

氮化镓基Micro-LED侧壁对外量子效率的影响及侧壁处理技术综述

邝海 黄振 熊志华 刘丽

A review of the effect of GaN-Based Micro-LED sidewall on external quantum efficiency and sidewall treatment techniques

KUANG Hai, HUANG Zhen, XIONG Zhi-hua, LIU Li

引用本文:

邝海, 黄振, 熊志华, 刘丽. 氮化镓基Micro-LED侧壁对外量子效率的影响及侧壁处理技术综述[J]. *中国光学*, 2023, 16(6): 1305-1317. doi: 10.37188/CO.2023-0091

KUANG Hai, HUANG Zhen, XIONG Zhi-hua, LIU Li. A review of the effect of GaN-Based Micro-LED sidewall on external quantum efficiency and sidewall treatment techniques[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1305-1317. doi: 10.37188/CO.2023-0091

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0091>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

LED微阵列投影系统设计

Design of projection system for a micro-LED array

中国光学 (中英文). 2019, 12(1): 88 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0088>

平板显示技术比较及研究进展

Comparison and research progress of flat panel display technology

中国光学 (中英文). 2018, 11(5): 695 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0695>

基于SESAM被动调Q的激光二极管泵浦Yb:CaYAlO₄脉冲激光器

Output characteristics of diode-pumped passively Q-switched Yb: CaYAlO₄ pulsed laser based on a SESAM

中国光学 (中英文). 2019, 12(1): 167 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0167>

基于量子点的荧光型太阳能聚光器

Quantum dots based luminescent solar concentrator

中国光学 (中英文). 2017, 10(5): 555 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0555>

微分干涉差共焦显微膜层微结构缺陷探测系统

Detection system of multilayer coating microstructure defects based on differential interference contrast confocal microscopy

中国光学 (中英文). 2018, 11(2): 255 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0255>

ZnO/ZnS核壳纳米线界面缺陷的形成及发光特性研究

Formation of interface defects of ZnO/ZnS core-shell nanowires and its optical properties investigations

中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 872 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0872>

文章编号 2097-1842(2023)06-1305-13

氮化镓基 Micro-LED 侧壁对外量子效率的影响及侧壁处理技术综述

邝海*, 黄振, 熊志华, 刘丽

(江西科技师范大学江西省光电子与通信重点实验室, 江西南昌 330038)

摘要: 氮化镓基 Micro-LED 具备高亮度、高响应频率、低功耗等优点, 是未来显示技术和可见光通信系统的理想选择, 但目前外量子效率(EQE)低下这一问题严重影响其规模化量产及进一步应用。为了突破 EQE 低下这一瓶颈, 通过分析 Micro-LED 外量子效率的影响因素, 得知 EQE 下降的主要原因包括侧壁缺陷引起的载流子损耗及非辐射复合。总结了侧壁缺陷对载流子输运及复合的影响。综述了目前常用的侧壁处理技术及修复方法, 指出现有侧壁处理方法较为笼统、针对性不足且载流子与侧壁缺陷的作用机理并不十分清楚。提出应深入地研究侧壁缺陷种类和分布、载流子与侧壁缺陷作用机制及侧壁处理过程中的缺陷修复模式。本文为提高外量子效率、加快 Micro-LED 商业化量产进程提供设计思路和理论依据。

关键词: 侧壁缺陷; 微发光二极管; 外量子效率; 载流子; 侧壁钝化

中图分类号: TN312 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0091

A review of the effect of GaN-Based Micro-LED sidewall on external quantum efficiency and sidewall treatment techniques

KUANG Hai*, HUANG Zhen, XIONG Zhi-hua, LIU Li

(Key Laboratory for Optoelectronics and Communication of Jiangxi Province,
Jiangxi Science Technology Normal University, Nanchang 330038, China)

* Corresponding author, E-mail: haizi411@126.com

Abstract: Micro-LEDs offers the benefits of high brightness, high response frequency, and low power consumption, making them an attractive candidate for future display technologies and Visible Light Communication (VLC) systems. Nonetheless, their low External Quantum Efficiency (EQE) currently impedes their scaled mass production and further applications. In order to break through the bottleneck of low EQE, we conducted an analysis of Micro-LED external quantum efficiency's contributing factors. The influencing

收稿日期: 2023-05-15; 修订日期: 2023-06-02

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目 (No. GJJ2201338); 国家自然科学基金 (No. 12364013); 江西科技师范大学博士科研启动基金项目 (No. 2019BSQD020); 中央引导地方科技发展资金项目 (No. 2022ZDD03088)
Supported by Science and Technology Research Project of Jiangxi Education Department (No. GJJ2201338); National Natural Science Foundation of China (No. 12364013); Doctoral Research Foundation of Jiangxi Science and Technology Normal University (No. 2019BSQD020); Government Guides Local Science and Technology Development Funds (No. 2022ZDD03088)

factors for EQE are analyzed. It is concluded that the carrier loss and non-radiative recombination caused by sidewall defects are the main reasons for the decrease in EQE. In addition, we summarized the impact of sidewall defects on carrier transport and composites, and we also reviewed the commonly used sidewall treatment technology and repair methods, and pointed out that the existing sidewall treatment methods are helpful but insufficient for improving EQE, and the mechanism of carrier interaction with sidewall defects is not very clear. It is suggested to carry out a thorough and systematic study on the types and distribution of sidewall defects, the mechanism of carrier and sidewall defects, and the defect repair mode in the sidewall treatment process. Finally, future development trends are projected. This paper offers design ideas and theoretical foundations to enhance the external quantum efficiency and accelerate the process of commercialization and mass production of Micro-LEDs.

Key words: defects on sidewall; micro-LED; external quantum efficiency; carriers; surface passivation

1 引言

微发光二极管 (Micro-Light-Emitting diode, Micro-LED) 因具有其他光源不可比拟的优势而备受关注^[1-6]。首先, 由于它具备自发光特性而无需偏振器, 可使显示器更轻薄; 其次, Micro-LED 中电光转换效率较高, 理论上功耗仅为传统有机发光二极管 (Organic light emitting diode, OLED) 的一半, 使装置的电池寿命延长、续航力更长^[7-8]; 再次, 它的响应时间为纳秒级, 具备超快的切换速度, 可以达到头戴虚拟现实技术 (Virtual reality, VR) 和增强现实 (Augmented reality, AR) 装备显示器最理想的像素密度, 也可满足可见光通信的高响应频率要求^[9-11]。此外, 它具有高亮度特性, 能提高装备在阳光下的可读性, 可以解决由于环境光较强导致的显示器上的影像泛白、辨识度变差的问题, 尤其适用于透明显示器和高亮度显示器^[8, 12-14]。更重要的是, Micro-LED 技术能整合多种传感器、可以识别手势, 在成为显示器件的同时还可以通过加载特定频率的数据信号实现光通信功能, 以满足 5G 时代信息集成的需求^[15-18]。可见, Micro-LED 将成为解决 5G 信息时代 VR/AR 等高阶消费类头戴装备续航能力短、分辨率不足、亮度不够高、响应慢等问题的关键技术, 同时也因能解决目前可见光通信系统传输速率低的不足而成为未来显示和可见光通信系统的理想选择, 将应用于可穿戴手表、高端电视、AR/VR 等近眼显示器、物联网无线通信等领域, 具有广阔

的应用前景^[19-28]。国际市场研究机构 Research And Markets 于 2021 年 12 月发布的报告预测 2027 年全球 Micro-LED 显示市场将达 211.69 亿美元^[29]。

