

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.260050.

专题:面向6G的无线光通信

柳钟旭,谢大炜,戴御荣,等. 高速微发光二极管器件及其可见光通信系统最新进展[J]. 光通信研究, 2026(2): 260050.

Liu Z X, Xie D W, Dai Y R, et al. The Latest Developments of High-Speed Micro-LED Devices and Their Visible Light Communication Systems[J]. Study on Optical Communications, 2026(2):260050.

高速微发光二极管器件及其可见光通信系统 最新进展(特邀)

柳钟旭^{1,2}, 谢大炜¹, 戴御荣¹, 李奕镔¹, 魏子贤^{1,2}, 罗鸣宇¹, 余长源^{1,2}

(1. 香港理工大学电机及电子工程学系, 香港 999077; 2. 香港理工大学晋江技术创新研究院 微电子研究所, 广东晋江 362200)

摘要:面向室内高速接入、短距互连与显示和通信一体化等新兴场景,可见光通信(VLC)正由照明附加通信转向以光源阵列为核心的并行信息承载平台。微发光二极管(Micro-LED)凭借可规模化阵列集成、空间复用及片上互连潜力等技术,使发射端从单点光源演进为可编程并行前端,成为推动可见光高速通信工程化的重要器件。文章按“机理-器件-系统”的主线综述了高速Micro-LED器件及其VLC系统的最新进展:阐明了电光带宽的形成机制及主导因素随尺寸与注入条件的转移;总结了晶向与极化调控、量子阱与势垒及电子阻挡层设计、掺杂与应力能带工程、侧壁损伤抑制与钝化等提速路径及其对“带宽-效率/光功率”折中的影响;归纳了高谱效调制、均衡与预失真、阵列并行与多维复用等系统技术,并讨论了器件与系统层面的瓶颈与趋势,为后续协同优化与工程化部署提供了参考。

关键词:微发光二极管;可见光通信;短距互连;并行光互连;阵列光源

中图分类号:TN929

文献标志码:A

The Latest Developments of High-Speed Micro-LED Devices and Their Visible Light Communication Systems

LIU Zhongxu^{1,2}, XIE Dawei¹, DAI Yurong¹, LI Yibin¹, WEI Zixian^{1,2}, LUO Mingyu¹, YU Changyuan^{1,2}

(1. Department of Electrical and Electronic Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

2. Microelectronics Research Institute, The Hong Kong Polytechnic University Jinjiang Technology and Innovation Research Institute, Jinjiang 362200, China)

Abstract: For emerging scenarios such as high-speed indoor access, short-reach interconnects, and display-communication convergence, Visible Light Communication (VLC) is shifting from “illumination with added communication” toward a parallel information-bearing platform centered on emitter arrays. Leveraging scalable array integration, spatial reuse, and the potential for on-chip interconnects, Micro-Light-Emitting Diodes (Micro-LED) enable the transmitter to evolve from a single-point source into a programmable parallel emitting front end and have become a key enabler for the engineering deployment of high-speed VLC. Following a “mechanism-device-system” storyline, this review summarizes recent advances in high-speed Micro-LED devices and Micro-LED-based VLC systems. We elucidate the physical origins of electro-optical bandwidth and the regime-dependent transition of dominant limiting factors with device size and injection conditions. We then investigate the acceleration strategies including crystal-orientation and polarization engineering, quantum-well/barrier and electron-blocking-layer designs, doping and strain-induced band engineering, and sidewall-damage suppression and passivation, highlighting their trade-offs between bandwidth-efficiency and optical power. Furthermore, we outline system-level techniques such as spectrally efficient modulation, equalization and predistortion, array-based parallel transmission, and multi-dimensional multiplexing. We also discuss remaining bottlenecks and trends at both device and system levels, providing guidance for future co-optimization and practical deployment.

Key words: Micro-LED; VLC; short-reach interconnects; parallel optical interconnects; emitter arrays

0 引言

随着人工智能算力基础设施、数据中心网络及沉浸式显示终端的快速发展,短距离高速信息传输

在带宽密度、能效与可扩展性等方面面临持续提升需求。传统射频(Radio Frequency, RF)无线接入受频谱资源紧张、同频干扰及安全隔离边界等因素制约,而可见光通信(Visible Light Communication,

收稿日期:2026-02-13; 修回日期:2026-03-03; 纸质出版日期:2026-04-10

基金项目:香港研资局青年研究员资助项目(JRFS2526-5S09);香港研究资助局优配研究金资助项目(HK RGC GRF 15238025, 15236424, 15231923);光电融合集成通信感知教育部重点实验室开放基金资助项目

作者简介:柳钟旭(1995-),男,福建厦门人。博士,主要研究方向为光无线通信和定位系统。

通信作者:魏子贤,博士。E-mail: zixian.wei@polyu.edu.hk

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

VLC)因免频谱许可、抗电磁干扰能力强、物理层安全性高及可与照明/显示基础设施实现资源复用等特点,被认为是室内超密集接入及短距互连的重要补充技术方向之一^[1-4]。

微发光二极管(Micro-Light-Emitting Diodes, Micro-LED)由于像素微缩带来的低结电容、较小电阻-电容(Resistor-Capacitor, RC)时延以及阵列化与可寻址驱动特性,被普遍认为是下一代高速 VLC 的关键候选光源之一。近几年对高速 Micro-LED 通信系统的研究显著加速,主要源于多方面因素的共同推动:其一,材料与外延质量持续改进,结合量子阱(Quantum Well, QW)/势垒与电子阻挡层(Electron Blocking Layer, EBL)设计、掺杂与应力/极化能带工程等结构优化,为提升辐射复合占比并拓展高速工作窗口提供了基础^[5-7];其二,微纳加工与侧壁损伤抑制、钝化工艺的成熟增强了微米尺度器件的效率与一致性^[8-9];其三,封装互连与前端电路带宽提升使瓶颈从“单器件限制”逐步转向“器件-光学-封装-电路”协同限制^[10-11];其四,高谱效调制与均衡/预失真等数字信号处理(Digital Signal Process, DSP)手段的成熟,以及阵列化并行与多维复用的兴起,使器件带宽更充分地转化为系统吞吐,并推动 Micro-LED-VLC 向系统化与应用化阶段演进^[12-14]。

目前已有综述分别从 VLC 的系统与网络体系、关键调制与资源管理机制以及 Micro-LED 器件与高速 VLC 应用等角度对该领域进行了较为系统的总结^[15-19]。然而,从基于高速 Micro-LED 的 VLC 这一“器件-系统”强耦合问题出发,现阶段仍存在进一步综合梳理的必要性。基于此,本文围绕高速 Micro-LED 器件及其 VLC 系统的最新进展,按“机理-器件-系统”的主线开展综述:从复合与微分载流子寿命和 RC 寄生两类关键限制出发,梳理了-3 dB 带宽形成机制及其与尺寸/注入条件的耦合关系;在器件层面总结了外延与结构提速路径(包括晶向工程、QW/势垒/EBL 与能带工程等)及其对带宽与效率的影响;进一步面向系统实现,概述了基

于 Micro-LED 的高速链路阵列/复用方案以及典型应用场景的端到端瓶颈与工程化挑战,并在此基础上归纳了基于高速 Micro-LED 的 VLC 系统的关键挑战与发展趋势。

1 VLC 系统与 Micro-LED 器件概述

1.1 VLC 系统架构与光源需求

图 1 为基于 Micro-LED 的 VLC 系统示意图,如图所示,当前 VLC 系统多采用强度调制/直接探测(Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD)体制:发射端由高速信号源与驱动/放大电路产生调制电流,并在直流偏置点附近叠加载波,驱动发光器件把电信号映射为随时间变化的光强;信道通常为室内自由空间链路,也可拓展至水下等更复杂光无线环境;接收端以光电探测器(Photoelectric Detector, PD)完成光/电转换,经跨阻放大后,由后级 DSP 恢复比特流^[1]。在超越第五代移动通信技术(Beyond 5th Generation Mobile Communication Technology, B5G)/第六代移动通信技术(6th Generation Mobile Communication Technology, 6G)异构网络中, VLC 系统常定位为 RF 信号的补充热点层,用于高密度接入与局部高速回传等场景^[20]。

面向系统工程化,光源指标往往不是“单项最优”,而是需要围绕链路吞吐与部署约束进行综合折中:其一,调制带宽决定可支持的符号率上限,并进一步影响高阶调制的可行性;其二,光功率与照度分布直接进入链路预算,决定覆盖范围、接收光电流与系统信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR);其三,线性度与动态范围决定正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)等高谱效波形在峰均比与非线性失真下的容限,从而影响可达速率与误码率(Bit Error Rate, BER)性能^[21]。得益于像素级可缩放、阵列化集成与片上互连潜力, Micro-LED 有望在带宽、功率与空间复用之间提供更灵活的系统解空间,已被用于多用户和分区发射等新型系统形态^[22]。

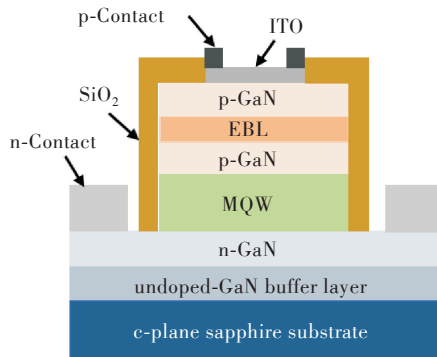


图 1 基于 Micro-LED 的 VLC 系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of VLC system based on Micro-LED

