

文章编号: 1000-7032(2025)10-1953-08

蜂巢表面 AlGaInP 基倒装 Micro-LED 的光电性能

谢 军¹, 张 威^{1,2}, 谢子敬¹, 徐盛海², 王 洪^{1,2,3*}

(1. 华南理工大学 物理与光电学院, 广东省光电工程技术研究中心, 广东 广州 510630;

2. 京东方华灿光电股份有限公司, 浙江 义乌 322000;

3. 中山市华南理工大学现代产业技术研究院, 广东 中山 528437)

摘要: AlGaInP 基红光 Micro-LED 较低的光提取效率限制了器件的发光强度。本文提出了一种自组装 Ni 金属纳米掩模和湿法刻蚀技术, 获得了具有高密度、高均匀性的 GaP 表面纹理, 通过表面纹理增加临界角降低全内反射效应从而有效地提高了器件光提取效率。使用不同厚度的镍掩膜获得不同形貌的表面纹理。结果表明, 在 20 A/cm² 电流密度下, 使用 1 nm 厚镍金属纳米掩膜湿法刻蚀的 Micro-LED 的发光强度和外量子效率比无表面纹理的 Micro-LED 分别提升 21.04% 和 23.58%。提出了一种使用 ICP 干法刻蚀结合湿法刻蚀制备蜂巢型圆柱状表面纹理。在相同工艺的 ICP 刻蚀后对 GaP 层湿法腐蚀不同时间, 在电流密度为 20 A/cm² 时, 使用 ICP 蚀刻和湿法蚀刻 10 s*3 次的 Micro-LED 发光强度和外量子效率分别比无表面纹理的 Micro-LED 提高了 81.61% 和 48.40%。

关 键 词: AlGaInP; 倒装; 光提取效率; Micro-LED; 表面纹理

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A

DOI: 10. 37188/CJL. 20250138

CSTR: 32170. 14. CJL. 20250138

Photoelectric Performance of AlGaInP-based Flip-chip
Micro-LEDs with Honeycomb Surface TextureXIE Jun¹, ZHANG Wei^{1,2}, XIE Zijing¹, XU Shenghai², WANG Hong^{1,2,3*}

(1. Engineering Research Center for Optoelectronics of Guangdong Province, School of Physics and Optoelectronics,

South China University of Technology, Guangzhou 510630, China;

2. BOE HC SEMITEK Co., Yiwu 322000, China;

3. Zhongshan Institute of Modern Industrial Technology, South China University of Technology, Zhongshan 528437, China)

* Corresponding Author, E-mail: phhwang@scut.edu.cn

Abstract: The low light extraction efficiency of AlGaInP-based red light Micro-LEDs limits the luminescence intensity of the devices. A self-assembled Ni metal nanomask and wet etching technique was proposed to obtain GaP surface texture with high density and high uniformity. The critical angle is increased by surface texture to reduce the total internal reflection effect, thereby effectively improving the efficiency of light extraction. Different surface textures were obtained by using nickel masks of different thicknesses. The results show that at a current density of 20 A/cm², the luminescent intensity and external quantum efficiency of the Micro-LED wet-etched with a 1 nm thick nickel metal nano-mask are increased by 21.04% and 23.58%, respectively, compared with the Micro-LED without surface texture. Another method for preparing honeycomb cylindrical surface texture using ICP dry etching combined with wet etching was proposed. The GaP layer was wet-etched for different durations after the same ICP etching process. The results show that when the current density is 20 A/cm², the luminous intensity and external quantum efficiency of Micro-LED etched by ICP and wet etching for 10 s *3 times are increased by 81.61% and 48.40%, respectively,

收稿日期: 2025-05-02; 修订日期: 2025-05-17

基金项目: 广东省科技计划项目(2020B010171001); 中山市科技发展专项基金项目(2019AG042, 2020AG023, 2023A0002)

Supported by Science and Technology Plan Project of Guangdong Province (2020B010171001); Science and Technology Development Special Fund Projects of Zhongshan City (2019AG042, 2020AG023, 2023A0002)

compared with the Micro-LED without surface texture.

Key words: AlGaInP; flip-chip; light extraction efficiency; Micro-LED; surface texture

1 引 言

Micro-LED 作为新一代显示技术,由于具有高亮度、高对比度、快速响应、低功耗等优点而受到广泛关注,可广泛应用于全彩显示、虚拟现实(VR)/增强现实(AR)、可见光通信等领域^[1-4]。通过有机化学气相沉积生长的四元 AlGaInP 基红光 Micro-LED 具有直接带隙跃迁的材料特性^[5-6]。由于 AlGaInP 可以精确地与 GaAs 衬底晶格匹配,以其制备的器件内量子效率接近 99%^[7-8]。然而,由于 GaAs 衬底对黄绿光(560 nm)到红光(650 nm)波长范围内光的吸收,降低了光子逃逸的概率。此外,GaP 层和出射介质之间存在较大的折射率差异,以空气作为出射介质,其临界角约为 17°^[9-11]。全反射定律表明,当光的入射角大于临界角时,光会被全反射回器件内部,并经过材料多次反射,最终转化为热能^[12-14]。对于红光 Micro-LED,从多量子阱中出射的光只有大约 2.5% 能够从 GaP 层表面逃逸^[15-16]。因此,本文通过改变 GaP 层表面形貌,提高 Micro-LED 光提取效率来提升器件光学性能。