Micro-LED 自从被美国德州理工大学 Jiang H X 教授团队^[1, 30-31]提出后, 迅速引起相关科研院所和企业的关注, 并取得重大成果。三星已推出了世界上第一台消费型模块化的 146 英寸 Micro-LED 电视。2019 年英国的 Plessey 展示了 Micro-LED 制备的分辨率达 $1\ 920 \times 1\ 080$ 的 VR/AR 眼镜^[21]。目前 Micro-LED 已应用于通信系统且传输速度可达 15.78 Gbit/s, 而且还在持续提高中^[19, 32]。这些成果充分表明了 Micro-LED 强大的技术实力和发展潜力, 但目前仍未商业化量产, 少量已展示的 Micro-LED 显示屏存在尺寸小、分辨率不够高等问题, 离预期效果还有很大差距。除了仍然存在转移过程难以保证高良率以及缺乏高效红光导致 Micro-LED 难以全彩化两大瓶颈外, 低外部量子效率 (External quantum efficiency, EQE) 是 Micro-LED 发展的另一大挑战^[15, 33-34]。目前报道的 GaN 基 Micro-LED 的峰值 EQE 通常小于 15%^[35], 尺寸小于 $5\ \mu\text{m}$ 芯片的峰值 EQE 甚至小于 1%^[36], 这严重影响了 Micro-LED 的应用范围及产业化进程。南昌大学江风益团队制备出了高光效 InGaN 基橙—红光 LED 使得全彩化成为可能^[37]。巨量转移技术已引起广泛关注, 有望不久的将来得到解决^[21, 38-42]。现今, 急需突破 EQE 低下这一瓶颈以推动 Micro-LED 产业化进程。

为了提高外量子效率, 本文分析了 EQE 低下

的主要影响因素,讨论了侧壁缺陷对 EQE 的显著影响,梳理了侧壁缺陷与载流子的作用机制,对比分析了各种侧壁处理方法的特点及范围,并展望了未来侧壁处理技术的发展趋势。

2 EQE 的主要影响因素分析

2.1 侧壁载流子损耗是 EQE 低下的主要因素

Micro-LED 具备优于液晶显示(Liquid crystal display, LCD)和 OLED 的特性(见表 1),但是外量子效率低下影响了其进一步广泛应用。从 Micro-LED 结构示意图(见图 1)可以看出,其结构包含多层,因此光的产生和传输也较为复杂,影响因素较多。

表 1 Micro-LED 与 OLED、LCD 比较^[4,9]

Tab. 1 Performance comparison of Micro-LED, OLED and LCD^[4,9]

| | Micro-LED | OLED | LCD |
|-------------------|---------------|---------------|-----------|
| Mechanism | Self-emissive | Self-emissive | Backlight |
| Luminous efficacy | High | Medium | Low |
| Power consumption | Low | Medium | High |
| Lifetime | Long | Medium | Long |
| Response time | ns | μs | ms |
| Cost | High | Medium | Low |

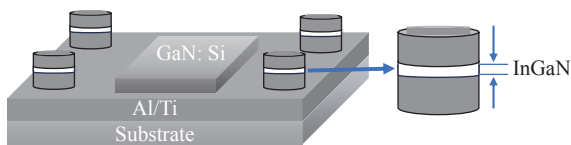


图 1 Micro-LED 结构示意图(改编自文献 [1])

Fig. 1 Schematic diagram of Micro-LEDs Structure (adapted from Ref.[1])

Micro-LED 的 EQE 定义为每秒发散到自由空间的光子数量与每秒 LED 电子-空穴复合数之比。直接决定了 LED 器件的光学性能,是非常重要的指标。如何突破低 EQE 这一瓶颈已成为研究热点。诺贝尔奖获得者 Shuji Nakamura 课题组等在这方面做了研究^[21, 33-34, 42-47]。EQE 的影响因素很多,包含载流子注入、光的形成、光的传输及光的提取等,可用公式(1)表示^[35]

$$EQE = CIE \times IQE \times LEE, \quad (1)$$

$$IQE = \frac{R_{\text{rad}}}{R_{\text{rad}} + R_{\text{SRH}} + R_{\text{Auger}}}, \quad (2)$$

$$IQE = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3}, \quad (3)$$

其中 CIE、IQE 和 LEE 分别为 Micro-LED 的电流注入效率(Current injection efficiency)、内量子效率(Internal quantum efficiency)及光提取效率(Light extraction efficiency)。图 2 是常见的用于模拟和效率分析的 InGaN/GaN 基蓝色发光二极管的示意图。由公式(1)及图 2 都可以看出, EQE 由 CIE、IQE 及 LEE 这三个效率共同决定:

(1)CIE 为输出的光功率与空间电荷区输入的电功率之比,提高载流子的匹配率可以提高 CIE。由图 2 可以看出,电注入效率主要由空穴和电子的注入、输运、浓度等决定,而这些都与缺陷有很大关系。主要原因是 Micro-LED 中侧壁缺陷形成的非辐射复合中心严重影响了载流子的注入能力,缺陷处还容易形成漏电流通道,这些都对载流子的有效复合产生很大影响,使得 CIE 降低从而引起 EQE 下降^[42]。

(2)LEE 为每秒发散到自由空间的光子数与每秒空间电荷区产生的光子数之比,由光的传输决定,受电极等影响较大^[48]。对于 LED,理想情况是载流子复合后产生的光都从顶部射出并被充分利用,但实际情况是,光在传输过程中会发生反射、散射、吸收等损耗,也可能从侧面射出未被有效利用,这些行为会引起 LEE 降低,从而影响 EQE。为减少光损耗提高 LEE,目前常用的方法主要有提高反射层的反射率、表面粗化及表面钝化等^[49-51]。

(3)IQE 为每秒空间电荷区产生的光子数量与每秒 LED 电子-空穴复合数之比。根据 ABC 模型^[43, 52-54], IQE 如式(2)和(3)所示。其中: R_{rad} 、 R_{SRH} 及 R_{Auger} 分别表示载流子辐射复合率、肖特基(Shockley-Read-Hall, SRH)辐射复合率及俄歇(Auger)复合率; n 为载流子密度; A 、 B 、 C 分别表示非辐射复合系数、辐射复合系数及俄歇复合系数。根据式(2)和式(3)可知, IQE 由载流子的复合及载流子浓度决定,发光效率由辐射复合和非辐射复合的竞争决定,要想通过提高 IQE 来提高 EQE,必须使得载流子自发辐射率最大化、减少俄歇复合及 SRH 复合^[55]。

根据以上分析, EQE 由 LEE、CIE 及 IQE 共

同确定,受晶体质量、热管理、载流子注入效率等因素影响^[56-57],其中,载流子及缺陷是主要影响因素。由图 2 可见, IQE 的主要影响因素为载流子和缺陷, CIE 主要影响因素为载流子注入、浓度及迁移等,而缺陷也同时影响光的射出,从而影响 LEE。因此,缺陷和载流子是 EQE 的主

要影响因素。Shuji Nakamura 课题组等研究结果也表明侧壁损伤及缺陷引起的载流子损耗是 Micro-LED 的 EQE 降低的主要原因^[42-47]。因此,降低侧壁引起的载流子损耗及侧壁缺陷密度是提升 EQE 的关键。