1.2 Micro-LED 的基本结构与工作原理

图 2 为基于 GaN/InGaN 系多重量子阱(Multiple Quantum Wells, MQW)的 Micro-LED 结构图,如图所示,GaN 系 Micro-LED 通常采用“衬底/缓冲层、n 型 GaN (n-GaN)、InGaN/GaN MQW 有源区、EBL、p 型掺杂层、透明导电层以及金属电极”的垂直结构,在正向偏置下注入电子与空穴,并在有源区辐射复合发光^[10,18]。与常规大尺寸 LED 相比,Micro-LED 的核心特征在于其小尺寸会降低结电容与几何电容,从而减小 RC 时延;同时,在更高电流密度下微分载流子寿命往往缩短,使-3 dB 带宽提升更明显。但微缩也会放大侧壁缺陷与表面复合的影响,若缺乏有效的侧壁损伤抑制与钝化工艺,非辐射通道增强会引发效率下降并限制可持续高速工作窗口^[23]。因此,Micro-LED 在“带宽-效率/光功率”之间呈现出随像素尺寸系统变化的规律:小像素更有利于高带宽与阻抗匹配,大像素更有利于高光功率输出;工程实现中常采用阵列并行来同时满足吞吐与照明/链路预算需求^[24]。在此基础上,通过外延与器件结构协同优化,Micro-LED 已实现 GHz 级电光带宽并支撑多 Gbit/s 级 VLC 传输验证^[25]。对于绿光等长波段器件,由于量子限制斯塔克效应(Quantum-Confined Stark Effect, QCSE)与效率下垂带来的带宽/效率耦合更强,近年来也出现了通过有源区工程(如 InGaN 量子点(Quantum Dot, QD)等)改善载流子束缚与复合动力学,从而推动高带宽绿光 Micro-LED 及其多 Gbit/s 通信演示的进展^[26]。



注:ITO 为氧化铟锡,是制备 micro-LED 理想的透光电极。

图 2 基于 GaN/InGaN 系 MQW 的 Micro-LED 结构

Figure 2 GaN/InGaN-based MQW Micro-LED structure

1.3 高速调制性能的关键物理限制

Micro-LED 要从单器件带宽提升走向面向通信系统可用的高速发射机,需要权衡多个方面的“器

件-系统”协同性能。作为通信系统的核心光源,其小信号调制带宽的物理极限主要受限于两类因素:一类是决定本征响应上限的有源区载流子复合动力学;另一类是来自器件与互连中的寄生 RC。

然而,协同优化材料特性与器件工艺以同步抑制 RC 延迟并提升复合速率,仍是当前该领域的重大挑战。特别是在广泛应用的极性 GaN/InGaN 基 Micro-LED 中,沿极性轴方向的强极化电场引发 QCSE,导致能带倾斜并降低了电子-空穴波函数重叠概率。这不仅削弱了光功率输出,还显著拉长了载流子微分寿命,成为限制带宽进一步提升的主要瓶颈。为突破上述物理限制,后续章节将从外延生长与器件加工两个核心维度展开综述,重点探讨通过应力工程与能带设计减轻 QCSE 以及通过结构优化协同提升 Micro-LED 调制带宽与输出功率的最新进展。

2 高速 Micro-LED 器件的外延生长和结构优化进展

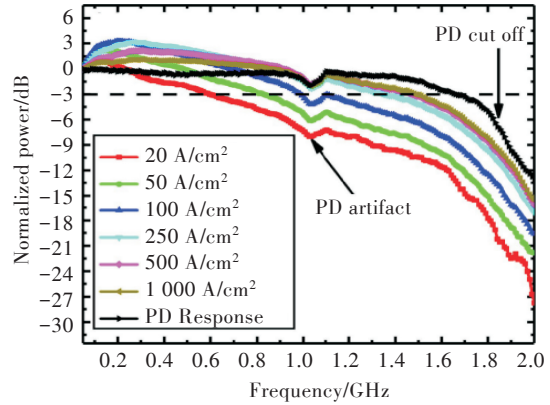
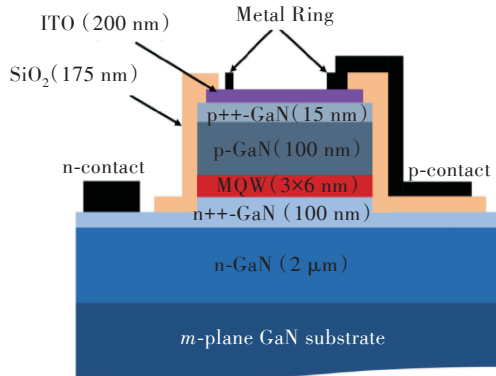
2.1 Micro-LED 器件的外延生长优化

在 Micro-LED 的调制特性中,外延层的结构设计与其生长质量是决定其响应速度的物理基石。由基于肖克利-里德-霍尔复合(Shockley-Read-Hall Recombination, SRH)-辐射-俄歇机制的 ABC 复合模型所述的速率方程可知,调制带宽的上限本质上取决于载流子在 MQW 中的复合动力学^[27]。对于常规的极性 GaN 基 Micro-LED,外延层设计面临的核心挑战在于如何克服 QCSE。强烈的内建极化电场导致能带倾斜,空间上分离了电子与空穴的波函数,这不仅增加了辐射复合寿命,也降低了内量子效率。因此,外延层维度的性能提升研究主要聚焦于通过能带工程来增强波函数重叠,并加速载流子的循环过程。

减轻 QCSE 最直接的方法是从晶体生长方向入手。由于 c 面器件中强烈的极化电场导致 QCSE,电子-空穴波函数重叠变差,辐射寿命拉长,因此研究者通过选用非极性 m 面和多种半极性晶向来削弱或消除内建电场,从根本上缩短载流子寿命,在较低电流密度下获得高带宽。非极性方面,如图 3 所示,Rashidi 团队的 m 面 InGaN/GaN Micro-LED 在约 1 kA/cm² 电流密度下即可实现 1.5 GHz 的-3 dB 带宽^[28],后续工作进一步表明在仅 10 A/cm² 这一极低电流密度下仍能保持约 508 MHz 带宽且接近峰值外量子效率(External Quantum Efficiency,

EQE), 证明非极性结构非常适合低功耗和高效 VLC 发射端设计^[29]。半极性方面, 如图 4 所示, 以 20~21 晶向为代表的 InGaN/GaN 微型 LED, 已在绿光波段实现了 756 MHz 的带宽和 1.5 Gbit/s 的数据速率^[7], 后续进一步突破了 1.1 GHz 的带宽和 4.3 Gbit/s 的数据速率^[30]。进一步的工作也表明半极性蓝光和绿光 Micro-LED 在几十 A/cm² 电流密度下就能超过 500 MHz, 在约 100 A/cm² 电流

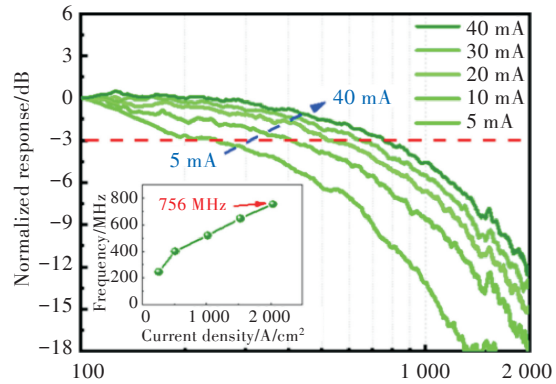
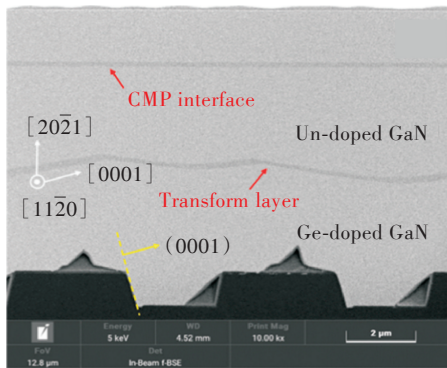
密度下即可突破 1 GHz, 兼顾了高速度与较低的功耗和发热^[31]。在理论和仿真层面, 多晶向对比研究也表明某些半极性取向在 9~20 kA/cm² 电流范围内可以提供接近或超过 900 MHz 的带宽, 验证了通过晶向选择抑制 QCSE 和提高辐射复合速率的普适性策略^[32-33]。综合来看, 非极性和半极性器件突出优势在于极低电流密度下的高带宽与高效率, 提供了在低电流下实现 GHz 级带宽的实用方案。



(a)非极性 InGaN/GaN Micro-LED
(a)Non-polar InGaN/GaN Micro-LED

(b)频率响应曲线
(b)Frequency response curve

图 3 非极性 GaN/ InGaN Micro-LED 结构图及其频率响应曲线^[28]
Figure 3 Structure diagram and frequency response curve of non-polar Micro-LED



