

表面复合与光提取效率竞争机制对 Micro-LED 光效的影响

刘志强¹, 江莹¹, 莫梦月¹, 闫金健¹, 李鹏岗¹, 黄凯^{1,2*},
李金钗^{1,2}, 卢卫芳^{1,2*}, 康俊勇¹, 张荣^{1,2}

(1. 厦门大学物理科学与技术学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门市未来显示技术研究院, 福建 厦门 361102)

摘要: [目的] 基于表面复合引起的尺寸效应, 研究 Micro-LED 器件的尺寸、形状与光效的关系。[方法] 利用 SimuLED 软件, 通过设计不同尺寸和形状的器件, 探究器件表面复合占比与周长面积比之间的关系, 并分析器件形状对 Micro-LED 性能的影响。[结果] 器件表面复合速率与周长面积比成线性比例关系; 器件形状通过表面复合占比与光提取效率共同影响器件的外量子效率。在本文研究的 3 种芯片形状中, 圆形芯片的内量子效率最高, 正六边形芯片的外量子效率最高, 而方形芯片的内、外量子效率以及光功率均最低。[结论] 当器件的尺寸受限时, 可以通过优化器件形状, 以降低表面复合占比和提高光提取效率, 进而提高光效。

关键词: Micro-LED; 尺寸效应; 表面复合速率; 周长面积比; 光提取效率

中图分类号: O 471

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)04-0682-08

Impact of the competition mechanism between surface recombination and light extraction efficiency on Micro-LED device performance

LIU Zhiqiang¹, JIANG Ying¹, MO Mengyue¹, YAN Jinjian¹, LI Penggang¹, HUANG Kai^{1,2*},
LI Jinchai^{1,2}, LU Weifang^{1,2*}, KANG Junyong¹, ZHANG Rong^{1,2}

(1. School of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Xiamen Future Display Technology Research Institute, Xiamen 361102, China)

Abstract: [Objective] Based on the size effect induced by surface recombination, this study investigates the relationship among the size, shape, and light efficiency of Micro-LED devices. [Methods] Using SimuLED software, we design devices with different sizes and shapes, so that the correlation between surface recombination ratio and the perimeter-to-area ratio can be explored, and the influence of device shape on Micro-LED performance can be analyzed. [Results] The surface recombination rate exhibits a linear proportionality with the perimeter-to-area ratio. The device shape affects the external quantum efficiency (EQE) through both surface recombination ratio and light extraction efficiency (LEE). Among these three chip shapes studied, circular chips demonstrate the highest internal quantum efficiency (IQE), while regular hexagonal chips achieve the highest EQE. In contrast, square chips exhibit the poorest performance in both IQE and EQE, as well as optical powers. Additionally, achieving peak IQE requires progressively higher current densities with diminishing device size, primarily driven by intensified surface recombination. [Conclusion] When device size is constrained, optimizing the shape can reduce surface recombination ratios and improve light extraction efficiencies, thereby enhancing overall light efficiencies.

Keywords: Micro-LED; size-dependent effect; surface recombination rate; perimeter-to-area ratio; light extraction efficiency

收稿日期: 2025-02-25 录用日期: 2025-04-28

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3600101); 国家自然科学基金(62174141, 62404184); 中央高校基本科研业务费专项资金(20720230019)

通信作者: k_huang@xmu.edu.cn; weilu.weif@xmu.edu.cn

引文格式: 刘志强, 江莹, 莫梦月, 等. 表面复合与光提取效率竞争机制对 Micro-LED 光效的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(4): 682-689.

Citation: LIU Z Q, JIANG Y, MO M Y, et al. Impact of the competition mechanism between surface recombination and light extraction efficiency on Micro-LED device performance[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(4): 682-689. (in Chinese)



随着智能手机、平板电脑、可穿戴设备等高科技电子产品的快速迭代升级,市场对高分辨率和卓越显示性能的需求急剧上升^[1-2].在此背景下, Micro-LED 因其高亮度、宽色域、低驱动电压、超快响应时间、高发光效率、超高分辨率,以及优异的稳定性等诸多优势^[3-6],逐渐成为科研界和产业界关注的焦点.

目前, III-V 族氮化物 LED 的制备通常采用等离子体干法刻蚀以形成器件台面.然而,在刻蚀过程中,器件侧壁难以避免受到损伤,从而在侧壁区域引入大量缺陷、杂质和悬挂键^[7-9],这一受损区域通常被称为“坏区”.“坏区”中的表面缺陷作为非辐射复合中心,会吸引周围载流子扩散至侧壁区域并参与非辐射复合,同时形成漏电通道,导致大量载流子泄漏^[10-13].