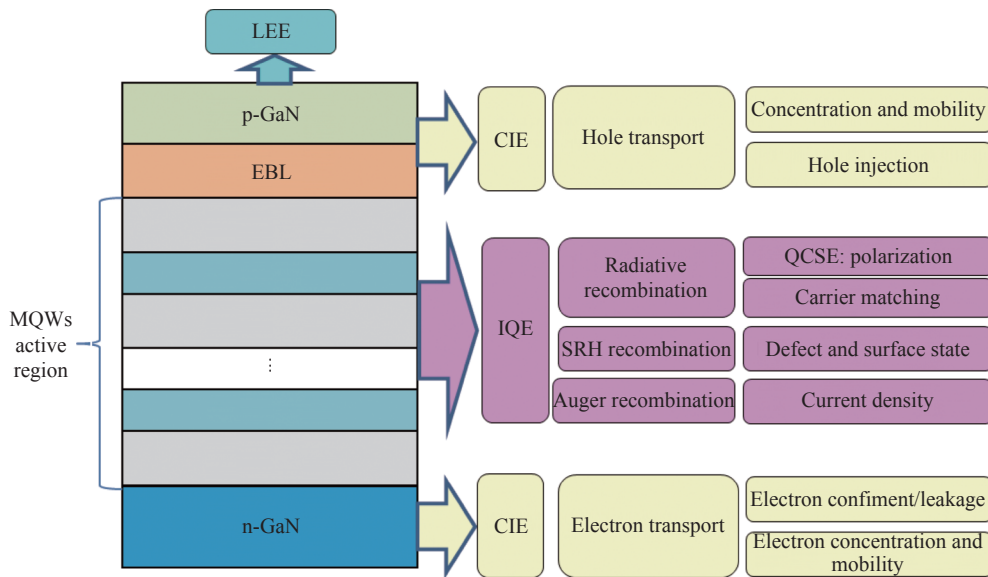


图 2 用于模拟和进行效率分析的垂直结构 InGaN/GaN 基蓝色发光二极管的示意图(改编自文献 [35])

Fig. 2 Schematic diagram of the InGaN/GaN-based blue light-emitting-diode used for the simulation and the analysis of the efficiency (adapted from Ref.[35])

2.2 Micro-LED 中侧壁缺陷对外量子效率的影响分析

Micro-LED 制备需要经过电感耦合等离子体 (Inductively coupled plasma, ICP)刻蚀工艺,图 3 为 ICP 腐蚀后 ITO 层的横断面扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM)图像。其中,左侧经 ICP 蚀刻去除 SiO₂、右侧为在蚀刻过程中覆盖光刻胶,标记为“Pt”的层是在聚焦离子束 (Focused ion beam, FIB)扫描电镜横断面成像时沉积的铂层。从图中可以看出,经过 ICP 刻蚀后侧壁不可避免地留下了化学污染和损伤,主要包含:深能级非辐射复合中心、掺杂杂质、挥发性强的元素及污染层等^[21, 58-60]。对于常规尺寸 LED, EQE 主要由外延生长和芯片结构等决定,上述侧壁损伤及缺陷引起的载流子及光损耗对 EQE 的影响几乎可以忽略不计。然而, Micro-LED 一般单边尺寸小于 100 μm,一些高清显示器,如面向头戴 VR/AR 装备用高分辨率显示器要求芯片需小于 10 μm × 10 μm^[43, 55, 61]。在这样的尺寸条件

下,芯片周长与面积比值较大,刻蚀过程中产生的侧壁损伤、缺陷以及器件的表面复合区域所占的比例很大,任何缺陷和杂质都会促进表面少数载流子复合^[55]。研究证明,刻蚀后的杂质和氧化物能诱导缺陷能级^[60]。同时,侧壁边缘的周期性受

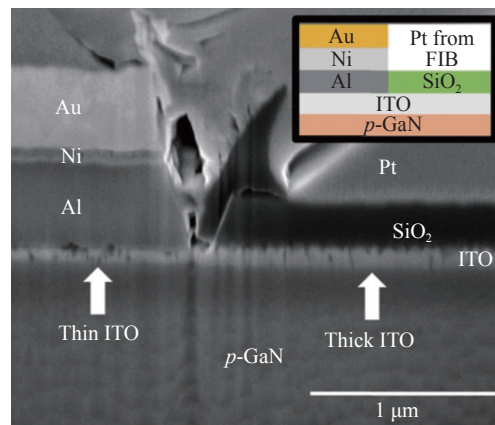


图 3 ICP 腐蚀后 ITO 层的横断面扫描电子显微镜 (SEM) 图像^[62]

Fig. 3 Cross-sectional scanning electron microscopy (SEM) image of ITO layer after exposing to ICP etch ^[62]

干扰,诱导出半导体间隙中的电子态并成为非辐射复合中心^[62],另外,小尺寸 Micro-LED 的侧壁存在一些载流子堆积,引起“边缘效应”与“尺寸效应”^[42, 45, 48, 63]。此外,随着芯片尺寸的减小,空穴更容易被缺陷捕获,空穴注入效率也随之下降^[47]。在这种情况下,漏电流也随着尺寸的减小而增大,导致 EQE 随着尺寸减小而剧烈下降^[64]。Ding K 等^[65]研究表明当芯片尺寸从 500 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 降低到 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 时,最大 EQE 由 10% 下降到 5%。可见,侧壁表面及缺陷引起了载流子非辐射复合,限制了载流子注入能力,导致漏电流通道的形成。这些侧壁缺陷引起的载流子损耗在 Micro-LED 中非常显著,成为 EQE 低下的主要原因^[42, 66]。

俄歇复合和 SRH 复合是 LED 中最主要的两

种非辐射复合^[55], Micro-LED 应用于显示领域时一般电流密度较低^[67],此时俄歇复合占比较小,几乎可以忽略,载流子主要表现为 SRH 复合。Olivier 等^[53]研究了尺寸对载流子复合的影响,研究结果见图 4。由图 4 中可以看出:在一定范围内,ABC 模型中 SRH 复合对应的系数 A 随着芯片尺寸减小而明显增大,而俄歇复合对应的系数 C 始终保持相同数量级、变化不大。结果证实了 SRH 复合是小尺寸 Micro-LED 的主要载流子损耗。SRH 复合由捕获中心的密度、截面及能级决定^[35], Micro-LED 的非辐射复合中心集中在侧壁缺陷^[64],是引起 Micro-LED 的 EQE 下降的主要原因。由公式(3)中得出,降低 An 即降低 SRH 复合是提高 EQE 的关键^[34]。故可通过降低侧壁缺陷密度及其引起的载流子损耗实现。

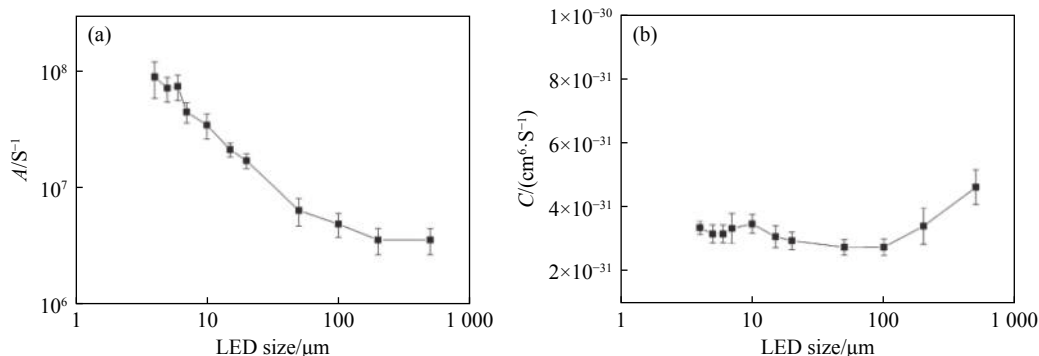


图 4 提取系数 A (a) 和 C (b) 随着 LED 尺寸的变化图^[53]

Fig. 4 Extracted coefficients A (a) and C (b) plotted versus LED size^[53]

2.3 侧壁缺陷影响 EQE 的物理机制

LED 的工作原理是将电能转换为光能。根据能量守恒定律,理想情况是注入的载流子都能有效复合转换为光子,并被合理利用。实际上,除了电子、空穴的有效复合,载流子还会有所损耗,尤其是在表面和缺陷处。对于 Micro-LED,载流子损耗集中在侧壁处,主要表现为:

(1)电子、空穴在侧壁表面发生复合形成光子,但是光从侧壁散发出并未被有效利用。尺寸较小的 Micro-LED 中侧向电阻低、电流扩展更好,载流子更容易输运到有源层边缘在侧壁发生辐射^[33, 48, 68]。从图 2 可以看出,侧壁处形成的光子容易选择最短路径直接从侧壁处发射或者被表面缺陷吸收,引起 LEE 降低从而导致 EQE 低下^[49-50, 54]。研究人员^[48]通过模拟计算证明:“尺寸

效应”很大程度取决于有源区侧壁表面的载流子复合引起的载流子损耗,因此 EQE 随着尺寸减小而降低。

(2)侧壁损伤或者缺陷处形成泄漏通道,载流子在缺陷处形成漏电流。张紫辉联合郭浩中团队^[42]对比分析了相同尺寸 20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 带侧壁损伤和完整未带损伤的 Micro-LED,结果见图 5。图 5(c)为样品的 I-V 曲线图,从图中可以看出 Micro-LED 侧壁缺陷处易形成电流泄漏通道,最终导致 EQE 急剧下降。

(3)载流子在缺陷处被捕获发生非辐射复合。研究表明,俄歇辐射系数基本不随尺寸变化,而肖特基辐射复合系数随着尺寸降低而增大,这意味着小尺寸的 Micro-LED 表面缺陷引起的 SRH 非辐射复合严重影响 EQE^[53]。张紫辉团队

为此做了大量工作,图 5(d)显示样品台面边缘的载流子浓度快速下降,这是因为载流子在侧壁被缺陷捕获发生 SRH 复合^[42]。2020 年,他们又联合刘召军博士团队进一步证实^[69]:晶体质量和载流子输运会影响光电性能。干蚀刻所引起的表面

损伤和缺陷会引起表面非辐射复合,使得 Micro-LED 的 IQE 降低,严重影响 EQE。2021 年,他们再次强调侧壁缺陷引起的非辐射复合是 EQE 低下的一个重要原因^[33]。

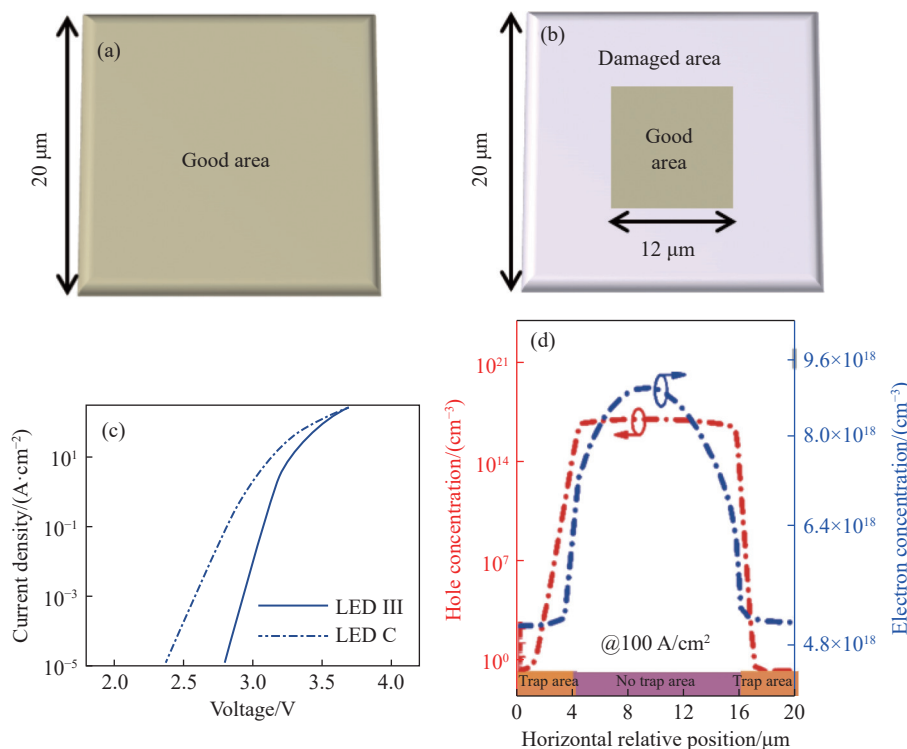


图 5 (a) 完整的 Micro-LED 示意图; (b) 侧壁带缺陷的 Micro-LED 示意图; (c) 样品的 I-V 曲线; (d) 样品的 P 电极附近的载流子浓度变化(改编自文献 [42])

Fig. 5 Schematic diagrams for (a) LED without sidewall damages and (b) LED with sidewall damages; (c) the current-voltage characteristics in semi-log scale for LEDs; (d) changes in carrier concentration profiles near the P-region for LED (adapted from Ref. [42])

载流子在侧壁缺陷处行为的厘清有利于提高 EQE,但是载流子与缺陷的具体相互作用机制及模式并没有被系统研究,不同缺陷与载流子相互作用的差异性也并不十分清楚,比如在空位处和位错处漏电流分布是否相同、载流子的非辐射复合是否一样等。需进一步根据缺陷种类有针对性地深入研究侧壁缺陷对载流子输运及复合的影响,为后续提出更有效的侧壁处理方法提供理论基础。

3 侧壁处理技术及缺陷修复方法

为了提高外量子效率,降低 Micro-LED 的侧壁载流子损耗和缺陷密度是关键^[70],缺陷修复是基本途径,目前侧壁处理技术及缺陷修复方法主

要有:

(1)优化设计芯片内部结构,使得载流子远离侧壁表面。Corfdir P^[71]等设计了 core-shell 结构,使得载流子远离表面,从而有效降低了表面辐射。郭浩中团队通过减薄势垒层厚度来降低垂直电阻,调节扩散电流,可以更好地将电流限制在台面内、远离侧壁,以降低载流子横向输运到侧壁的几率,减少了表面非辐射复合,并提升空穴注入率,提高了 EQE^[69]。芯片结构的优化可以在一定程度提高 EQE,但是侧壁表面及缺陷发生的载流子和光的损耗仍然存在,不容忽视。

(2)热处理法。研究已证实热处理可以消除近表面部分缺陷,降低侧壁缺陷密度,从而降低漏电流。但是处理过程中必须控制好退火工艺,假如温度过高容易引起新的缺陷,产生并导致漏电

流增大^[72-73]。田鹏飞等^[45]通过增加退火时间部分修复了缺陷,使得低电流密度下的发光效率得到提高。但是退火不能使缺陷完全消除,在合适的条件下经退火处理后,LED 仍然存在漏电流,可能与侧壁的 N 空位有关^[72]。具体物理机制还有待进一步深入研究。合适的处理条件如温度、时间等应根据不同的芯片选择。

(3)化学处理法。干法刻蚀工艺使得 Micro-LED 侧壁产生损伤及缺陷,很多研究人员尝试采用湿法化学刻蚀来降低侧壁损伤,目前已报道的化学法有采用氢氟酸(HF)或者氢氧化钾(KOH)处理。采用稀氢氟酸处理后制备的 AlGaInP 极小尺寸红光 Micro-LED,在低注入电流区和高注入电流区的 EQE 分别提高到了 35.48% 和 12.86%。主要是通过化学处理消除了侧壁表面的一些物理缺陷、污染物和材料损伤等,因此,降低了由于表面缺陷引起的非辐射复合率^[74]。这对氮化镓基 Micro-LED 具有重要的借鉴意义,后续可研究采用氢氟酸处理氮化镓基 Micro-LED,并研究其对污染物、侧壁损伤及 EQE 的影响。研究人员采用 KOH 处理 ICP 刻蚀后的 LED 侧壁,结果显示漏电流变小了。进一步证实了经过氢氧化钾处理后侧壁缺陷的密度下降了^[72]。综上,化学法可以消除部分刻蚀后留下的漏电流通道^[75],但是目前常用的氢氧化钾和氢氟酸都更容易侵蚀金属,因此单独采用化学法处理后效果并不是很理想,可进一步联合采用其他方法共同处理 Micro-LED 侧壁以达到更好的效果。