在过去的几十年里,研究者们研究了各种方法来提高 Micro-LED 的光提取效率,例如生长具有高光学透过率和高导电性的厚 p-GaP 层作为电流扩展层^[17]、中空半球形聚苯乙烯(HHPS)阵列^[7]、全向反射镜^[18-19]、光子晶体^[20]、改变器件形状^[21]、表面纹理^[22-25]、图案化衬底^[26-28]等。这些技术中,表面纹理因具有重复性高、可控性强、低成本和可批量生产等优点而被广泛应用于提高光提取效率。干法或湿法刻蚀均可制备出高密度、高均匀性的表面纹理^[29-31]。然而,在形貌工艺中,往往会因为干法或者湿法刻蚀带来的缺陷而造成器件漏电通道的增加而增大电能损耗,提高了器件的开启电压和电流。

本文旨在提高 Micro-LED 的光提取效率的同时降低电功率损耗,沉积了镍金属作为掩膜,然后使用溶液腐蚀 GaP 层,制备具有表面纹理的 AlGaInP 基倒装 Micro-LED。为避免 GaAs 衬底对光的吸收,进一步提高光提取效率,将器件的 GaAs 衬底剥离并与蓝宝石结合。在电流密度为

20 A/cm²时,使用 1 nm 厚镍金属纳米掩膜湿法蚀刻的 Micro-LED 的发光强度为 13.23 mcd,相较于无表面纹理的 Micro-LED 的发光强度 10.93 mcd 提升了 21.04%。此外,使用 ICP 干法刻蚀和湿法刻蚀相结合的方法制备蜂巢型圆柱状表面纹理。结果表明,在电流密度为 20 A/cm²时,使用 ICP 蚀刻和湿法蚀刻 10 s*3 次的 Micro-LED 发光强度比无表面纹理的 Micro-LED 提高了 81.61%。

2 实 验

通过金属有机化学气相沉积(MOCVD)在 4 英寸 GaAs(100)衬底上制备发光波长为 630 nm 的红光 AlGaInP 基 Micro-LED。器件结构包含 0.3 μm 厚的 n 型 GaAs 欧姆接触层、1.3 μm 厚的 n 型 AlGaInP 层、270 nm 厚的 4 对未掺杂的 (Al_{0.65}Ga_{0.35})_{0.5}In_{0.5}P 多量子阱层、530 nm 厚的 p 型 AlGaInP 层和 4.5 μm 厚的 p 型 GaP 层。图 1(a)~(g)是红光 AlGaInP 基 Micro-LED 制备工艺流程图。详细过程包括以下步骤:如图 1(a)所示,使用丙酮超声清洗外延片 10 min,异丙醇浸泡 30 s,再用去离子水冲洗 2 min,去除样片表面有机物。将外延片在 60 °C 的 511 溶液中浸泡 5 min,使用去离子水冲洗 2 min。再在 60 °C 的氨水中浸泡 10 min,用去离子水冲洗 2 min 去除表面离子和氧化物,最后在 105 °C 的热板上烘烤 5 min。使用电子束蒸发沉积镍金属,如图 1(b)所示。然后通过快速热退火(RTA)将器件在 550 °C 下退火 60 s,形成镍金属纳米颗粒,用作蚀刻掩膜,如图 1(c)所示。在图 1(d)中,GaP 层用粗化液(HCl:HNO₃:H₂O=3:1:3)蚀刻 30 s,蚀刻 3 次,形成表面纹理。然后用苯并环丁烯(BCB)将器件键合到蓝宝石上,再用 NH₄OH:H₂O₂:H₂O 混合溶液去除 GaAs 衬底,如图 1(e)、(f)所示。随后,使用电感耦合等离子体系统(ICP),以 Cl₂ 和 BCl₃ 作为蚀刻气体,刻蚀出台面结构。然后使用电子束蒸发沉积 N/P 一次电极 Cr/Al/Ti/Au(50/800/200/200 nm)。采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)沉积 80 nm 的 SiO₂ 钝化层。采用电感耦合等离子体反应离子刻蚀(RIE-ICP)选择性刻蚀一次电极上的 SiO₂ 形成孔径,然后沉积 N/P 二次电极 Ti/Pt/Au(10/50/