对于传统的大尺寸 LED 器件而言,“坏区”在有源区中所占比例较小,其影响可以忽略不计.然而,当芯片尺寸减小时,“坏区”占比显著增加,导致更多的载流子参与侧壁的非辐射复合,从而降低发光效率,这一现象被称为尺寸依赖效应^[14-15].研究表明,侧壁表面复合是尺寸依赖效应的主要机制^[11],而在低电流密度下, Shockley-Read-Hall (SRH) 复合比俄歇复合对 Micro-LED 尺寸效应的影响更显著^[16].此外,有研究指出“坏区”宽度取决于表面复合速率与载流子横向扩散的能力,其中表面复合率由 SRH 复合系数 A 决定^[17].

因此,在微型显示领域中,随着芯片尺寸的减小,应重点考虑如何降低表面缺陷及其导致的非辐射复合,同时通过优化设计提高光提取效率(light extraction efficiency, LEE).现有研究表明,可采用湿法刻蚀^[18-19]、氢钝化^[20-21]、原子层沉积^[22]以及选择性区域生长^[23]等方法来降低表面缺陷及复合;通过微表面结构处理^[24-25],引入分布式布拉格反射镜(DBR)结构^[26]、优化器件几何形状^[27-28]、改善电场分布^[29],以及优化载流子注入^[30-31]等方式来提升 LEE.在评估芯片最终的光学性能时,需要综合考虑表面复合以及 LEE 的平衡.

考虑到坏区占比可等效为有源区的周长面积比,与器件的尺寸和形状有关,故在本研究中利用 1D/3D 芯片模拟软件设计芯片外延与结构,通过模拟不同尺寸芯片的“坏区”占比,探究表面复合速率与尺寸之间的关系;在此基础上,计算不同尺寸及形状(方形、圆形和正六边形)芯片的 LEE,并分析其光效差异及背后的物理机制,为进一步提升 Micro-LED 性能提供有价值的参考.

1 Micro-LED 的结构设计与性能模拟

本研究中,蓝光 Micro-LED 的外延结构设计通过

俄罗斯 STR 集团开发的 SimuLED 软件工具完成,其中 LED 的性能使用 SiLENSe 6.5.1 模块.该模块基于一维薛定谔-泊松方程求解器,并结合漂移-扩散模型进行计算.

LED 的基础外延结构包括:一个 $3\ \mu\text{m}$ 的 n-GaN 接触层(掺杂浓度为 $5 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$);一个多量子阱(multiple quantum well, MQW)活性区,其中活性区包括三个未掺杂的 $2.5\ \text{nm}\ \text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 量子阱,量子阱之间通过 $9\ \text{nm}\ \text{GaN}$ 势垒隔开;MQW 上方为一个 $15\ \text{nm}$ 厚的 p-Al_{0.1}Ga_{0.9}N 电子阻挡层(掺杂浓度为 $2 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$),以及一个 $150\ \text{nm}$ 厚的 p-GaN 接触层(掺杂浓度为 $1 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$).在 p 型接触层顶部沉积一层透明导电氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)作为电流扩散层,最后在 ITO 膜上形成 p 型接触电极和衬垫,而 n 型接触电极直接沉积在 n-GaN 底部.该芯片的三维结构示意图如图 1 所示.

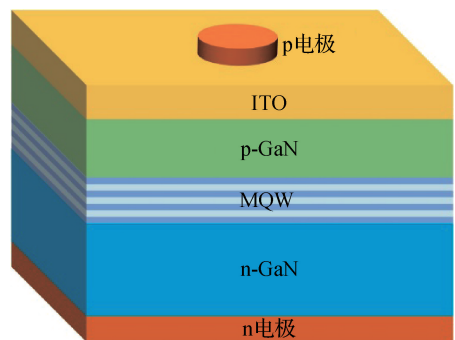


图 1 方形芯片三维结构

Fig. 1 Three-dimensional structure of the square chip

仿真中, SRH 非辐射复合寿命、辐射复合系数与俄歇复合系数分别设定为 $100\ \text{ns}$ 、 $2 \times 10^{-11}\ \text{cm}^3/\text{s}$ 和 $1 \times 10^{-30}\ \text{cm}^6/\text{s}$, 电子和空穴迁移率分别为 $100\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $10\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ^[11].最终模拟得到发射光谱的峰值波长为 $466\ \text{nm}$, 内量子效率(internal quantum efficiency, IQE)峰值电流密度约为 $1\ \text{A}/\text{cm}^2$.

