到达 n-GaN 区域,此时离子注入区下方的 MQW 中只有极少的载流子会进行发光复

合,因此样品 C 具有相对最佳的光学隔离特性。另外,从后面的 $J-V$ 测试结果中可以看到,样品 C 由于其 120 keV + 60 keV 的双能注入而在 MQW 层中引入了大量缺陷,导致非离子注入区下方的 MQW 的边界区域存在更大的漏电,对应的器件阵列的外量子效率会大大降低,从而降低样品 C 的发光亮度。因此,尽管样品 C 具有最佳的光隔离特性,但样品 B 比样品 C 具有更好的发光亮度。

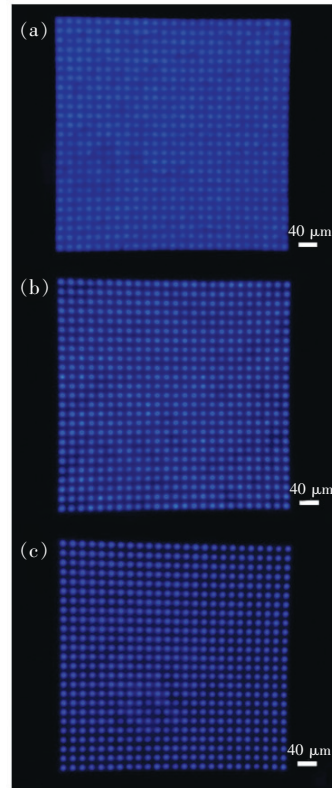


图 5 样品 A(a)、B(b)和 C(c)上 $10\text{ }\mu\text{m}$ Micro-LED 阵列的发光效果图。

Fig. 5 Luminous effect of the $10\text{ }\mu\text{m}$ Micro-LED arrays of sample A(a), B(b) and C(c).

3.5 Micro-LED 阵列 $J-V$ 测试与分析

由于样品 A 的光隔离效果较差,因此只进一步研究了样品 B 和样品 C 的器件性能。图 6(a)是相同尺寸 ($10\text{ }\mu\text{m}$) 下不同离子注入能量制备的 Micro-LED 阵列的 $J-V$ 曲线图。在 $-5\text{ }\sim\text{ }0\text{ V}$ 范围内,样品 C 的反向漏电高于样品 A 和 B,这是因为样品 C 的 MQW 已被完全破坏,氟离子在 MQW 中引入大量缺陷,这些缺陷将捕获一定数量的载流子使得漏电增加^[21]。在 $2\text{ }\sim\text{ }5\text{ V}$ 的正向电压范围内,样品 B 和 C 上 Micro-LED 阵列的 $J-V$ 特性

接近,但在 $0 \sim 2$ V 范围内样品 B 的电学性能更好。图 6(b) 是样品 B 中单颗像素尺寸为 $4, 6, 8, 10 \mu\text{m}$ 的 Micro-LED 阵列的 J - V 曲线图。可以看出, Micro-LED 的反向泄漏电流随着像素尺寸的减小而略有增加,这是因为离子注入过程中也存在相应的损伤,这种损伤会随着器件尺寸的减小而在器件单位面积上剧增。然而图中所示的漏电差异并非极其大,说明离子注入制备的 Micro-LED 阵列的漏电都在一定范围内。同时与图 6(a) 相比,图 6(b) 样品 B 中 4 种尺寸的 Micro-LED 阵列在正向电压范围内的电性能均略好于样品 C。

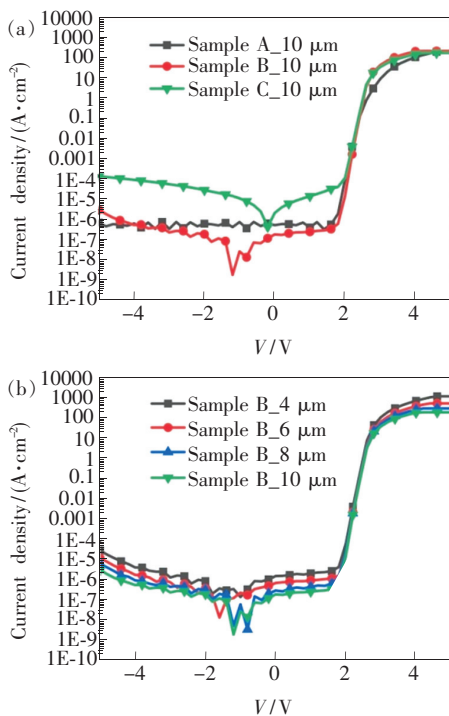


图 6 (a) 样品 A、B 和 C 上 $10 \mu\text{m}$ Micro-LED 阵列; (b) 样品 B 上 $4, 6, 8, 10 \mu\text{m}$ Micro-LED 阵列的电流密度和电压关系曲线。

Fig. 6 (a) Relationship between the current density and voltage of the $10 \mu\text{m}$ Micro-LED array on samples A, B and C. (b) Relationship between the current density and voltage of the $4, 6, 8, 10 \mu\text{m}$ Micro-LED arrays on sample B.