(4)侧壁钝化法。钝化是较常用的侧壁处理方法,不仅可以抑制侧壁悬挂键、降低侧壁缺陷,还可以减少光从侧壁的发出率,提升 LEE,从而提高 EQE^[51, 55, 76-77],被认为是降低 Micro-LED 表面辐射的关键技术^[48]。生产中用的较多的是等离子体增强化学的气相沉积法(Plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)。这种方法沉积速度快,对大尺寸器件有一定的减小漏电流的作用,但对于芯片面积小于 $60\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ 的 Micro-LED^[62],PECVD 钝化并不能有效降低漏电流,主要原因是钝化层致密度不够,部分缺陷无法被有效钝化^[78]。另外,PECVD 钝化可能降低 ITO 层的透明度,而影响光输出^[79-80]。研究人员采用原子层沉积法(Atomic layer deposition, ALD)从原

子水平精确控制钝化层厚度、制备更致密的钝化层^[62-81],研究结果显示钝化后缺陷密度有效降低、漏电流有所减小,主要原因是 ALD 层抑制了载流子的表面辐射和侧壁缺陷引起的漏电流。Wong M S 等^[62]对比了采用 ALD、PECVD 侧壁钝化后及未钝化的 Micro-LED,样品图及研究结果见图 6。其中,样品 LED-1 未经过侧壁处理,LED-2 经过 ALD 钝化和 ICP 刻蚀,LED-3 通过 PECVD 侧壁钝化和 HF 刻蚀,LED-4 经过 ALD 侧壁处理和 HF 刻蚀,研究结果显示:ALD 侧壁钝化后的 LED 光输出较一致、漏电流最小、 $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 芯片的峰值 EQE 由钝化前的 24% 提高到 33%。结果表明:对于尺寸较小的 Micro-LED,ALD 钝化效果明显优于 PECVD 钝化,主要原因是 ALD 钝化可以消除一些非辐射复合中心,降低了“尺寸效应”对 Micro-LED 外量子效率的影响。目前 ALD 技术主要用作生长二氧化硫和氧化铝层作为钝化层,其中氧化铝的稳定性好、致密度高^[82-83],是侧壁钝化的理想选择^[76, 81]。然而,ALD 沉积速度较低、难以沉积较厚的钝化层,因此,可以考虑根据实际情况综合使用 ALD 和 PECVD 这两种钝化方法^[55]。研究人员对比了联合采用这两种方法制备双层 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 和单独采用 PECVD 制备单层 SiO_2 钝化后的 Micro-LED,结果发现前者的漏电流更小、EQE 更高,且前者侧壁未发现缺陷相关的非辐射点。研究表明联合使用 ALD 和 PECVD 双层钝化能有效降低侧壁缺陷^[64]。这是侧壁处理技术未来发展方向,钝化层的选择也应该更多样化。

(5)离子注入法。研究发现氮离子注入 Micro-LED 后,N 原子比例由 23.3% 增加到 43.0%,而 O 原子比例由 21.1% 降低到 6.7%,器件的光致发光强度提高了 7 倍,EQE 提高约 33%,漏电流减小,开启电压和工作电压都降低,光电性能得到改善^[70]。这意味着通过离子注入可以抑制表面悬挂键等缺陷。主要原因是 N 离子注入后代替 O 或者 OH 与侧壁表面 Ga 悬挂键发生反应,从而降低了表面的缺陷密度。离子注入后,Micro-LED 的表面变化见图 7(彩图见期刊电子版)。研究结果证实了离子注入能降低缺陷密度,抑制载流子表面非辐射复合。根据以上研究结果,后续可以依据 Micro-LED 的侧壁缺陷中悬挂键的类别及表

面分布情况,通过合适的离子注入方式消除表面悬挂键及空位,降低缺陷密度,提高外量子效率。

离子注入量及离子类型需要根据缺陷种类进一步研究。

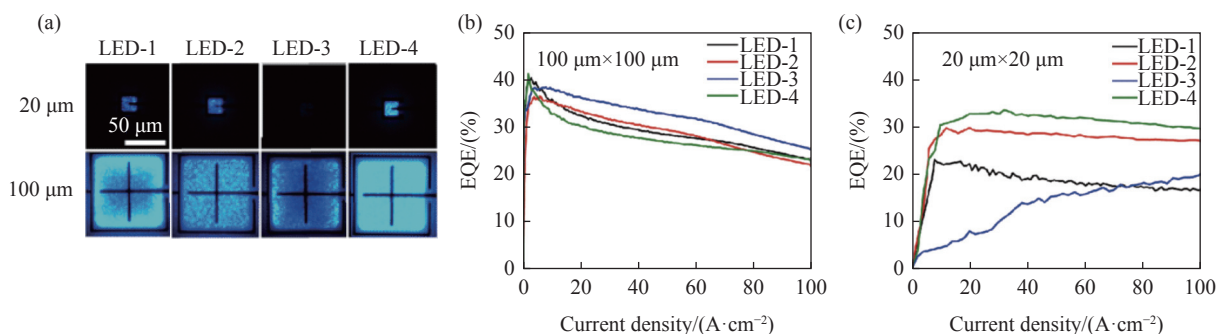


图 6 (a)样品在 1 A/cm^2 下的电致发光图像; (b)、(c)不同尺寸芯片的 EQE 随注入电流密度的变化(改编自文献 [62])

Fig. 6 (a) Electroluminescence images of Micro-LEDs at 1 A/cm^2 ; (b), (c) variation of EQE with injection current density for different chip sizes (adapted from Ref.[62])

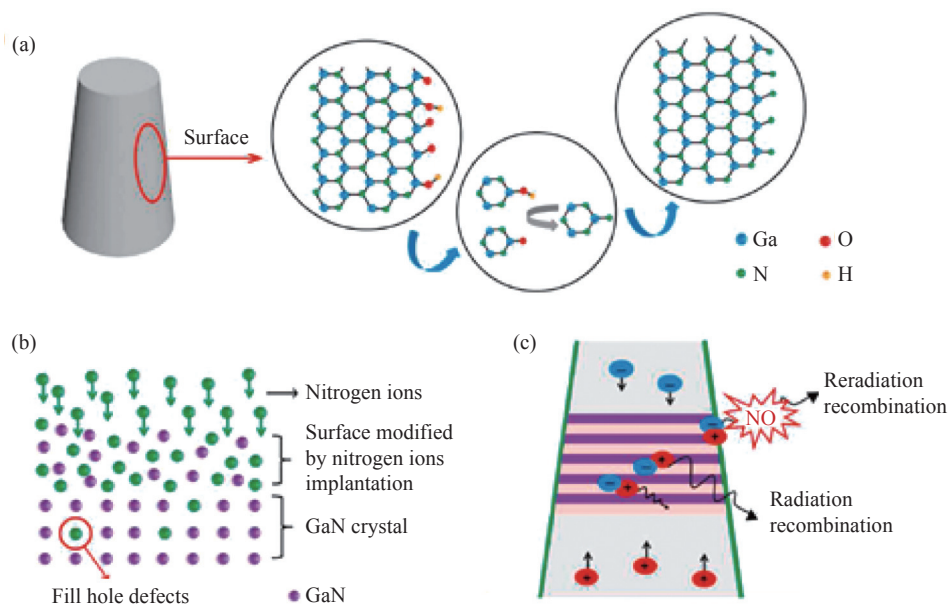


图 7 离子注入后 Micro-LED 表面变化示意图。(a) 表面化学结构发生变化; (b) 原子排列、表面修复和空穴缺陷填充; (c) GaN 中的钝化层^[70]。