为了研究器件尺寸和形状变化对性能的影响,使用 SimuLED 软件中的 speCLED 模块进行芯片结构设计.该模块采用三维混合方法模拟芯片内部的电流扩散.为排除常规倒装结构可能引起的电流分布不均问题,本研究选择典型的 LED 垂直结构芯片作为研究对象.首先设计了 5 种不同尺寸的方形芯片(图中标注为“Squ.”),尺寸分别为: $5 \times 5\ \mu\text{m}^2$, $10 \times 10\ \mu\text{m}^2$, $15 \times 15\ \mu\text{m}^2$, $20 \times 20\ \mu\text{m}^2$, $40 \times 40\ \mu\text{m}^2$, 并以传统的大尺寸芯片($300 \times 300\ \mu\text{m}^2$)作为对照组.

文献[32]首先讨论了芯片尺寸对表面复合速率

(surface recombination velocity, SRV) 的影响^[32]. 通过多次模拟计算发现, SRV 与周长面积比成正比, 且遵循“ $V_{SR} = C/S \times 50\ 000$, 其中 V_{SR} 为 SRV, C 为周长, S 为面积”这一规律, 结果如图 2(a) 所示. 同时, 不同尺寸器件的峰值内量子效率(internal quantum efficiency, IQE) 对应的电流密度相较于大尺寸芯片产生了显著偏

移, 如图 2(b) 所示. 进一步分析发现, 本研究的模拟结果与 Olivier 等^[33] 的实验结果高度一致. 例如, Olivier 报道的大尺寸芯片峰值量子效率对应的电流密度约为 $1\ \text{A}/\text{cm}^2$, 而 $50, 20$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 芯片对应的电流密度约为 $3, 10$ 和 $30\ \text{A}/\text{cm}^2$. 此结果有力验证了本工作中提出的 SRV 设定规则, 为后续研究奠定了重要基础.

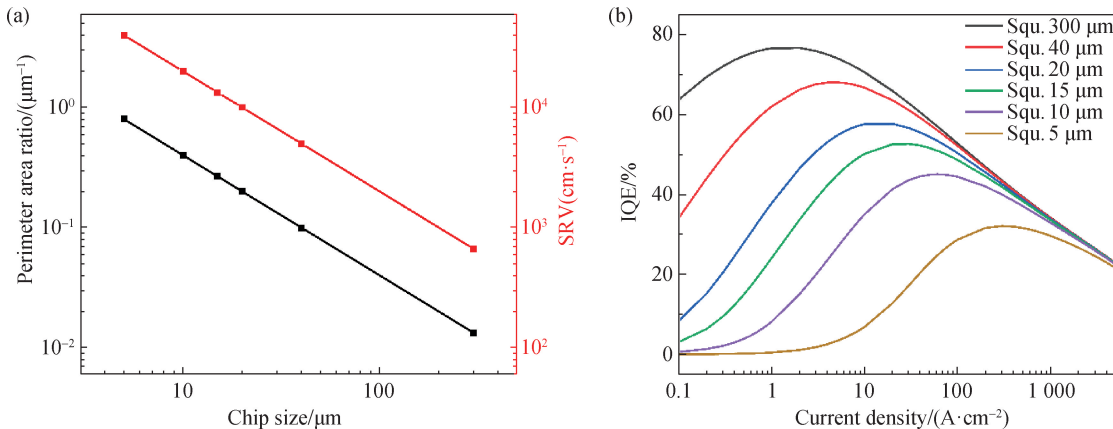


图 2 不同尺寸芯片的周长面积比以及对应的表面复合速率(a)和 IQE(b)^[32]

Fig. 2 Perimeter-to-area ratio and corresponding surface recombination velocity (a) and Internal quantum efficiency (b) for chips with different sizes^[32]

2 结果与分析

2.1 Micro-LED 的尺寸依赖效应

图 3(a) 展示了方形芯片的辐射复合电流、泄漏电流以及表面复合电流的变化情况. 该芯片尺寸为 $20 \times 20\ \mu\text{m}^2$. 将模拟结果用双对数坐标轴表示后可以发现, 辐射复合电流随电流密度的增加呈现出接近匀速的线性增长趋势. 与此不同的是, 垂直泄露电流在 pn

结界面附近表现出更复杂的变化: 局部电场的增强加速了载流子的运动, 从而引起漏电流的增加^[34]. 此外, 材料中的晶格缺陷和位错等结构性缺陷为载流子提供了额外的逃逸路径, 进一步加剧了泄漏现象^[35]. 因此, 在高电流密度范围内, 垂直泄露电流的增长速率显著提高. 相比之下, 表面复合电流的增长趋势较为平缓. 随着电流密度的增加, 表面缺陷逐渐被填充, 导致表面态的复合能力趋于饱和^[32]. 因此, 即使进一步提高电流, 表面复合电流的增幅也较为有限.