(a)半极性 Micro-LED 截面视角的扫描电镜图
(a)The SEM image of the cross-sectional view of semi-polar Micro-LED

(b)频率响应曲线
(b)Frequency response curve

图 4 半极性 Micro-LED 扫描电镜图及其频率响应曲线^[7]

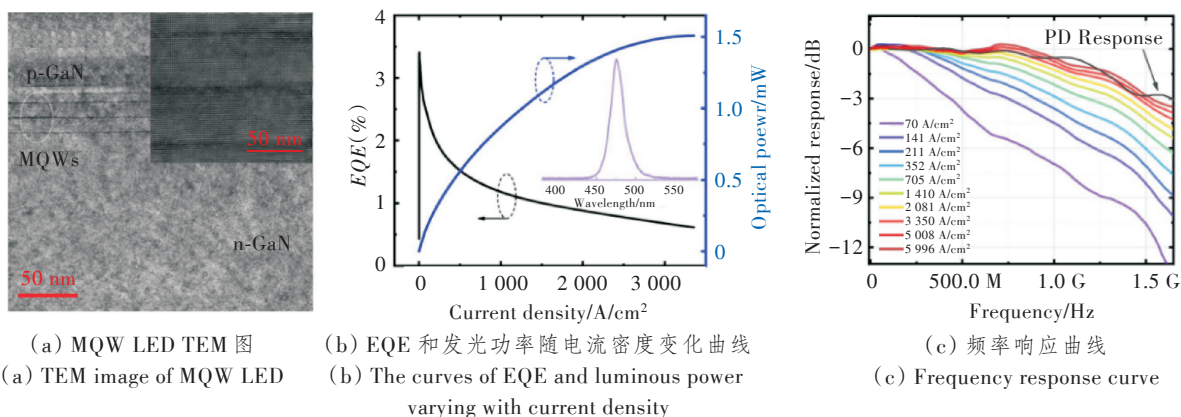
Figure 4 Scanning electron microscope image and frequency response curve of semipolar Micro-LED

围绕提升 GaN 基 Micro-LED 在 VLC 中的调制带宽和数据速率, 当前在 QW 以及其周围势垒、EBL 和掺杂与能带工程 3 个层面, 已经形成了较为系统的设计思路: 一方面, 在传统 InGaN QW 内部, 通过缩薄阱宽、渐变 QW、势垒厚度和势垒掺杂等来直接加快载流子复合, 例如将 c 面蓝光 Micro-LED 的 QW 厚度压缩到约 1 nm, 如图 5 所示, 并配合优化温度实现较强钢 (Indium, In) 局域化与应变调控, 可以显著减弱 QCSE、提高电子-空穴波函数

重叠, 从而把 -3 dB 带宽在约 60 μm 像素下提升到 1.53 GHz^[34]。绿光器件中通过系统改变 QW 垒厚度 (如 5、10 和 13 nm), 实验和 ABC 模型一致, 表明减薄势垒有利于增强总复合速率和提高带宽, 但同时会牺牲一定晶体质量和 EQE, 定量呈现了速度和效率的权衡^[35]。在此基础上, 仿真工作进一步提出梯度 In 组分的梯形/渐变 QW, 通过重新分配内部电场与能带, 提升空穴注入和电子-空穴重叠, 在中低电流区就可获得更短的微分寿命和更大的预测

调制带宽,为在不极端提高电流密度的前提下实现高带宽提供了结构设计思路^[6]。Lei 等人也通过两层沿方向 In 含量线性递增的 InGaN 势垒替代传统 GaN 势垒,可在 2 kA/cm² 电流密度下将-3 dB 带宽提升约 34% 至 580 MHz^[36]。同时也有通过在第一量子势垒中引入适量 Si 掺杂来局部屏蔽电场、增加辐射复合速率的设计,其垂直结构 Micro-LED 阵

列的带宽可在 2 kA/cm² 下提升到约 578 MHz,并支撑>1.6 Gbit/s 的链路^[37]。面向黄光与红光,还发展出混合 QW 和 GaN/InGaN 超晶格等缓冲组合,在高 In 含量发光阱前加入低 In 的 QW 或超晶格以释放应变、抑制 QCSE,从而在改善晶体质量与发光效率的同时,仍保持几百 MHz 以上带宽和 Gbit/s 级数据速率^[38]。



注:TEM 为透射电子显微镜。

图 5 c 面 Micro-LED 的 TEM 图、EQE 和发光功率曲线及其频率响应曲线^[34]

Figure 5 TEM, EQE and optical output power curves, and frequency response curve of c-plane Micro-LED

另一方面,近年来,外延优化不再局限在 QW 本身。在 EBL 侧,除了传统“更强阻挡防漏电”的思路外,也出现了刻意“削弱阻挡”的带宽导向设计,例如采用梯形 AlInGaN EBL,让一部分电子在高注入时更易逸出主动区并通过非辐射通道复合,从而显著缩短总寿命,将-3 dB 带宽提升到约 643 MHz,并在可接受的光功率与 EQE 下降范围内实现 4.2 Gbit/s 的数据速率^[39]。更进一步,可以通过移除 EBL 实现低电流密度下带宽和效率的提升,但是这种方法在大电流密度下的效率反而会由于没有 EBL 而更低^[40]。在 p 侧掺杂方面,通过在 p 区引入极化诱导 p 型掺杂的梯度 AlGaIn,可将 p 层电导提高约 4 倍,使空穴注入更有效,绿光 Micro-LED 阵列的光输出功率和带宽均获得约 45% 的提升,尽管

绝对带宽仍处于百兆级,但清楚展示了从注入改善到带宽提升链路^[41]。在缓冲层侧,利用对前置层和超晶格等结构的优化,可以显著缓解有源区内的极化效应,提升晶体质量,实现光功率和调制带宽的双提升^[42-44]。再向前推进到如图 6 所示的纳米结构 QW 层面,InGaN QD 有源区则通过强局域和弱极化显著缩短辐射寿命,从根本上将调制带宽提升到远超常规 LED 器件的水平^[25-26,45-46]。在基于 QD 的蓝/绿 Micro-LED 中,由于自发辐射速率大幅提高,二维载流子池被打散为强局域纳米态,实测-3 dB 带宽在直流电流密度低于 1 kA/cm² 时即可分别达到蓝光近 3.6 GHz 和绿光近 1.4 GHz,等效电路分析表明,此时蓝光器件已从寿命受限转为 RC 受限^[47]。类似地,通过交替生长中断等工艺构建的 3 层

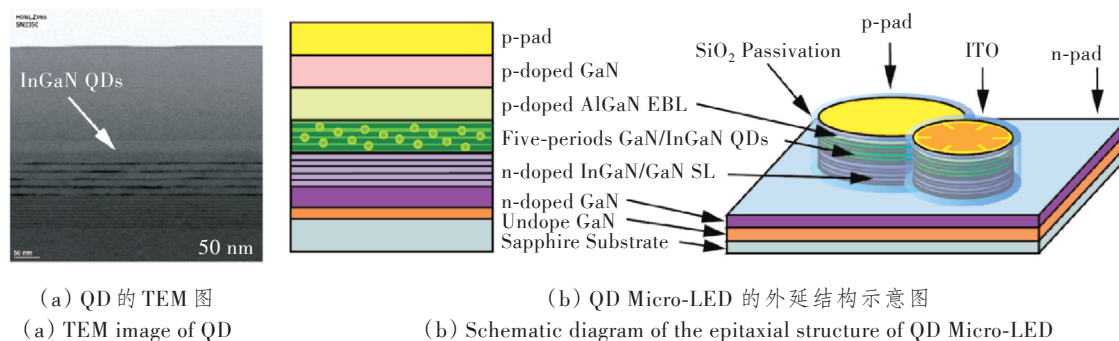


图 6 QD Micro-LED 的 TEM 图及其外延结构示意图^[26]

Figure 6 TEM image and epitaxial structure schematic diagram of QD Micro-LED

纳米结构 InGaN 有源区,在保持 >0.5 mW 输出功率的同时实现 >2.6 GHz 的电对电带宽,并可以在自由空间与塑料/石英光纤芯片间互连中实现 12 Gbit/s 的速率^[48]。

2.2 Micro-LED 器件结构优化

在器件层面,提升 GaN 基 Micro-LED 用于光通信的性能已经扩展为对芯片几何、寄生参数、侧壁与热管理等多维度的系统工程。首先是几何尺寸相关的尺寸效应:大量实验表明,当像素尺寸从百 μm 级缩小到 $10\sim 30$ μm 量级时,结电容近似按面积缩小,串联电阻在合理电极设计下不会呈比例增加,从而整体 RC 截止频率显著提高,同时更高的工作电流被压缩到更小的有效体积内,平均载流子浓度增大,微分寿命缩短,使器件从 RC 受限逐渐过渡到由载流子复合寿命主导的带宽区间^[49-50]。这在 c 面蓝光 Micro-LED 中尤其典型:在 GaN 自支撑衬底