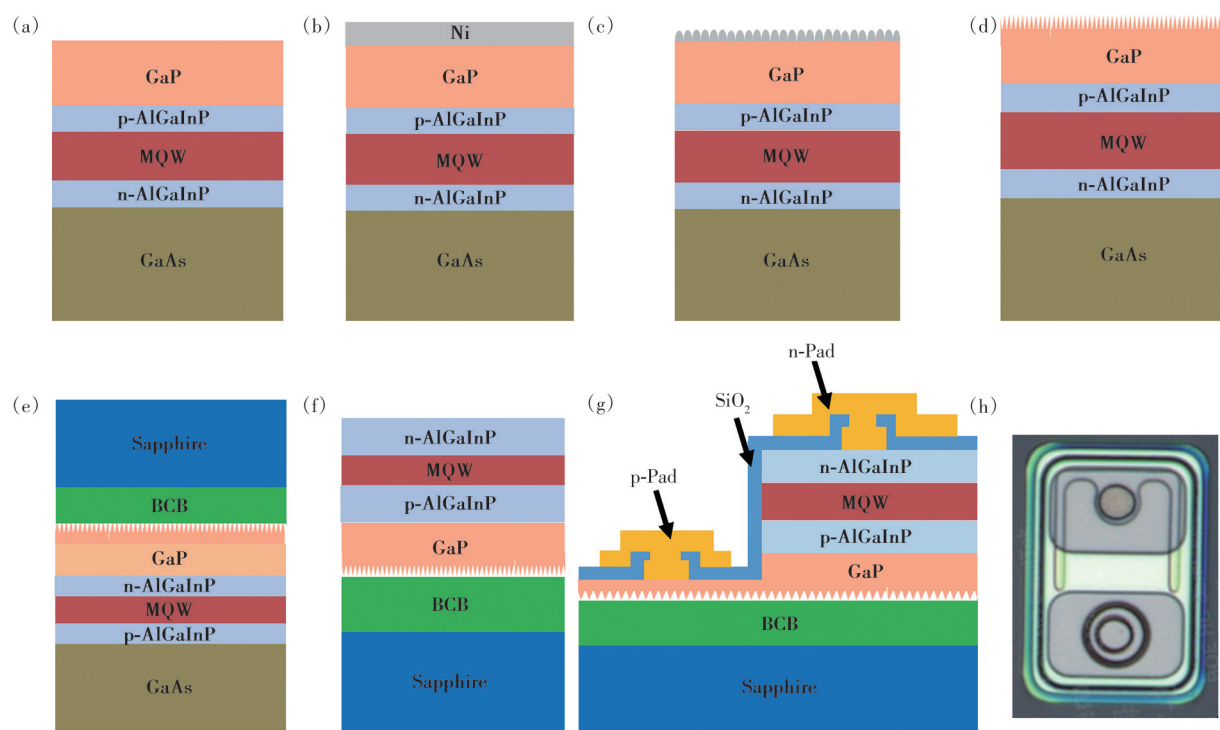


图1 (a)外延片;(b)外延片上沉积镍金属;(c)RTA后的镍金属纳米颗粒;(d)GaP层表面纹理;(e)BCB键合蓝宝石;(f)剥离 GaAs 衬底;(g)Micro-LED 器件结构;(h)Micro-LED 显微镜图

Fig.1 (a) Epitaxial wafer. (b) Nickel metal is deposited on the epitaxial wafer. (c) Nickel metal nanoparticles after RTA. (d) Surface texture of the GaP layer. (e)BCB-bonded sapphire. (f)Stripping the GaAs substrate. (g)Micro-LED device structure. (h)Micro-LED microscope image

1 000 nm)。制备完成的器件结构如图 1(g)所示。Micro-LED 的尺寸为 40 μm×60 μm。研究不同厚度(0 nm、1 nm 和 2 nm)的镍金属掩膜对 GaP 层表面纹理的影响。三种不同镍掩膜厚度的器件分别标记为样品 2、样品 3 和样品 4。此外,为了更好地进行对比分析,同时制备了无表面纹理的 Micro-LED 器件(标记为样品 1)。

3 结果与讨论

3.1 普通湿法刻蚀样品表征

通过聚焦离子束(FIB)和扫描电子显微镜(SEM)获得了所有样品的截面图和表面形貌,如图 2 所示。图 2(a)中,样品 1 的表面形貌平整。表面有少量突出的颗粒,这可能是外延生长过程不均造成的。而 SEM 图像中可以看出,样品 2 中不同尺寸的纳米颗粒不规则分布在 GaP 表面,这在横截面图中也可以看到。如图 2(b)~(d)所示,样品 3 中 GaP 层表面纳米颗粒的尺寸最小,分布最均匀。均匀和规则的表面纹理有助于光子从量子阱逃逸到空气中,有利于提高 Micro-LED 的光提取效率。