Fig. 7 Schematic diagram of Micro-LED surface changes after ion implantation. (a) Changes in surface chemical structure; (b) atomic alignment, surface repair and cavity defect filling; (c) passivation layer in GaN^[70]

(6)联合使用化学法及钝化法。研究表明单独采用化学处理法无法完全消除缺陷, Nakamura S H 团队采用 HF 刻蚀与 ALD 联合处理 Micro-LED,使得尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 的 LED 的 EQE 由 24% 提高到 33%,漏电流减少,而且在低电流密度时发光均匀性较好^[62]。研究人员采用 KOH 化学法与 ALD 技术相结合进行处理。结果表明这种联合处理方法对 SRH 非辐射复合和等离子体损伤诱导的表面复合具有较好的抑制作用^[62, 84]。可见,联合使用化学法和钝化法对于降低非辐射

复合、提高 EQE 具有较好的效果,后续可根据实际效果和操作性,进一步研究更多的联合处理方法。

近年来, Micro-LED 技术得到快速发展^[85],目前通过侧壁处理使得 EQE 低下的问题得到了一定改善,但是研究主要集中于侧壁整体处理及处理后的效果,较为笼统。侧壁中各类缺陷如空位、悬挂键、位错占比如何? 它们在侧壁如何分布? 各种缺陷适合的处理方法是什么? 各类缺陷在各种处理方法中如何变化? 最佳的缺陷修复模

式和机制是什么?这些都是解决因“边缘效应”与“尺寸效应”引起的 EQE 低下这一瓶颈的关键,但是目前并不十分清楚,需对缺陷特征、分布及作用机制进一步深入研究,有针对性地根据缺陷种类和分布提出更有效的侧壁处理方法。

4 结论与展望

Micro-LED 是未来高清显示器和可见光通信领域的理想选择,近年来已取得了较好的成果,但是目前 Micro-LED 外量子效率仍较低下,严重影响其产业化进程及利用率。经过 20 多年的研究,发现载流子在侧壁表面及缺陷处发生表面复合、非辐射复合、漏电流等损耗,是 Micro-LED 外量子效率降低的主要原因。载流子的有效调控及缺陷密度降低是解决问题的关键。目前报道的侧壁处理方法主要有优化设计芯片内部结构、热处理、化学法、钝化法、离子注入法及联合使用多种方法等,这些侧壁处理方法对提高 EQE 有一定的效果。

然而,现有侧壁处理方法较为笼统、针对性不强。后续需要根据侧壁缺陷种类及分布,进一步提出更有效的侧壁处理方案,以下基础性问题值得深入探讨和求索:(1)侧壁缺陷的种类及分布规律:不同缺陷与载流子的作用机制不同,侧壁处理过程中发生的反应也不同,应该厘清侧壁缺陷的种类及特征;(2)侧壁缺陷与载流子的作用机理:载流子在缺陷处会发生非辐射复合、漏电流等损耗,但是各种缺陷与载流子的具体作用机制未系统研究;(3)各种缺陷在侧壁处理过程中的作用机理及动力学:位错、空位、畸变等在侧壁处理过程中发生的反应不同,动力学也不同,应总结各类缺陷修复模式。在此

基础上,有针对性地提出更有效的侧壁处理方法和缺陷修复方案,实现非辐射复合率降低、漏电流减小及缺陷密度下降的目标,为突破 EQE 低下这一瓶颈提供理论参考。

在进一步深入研究以上微观作用机制的基础上,针对目前常用的侧壁处理方法存在的问题和困难,提出如下展望:(1)开发一种新的侧壁处理方法,能修复所有,至少大部分缺陷,切实有效地降低缺陷密度、提高 Micro-LED 的外量子效率。目前研究表明,钝化法能有效抑制悬挂键,离子注入能有效修复空位,热处理可以消除近表面部分缺陷,化学法能较好地去除一些表面污染,如何综合各方法的优点开发出一种新技术能去除、修复或者屏蔽所有,至少大部分类型缺陷,是未来研究方向;(2)利用高新科学技术,优化 Micro-LED 生产工艺和设备,从源头上减少缺陷的产生,从根本上解决侧壁缺陷对外量子效率的不利影响。目前刻蚀工艺和设备的优化已受关注,但是因为 Micro-LED 尺寸的特殊性,还未能完全解决侧壁损伤问题,可进一步利用光、声、电等还有其他物理、化学反应,以及日益精湛的检测技术,减少侧壁缺陷产生,有望不需要通过侧壁处理就能使得外量子效率显著提高;(3)加快培养相关复合型复合型专业创新人才培养。Micro-LED 的侧壁处理及缺陷修复技术,涉及到物理、化学、材料、机电、检测、显示等各领域,仅熟悉其中一两个专业的技术人员已无法满足需求,急需培养多领域的综合应用型人才,是解决外量子效率低这一瓶颈的重要保障。随着技术的不断发展,Micro-LED 的侧壁处理技术会逐步完善,外量子效率会相应提高,高性能的 Micro-LED 会更好更广泛地应用于显示和可见光通信领域, Micro-LED 产业化指日可待。

参考文献:

- [1] JIN S X, LI J, LI J Z, *et al.*. GaN microdisk light emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(5): 631-633.
- [2] 蒋成伟,沙源清,袁佳磊,等.电致发光的完全悬空超薄硅衬底氮化镓基蓝光 LED 器件的制备与表征[J]. *中国光学*, 2021, 14(1): 153-162.
JIANG CH W, SHA Y Q, YUAN J L, *et al.*. Fabrication and characterization of an LED based on a GaN-on-silicon platform with an ultra-thin freestanding membrane in the blue range[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(1): 153-162. (in Chinese)
- [3] ZHANG K, LIU Y B, KWOK H S, *et al.*. Investigation of electrical properties and reliability of GaN-based micro-LEDs[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(4): 689.