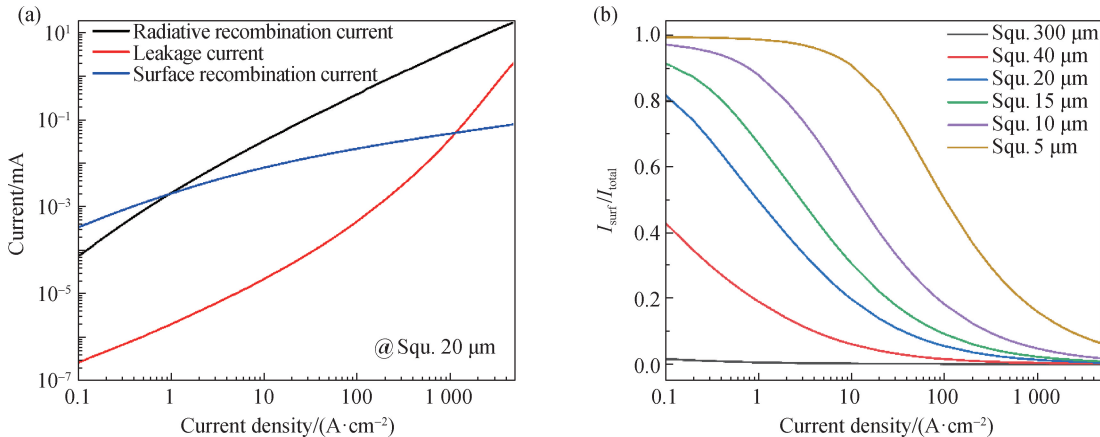


图 3 三种电流随着电流密度增加的变化情况(a)和表面复合电流在总电流中的占比变化情况(b)

Fig. 3 Variation of the three types of current with increasing current density (a) and variation of the proportion of surface recombination current in the total current (b)

图 3(b)展示了不同尺寸芯片的表面复合电流与总电流之比随着电流密度的变化情况. 观察发现,对于尺寸为 $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ 的芯片,在任意电流密度下,表面电流的占比都非常低,这表明表面复合对大尺寸芯片的影响可以忽略不计.

随着芯片尺寸的减小,表面复合电流占比显著增加. 特别是在低电流密度下,尺寸为 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 的芯片表面复合电流占比接近 100%,说明此时绝大多数的载流子被表面缺陷捕获. 此外,不同尺寸芯片的表面复合电流达到饱和并开始衰减的时机也存在差异. 具体而言,随着器件尺寸的缩小,表面复合电流更难以达到饱和,其饱和所需要的电流密度显著提高,这进一步导致芯片量子效率达到最大值时所需的电流密度也随之增加. 以上现象从机理上解释了 Micro-LED 芯片的尺寸依赖效应.

2.2 器件形状对 Micro-LED 性能的影响

2.2.1 形状与 IQE 的关系

ABC 模型是分析常规大尺寸 LED 中 MQW 载流子动态复合的经典模型^[36-37]. 该模型主要考虑了 SRH 非辐射复合、辐射复合和俄歇复合. 然而,对于 Micro-LED 而言,表面复合在载流子复合过程中占据重要地位,但传统 ABC 模型未能将其纳入分析. 为了精确描述任意尺寸器件中载流子的各种复合机制,本研究引用 Wang 等^[38]提出的改进 ABC 模型,其公式如下:

$$E_{\text{IQ}} = \frac{BN^2}{(A + A')N + BN^2 + CN^3} \times E_{\text{CI}}, \quad (1)$$

$$E_{\text{EQ}} = E_{\text{IQ}} \times E_{\text{LE}}, \quad (2)$$

其中, E_{IQ} 和 E_{EQ} 分别为 IQE、外量子效率 (external quantum efficiency, EQE), N 为流子浓度, A 、 B 、 C 分别为 SRH 非辐射复合系数、辐射复合系数和俄歇复合系数, A' 为表面复合系数, E_{CI} 为电流注入效率, E_{LE}

为 LEE.

以 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 的方形器件为参考,设计面积相同 ($400 \mu\text{m}^2$) 的圆形芯片和正六边形芯片 (分别用 “Circ.” 和 “Hex.” 表示). 结合表面复合速率对这些器件进行仿真,结果如图 4(a) 所示. 仿真表明,与方形芯片相比,圆形芯片和正六边形芯片的峰值 IQE 分别提高了 3.8% 和 2.4%. 这一差异主要归因于不同的周长面积比引入的表面缺陷数量存在差异.