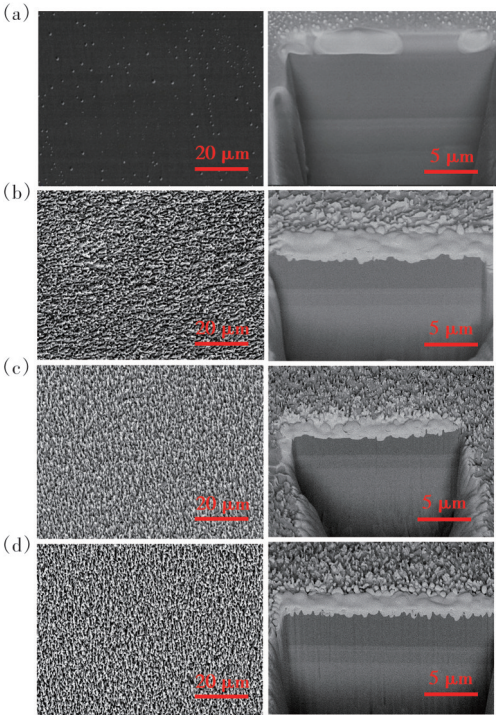


图2 左图和右图分别为 GaP 层的 SEM 图和 FIB 图。(a) 样品 1;(b)样品 2;(c)样品 3;(d)样品 4

Fig.2 The images on the left and right are the SEM and FIB images of the GaP layer. (a)Sample 1. (b)Sample 2. (c)Sample 3. (d)Sample 4

Micro-LED 器件的反向漏电流和 J - V 曲线如图 3 所示。从图 3(a) 中可以得到, 所有样品的漏电流没有显著差异。在 -9 V 的反向电压下, 所有样品的反向漏电流接近, 约为 4.7×10^{-8} A。这表明, 在蚀刻过程中, 湿法蚀刻对器件的反向漏电流没有明显影响。如图 3(b) 所示, 在电流密度为 20 A/cm² 时, 样品 1、样品 2、样品 3 和样品 4 的正向电压分别为 1.99 V、 2.03 V、 2.00 V 和 2.01 V。几乎相同的正向电压表明湿法刻蚀 GaP 层没有显著影响 Micro-LED 的电学性能。值得注意的是, 如图 3(b) 插图所示, 与样品 2 和 4 相比, 样品 3 采用 1 nm 镍掩膜的粗化方法对器件电性能的影响最小, 这归因于 GaP 表面纳米颗粒的均匀分布。

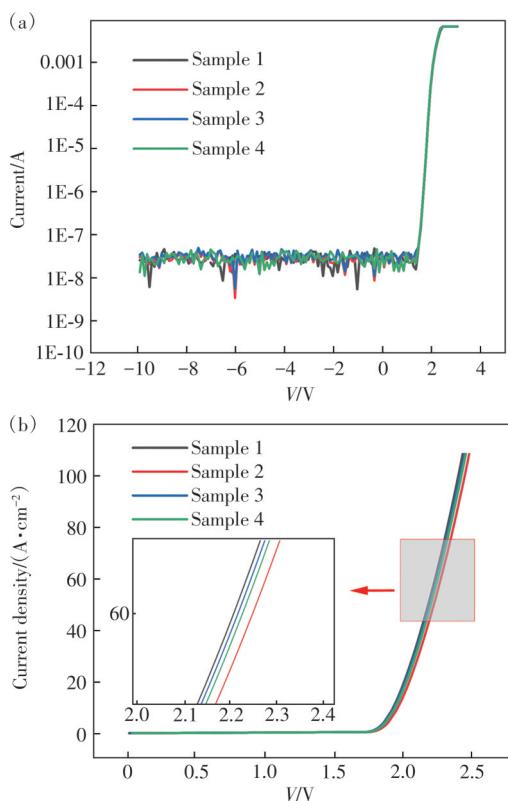


图 3 (a) 反向漏电流; (b) AlGaInP 基 Micro-LED 的 J - V 曲线, 插图: J - V 曲线局部放大图

Fig.3 (a) Reverse leakage. (b) J - V curves of AlGaInP-based Micro-LED. Insert: local enlargement of J - V curves

所有样品的发光强度和外量子效率使用电致发光设备 (EL) 测试得到, 其随电流密度的变化如图 4 所示。在 20 A/cm² 电流密度下, 样品 1、样品 2、样品 3 和样品 4 的发光强度分别为 10.93 mcd、 12.38 mcd、 13.23 mcd 和 12.58 mcd, 外量子效率分别为 15.39% 、 17.97% 、 19.02% 和 17.98% 。与样品 1 相比, 样品 2、样品 3 和样品 4 的发光强度分