上, 20 μm 像素可以实现高达 2.3 GHz 的 -3 dB 带宽并支撑 10 Gbit/s 以上的 VLC 链路,而更大像素则提供更高光功率但带宽降低^[51-52]。然而在阵列结构中,浅刻蚀或共用 n -GaN 层会引入显著的寄生电容和波导效应,限制系统带宽。因此,近年来通过深刻蚀将每个像素电气上完全隔离和刻蚀至衬底的结构越来越受到重视,两种刻蚀方式所制造出的 Micro-LED 如图 7 所示。等效电路与阻抗拟合表明,深刻蚀可以显著降低电极及线路电容。在绿光 Micro-LED 阵列中,将 n -GaN 深刻蚀分割为完全独立像素后,侧向波导损耗减小,从蓝宝石侧出光增强,EQE 在 4 kA/cm^2 下提高约 47%, -3 dB 带宽也提升约 57%,VLC 系统数据速率达到 6.58 Gbit/s,说明深刻蚀是一条从 RC 侧打开带宽瓶颈的有效路径^[53-54]。

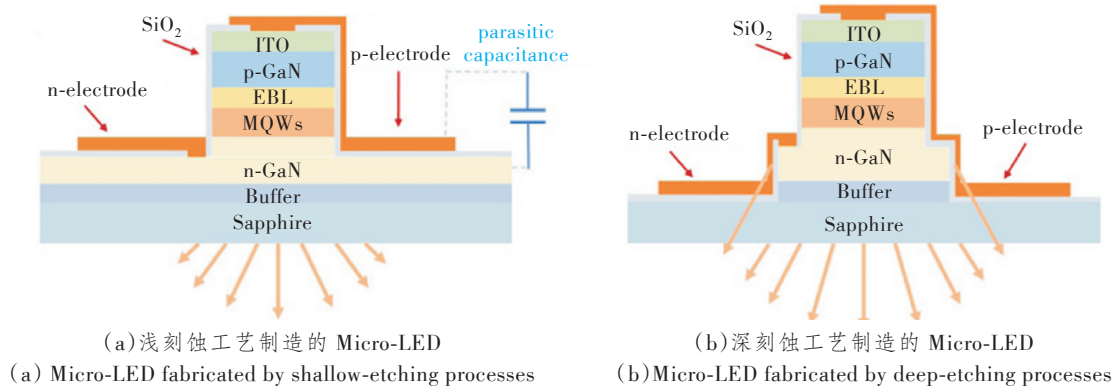


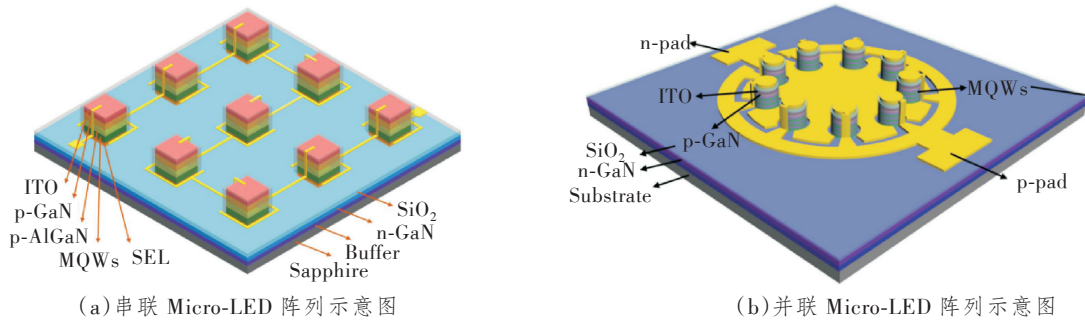
图 7 不同刻蚀方式所制造出的 Micro-LED 的示意图^[53]

Figure 7 Schematic diagrams of Micro-LEDs fabricated by different etching methods

在阵列拓扑方面,如何在保持单像素高带宽的前提下提升总光功率,是器件层面的一个核心问题。串联阵列通过在相同电流下叠加电压,使每个像素工作在接近单像素的电流密度,因此可以在整体光功率提高的同时大致保持原有带宽。例如 10 μm 绿光单像素在约 40 kA/cm^2 电流密度下电光带宽可达 2.19 GHz,而由多像素串联构成的阵列在带宽几乎不损失的前提下提供毫瓦级光功率,实现近 9 Gbit/s 的速率^[55-56]。并联阵列则在相同电压下注入更大总电流,单像素电流密度通常略降,理论上有利于可靠性和效率,但多像素并联会放大线阻与电容带来的 RC 负载,一般会牺牲带宽;不过在某些结构中,利用环形并联紫光 Micro-LED 阵列,在高电流密度下的自加热效应反而缩短了有效载流子寿命,使 9 像素并联时的 -3 dB 带宽从单像素的约 797 MHz 提升到约 1.13 GHz,同时获得更高的光

功率和 10.25 Gbit/s 的数据速率^[57]。图 8 所示为串联和并联 Micro-LED 阵列的示意图。

在进一步压榨带宽和效率的同时,器件设计也越来越重视侧壁效应、“光-场”工程和可靠性问题。Micro-LED 尺寸缩小后,侧壁缺陷和表面态导致的非辐射复合在有效体积中所占比例急剧上升,又严重降低 EQE 并引入了电流崩塌和噪声,因此高质量侧壁钝化成为小尺寸器件的关键步骤,既可抑制漏电与界面态,又能在较宽电流范围内稳定寿命-带宽特性^[58-59]。在光-场工程方面,表面等离子激元和腔/光子结构被用来从光学侧加速辐射。例如在红光 InGaN Micro-LED 上集成金属等离子激元光栅,理论与仿真表明珀塞尔效应(Purcell effect, Purcell)因子可提升到接近 5.1,单器件 EQE 提高约 11%,对应的 -3 dB 带宽可提升至约 528 MHz,同时辐射角度变宽,有利于抑制阵列像素间串扰^[60]。在



(a) 串联 Micro-LED 阵列示意图 (b) 并联 Micro-LED 阵列示意图
 (a) Schematic diagram of a series-connected Micro-LED array (b) Schematic diagram of a parallel-connected Micro-LED array
 注: SEL 为单发射层或单发光层。

图 8 串联和并联 Micro-LED 阵列的示意图^[55,57]

Figure 8 Schematic diagram of series-connected and parallel-connected Micro-LED arrays

温度、可靠性与退化行为方面,高速工作不可避免地伴随着高电流密度和自加热,短期内适度升温往往会增强非辐射复合、缩短有效寿命,从而提升瞬时带宽;有实验表明,蓝光 Micro-LED 在 200 °C 仍可维持甚至略高于室温的带宽(如由 3.73 提升到约 4.00 GHz),分析表明,这是由于非辐射通道主导下寿命随温度缩短的结果^[61]。但长期高电流密度应力会在有源区及周边引入新的缺陷,增强陷阱辅助隧穿和 SRH 通道,反而拉长有效辐射与 Auger 寿命,导致带宽随老化显著下降^[62]。因此,器件层面的带宽提升策略必须和热设计、封装、驱动波形以及可靠性工程捆绑考虑:通过合理选择工作电流密度区间、脉冲或交流电(Alternating Current, AC)驱动模式、良好的散热路径以及稳健的侧壁/电极钝化,才能在充分利用“高电流密度/高温加速复合”的

优势的同时,避免不可退化带来的长期性能崩塌。综合来看,当前 Micro-LED 器件层面的研究已经从单一结构调参演进为“几何-电-光-热-时间”的多场耦合设计,共同为实现 GHz 级乃至多 GHz 的稳定带宽和多 Gbit/s 的 VLC 系统奠定了基础。

为便于从“衬底-晶向-有源区/结构”3 个维度对高速 Micro-LED 的器件水平进行横向比较,表 1 汇总了近年来不同衬底与结构类型器件在典型工作点下的 -3 dB 调制带宽及对应电流密度。由表可知,传统蓝宝石衬底 c 面器件在较高电流密度驱动下已实现约 1~2 GHz 量级的带宽;通过晶向工程(非极性/半极性)削弱极化场与 QCSE,可在更低注入条件下获得更高带宽,并进一步将可实现带宽推进至多 GHz 区间;与此同时,随着衬底从蓝宝石扩展到 Si 与自支撑 GaN,以及 QD 等纳米有源区的

表 1 不同器件衬底和结构的 Micro-LED 性能

Table 1 The performance of Micro-LEDs with different substrate and structure types

年份	器件衬底和结构	-3 dB 带宽/GHz	电流密度/kA/cm ²	引用
2016	蓝宝石衬底 c 面	1.000	45.8	[63]
2016	蓝宝石衬底 c 面	0.830	19.5	[50]
2018	蓝宝石衬底非极性面	1.500	1.0	[28]
2020	蓝宝石衬底半极性面	0.756	2.0	[7]
2022	蓝宝石衬底 c 面	1.530	~6.0	[34]
2022	蓝宝石衬底 c 面	1.310	41.4	[56]
2023	蓝宝石衬底 c 面(QD 有源区)	3.600	< 1.0	[47]
2024	Si 衬底 c 面	0.580	2.0	[36]
2024	GaN 单晶衬底 c 面	2.300	42.5	[51]
2024	蓝宝石衬底 c 面(QD 有源区)	2.640	1.5	[48]
2024	蓝宝石衬底 c 面	0.704	3.0	[64]
2024	蓝宝石衬底半极性面	4.000	11.0	[61]
2025	硅衬底 c 面	0.643	2.0	[39]
2025	蓝宝石衬底 c 面	2.190	40.0	[55]
2025	蓝宝石衬底 c 面	1.133	6.0	[65]