图 4(b) 显示了这 3 种芯片的表面复合电流占总电流的比例. 可以看出,方形芯片的表面电流占比最高,而圆形芯片的占比最低. 这一结果很好地解释了 3 种芯片峰值 IQE 存在差异的原因. 此外,当电流密度超过 100 A/cm^2 时,表面复合电流的占比显著降低并趋近于零. 这一现象也解释了图 4(a) 中,大电流密度阶段 3 条曲线几乎重合的原因,此时可以认为表面复合过程已达到饱和状态,其对总性能的影响变得不再显著.

此前, Boussadi 等^[8]在其研究中指出,由于刻蚀相关的侧壁缺陷会引发载流子损失,导致侧壁区域的光功率密度低于中心区域. 因此,他们将光功率密度低于中心最大值 80% 的区域定义为 “侧壁损伤区”,即前文提到的 “坏区”. 沿用这个定义,本文绘制了芯片从对称中心到最近边界的光功率密度分布情况 (图 5). 在绘制过程中,选取的电流密度为 10 A/cm^2 , 即这 3 种芯片峰值 IQE 对应的电流密度. “坏区” 在图 5 中均以红色区域标出,每幅图的插图为器件二维平面上的光功率密度分布示意图,其中插图中的紫色边缘区域同样表示 “坏区”.

从图 5 可以看出,标红区域光功率密度呈现明显下降趋势,尤其是在侧壁边缘,其光功率密度仅为为中心最大值的 45.2%、46.1% 以及 46.4%,说明 3 组芯片的侧壁受到的刻蚀损伤都非常严重,导致其光功率

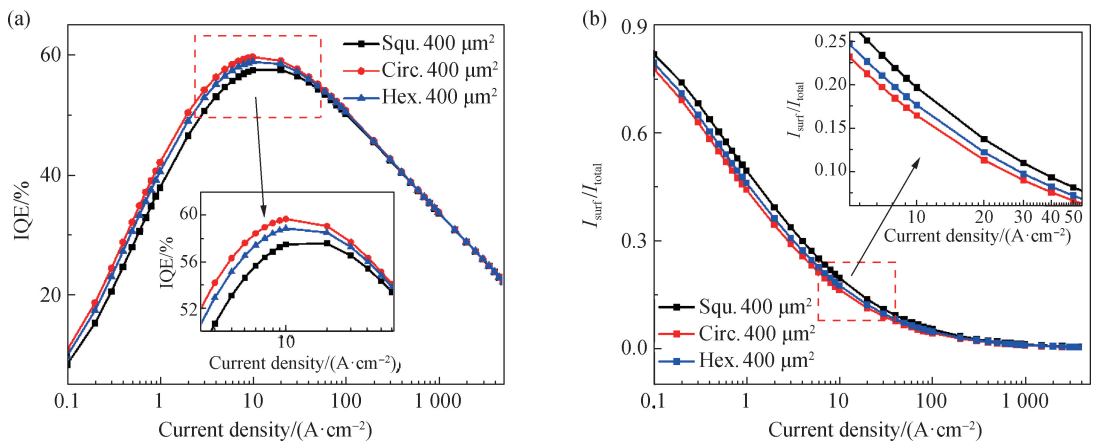


图 4 3 种不同形状芯片的 IQE(a) 和表面复合电流与总电流的比值(b)

Fig. 4 IQE (a) and proportion of surface recombination current to total current (b) for the three chips with different shapes

密度都不到中心区域的一半,这对显示与应用而言是十分不利且不可忽视的.进一步的积分计算表明,在该尺寸下,方形、圆形和正六边形芯片的“坏区”面积

分别占芯片总面积的 37.71%、32.68%和 34.39%.这意味着,从空间分布的角度来看,圆形芯片受到的刻蚀损伤最少,其表面复合效应也最为轻微.

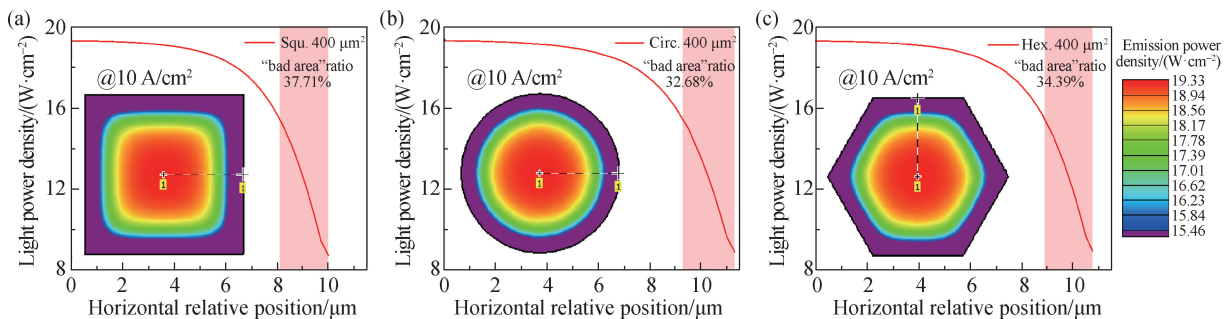


图 5 三种芯片的光功率密度分布(从对称中心到最近的边界),插图表示二维平面的光功率密度分布示意图

Fig. 5 Light power density distribution of the three types of chips (from the symmetric center to the nearest boundary), the insets show a schematic diagram of the light power density distribution on a 2D plane