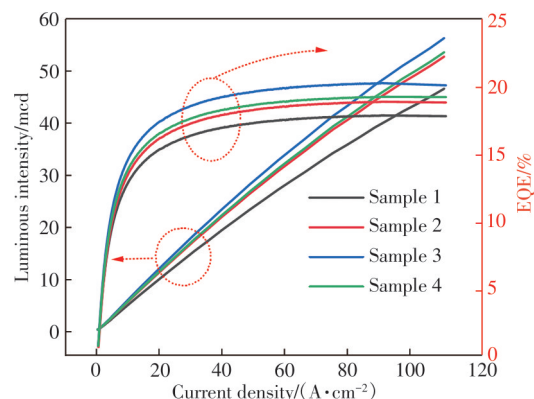


图 4 AlGaInP 基 Micro-LED 的 I - J 曲线和 EQE- J 曲线

Fig.4 I - J curves and EQE- J curves of AlGaInP-based Micro-LED

别提高了 13.26% 、 21.04% 、 15.09% , 外量子效率分别提高了 16.76% 、 23.58% 、 16.83% 。上述结果表明, GaP 层的表面纹理提高了 Micro-LED 的发光效率。这是由于 GaP 层的表面纳米颗粒增加了反射临界角, 使得光子从半导体逃逸到空气的概率增加, 从而提高了光提取效率。与未使用 Ni 金属纳米掩膜的器件 (样品 2) 相比, 使用 Ni 金属纳米掩膜的器件 (样品 3 和 4) 的发光强度和外量子效率均有所提高, 并且样品 3 的发光强度和外量子效率比样品 4 分别提高了 5.17% 和 5.78% 。这是由于样品 3 的 GaP 层表面纹理更加均匀, 使光子逃逸的可能性更大。

3.2 蜂巢型样品表征

上一节中表面纹理的应用有助于发光强度和外量子效率的提升, 如图 5(a)、(b) 所示, 经过湿法刻蚀后的样品表面复杂度增加, 当 LED 量子阱中辐射出的光线到达粗化的 GaP 表层时, 更多原本大于临界角的光线能出射到芯片外部, 从而增加了光子从半导体到空气界面逃逸的概率。

为了制备更规则和均匀的表面纹理提高光提取效率, 在湿法蚀刻之前采用 ICP 干法蚀刻, 利用 ICP 垂直刻蚀的性质, 增大了 GaP 层的光线出射表面和复杂度; 随之使用湿法刻蚀在台面侧壁进行粗化, 在表面形成了一种均匀的新型蜂巢型圆柱状表面纹理, 光线在圆柱内能通过多次反射折射而逃逸^[16,23], 如图 5(c) 所示。ICP 功率为 500 W, 射频功率为 365 W。蚀刻气体为 Cl_2/BCl_3 , 流速分别为 90 mL/min 和 10 mL/min。在相同的 ICP 蚀刻工艺下使用不同的湿法刻蚀时间 (10 s*3 次, 20 s*3 次, 30 s*3 次) 制备出三种不同器件, 分别标记为样品 5、样品 6 和样品 7。蚀刻 GaP 层表面形

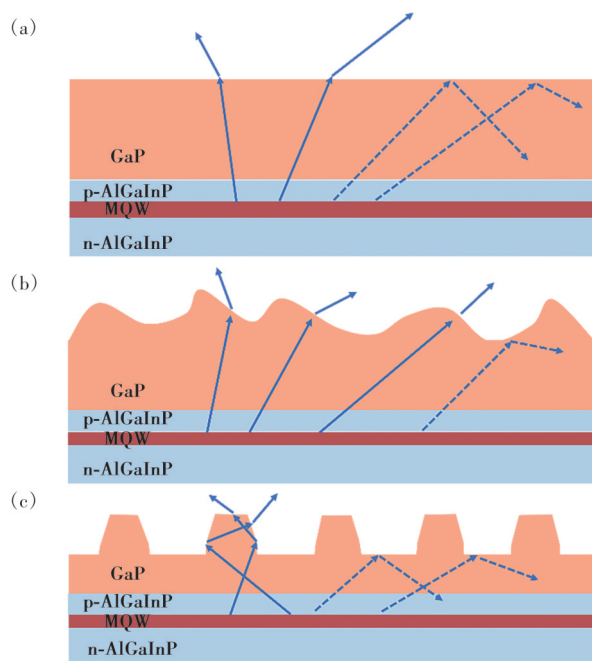


图 5 不同样品表面的光出射路线。(a)无处理样品 1; (b)湿法刻蚀样品 2~4; (c)蜂巢型表面样品 5~7

Fig.5 The light emitting path form different surface of (a) Sample 1, (b) Sample 2~4, and (c) Sample 5~7

貌的 SEM 和 FIB 图如图 6 所示。三种样品两个相邻圆柱体之间的距离为 $1.65\ \mu\text{m}$, 但圆柱体的直径和高度存在差异。样品 5 的圆柱体直径为 $1.916\ \mu\text{m}$, 高度为 $517\ \text{nm}$; 样品 6 的圆柱体直径为 $2.230\ \mu\text{m}$, 高度为 $492\ \text{nm}$; 而样品 7 的圆柱体直径

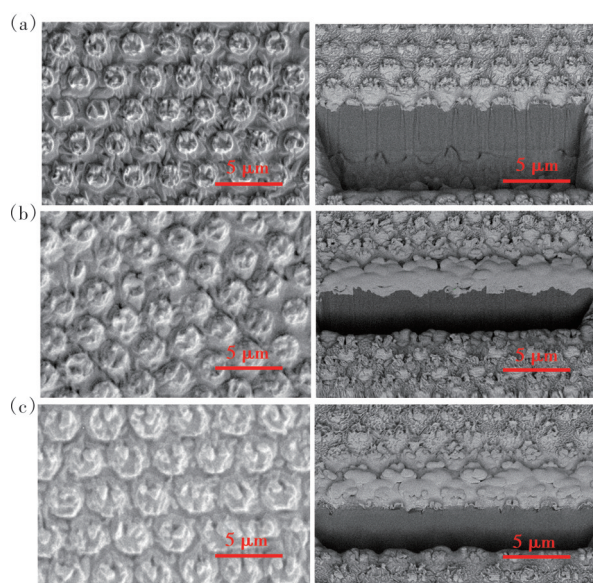


图 6 左图和右图分别为 GaP 层的 SEM 图和 FIB 图。(a) 样品 5; (b) 样品 6; (c) 样品 7

Fig.6 The SEM and FIB images of GaP layer are presented left and right, respectively. (a) Sample 5. (b) Sample 6. (c) Sample 7