引入,器件的“带宽-功耗/热负载”工作窗口被显著拓宽,体现出从单纯依赖高注入加速复合,逐步转向材料/结构协同以实现“低电流密度下的高带宽”的发展趋势。该对比也提示:报道带宽数值应结合电流密度与结构类型共同解读,才能更准确地评估不同路线在系统级可用性(光功率、效率与可靠性约束)下的实际优势。

综上,本章节从外延能带工程与器件结构工程两个层面,系统梳理了高速 Micro-LED 的提速路径。图 9 进一步以年份为横轴汇总了代表性工作的器件带宽数据,可以直观看到:近十年来, Micro-LED 的可实现带宽已由亚 GHz 稳步推进至多 GHz 区间,并呈现出从单像素本征带宽提升向阵列/封装互连与热可靠性主导的端到端瓶颈迁移的趋势。需要强调的是,器件 -3 dB 带宽只是系统吞吐的必要条件而非充分条件:在 IM/DD 体制下,最终可达速率还取决于驱动与互连的频响与阻抗匹配、器件线性度与动态范围、接收端噪声与带宽以及调制与 DSP(均衡/预失真和比特/功率加载等)对频率选择性与非线性的补偿能力。基于此,下一章将把视角从“器件能做到多快”推进到“系统如何把带宽转化为速率与距离”,围绕系统进展展开。

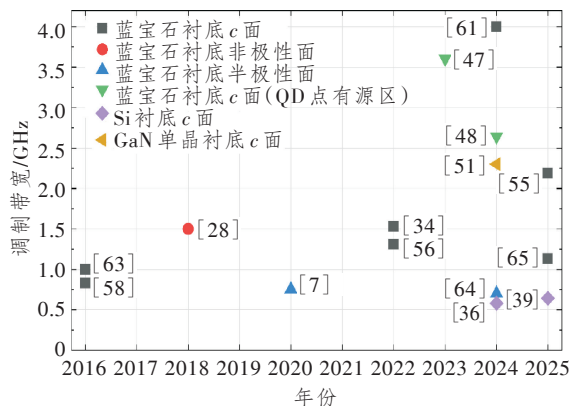


图 9 Micro-LED 器件带宽发展图

Figure 9 Development diagram of bandwidth for Micro-LED devices

3 基于 Micro-LED 的高速 VLC 系统进展

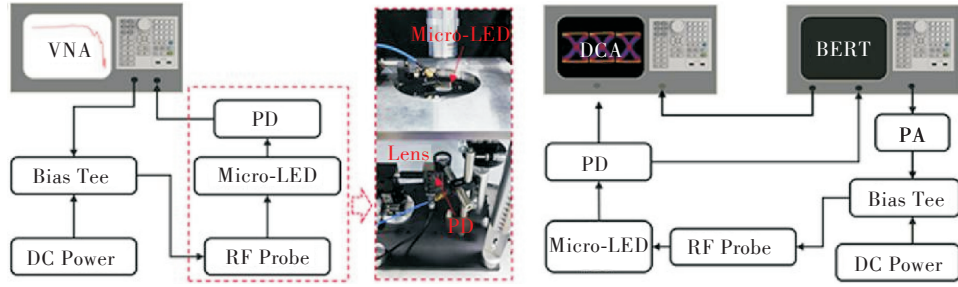
3.1 点对点高速链路

典型的 Micro-LED-VLC 点对点实验平台通常由高速任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)产生调制信号,经过 RF 功放与偏

置-合路(Bias-Tee 或等效电路)后叠加到 Micro-LED 的直流偏置上,以获得更高的线性动态范围和更大的调制电流摆幅;发射端配合光学透镜系统进行光束整形以实现自由空间传输,接收端多采用雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)进行光/电转换,随后通过跨阻放大器(Trans-impedance Amplifier, TIA)后置放大及高速示波器采样,并离线完成均衡和解调等 DSP 操作与 BER 等系统性能评估。在器件侧,除单个像素 Micro-LED 外,串联偏置(Series-biased)小阵列与多色阵列成为提升链路距离与总速率的关键方案:串联可在一定程度上提高光功率并降低等效电容/改善高频响应,从系统层面增强 SNR 与可用带宽,从而支持更高阶调制或更长距离传输^[18,66]。

点对点 Micro-LED-VLC 系统在调制上呈现低复杂度高可靠性和频谱高效调制两类策略。开关键控(On-Off Keying, OOK)调制/脉冲幅度调制(Pulse-Amplitude Modulation, PAM)具有实现简单、硬件线性度要求低和可靠性高的特点,适合短距离或低复杂度终端,其系统评估常结合眼图与 BER 或 Q 因子分析。在短距互连及低功耗链路中,采用 OOK 调制可以降低 DSP 复杂度^[67];而频谱高效调制,如 OFDM/离散多音(Discrete Multi-Tone, DMT)与比特/功率加载、预失真/预均衡技术等,利用多载波将频率选择性信道分解为多个子信道,通过自适应比特/功率加载与均衡补偿器件-电路-光通道的幅度频率响应与非线性,可以显著提升有效频谱效率与可达速率^[68-70]。

基于 Micro-LED 的 VLC 链路性能评价通常以系统带宽、BER 的前向纠错(Forward Error Correction, FEC)门限、眼图开口度和误差矢量幅度(Error Vector Magnitude, EVM)为核心,性能测试系统图如图 10 所示。对于多载波与高阶正交振幅调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM),EVM 与各子载波 SNR 直接关联。当 Micro-LED 器件或电路链路存在明显带宽滚降或非线性时,通常表现为高频子载波 SNR 降低和 EVM 变差,进而限制可加载比特数与总速率。因此,近年大量工作将系统提升聚焦于提高 Micro-LED 系统的小信号 -3 dB 带宽、优化偏置与驱动线性度以及在 DSP 侧引入非线性补偿等。



注：VNA为矢量网络分析仪；DC为直流电；DCA为数字通信分析仪；BERT为BER测试仪。

图 10 频率响应特性和自由空间通信性能测试系统图

Figure 10 Diagram of the frequency response characteristics and free space communication performance test system

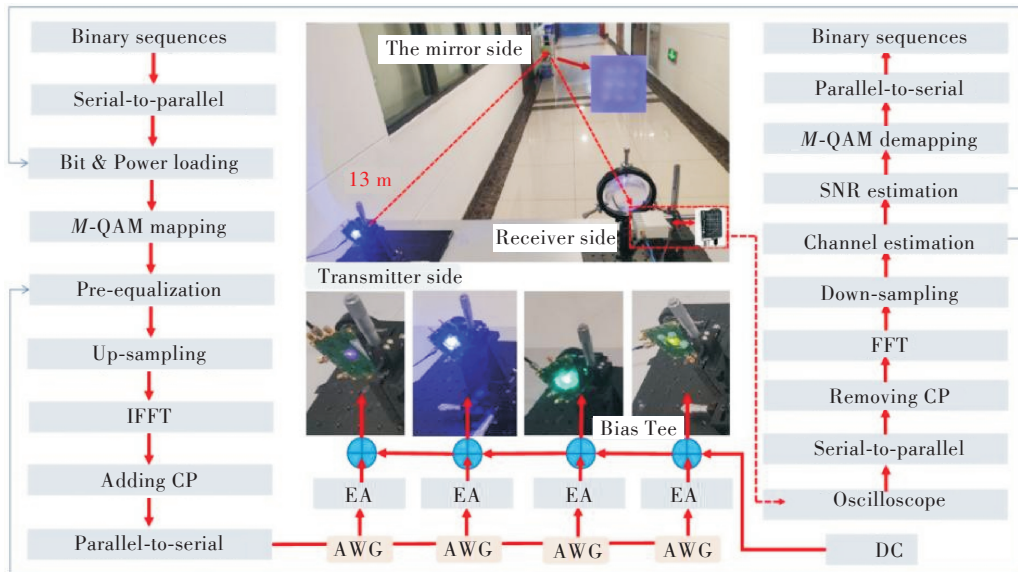
3.2 多维复用与阵列化系统

Micro-LED 具有可高密度阵列化与逐像素寻址的优势,使其在 VLC 系统中具备实现空间调制的潜力。发射端通过多像素独立驱动并在空间上形成可区分的光场,或通过成像光学映射到接收面,接收端采用多 PD 或成像式接收结构实现通道分离,从而在不增加单像素带宽的前提下提升总吞吐与多用户接入能力。

从器件与驱动角度看,阵列化系统的瓶颈往往来自通道间的电学和光学串扰与高密度互连带来的寄生效应。因此,提升阵列像素隔离度和降低共享电极带来的寄生电容和波导效应是阵列高速化的重要方向。文献[53]中报告的基于深刻蚀实现像素电隔离的绿色 Micro-LED 阵列工作,提出了隔离结构可同时带来 EQE 与带宽的提升,并在系统层面实