3.6 Micro-LED 阵列光功率测试与分析

图 7(a) 为采用 60 keV 离子注入能量制备的不同尺寸的 Micro-LED 阵列的光学特性测试结果。可以发现, $4, 6, 8, 10 \mu\text{m}$ Micro-LED 器件阵列能够输出较高的最大光功率密度, 其中 $4 \mu\text{m}$ Micro-LED 器件阵列的最大光功率密度 (~ 200

W/cm^2) 远高于其他 3 种尺寸的器件阵列。4 种尺寸器件阵列的光功率密度分别在 $4800, 2000, 1200, 900 \text{ A}/\text{cm}^2$ 处达到饱和, 同时最大光功率密度存在着随像素尺寸减小而增加的规律, 主要原因是电流拥挤效应和热堆积效应^[17] 对较小尺寸的 Micro-LED 阵列具有更低的影响。图 7(b) 为样品 B 上 $4, 6, 8, 10 \mu\text{m}$ 四种尺寸 Micro-LED 阵列的外量子效率 (EQE) 与电流密度的关系, 从图中可以看到, $10 \mu\text{m}$ Micro-LED 阵列的峰值 EQE 接近 4% , 该结果高于文献 [12] 中 ICP 干法刻蚀制备的 $10 \mu\text{m}$ Micro-LED 不到 2.5% 的峰值 EQE。另外, 从图中还可以看出, 基于离子注入工艺制备的 Micro-LED 阵列的 EQE 受到器件尺寸的影响较为明显, 这是因为在离子注入过程中 Micro-LED 器件边缘被引入了大量晶格损伤, 并且器件单位面积的晶格损伤会随着器件尺寸减小而增多, 从而使得 Micro-LED 阵列的光效受器件尺寸的影响十分明显。

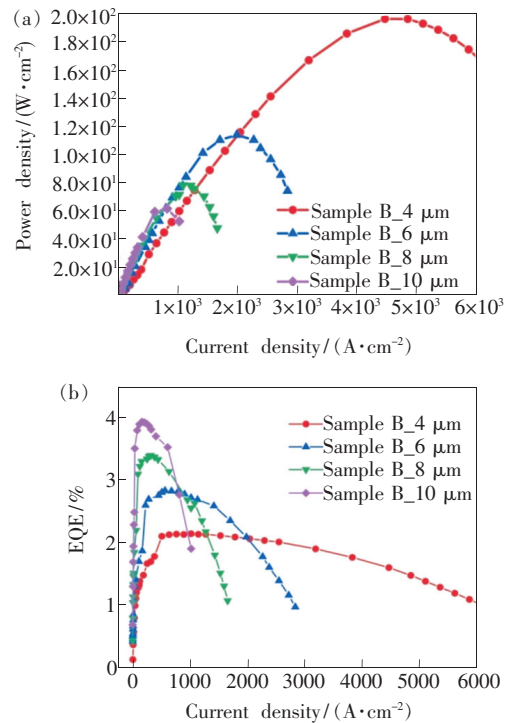


图 7 (a) 样品 B 上不同尺寸的 Micro-LED 阵列的光功率密度与电流密度的关系; (b) 样品 B 上不同尺寸 Micro-LED 阵列的外量子效率与电流密度的关系。

Fig. 7 (a) Relationship between the optical power density and current density of the Micro-LED arrays of different sizes on sample B. (b) Relationship between the external quantum efficiency and current density of the Micro-LED arrays of different sizes on sample B.

4 结 论

本文采用离子注入工艺将高电阻态引入LED结构顶层p-GaN的特定区域,完成了超小尺寸横向结构的Micro-LED器件制备。采用60 keV单能量注入的Micro-LED阵列反向漏电优于120 keV+60 keV双能量注入的器件,因为双重注入氟离子已经穿透

并严重破坏了量子阱区域,导致其漏电大幅增加。另外,60 keV单能注入制备的Micro-LED阵列漏电最低,其中4 μm Micro-LED阵列的最大光输出功率密度高达200 W/cm^2 。因此,离子注入工艺将为超小尺寸Micro-LED芯片制备提供新思路,并且这种传统的平面化微纳加工工艺方案在第三代半导体新型器件制备中具有性能优势和产业化前景。

参 考 文 献:

- [1] CHEN C J, CHEN H C, LIAO J H, *et al.*. Fabrication and characterization of active-matrix 960 \times 540 blue GaN-Based micro-LED display [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2019, 55(2): 3300106-1-6.
- [2] DAY J, LI J, LIE D Y, *et al.*. III-nitride full-scale high-resolution microdisplays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(3): 031116-1-3.
- [3] HAN H V, LIN H Y, LIN C C, *et al.*. Resonant-enhanced full-color emission of quantum-dot-based micro LED display technology [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(25): 32504-32515.
- [4] CHONG W C, CHO W K, LIU Z J, *et al.*. 1 700 pixels per inch (PPI) passive-matrix micro-LED display powered by ASIC [C]. *Proceedings of 2014 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, La Jolla*, 2014: 1-4.
- [5] WU T Z, SHER C W, LIN Y, *et al.*. Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology [J]. *Appl. Sci.*, 2018, 8(9): 1557-1-17.
- [6] MEI S L, LIU X Y, ZHANG W L, *et al.*. High-bandwidth white-light system combining a micro-LED with perovskite quantum dots for visible light communication [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(6): 5641-5648.
- [7] WASISTO H S, PRADES J D, GÜLINK J, *et al.*. Beyond solid-state lighting: miniaturization, hybrid integration, and applications of GaN nano- and micro-LEDs [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2019, 6(4): 041315-1-40.
- [8] HORNG R H, CHIEN H Y, TARNTAIR F G, *et al.*. Fabrication and study on red light micro-LED displays [J]. *IEEE J. Electron Devices Soc.*, 2018, 6: 1064-1069.
- [9] HUANG Y G, TAN G J, GOU F W, *et al.*. Prospects and challenges of mini-LED and micro-LED displays [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2019, 27(7): 387-401.
- [10] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, *et al.*. Mini-LED, micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives [J]. *Light Sci. Appl.*, 2020, 9(1): 105-1-16.
- [11] DAAMI A, OLIVIER F, DUPRÉ L, *et al.*. 59-4: Invited Paper: electro-optical size-dependence investigation in GaN micro-LED devices [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, 2018, 49(1): 790-793.
- [12] ZHU J, TAKAHASHI T, OHORI D, *et al.*. Near-complete elimination of size-dependent efficiency decrease in GaN micro-light-emitting diodes [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2019, 216(22): 1900380-1-6.
- [13] LIN H Y, SHER C W, HSIEH D H, *et al.*. Optical cross-talk reduction in a quantum-dot-based full-color micro-light-emitting-diode display by a lithographic-fabricated photoresist mold [J]. *Photonics Res.*, 2017, 5(5): 411-416.
- [14] HIGO A, KIBA T, TAMURA Y, *et al.*. Light-emitting devices based on top-down fabricated GaAs quantum nanodisks [J]. *Sci. Rep.*, 2015, 5: 9371-1-8.
- [15] SAMUKAWA S. A neutral beam process for controlling surface defect generation and chemical reactions at the atomic layer [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2015, 4(6): N5089-N5094.
- [16] WANG M J, CHEN K J. Improvement of the off-state breakdown voltage with fluorine ion implantation in AlGaIn/GaN HEMTs [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2011, 58(2): 460-465.
- [17] XU F, GAO C H, FAN Y M, *et al.*. Enhanced performance of vertical-structured InGaIn micro-pixelated light-emitting-diode array fabricated using an ion implantation process [J]. *Opt. Lett.*, 2019, 44(18): 4562-4565.
- [18] GUO W L, TAI J P, LIU J P, *et al.*. Process optimization of passive matrix GaN-based micro-LED arrays for display applications [J]. *J. Electron. Mater.*, 2019, 48(8): 5195-5201.

- [19] 刘洪楷. 采用离子注入工艺制造平面型 LED [J]. 光机电信息, 2000,17(4):21-22.
LIU H K. Using ion implantation process to manufacture planar LED [J]. *OME Inf.*, 2000,17(4):21-22. (in Chinese)
- [20] LIN S X, MENG D, WEN C P, *et al.*. Analysis on the CTLM and LTLM applicability for GaN HEMTs structure alloyed ohmic contact resistance evaluation [C]. *Proceedings of 2013 IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-state Circuits, Hong Kong, China*, 2013:1-2.
- [21] OLIVIER F, DAAMI A, LICITRA C, *et al.*. Shockley-Read-Hall and Auger non-radiative recombination in GaN based LEDs: a size effect study [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017,111(2):022104.



谭毅(1996 -),男,湖北利川人,硕士研究生,2018年于湖北大学获得学士学位,主要从事氮化镓基微型发光二极管的研究。

E-mail: ytan2019@sinano.ac.cn



张宝顺(1969 -),男,吉林双辽人,博士,研究员,2003年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事半导体材料生长和器件工艺的研究。

E-mail: bszhang2006@sinano.ac.cn