约为 $2.247\ \mu\text{m}$, 高度约为 $467\ \text{nm}$ 。结果表明, 湿法刻蚀时间过长会使 GaP 层表面变平, 此时的表面纹理不利于光出射。

器件的反向漏电流和 J - V 曲线如图 7 所示, 其中样品 1 对应于平面结构的器件。图 7(a) 表明, 采用干法和湿法蚀刻的方法对器件的漏电流没有显著影响, 器件的漏电流在 $-9\ \text{V}$ 的反向偏置下测量值约为 $5.1 \times 10^{-8}\ \text{A}$ 。如图 7(b) 所示, 在电流密度为 $20\ \text{A}/\text{cm}^2$ 时, 样品 1、样品 5、样品 6 和样品 7 的正向偏置电压分别为 $1.99\ \text{V}$ 、 $1.95\ \text{V}$ 、 $1.96\ \text{V}$ 和 $1.97\ \text{V}$ 。如图 7(b) 插图所示, 与平面结构的样品 1 相比, 干法和湿法蚀刻后器件的电学性能得到了增强。样品 5 的器件电学性能提升最为显著。

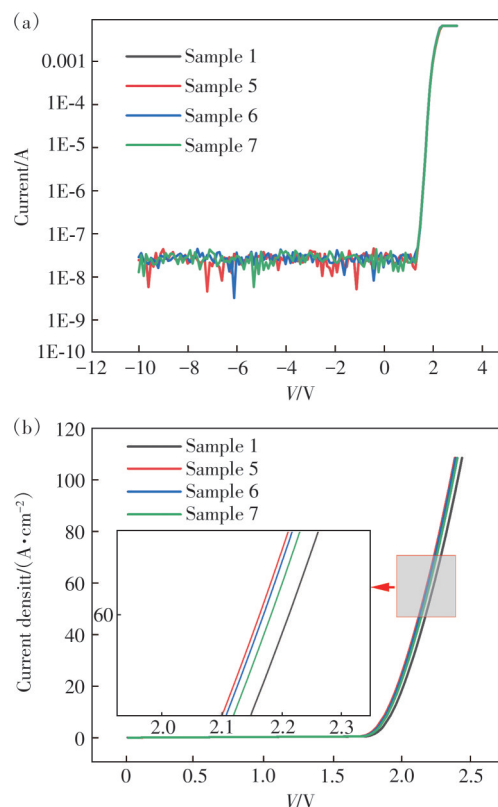


图 7 (a) 反向漏电流; (b) Micro-LED 的 J - V 曲线, 插图: J - V 曲线局部放大图

Fig.7 (a) Reverse leakage. (b) J - V curves of Micro-LED. Insert: local enlargement of J - V curves

所有样本的 I - J 曲线和 EQE- J 曲线如图 8(a) 所示。发光强度与电流密度呈线性关系, 而外量子效率在较低水平下随着电流密度的增加而快速增加, 达到峰值后逐渐趋于稳定。在 $20\ \text{A}/\text{cm}^2$ 电流密度下, 样品 1、样品 5、样品 6 和样品 7 的发光强度分别为 $10.93\ \text{mcd}$ 、 $19.85\ \text{mcd}$ 、 $19.21\ \text{mcd}$ 和 $15.99\ \text{mcd}$,

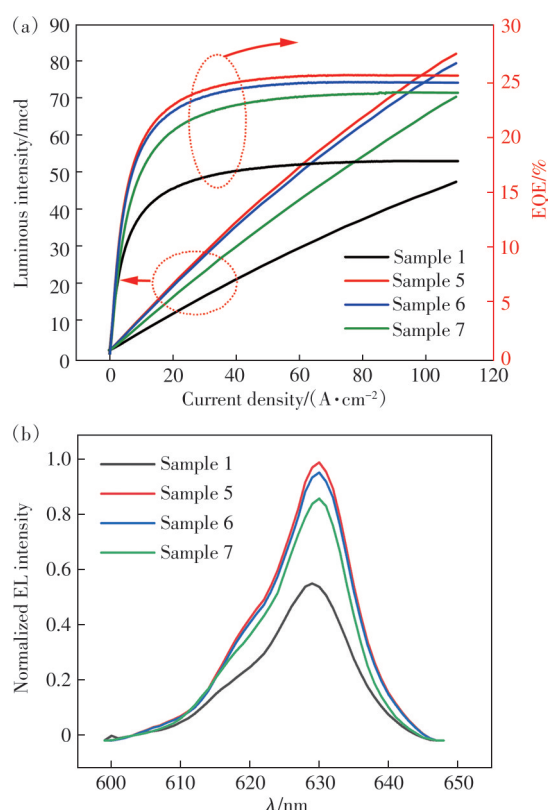


图8 (a) Micro-LED的 I - J 曲线和 EQE- J 曲线; (b) Micro-LED 归一化的 EL 曲线

Fig.8 (a) I - J and EQE- J curves of Micro-LED. (b) Normalized EL curves of Micro-LED