现了 Gbit/s 级高速传输。

波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)是 Micro-LED-VLC 提升总吞吐的另一条主线。通过红绿蓝(Red Green Blue, RGB)或多波长多通道并行调制,实现器件速率叠加,如 Zhu 等人报告的多色串联 Micro-LED 阵列实现了 13 m 距离下 15.78 Gbit/s 总速率的长距离 WDM 演示,如图 11 所示^[71];Maclure 等人报告的紫外(Ultraviolet, UV)多波长 WDM 在 0.5 m 距离实现了 10.32 Gbit/s 的并行传输^[72]。此外,也有工作在系统层面采用 LED 与 Micro-LED 混合 WDM,将总吞吐推进到 25 Gbit/s 以上^[73]。WDM 的关键工程问题主要包括通道间光谱串扰与滤波代价、不同波长器件带宽和线性度差异导致的短板效应以及在长距离下的色散与光学对准问题。



注：IFFT为快速傅里叶逆变换；FFT为快速傅里叶变换；CP为循环前缀；EA为电放大器。

图 11 基于多色串联 Micro-LED 阵列的 WDM VLC 系统实验装置图^[71]

Figure 11 Schematic of the experimental setup for the multicolor series connection Micro-LED arrays-based WDM VLC system

表 2 从系统实现的视角,对近年来代表性的 Micro-LED-VLC 演示工作进行了横向归纳:既涵盖单像素与阵列(串联、并联和多色阵列等)两类发射端形态,也对比了 OOK 调制、PAM 等低复杂度

表2 不同调制、复用方法及单颗/阵列式 Micro-LED VLC 系统速率

Table 2 Data rates of single/array Micro-LED VLC systems with different modulation and multiplexing methods

年份	器件	调制/信号处理	速率	距离	引用
2020	绿光半极性 Micro-LED 发射器	OOK	1.5 Gbit/s	光纤耦合	[7]
2020	红光 AlGaInP Micro-LED 发射器	OFDM	5.014 Gbit/s(单像素)、6.596 Gbit/s(并联阵列)	0.4 cm	[74]
2020	蓝光 GaN Micro-LED 阵列发射器	OOK	1 Gbit/s	光纤耦合	[75]
2020	蓝光 QD Micro-LED 发射器	OOK	2 Gbit/s(空气/水下融合链路)	3 m(空-水)	[76]
2020	蓝光串联 GaN Micro-LED 阵列发射器	OFDM+自适应比特-功率加载	11.74、11.72、10.11、6.58、2.84 和 1.61 Gbit/s	0.3、2.0、5.0、10.0、15.0 和 20.0 m	[77]
2021	绿光 Micro-LED 阵列发射器	OOK / DMT	1.50 Gbit/s(OOK)、>5.02 Gbit/s(DMT)	0.5 m	[73]
2021	蓝光 GaN Micro-LED 发射器	OOK / OFDM	2 Gbit/s(OOK)、4 Gbit/s(OFDM)	3 m	[10]
2021	蓝光 Micro-LED 发射器	OFDM / ANN 均衡	8.75 Gbit/s	0.12 cm	[70]
2021	蓝光半极性 Micro-LED + 钙钛矿色转换	OOK	1.2 Gbit/s	未提及	[78]
2022	红光 InGaN Micro-LED 发射器	OOK	350 Mbit/s	光纤耦合	[79]
2022	黄绿 Micro-LED 发射器	OOK	800 Mbit/s	光纤耦合	[80]
2022	绿光串联 Micro-LED 阵列发射器	OFDM	5.789 Gbit/s	0.5 m	[56]
2022	多波长可见 LED + UV/可见 Micro-LED 发射器	OFDM + 预均衡 - 比特加载/WDM	聚合 25.20 Gbit/s、Micro-LED 18.43 Gbit/s	0.25 m	[81]
2022	蓝光 GaN Micro-LED 发射器	OFDM + 预均衡 - 比特加载/WDM	4.48 Gbit/s	1 m	[52]
2022	绿光 InGaNQD Micro-LED 发射器	OOK、PAM-4	2.1(OOK)、5.0(PAM-4)Gbit/s	2 m	[26]
2022	蓝光 Micro-LED 发射器	OFDM	5.27 Gbit/s	1 m	[34]
2022	蓝光并联 Micro-LED 2×2 阵列发射器	OOK	1.5 Gbit/s	未提及	[82]
2022	绿光 Micro-LED 器件	OFDM	1.773、1.309 Gbit/s	未提及	[35]
2022	多色串联 Micro-LED 阵列发射器	OFDM + 预均衡/WDM	V5.71、B4.86、G4.39、Y0.82 Gbit/s、WDM 聚合 15.78 Gbit/s	13 m	[71]
2023	绿光 Micro-LED 阵列器件	OFDM	156 MHz	0.3 m	[83]
2023	绿光 GaN-on-Si Micro-LED 器件	OFDM	4.65 Gbit/s	0.25 m(80 μm 单像素)、13 m(9×20 μm 串联)	[84]
2024	黄/红 InGaN Micro-LED 阵列发射器	OOK、OFDM	1.0(黄, OOK)、1.5(黄, OFDM)Gbit/s	光纤耦合	[38]
2024	蓝光 c-plane Micro-LED 阵列器件	OOK	1.61 Gbit/s	1 m	[37]
2024	绿光 Micro-LED 发射/接收器件	OFDM	1.1 Gbit/s(全双工)	未提及	[85]
2024	蓝光 c-plane 自支撑 GaN Micro-LED 发射器	OFDM + 预均衡比特加载	10.547 Gbit/s	0.2 m	[51]
2025	蓝光 Micro-LED 发射器	OOK	3.07 Gbit/s	未提及	[86]
2025	蓝光 Micro-LED 发射器/阵列发射器	OOK	11.2 Gbit/s(单通道)、每通道 3.5 Gbit/s(300 通道阵列)	30 m	[87]
2025	绿光 Micro-LED 阵列发射器	OFDM	307.3 Mbit/s	0.12 m	[88]
2025	蓝光 Micro-LED 发射器	OFDM	4.2 Gbit/s	1 m	[39]
2025	紫光 Micro-LED 阵列发射器	OFDM	10.25 Gbit/s	0.1 m	[57]
2025	多色 Micro-LED 阵列发射器	OFDM(红、黄)、DMT(绿、蓝)	R2.25、Y3.00、G5.36、B7.12 Gbit/s、总速率 17.73 Gbit/s	0.5 m	[89]

注:ANN为人工神经网络;速率栏V、B、Y、G和R分别为紫色、蓝色、黄色、绿色和红色。

调制与 OFDM/DMT 结合自适应比特/功率加载、均衡/预失真以及 WDM 等复用手段在不同距离下的速率表现。由表可知,系统峰值速率的提升往往并非单纯依赖器件带宽纪录,而是由光功率/链路预算(距离)-频谱效率(调制阶数)-DSP 补偿能力-多通道复用增益共同决定:短距链路更容易通过高阶调制与强均衡把带宽转化为吞吐,而在米级到十米级距离下,阵列(尤其串联阵列)与 WDM 并行则成为兼顾光功率与聚合速率的关键路径。

图 12 进一步把表 2 中的代表性结果按年份可视化,直观反映了 Micro-LED-VLC 从早期百 Mbit/s 到多 Gbit/s 的快速跃迁,并在近几年逐步逼近/突破 10 Gbit/s 量级的趋势。值得注意的是,速率上升的背后,驱动/互连与器件线性度、接收端带宽噪声以及均衡/预失真与加载策略的成熟度,正在越来越多地决定系统速率能否稳定复现;因此,图 12 不仅是速率纪录的时间轴,也揭示了研究重心正由单点速率突破转向可部署条件下的端到端协同优化。

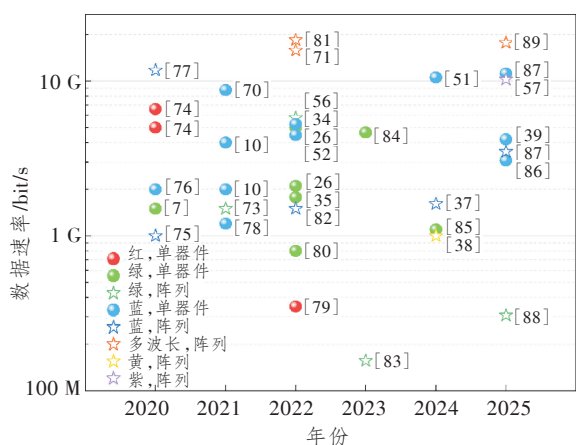


图 12 Micro-LED VLC 系统速率发展图

Figure 12 Development diagram of speed for Micro-LED VLC systems

3.3 场景化应用与系统集成

室内光保真(Light Fidelity, Li-Fi)场景中, Micro-LED 既可作为照明和显示光源,又可作为高速接入点发射端。系统形态通常体现为阵列化光源结合多用户接入与终端移动性支持,阵列化的光源可用于波束或空间资源分配,WDM 可用于波长资源复用,而在用户移动与遮挡条件下,链路自适应如距离自适应均衡和速率-调制自适应等成为保持可靠性的关键^[90-91]。