- [4] LIU ZH J, LIN C H, HYUN B R, *et al.*. Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 23.
- [5] WOODGATE G J, HARROLD J. P-101: Micro-optical systems for micro-LED displays[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 1559-1562.
- [6] YIN Y M, HU Z P, ALI M U, *et al.*. Alleviating the crosstalk effect via a fine-moulded light-blocking matrix for colour-converted micro-LED display with a 122% NTSC gamut[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3: 36.
- [7] 殷录桥, 张雪松, 任开琳, 等. 考虑小尺寸效应的 Micro-LED 驱动结构设计[J]. *光学学报*, 2023, 43(2): 0223003.
YIN L Q, ZHANG X S, REN K L, *et al.*. Design of micro-LED driving structure considering small size effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(2): 0223003. (in Chinese)
- [8] 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: Science & Applications*, 2020, 9(1): 105.
- [9] LEE H E, SHIN J H, PARK J H, *et al.*. Micro light-emitting diodes for display and flexible biomedical applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(24): 1808075.
- [10] RAJBHANDARI S, MCKENDRY J J D, HERRNSDORF J, *et al.*. A review of gallium nitride LEDs for multi-gigabit-per-second visible light data communications[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2017, 32(2): 023001.
- [11] XIONG J, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications[J]. *eLight*, 2021, 1: 3.
- [12] LEE V W, TWU N, KYMISSIS I. Micro-LED technologies and applications[J]. *Information Display*, 2016, 32(6): 16-23.
- [13] TEMPLIER F. GaN-based emissive microdisplays: a very promising technology for compact, ultra-high brightness display systems[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(11): 669-675.
- [14] LIU Y T, LIAO K Y, LIN C L, *et al.*. 66-2: Invited Paper: PixeLED display for transparent applications[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 874-875.
- [15] LI K H, FU W Y, CHOI H W. Chip-scale GaN integration[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2020, 70: 100247.
- [16] MONAVARIAN M, RASHIDI A, ARAGON A A, *et al.*. Impact of crystal orientation on the modulation bandwidth of InGaN/GaN light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(4): 041104.
- [17] RASHIDI A, MONAVARIAN M, ARAGON A, *et al.*. High-speed nonpolar InGaN/GaN LEDs for visible-light communication[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(4): 381-384.
- [18] ARVANITAKIS G N, BIAN R, MCKENDRY J J D, *et al.*. Gb/s underwater wireless optical communications using series-connected GaN micro-LED arrays[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 7901210.
- [19] 蒋府龙, 许非凡, 刘召军, 等. 氮化镓基 Micro-LED 显示技术研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2020, 49(11): 2013-2023.
JIANG F L, XU F F, LIU ZH J, *et al.*. Development of GaN-based micro-LED display technology[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2020, 49(11): 2013-2023. (in Chinese)
- [20] 严子雯, 严群, 李典伦, 等. 高度集成的 μ LED 显示技术研究进展[J]. *发光学报*, 2020, 41(10): 1309-1317.
YAN Z W, YAN Q, LI D L, *et al.*. Research progress of high integration density μ LED display technology[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(10): 1309-1317. (in Chinese)
- [21] ZHOU X J, TIAN P F, SHER C W, *et al.*. Growth, transfer printing and colour conversion techniques towards full-colour micro-LED display[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2020, 71: 100263.
- [22] WU T ZH, SHER C W, LIN Y, *et al.*. Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1557.
- [23] JIANG H X, LIN J Y. Nitride micro-LEDs and beyond-a decade progress review[J]. *Optics Express*, 2013, 21(S3): A475-A484.
- [24] 董冰, 佟首峰, 张鹏, 等. 20 m 水下无线蓝光 LED 通信系统样机设计[J]. *中国光学*, 2021, 14(6): 1451-1458.
DONG B, TONG SH F, ZHANG P, *et al.*. Design of a 20 m underwater wireless optical communication system based on blue LED[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1451-1458. (in Chinese)
- [25] CHENG D, WANG Q, LIU Y, *et al.*. Design and manufacture AR head-mounted displays: A review and outlook[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(3): 350-369.
- [26] PARK J H, LEE B. Holographic techniques for augmented reality and virtual reality near-eye displays[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 137-150.

- [27] YUSUKE S, KAZUO S, Daisuke B, *et al.*. Holographic augmented reality display with conical holographic optical element for wide viewing zone[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 26-34.
- [28] BEMARD C K, MARIA P. Holographic optics in planar optical systems for next generation small form factor mixed reality headsets[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(4): 771-801.
- [29] Global micro-LED market with covid-19 impact analysis by application (display (smartwatch, NTE device, smartphone and tablet, television, digital signage), lighting (general, automotive)), display panel size, vertical and region-forecast to 2027[EB/OL]. (2021-12)[2023-06-16]. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5067415/global-micro-LED-market-with-covid-19-impact#pos-0>.
- [30] JIANG H X, JIN S X, LI J, *et al.*. III-nitride blue microdisplays[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(9): 1303-1305.
- [31] JIN S X, LI J, LIN J Y, *et al.*. InGaN/GaN quantum well interconnected microdisk light emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(20): 3236-3238.
- [32] ZHU G Q, LIU Y J, MING R, *et al.*. Mass transfer, detection and repair technologies in micro-LED displays[J]. *Science China Materials*, 2022, 65(8): 2128-2153.
- [33] HANG SH, CHUANG C M, ZHANG Y H, *et al.*. A review on the low external quantum efficiency and the remedies for GaN-based micro-LEDs[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(15): 153002.
- [34] WIERER J J JR, TANSU N. III-nitride micro-LEDs for efficient emissive displays[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(9): 1900141.
- [35] LU SH Q, LI J CH, HUANG K, *et al.*. Designs of InGaN micro-LED structure for improving quantum efficiency at low current density[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2021, 16(1): 99.
- [36] VIREY E H, BARON N. 45-1: Status and prospects of microLED displays[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 593-596.
- [37] ZHANG SH N, ZHANG J L, GAO J D, *et al.*. Efficient emission of InGaN-based light-emitting diodes: toward orange and red[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(11): 1671-1675.
- [38] ZHANG L, OU F, CHONG W C, *et al.*. Wafer-scale monolithic hybrid integration of Si-based IC and III-V epi-layers-A mass manufacturable approach for active matrix micro-LED micro-displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(3): 137-145.
- [39] JUNG T, CHOI J H, JANG S H, *et al.*. 32-1: Invited Paper: Review of micro-light-emitting-diode technology for micro-display applications[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 442-446.
- [40] COK R S, MEITL M, ROTZOLL R, *et al.*. Inorganic light-emitting diode displays using micro-transfer printing[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2017, 25(10): 589-609.
- [41] CORBETT B, LOI R, ZHOU W D, *et al.*. Transfer print techniques for heterogeneous integration of photonic components[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2017, 52: 1-17.
- [42] KOU J Q, SHEN C C, SHAO H, *et al.*. Impact of the surface recombination on InGaN/GaN-based blue micro-light emitting diodes[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): A643-A653.
- [43] HWANG D, MUGHAL A, PYNN C D, *et al.*. Sustained high external quantum efficiency in ultrasmall blue III-nitride micro-LEDs[J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(3): 032101.
- [44] BULASHEVICH K A, KARPOV S Y. Impact of surface recombination on efficiency of III-nitride light-emitting diodes[J]. *Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Letters*, 2016, 10(6): 480-484.
- [45] TIAN P F, MCKENDRY J J D, GONG ZH, *et al.*. Size-dependent efficiency and efficiency droop of blue InGaN micro-light emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(23): 231110.
- [46] ZHAO CH, NG T K, PRABASWARA A, *et al.*. An enhanced surface passivation effect in InGaN/GaN disk-in-nanowire light emitting diodes for mitigating Shockley-Read-Hall recombination[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(40): 16658-16665.
- [47] OLIVIER F, TIRANO S, DUPRÉ L, *et al.*. Influence of size-reduction on the performances of GaN-based micro-LEDs for display application[J]. *Journal of Luminescence*, 2017, 191: 112-116.
- [48] KONOPLEV S S, BULASHEVICH K A, KARPOV S Y. From large-size to micro-LEDs: scaling trends revealed by modeling[J]. *Physica Status Solidi (A)*, 2018, 215(10): 1700508.
- [49] 江凤益, 刘军林, 王立, 等. 硅衬底高光效 GaN 基蓝色发光二极管[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2015, 45(6): 067302.
- JIANG F Y, LIU J L, WANG L, *et al.*. High optical efficiency GaN based blue LED on silicon substrate[J]. *Scientia*

- Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2015, 45(6): 067302. (in Chinese)
- [50] CHOI H W, JEON C W, DAWSON M D, *et al.*. Mechanism of enhanced light output efficiency in InGaN-based micro-light emitting diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(10): 5978-5982.
- [51] ZHANG Y Y, GUO E Q, LI ZH, *et al.*. Light extraction efficiency improvement by curved GaN sidewalls in InGaN-based light-emitting diodes[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(4): 243-245.
- [52] KARPOV S. ABC-model for interpretation of internal quantum efficiency and its droop in III-nitride LEDs: a review[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2015, 47(6): 1293-1303.
- [53] 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]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(2): 022104.
- [54] WIERER J J JR, TSAO J Y, SIZOV D S. Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(6): 963-993.
- [55] LIU A CH, SINGH K J, HUANG Y M, *et al.*. Increase in the efficiency of III-nitride micro-LEDs: atomic-layer deposition and etching[J]. *IEEE Nanotechnology Magazine*, 2021, 15(3): 18-34.
- [56] CHU CH SH, TIAN K K, ZHANG Y H, *et al.*. Progress in external quantum efficiency for III-nitride based deep ultraviolet light-emitting diodes[J]. *Physica Status Solidi (A)*, 2019, 216(4): 1800815.
- [57] ZHANG Z H, ZHANG Y H, BI W G, *et al.*. On the internal quantum efficiency for InGaN/GaN light-emitting diodes grown on insulating substrates[J]. *Physica Status Solidi (A)*, 2016, 213(12): 3078-3102.
- [58] PEARTON S J. Characterization of damage in electron cyclotron resonance plasma etched compound semiconductors[J]. *Applied Surface Science*, 1997, 117-118: 597-604.
- [59] LEE J M, HUH C, KIM D J, *et al.*. Dry-etch damage and its recovery in InGaN/GaN multi-quantum-well light-emitting diodes[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2003, 18(6): 530-534.
- [60] BOUSSADI Y, ROCHAT N, BARNES J P, *et al.*. Investigation of sidewall damage induced by reactive ion etching on AlGaInP mesa for micro-LED application[J]. *Journal of Luminescence*, 2021, 234: 117937.
- [61] TIAN W Y, LI J H. Size-dependent optical-electrical characteristics of blue GaN/InGaN micro-light-emitting diodes[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(29): 9225-9232.
- [62] WONG M S, HWANG D, ALHASSAN A I, *et al.*. High efficiency of III-nitride micro-light-emitting diodes by sidewall passivation using atomic layer deposition[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 21324-21331.
- [63] JIANG F L, HYUN B R, ZHANG Y, *et al.*. Role of intrinsic surface states in efficiency attenuation of GaN-based micro-light-emitting-diodes[J]. *Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Letters*, 2021, 15(2): 2000487.
- [64] LEE D H, LEE J H, PARK J S, *et al.*. Improving the leakage characteristics and efficiency of GaN-based micro-light-emitting diode with optimized passivation[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2020, 9(5): 055001.
- [65] DING K, AVRUTIN V, IZYUMSKAYA N, *et al.*. Micro-LEDs, a manufacturability perspective[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(6): 1206.
- [66] 王玮东, 楚春双, 张丹扬, 等. 俄歇复合、电子泄漏和空穴注入对深紫外发光二极管效率衰退的影响[J]. *发光学报*, 2021, 42(7): 897-903.
- WANG W D, CHU CH SH, ZHANG D Y, *et al.*. Impact of auger recombination, electron leakage and hole injection on efficiency droop for DUV LEDs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(7): 897-903. (in Chinese)
- [67] JIA X T, ZHOU Y G, LIU B, *et al.*. A simulation study on the enhancement of the efficiency of GaN-based blue light-emitting diodes at low current density for micro-LED applications[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(10): 105915.
- [68] HERRNSDORF J, MCKENDRY J J D, ZHANG SH L, *et al.*. Active-matrix GaN micro light-emitting diode display with unprecedented brightness[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, 62(6): 1918-1925.
- [69] CHANG L, YEH Y W, HANG SH, *et al.*. Alternative strategy to reduce surface recombination for InGaN/GaN micro-light-emitting diodes-thinning the quantum barriers to manage the current spreading[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2020, 15(1): 160.
- [70] LIU SH G, HAN S C, XU CH CH, *et al.*. Enhanced photoelectric performance of GaN-based micro-LEDs by ion implantation[J]. *Optical Materials*, 2021, 121: 111579.
- [71] CORFDIR P, LEWIS R B, MARQUARDT O, *et al.*. Exciton recombination at crystal-phase quantum rings in GaAs/In_xGa_{1-x}As core/multishell nanowires[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(8): 082107.

- [72] YANG Y, CAO X A. Removing Plasma-induced sidewall damage in GaN-based light-emitting diodes by annealing and wet chemical treatments[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2009, 27(6): 2337-2341.
- [73] CAO X A, CHO H, PEARTON S J, *et al.*. Depth and thermal stability of dry etch damage in GaN schottky diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 75(2): 232-234.
- [74] JUNG B O, LEE W, KIM J, *et al.*. Enhancement in external quantum efficiency of AlGaInP red μ -LED using chemical solution treatment process[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 4535.
- [75] WONG M S, NAKAMURA S, DENBAARS S P. Review-progress in high performance III-nitride micro-light-emitting diodes[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2019, 9(1): 015012.
- [76] YANG C M, KIM D S, LEE S G, *et al.*. Improvement in electrical and optical performances of GaN-based LED with SiO₂/Al₂O₃ double dielectric stack layer[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, 33(4): 564-566.
- [77] YANG C M, KIM D S, PARK Y S, *et al.*. Enhancement in light extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes using double dielectric surface passivation[J]. *Optics and Photonics Journal*, 2012, 2(3): 185-192.
- [78] LEY R T, SMITH J M, WONG M S, *et al.*. Revealing the importance of light extraction efficiency in InGaN/GaN microLEDs via chemical treatment and dielectric passivation[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(25): 251104.
- [79] SON K S, CHOI D L, LEE H N, *et al.*. The interfacial reaction between ITO and silicon nitride deposited by PECVD in fringe field switching device[J]. *Current Applied Physics*, 2002, 2(3): 229-232.
- [80] GUENTHER G, SCHIERNING G, THEISSMANN R, *et al.*. Formation of metallic indium-tin phase from indium-tin-oxide nanoparticles under reducing conditions and its influence on the electrical properties[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(3): 034501.
- [81] HUANG S W, SHEN C C, WU T ZH, *et al.*. Full-color monolithic hybrid quantum dot nanoring micro light-emitting diodes with improved efficiency using atomic layer deposition and nonradiative resonant energy transfer[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(4): 416-422.
- [82] KUANG H, TAN D Q, HE W, *et al.*. Oxidation behavior of multilayer hard coatings (TiCN/Al₂O₃/TiN) in process of recycling coated multicomponent hardmetal scrap[J]. *Materials*, 2018, 11(10): 1796.
- [83] KUANG H, TAN D Q, HE W, *et al.*. Mechanism of multi-layer composite coatings in the zinc process of recycling coated WC-Co cemented-carbide scrap[J]. *Materiali in Tehnologije*, 2017, 51(6): 997-1003.
- [84] WONG M S, LEE C, MYERS D J, *et al.*. Size-independent peak efficiency of III-nitride micro-light-emitting-diodes using chemical treatment and sidewall passivation[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(9): 097004.
- [85] 王伟, 赵甜甜, 刘强, 等. Mini/Micro LED 巨量转移技术研究与发展现状[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(2): 183-199.
- WANG W, ZHAO T T, LIU Q, *et al.*. Research and development status of Mini/Micro LED mass transfer technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(2): 183-199. (in Chinese)

作者简介:



邝海(1983—),女,湖南临武人,博士,讲师,2019年于南昌大学获得博士学位,现为江西科技师范大学江西省光电子与通信重点实验室讲师,主要从事半导体发光材料与器件等方面的研究。E-mail: haizi411@126.com



熊志华(1974—),男,江西南昌人,博士,教授,2008年于南昌大学获得博士学位,现为江西科技师范大学江西省光电子与通信重点实验室主任,主要从事半导体光电材料等方面的研究。E-mail: xionghua@126.com