外量子效率分别为 15.39%、22.84%、22.28% 和 20.54%。与样品 1 相比,样品 5、样品 6 和样品 7 的发光强度分别显著提高了 81.61%、75.75% 和 46.29%,外量子效率分别提高了 48.40%、44.77% 和 33.46%。研究表明,使用 ICP 刻蚀和溶液刻蚀 10 s*3 次的样品 5 对 AlGaInP 基 Micro-LED

光学性能的提高最为显著,这是因为样品 5 相较于其他样品具有更加均匀和规则的表面纹理,增加了折射面,更好地抑制全内反射效应,使得更多光子逃逸到器件外部。器件的归一化 EL 光谱如图 8(b) 所示,其峰值波长均为 630 nm。在电流密度为 20 A/cm² 时,与样品 1 相比,样品 5、样品 6 和样品 7 在 630 nm 波长处的发光强度分别提高了 77.10%、70.62% 和 54.03%,这进一步表明表面纹理可以提高 AlGaInP 基 Micro-LED 的发光强度,并且器件的电学性能没有明显下降。

4 结 论

本文采用自组装镍金属纳米掩膜和 ICP 刻蚀结合湿法刻蚀两种不同的方法制备了具有 GaP 表面纹理的 AlGaInP 基倒装 Micro-LED。通过 SEM 和 FIB 分析表征了 GaP 层的表面形貌,结果表明,两种方法制备的 GaP 层表面纹理具有高密度和高均匀性,均提高了 Micro-LED 的发光强度,并且对器件的电学性能没有明显损耗。在电流密度为 20 A/cm² 时,使用 1 nm 厚镍金属纳米掩膜湿法蚀刻的 Micro-LED 的发光强度比无表面纹理的 Micro-LED 提升 21.04%。使用 ICP 和湿法蚀刻 10 s*3 次的 Micro-LED 发光强度比无表面纹理的 Micro-LED 提高了 81.61%。因此,本文采用蜂巢型表面纹理工艺制备出的高亮度倒装 Micro-LED,具有良好的应用潜力。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250138>

参 考 文 献:

- [1] HWANGBO S, HU L, HOANG A T, *et al.* Wafer-scale monolithic integration of full-colour micro-LED display using MoS₂ transistor [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2022, 17(5): 500-506.
- [2] LIU X Y, YUAN Z X, ZHOU G F, *et al.* Improving the efficiency of micro-LEDs at high current densities employing a micro-current spreading layer-confined structure [J]. *Appl. Phys. B*, 2022, 128(7): 121.
- [3] LEE H J, CASTRO E J D, KIM J H, *et al.* Effects of nanosized Ni particle structure on the enhancement of light extraction from 600 nm AlGaInP light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Express*, 2012, 5(12): 122102.
- [4] LIN J Y, JIANG H X. Development of microLED [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, 116(10): 100502.
- [5] SHEI S C, ZENG X F, LIN N M, *et al.* SiN_x nanopillars on AlGaInP-based light-emitting diodes to enhance light extraction using self-assembly ZnO nanomask coating by successive ionic layer adsorption and reaction method [J]. *Thin Solid Films*, 2014, 570: 230-234.
- [6] LEE Y C, KUO H C, CHENG B S, *et al.* Enhanced light extraction in wafer-bonded AlGaInP-based light-emitting diodes via micro- and nanoscale surface textured [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2009, 30(10): 1054-1056.