为系统探究不同尺寸参数体系中,不同几何构型对应非辐射复合缺陷区域的空间分布特性及其 IQE 的变化规律,本研究通过积分计算将其余尺寸(100 μm² 和 25 μm²)及形状的芯片“坏区”占比结果汇总至表 1,同时将对应芯片的峰值 IQE 汇总至表 2.

据,可以明确地观察到,在 3 种形状的芯片中,圆形芯片的 IQE 最高.这一现象归因于该尺寸芯片中“坏区”所占比例最低,以及由此引发的表面复合的降低.随着芯片尺寸进一步减小,“坏区”所占的比例呈现上升趋势,进而导致了 IQE 的持续下降.此变化规律与芯片的“尺寸依赖效应”相吻合.

表 1 3 组不同尺寸与形状芯片的“坏区”占比

Tab. 1 The proportion of “bad area” for three sets of chips of different sizes and shapes

形状	“坏区”占比/%		
	400 μm²	100 μm²	25 μm²
方形	37.71	45.93	49.70
圆形	32.68	40.18	44.07
正六边形	34.39	42.12	45.98

表 2 3 组不同尺寸与形状芯片的峰值 IQE

Tab. 2 The peak IQE for three sets of chips of different sizes and shapes

形状	IQE/%		
	400 μm²	100 μm²	25 μm²
方形	57.56	44.92	32.05
圆形	59.66	47.03	33.84
正六边形	58.85	46.21	33.17

由表 1 可知,随着芯片面积的减小,3 种不同形状的芯片“坏区”占比都会逐渐增大,即缺陷受损区域所占的比例增加.另外,通过分析对比表 1 与表 2 的数

2.2.2 形状与 LEE 的关系

根据式(2)可知,光电转换器件的 EQE 由 IQE 和 LEE 共同决定,而 LEE 是衡量 LED 光输出效率的重要指标,表示 LED 器件中发出的光通过芯片表面时,经过反射和折射等光学效应后,最终能够逃逸到外部的光子比例^[39].利用模拟软件计算这 3 组不同尺寸及形状芯片的 LEE,计算结果如图 6 所示.

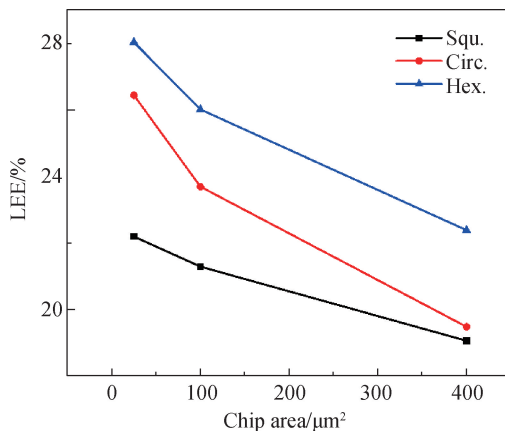


图 6 3 组不同尺寸与形状芯片的 LEE

Fig. 6 LEE for three sets of chips of different sizes and shapes

结果表明,无论芯片形状如何,尺寸减小时 LEE

均有所增强,这与其他学者的研究结果^[40]一致。同时正六边形芯片的 LEE 始终高于其他两种形状,这是因为正六边形的角度和形状有助光线更加均匀地从芯片的各个方向提取^[41],尤其是边缘区域,光提取比方形和圆形更为有效。

2.2.3 形状与 EQE 的关系

根据最终计算结果,绘制了 3 种不同尺寸及形状芯片的 EQE 变化情况,如图 7 所示。实验结果表明,在三种不同面积(400, 100 和 25 μm^2)的芯片中,正六边形芯片的峰值 EQE 始终高于圆形和方形结构,其中方形芯片的峰值 EQE 最低。具体而言,在 400 μm^2 芯片中,正六边形和圆形结构的峰值 EQE 分别比方形结构高 20.3%和 6.1%。由式(2)可知,这一趋势由 IQE 和 LEE 共同决定。

一方面,形状的改变影响“坏区”占比进而通过表面复合影响 IQE;另一方面,形状还会影响光场的空间分布,进而影响 LEE。形状边缘越圆滑,“坏区”占比越小, IQE 越高;而 LEE 则在圆滑程度折中的正六边形时最高。