水下光通信受限于水体吸收与散射特性,蓝绿光处于水下环境的吸收窗口,因此基于蓝/绿 Micro-LED 的水下 VLC 具有器件可得性与系统安全性的优

势。Lv 等人报告的一项基于大规模 GaN Micro-LED 阵列的水下无线光通信实验表明,在 73.5 m 的水下距离可实现 90 Mbit/s 的数据速率,在 37.7 m 水下距离,数据速率可提升至 165 Mbit/s,展示了 Micro-LED 阵列在水中短距高速链路中的潜力与可扩展性^[92]。水下场景的系统挑战主要集中在强散射导致的通道时变与对准敏感、背景光噪声与接收孔径和视场的权衡以及封装防水与热管理等工程问题;对应的系统优化方法包括更强的均衡及编码、空间分集与更高效的光学收发结构等。

在超短距(mm-cm)与板间(cm-m)互连中,与传统短距光互连技术相比, Micro-LED 方案在体系结构与能效评估维度上呈现出不同的技术路线。当前 850 nm 垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL)链路单通道速率已达到 40 Gbit/s 量级,系统能效约为 3.4 pJ/bit^[93],并在数据中心短距互连中得到广泛应用。然而, VCSEL 方案通常依赖高速串行/解串器(SerDes)与高带宽模拟前端,其功耗与面积开销随通道数线性扩展,在大规模并行场景下 SerDes 与驱动电路往往成为系统级能效与集成密度的主要瓶颈。硅光方案方面,基于调制器与外部/片上激光器的链路单通道速率已超过 100 Gbit/s,并具备成熟的 WDM 扩展能力^[94],但其系统实现依赖光源、调制器与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)电路的异质集成,封装耦合复杂度与功耗预算对整体能效具有显著影响。相比之下, Micro-LED 在短距互连中的潜在优势并不体现在单通道极限速率,而在于可通过高密度阵列实现“中低单通道速率+超大规模空间并行”的体系结构。例如,在 μm 级像素间距条件下,理论数据率密度可达约 20 Tbit/s/mm^[95],在该架构中,单像素目标速率可控制在 1~3 Gbit/s 量级,从而降低对超高速 SerDes 与高功耗驱动电路的依赖,有利于在系统层面优化单位面积吞吐与能效表现。近期面向规模化互连的 Micro-LED 数据互连实验亦报告了具有竞争力的系统能效结果,表明其在高密度并行光电融合模块中的工程潜力^[96]。因此,从工程化视角看, VCSEL 与硅光更适合“高速串行”架构,而 Micro-LED 更契合“高密度并行”架构。在未来数据中心短距与板间互连场景中,不同技术路线可能形成互补格局,其竞争力评估应基于包含驱动、电路、封装与互连在内的系统级能效与面积吞吐指标,而非仅以单器件带宽或峰值速率为依据。

综上,基于 Micro-LED 的 VLC 系统已从“验证可行性”的点对点演示,快速演进到以阵列化并行、复用与高谱效调制为核心的高速传输平台:一方面,器件带宽提升、驱动互连优化与 DSP(均衡/预失真和加载等)协同,使单链路速率持续抬升;另一方面,阵列并行与(多色)复用为在更长距离与更高照度约束下实现更高聚合吞吐提供了可扩展路径。然而,当系统从实验室指标走向工程化部署时,速率提升不再只取决于带宽,而更受限于“带宽-效率-线性度-热与可靠性-封装互连-复杂度/成本”的系统性折中。基于此,下一章进一步归纳高速 Micro-LED VLC 在器件与系统层面的挑战,讨论未来发展方向。

4 高速 Micro-LED 及其通信系统的关键挑战与发展趋势

4.1 器件层面的挑战

①“调制带宽-效率-功耗”之间存在天然耦合。提升调制带宽通常需要提高电流密度以缩短微分寿命,但同时会加剧效率下降、载流子溢出和自发热,导致线性工作区间收窄并提升可靠性风险,最终限制高阶调制条件下的有效 SNR 与可持续速率^[97]。这一矛盾在绿光至红光等长波段更为突出:QCSE 以及长波段材料缺陷问题会进一步放大“带宽-效率”权衡,因而更需要通过晶向工程、QW/势垒/EBL/掺杂与应力工程等手段,实现“低电流密度下的高带宽”,而非单纯依赖提高注入^[28,31,98]。与此同时,InGaN QD 有源区可通过增强载流子局域与提高自发辐射速率,从机制上缓解寿命受限并将带宽推向多 GHz,但其外延可控性、器件一致性以及与阵列工艺的兼容性仍是工程落地的关键门槛^[25-26,46]。

②寄生效应呈现“层级转移”,使器件优势难以直接转化为系统优势。像素微缩确实能降低结电容并缓解本征 RC 限制,但当器件走向阵列化、封装化与板级互连后,焊盘/走线/封装引入的寄生电感电容及阻抗失配会重新主导端到端频响滚降,使系统有效带宽显著低于晶圆级测得的器件带宽^[54]。因此,等效电路建模与阻抗拟合正在成为器件设计与封装选型的“共同语言”,用于解释不同封装/板级实现导致的带宽差异,并指导匹配网络、走线布局和互连结构优化。

③热与可靠性正从“附加指标”转变为“可持续速率的硬约束”。自加热与高温会改变复合通道占

比并引发频响漂移,短期内可能出现“热致带宽提升”的表象,但长期应力会导致缺陷累积与频响退化,使光功率与带宽同步衰退^[57];同时,面向车载/工业等高温场景,器件在高温条件下仍保持高带宽的能力也需要被系统化评估并纳入设计规范^[96]。

4.2 系统层面的挑战

①高频频响、线性度与噪声预算共同决定可达速率。对于 OFDM/DMT、QAM 和 PAM-4 等阶调制,发射端与接收端任一环节的幅相响应起伏都会引入明显码间干扰(Inter-Symbol Interface, ISI)/EVM 恶化,因此预均衡、后均衡以及自适应 bit/power loading 基本成为高速系统的标准配置。与此同时,若器件与驱动链路存在动态非线性或记忆效应,OFDM 的高峰值平均功率比(Peak-to-Average-Power Ratio, PAPR)会进一步放大失真与削顶,迫使系统在功率回退与 BER 性能之间折中,因此,面向工程实现的低复杂度动态预失真与非线性补偿将越来越关键。

②复用扩展的主要瓶颈正在转向“串扰与标定复杂度”。多通道复用(阵列并行、多进多出(Multi-Input Multiple-Output, MIMO)/空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)、WDM)可以提升总吞吐并改善链路预算,但像素间电学/光学/热串扰会破坏通道独立性并引入长期漂移,使系统需要更复杂的在线标定、通道估计与自适应均衡^[75,82]。在 WDM 场景中,多色/色转换系统的谱重叠与滤光非理想会引入谱串扰,使系统从“噪声受限”转为“串扰受限”,必须在器件光谱工程、滤波/光学设计和 MIMO 后处理之间协同优化,相关建模与抑制研究表明,对谱串扰的真实建模与后处理可显著提升 WDM-VLC 的容量上限^[79]。

③工程约束会显著改变“最优架构”的选择。高速系统走向可部署时,封装、互连、散热、体积、功耗和成本等因素会成为主导约束:实验室常用的大功率 RF 放大器、Bias Tee 与外置探针/连接器在量产模块中往往意味着寄生不可控与功耗不可接受,因此驱动-封装-器件的紧耦合设计乃至异质集成路线(缩短互连和固定阻抗环境)将成为必由之路。此外,在长距离或移动/遮挡等复杂场景中,距离自适应预均衡、鲁棒编码与链路自适应策略将从“性能优化”演进为“可用性保障”,10 m 量级、10 Gbit/s 级演示已体现出此类工程化策略的必要性^[73]。

4.3 未来发展趋势

①以“低电流密度下的更高带宽”为核心目标,

缓解功耗与热可靠性压力。典型路径包括：通过晶向工程(非极性/半极性)削弱 QCSE,在低电流下同时获得高带宽与高效率^[28,31,98]；通过 QW/势垒/EBL/掺杂与应力/缓冲工程,在保持晶体质量的同时提升复合速率并改善注入平衡^[34-35]；以 QD/纳米有源区为代表的更激进路线,将寿命受限进一步推向 RC 受限,从而打开多 GHz 带宽空间,但需要同步解决一致性与可制造性问题^[25-26]。

②“阵列化并行 + 多维复用”将成为提升总吞吐的主力路线,同时更强调串扰可控与标定可扩展。串联阵列可在较小带宽代价下提升光功率并改善等效电容,更适合更长距离或更高阶调制；并联阵列与特殊几何(如环形阵列)则可在特定条件下利用热-复合耦合获得更高的等效带宽与更强链路预算^[57]。在容量扩展上,空间并行与 WDM 的叠加将更常见；多色串联 Micro-LED 阵列与 WDM 已在更长距离下验证容量优势,具有进一步扩展的潜力^[71,81]。与此同时,对谱串扰与像素串扰的系统建模及 MIMO 后处理将更频繁地纳入“系统设计闭环”,作为复用可扩展性的关键保障^[82,99]。

③端到端协同设计与异质集成将决定工程化上限。器件侧将更强调等效电路与封装寄生共设计,把“芯片-封装-板级互连”作为统一对象优化,避免带宽在系统端被寄生吞噬^[65]；系统侧则会把预均衡、非线性补偿和学习型均衡作为可模块化 DSP 组件,用于对抗器件记忆效应、串扰和复杂信道变化,并降低对极端硬件线性度的依赖^[78]。从更宏观的路线图看,面向非显示应用(包括光通信/互连)的 Micro-LED 电光集成正在形成清晰技术谱系,其核心是把高速性能、能效、封装互连和可靠性统一纳入可制造框架,从而实现从实验室演示到系统产品的跨越。