- [7] CHENG W C, HUANG S Y, CHEN Y J, *et al.* AlGaInP red LEDs with hollow hemispherical polystyrene arrays [J]. *Sci. Rep.*, 2018, 8(1): 911.
- [8] HUANG H H, HUANG S K, TSAI Y L, *et al.* Investigation on reliability of red micro-light emitting diodes with atomic layer deposition passivation layers [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(25): 38184-38195.
- [9] LINDER N, KUGLER S, STAUSS P, *et al.* High-brightness AlGaInP light-emitting diodes using surface texturing [J]. *Proceeding SPIE*, 2001, 4278(1): 426852.
- [10] MA L, JIANG W J, ZOU D S, *et al.* Improved light extracion efficiency in AlGaInP-based diodes (LEDs) by applying a nanohole structure on GaP window layer [J]. *J. Phys.*, 2011, 276(1): 012077.
- [11] HUANG P W, WU Y S. Output power of AlGaInP light emitting diode improved by double roughening AlGaInP surfaces [J]. *Electrochem. Solid-State Lett.*, 2010, 13(5): H163-H165.
- [12] HORNG R H, WU T M, WUU D S. Improved light extraction in AlGaInP-based LEDs using a roughened window layer [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2008, 155(10): H710-H715.
- [13] SO S J, HA H S, PARK C B. Improvement of brightness for AlGaInP high-brightness LEDs with nano-scale roughness on top-GaP surface [J]. *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, 2008, 21(1): 68-72.
- [14] LEE Y J, KUO H C, WANG S C, *et al.* Increasing the extraction efficiency of AlGaInP LEDs *via* n-side surface roughening [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2005, 17(11): 2289-2291.
- [15] JIANG W J, XU C, SHEN G D, *et al.* Improved light extraction in AlGaInP-based LEDs using a self-assembly metal nanomask [J]. *J. Semicond.*, 2010, 31(6): 064008.
- [16] RYU H S, PARK M J, OH S K, *et al.* Vertical-injection AlGaInP LEDs with n-AlGaInP nanopillars fabricated by self-assembled ITO-based nanodots [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2015, 10(1): 356.
- [17] FLETCHER R M, KUO C P, OSENTOWSKI T D, *et al.* The growth and properties of high performance AlGaInP emitters using a lattice mismatched GaP window layer [J]. *J. Electron. Mater.*, 1991, 20(12): 1125-1130.
- [18] HU X P, CAI J H, LIU Y Z, *et al.* Design of inclined omni-directional reflector for sidewall-emission-free micro-scale light-emitting diodes [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2022, 154: 108335.
- [19] ZHAO M J, XU X H, YANG M J, *et al.* Performance improvement of AlGaInP based red LEDs by combination of omnidirectional mirror and AuZn micro-contacts [J]. *Results Phys.*, 2023, 44: 106159.
- [20] TANG X S, HAN L L, MA Z G, *et al.* Enhanced light extraction from AlGaInP-based red light-emitting diodes with photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(4): 5993-5999.
- [21] KRAMES M R, OCHIAI-HOLCOMB M, HÖFLER G E, *et al.* High-power truncated-inverted-pyramid ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$)_{0.5}In_{0.5}P/GaP light-emitting diodes exhibiting >50% external quantum efficiency [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(16): 2365-2367.
- [22] LEE S Y, LEE E, MOON J H, *et al.* Damage-free plasma etching to enhance performance of AlGaInP-based micro-light emitting diode [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2020, 32(17): 1041-1044.
- [23] TANG X S, WANG L, ZHAO M L, *et al.* Enhancement of light extraction efficiency of AlGaInP-based light emitting diodes by silicon oxide hemisphere array [J]. *Opt. Commun.*, 2021, 481: 126539.
- [24] HSU Y H, WAN T C, LO Y Y, *et al.* Study of thin film blue-light MicroLEDs by laser lift-off and texture process [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2024, 45(2): 212-215.
- [25] LIN G J, ZUO Z Y, LIU D, *et al.* Maskless surface patterning of AlGaInP light-emitting diodes by photochemical laser interference etching [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2013, 117(51): 27062-27066.
- [26] LEE Y J, KUO H C, LU T C, *et al.* Study of GaN-based light-emitting diodes grown on chemical wet-etching-patterned sapphire substrate with V-shaped pits roughening surfaces [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, 26(11): 1455-1463.
- [27] ZHOU S J, ZHAO X Y, DU P, *et al.* Application of patterned sapphire substrate for III-nitride light-emitting diodes [J]. *Nanoscale*, 2022, 14(13): 4887-4907.
- [28] ZHOU S J, ZHAO X Y, DU P, *et al.* 460-nm InGaN-based LEDs grown on fully inclined hemisphere-shape-patterned sapphire substrate with submicrometer spacing [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2009, 21(19): 1366-1368.

- [29] ZENG X F, SHEI S C, CHANG S J. Improving light output power of AlInGaP-based LEDs using GaP nanorods prepared by SILAR method [J]. *ECS Solid State Lett.*, 2013, 2(11): Q79-Q81.
- [30] LO H M, HSIEH Y T, SHEI S C, *et al.* AlGaInP LEDs prepared by contact-transferred and mask-embedded lithography [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, 46(12): 1834-1839.
- [31] CUI S Y, SHI L, JIN L, *et al.* Improvement of light extraction efficiency in AlGaInP-based vertical miniaturized-light-emitting diodes *via* surface texturing [J]. *Opt. Lett.*, 2024, 49(6): 1449-1452.



谢军(1998-),男,安徽合肥人,硕士研究生,2021年于中国矿业大学(徐州)获得学士学位,主要从事 Micro-LED 显示芯片的研究。

E-mail: 202120131358@mail.scut.edu.cn



王洪(1964-),男,江苏无锡人,博士,教授,博士生导师,2004年于华南理工大学获得博士学位,主要从事光通信网络与器件、宽禁带半导体材料与器件等领域的研究。

E-mail: phhwang@scut.edu.cn