此外,所有形状芯片的峰值 EQE 均随芯片面积减小而下降。例如,100 μm^2 和 25 μm^2 正六边形芯片的峰值 EQE 相较于 400 μm^2 分别降低了 8.75%和 22.64%。这种非线性衰减表明,小尺寸芯片中表面复合引起的非辐射复合率急剧增加,导致 IQE 和 EQE 共同下降,从而显著劣化器件光学性能。

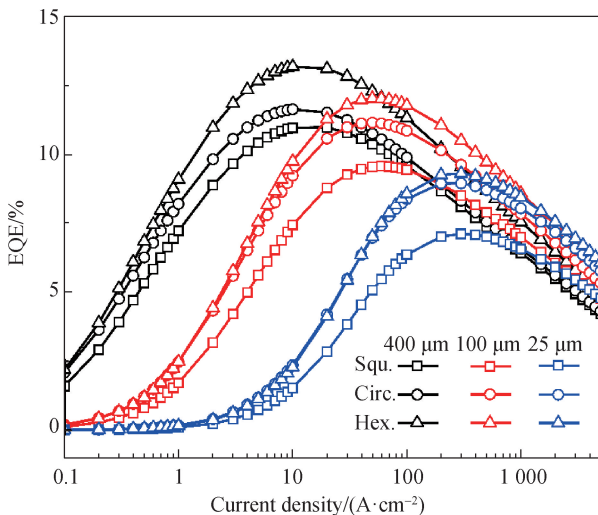


图 7 3 组不同尺寸及形状芯片的 EQE

Fig. 7 EQE for three sets of chips of different sizes and shapes

3 结 论

本研究通过软件模拟的方法探讨了 Micro-LED

的尺寸效应与表面复合之间的关系。研究表明,表面复合速率会随着芯片的周长面积比等比例增加。同时,不同形状的芯片在“坏区”占比方面存在差异。目前的研究显示,圆形芯片的“坏区”占比最小,而方形芯片的“坏区”占比最大。因此,可以推测,对于正多边形形状的芯片而言,边数越多,“坏区”占比越小,表面复合的影响也越弱,从而 IQE 会有所提高。此外,正六边形芯片由于其独特的几何结构,在 LEE 方面优于方形和圆形的芯片。

综合以上分析,在优化 Micro-LED 芯片设计时,必须综合权衡表面复合效应与 LEE 这两种机制的共同影响,从而最大化芯片的 EQE 和光输出性能。同时,正六边形形状的芯片具有最优的光学性能,因此在微型显示领域具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] SHEEN M, KO Y, KIM D U, et al. Highly efficient blue InGaN nanoscale light-emitting diodes[J]. Nature, 2022, 608(7921): 56-61.
- [2] 潘梓坚, 陈志忠, 焦飞, 等. 面向显示应用的微米发光二极管外延和芯片关键技术综述[J]. 物理学报, 2020, 69(19): 198501.
- [3] 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]. Journal of Electronic Materials, 2019, 48(8): 5195-5201.
- [4] FU Y F, SUN J, DU Z F, et al. Monolithic integrated device of GaN micro-LED with graphene transparent electrode and graphene active-matrix driving transistor[J]. Materials, 2019, 12(3): 428.
- [5] HSIAO F H, MIAO W C, LEE T Y, et al. Advancing high-performance visible light communication with long-wavelength InGaN-based micro-LEDs [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 7018.
- [6] CHEN J Y, DING H, SHENG X. Advanced manufacturing of microscale light-emitting diodes and their use in displays and biomedicine[J]. Journal of Information Display, 2023, 25(1): 1-12.
- [7] ARMSTRONG A M, BRYANT B N, CRAWFORD M H, et al. Defect-reduction mechanism for improving radiative efficiency in InGaN/GaN light-emitting diodes using InGaN underlayers[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(13): 4501.
- [8] 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(11):7937.
- [9] QIU R F, LU H, CHEN D J, et al. Optimization of inductively coupled plasma deep etching of GaN and etching damage analysis [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(7):2700-2706.
- [10] HALLER C, CARLIN J F, JACOPIN G, et al. GaN surface as the source of non-radiative defects in InGaN/GaN quantum wells [J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(11):111106.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] DAI Q, SHAN Q F, WANG J, et al. Carrier recombination mechanisms and efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(13):133507.
- [14] 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.
- [15] HUANG Y G, TAN G J, GOU F W, et al. Prospects and challenges of mini-LED and micro-LED displays [J]. Journal of the Society for Information Display, 2019, 27(7):387-401.
- [16] LU S Q, LI J C, 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.
- [17] YU L M, LU B Y, YU P, et al. Ultra-small size (1 - 20 μm) blue and green micro-LEDs fabricated by laser direct writing lithography [J]. Applied Physics Letters, 2022, 121(4):042106.
- [18] WONG M S, LEE C M, 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.
- [19] YANG F, XU Y, LI L, et al. Optical and microstructural characterization of Micro-LED with sidewall treatment [J]. Journal of Physics D: Applied Physics Express, 2022, 55(43):435103.
- [20] ZHUANG Z, IIDA D, OHKAWA K. Ultrasmall and ultradense InGaN-based RGB monochromatic micro-light-emitting diode arrays by pixilation of conductive p-GaN [J]. Photonics Research, 2021, 9(12):2429.
- [21] ZHUANG Z, IIDA D, VELAZQUEZ-RIZO M, et al. Ultra-small InGaN green micro-light-emitting diodes fabricated by selective passivation of p-GaN [J]. Optics Letters, 2021, 46(20):5092-5095.
- [22] CHEN D B, WANG Z, HU F C, et al. Improved electro-optical and photoelectric performance of GaN-based micro-LEDs with an atomic layer deposited AlN passivation layer [J]. Optics Express, 2021, 29(22):36559-36566.
- [23] BAI J, CAI Y F, FENG P, et al. A direct epitaxial approach to achieving ultrasmall and ultrabright InGaN micro light-emitting diodes (μLEDs) [J]. ACS Photonics, 2020, 7(2):411-415.
- [24] LEE T X, GAO K F, CHIEN W T, et al. Light extraction analysis of GaN-based light-emitting diodes with surface texture and/or patterned substrate [J]. Optics Express, 2007, 15(11):6670-6676.
- [25] SAWAKI N, HIKOSAKA T, KOIDE N, et al. Growth and properties of semi-polar GaN on a patterned silicon substrate [J]. Journal of Crystal Growth, 2009, 311(10):2867-2874.
- [26] 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]. Optics Express, 2015, 23(25):32504-32515.
- [27] FANG A Q, XU H, GUO W L, et al. Investigation of the effect of ITO size and mesa shape on the optoelectronic properties of GaN-based micro LEDs [J]. Crystals, 2022, 12(11):1593.
- [28] PARK J H, PRISTOVSEK M, CAI W T, et al. Interplay of sidewall damage and light extraction efficiency of micro-LEDs [J]. Optics Letters, 2022, 47(9):2250-2253.
- [29] HAN S H, LEE D Y, LIM J Y, et al. Effect of internal electric field in well layer of InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes on efficiency droop [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2012, 51(10R):100201.
- [30] HUANG S C, LI H, ZHANG Z H, et al. Superior characteristics of microscale light emitting diodes through tightly lateral oxide-confined scheme [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(2):021108.
- [31] HANG S, ZHANG M Y, ZHANG Y D, et al. Artificially formed resistive ITO/p-GaN junction to suppress the current spreading and decrease the surface recombination for GaN-based micro-light emitting diodes [J]. Optics Express, 2021, 29(20):31201-31211.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] NARITA T, KANECHIKA M, KOJIMA J, et al. Identification of type of threading dislocation causing reverse leakage in GaN p-n junctions after continuous forward current stress[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1):1458.
- [35] NARITA T, NAGASATO Y, KANECHIKA M, et al. Increase of reverse leakage current at homoepitaxial GaN p-n junctions induced by continuous forward current stress [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(25):253501.
- [36] 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.
- [37] HAN D P, YAMAMOTO K, ISHIMOTO S, et al. Determination of internal quantum efficiency in GaInN-based light-emitting diode under electrical injection: carrier recombination dynamics analysis [J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(3):032006.
- [38] WANG H, JIA X T, GUO Y, et al. Quantitative evaluation of carrier dynamics in blue micro-LEDs; the impact of size and current density on recombination and injection efficiency[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2024, 6(11):8134-8142.
- [39] WANG H, WANG L, SUN J, et al. Role of surface microstructure and shape on light extraction efficiency enhancement of GaN micro-LEDs; a numerical simulation study[J]. *Displays*, 2022, 73:102172.
- [40] GONZÁLEZ-IZQUIERDO P, ROCHAT N, ZOCCARATO D, et al. Influence of shape and size on GaN/InGaN μ LED light emission; a competition between sidewall defects and light extraction efficiency[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(11):4031-4037.
- [41] PARK J Y, KIM B J, YOO C J, et al. Subwavelength-scale nanorods implemented hexagonal pyramids structure as efficient light-extraction in light-emitting diodes[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):5540.

(责任编辑:任滢滢)