5 结束语

本综述围绕高速 Micro-LED 器件与 VLC 系统的协同演进,按“机理-器件-系统”的逻辑主线,对调制带宽形成机制、提速路径及系统化实现进行了归纳与评述。综合现有研究可以得到若干关键认识：其一, Micro-LED 的高速潜力来自像素微缩带来的低结电容与更短有效载流子寿命,但端到端性能上限并非由单一的一3 dB 带宽决定,而是由复合动力学、RC 寄生与封装互连、驱动与接收前端动态范围、链路 SNR 与非线性失真共同耦合所限定；其二,在器件层面,晶向工程、QW/势垒/EBL 与掺杂

及应力能带工程、侧壁损伤抑制与钝化等方法,实质上是在不同工作电流密度区间内重塑辐射/非辐射通道占比与电学寄生,从而推动器件在更低电流密度下获得更高带宽并改善“带宽-效率/光功率”折中；其三,在系统层面,高谱效调制(如 QAM-OFDM/DMT)、自适应比特/功率加载和均衡与预失真等 DSP 技术,以及阵列并行与多维复用策略,使器件带宽能够更有效地转化为系统吞吐,并支撑室内接入、水下链路及短距互连等多场景演示。与此同时,随着研究重心从“单器件纪录”转向“可部署链路及模块”,封装互连寄生、阵列串扰与一致性、热与可靠性以及系统复杂度/功耗边界正在成为制约进一步扩展的主导因素。面向下一阶段发展,需要建立以“器件-光学-电路-DSP”协同为核心的统一设计与评价框架,将等效电路与频域/时域表征、线性度与动态范围指标以及“热-老化”引起的频响漂移纳入同一闭环；同时,以短距互连为代表的应用更强调单位面积吞吐、能效与可扩展并行度,应在阵列架构、封装散热和低功耗前端电路上形成可制造的工程规范。总体而言,面向基于高速 Micro-LED 的 VLC 系统,其关键挑战已由“实现高速”演化为“在可制造与可靠约束下实现可扩展高速”,其突破路径将更多体现为跨层协同与系统工程化能力的提升。

参考文献：

- [1] Elgala H, Mesleh R, Haas H. Indoor Optical Wireless Communication: Potential and State-of-the-Art [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(9): 56-62.
- [2] Karunatilaka D, Zafar F, Kalavally V, et al. LED based Indoor Visible Light Communications: State of the Art [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(3): 1649-1678.
- [3] Pathak P H, Feng X, Hu P, et al. Visible Light Communication, Networking, and Sensing: a Survey, Potential and Challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2047-2077.
- [4] Haas H. LiFi Is a Paradigm-Shifting 5G Technology [J]. Reviews in Physics, 2018, 3: 26-31.
- [5] Parbrook P J, Corbett B, Han J, et al. Micro-Light Emitting Diode: From Chips to Applications [J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(5): 2000133.
- [6] Yin P, Zhi T, Tao T, et al. Study on Modulation Bandwidth of GaN-based Micro-Light-Emitting Diodes by Adjusting Quantum Well Structure [J]. Nanomaterials, 2022, 12(21): 3818.
- [7] Chen S H, Huang Y M, Chang Y H, et al. High-

- Bandwidth Green Semipolar (20 - 21) InGaN/GaN Micro Light-Emitting Diodes for Visible Light Communication[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(8): 2228–2235.
- [8] Liu Z, Cao H, Liu T, et al. Alleviate Sidewall Damage of InGaN Green Micro-LEDs by Atomic Layer Etching [J]. *Optics Letters*, 2025, 50 (11) : 3756–3759.
- [9] Kou J, 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.
- [10] Wang L, Wei Z, Chen C J, et al. 1.3 GHz E - O Bandwidth GaN-based Micro-LED for Multi-Gigabit Visible Light Communication [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 792.
- [11] Rae K, Manousiadis P P, Islim M S, et al. Transfer-Printed Micro-LED and Polymer-based Transceiver for Visible Light Communications [J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31474–31483.
- [12] McKendry J J D, Massoubre D, Zhang S, et al. Visible -Light Communications Using a CMOS -Controlled Micro - Light - Emitting - Diode Array [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(1): 61–67.
- [13] Islim M S, Ferreira R X, He X, et al. Towards 10 Gb/s Orthogonal Frequency Division Multiplexing-based Visible Light Communication Using a GaN Violet Micro - LED[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(2): A35.
- [14] Loureiro P A, Guiomar F P, Monteiro P P. Visible Light Communications: a Survey on Recent High-Capacity Demonstrations and Digital Modulation Techniques[J]. *Photonics*, 2023, 10(9): 993.
- [15] James Singh K, Huang W T, Hsiao F H, et al. Recent Advances in Micro - LEDs Having Yellow - Green to Red Emission Wavelengths for Visible Light Communications[J]. *Micromachines*, 2023, 14(2): 478.
- [16] Matheus L E M, Vieira A B, Vieira L F M, et al. Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(4): 3204–3237.
- [17] Rehman S U, Ullah S, Chong P H J, et al. Visible Light Communication: a System Perspective - Overview and Challenges[J]. *Sensors*, 2019, 19(5): 1153.
- [18] Lu T, Lin X, Guo W, et al. High-Speed Visible Light Communication based on Micro - LED: a Technology with Wide Applications in Next Generation Communication [J]. *Opto - Electronic Science*, 2022, 1 (12) : 220020.
- [19] Xu H, Ai J, Deng T, et al. Recent Progress in GaN - based High - Bandwidth Micro - LEDs and Photodetectors for High - Speed Visible Light Communication [J]. *Photonics*, 2025, 12(7) : 730.
- [20] Sharma H, Jha R K. VLC Enabled Hybrid Wireless Network for B5G/6G Communications [J]. *Wireless Personal Communications*, 2022, 124(2): 1741–1771.
- [21] Hussain B, Li X, Che F, et al. Visible Light Communication System Design and Link Budget Analysis [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33 (24) : 5201–5209.
- [22] Wei Z, Li M, Liu Z, et al. Parallel Mini/Micro-LEDs Transmitter: Size-Dependent Effect and GBPS Multi-User Visible Light Communication [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(8): 2329–2340.
- [23] 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.
- [24] Smith J M, Ley R, Wong M S, et al. Comparison of Size - Dependent Characteristics of Blue and Green InGaN MicroLEDs Down to 1 μm in Diameter [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(7): 071102.
- [25] Wang L, Wang L, Chen C J, et al. Green InGaN Quantum Dots Breaking through Efficiency and Bandwidth Bottlenecks of Micro-LEDs[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(5): 2000406.
- [26] Wei Z, Wang L, Liu Z, et al. Multigigabit Visible Light Communication based on High-Bandwidth InGaN Quantum Dot Green Micro-LED [J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(7): 2354–2366.
- [27] Hopkins M A, Allsopp D, Kappers M J, et al. The ABC Model of Recombination Reinterpreted: Impact on Understanding Carrier Transport and Efficiency Droop in InGaN/GaN Light Emitting Diodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122: 234505.
- [28] Rashidi A, Monavarian M, Aragon A, et al. Nonpolar m - Plane InGaN/GaN Micro - Scale Light - Emitting Diode with 1.5 GHz Modulation Bandwidth [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, 39(4): 520–523.
- [29] Zhu S, Shan X, Qiu P, et al. Low-Power High-Bandwidth Non - Polar InGaN Micro - LEDs at Low Current Densities for Energy - Efficient Visible Light Communication [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14 (5) : 7351805.
- [30] Chang Y H, Huang Y M, Gunawan W H, et al. 4.343 - Gbit/s Green Semipolar (20 - 21) M - LED for High Speed Visible Light Communication [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(4): 7300204.

- [31] Xu F, Qiu P, Tao T, et al. High Bandwidth Semi-Polar InGaN/GaN Micro-LEDs with Low Current Injection for Visible Light Communication[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, 15(1): 7300704.
- [32] Faruki M J, Bera K, Karmakar N. Impact of Crystal Orientation on Modulation Bandwidth: Towards GaN LED-based High-Speed Visible Light Communication[J]. *Photonics*, 2024, 11(6): 542.
- [33] Faruki M J, Karmakar N. Modulation Bandwidth Study on SQW GaN LEDs for High-Speed Visible Light Communication[C]//2023 33rd International Telecommunication Networks and Applications Conference. Melbourne, Australia: IEEE, 2023: 10368504.
- [34] Xu F, Jin Z, Tao T, et al. C-Plane Blue Micro-LED with 1.53 GHz Bandwidth for High-Speed Visible Light Communication[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 43(6): 910–913.
- [35] Yuan Z, Li Y, Lu X, et al. Investigation of Modulation Bandwidth of InGaN Green Micro-LEDs by Varying Quantum Barrier Thickness[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(8): 4298–4305.
- [36] Lei L, Zhu Z, Wang W, et al. Large Modulation Bandwidth GaN-based Micro-LED Arrays on Si Substrates with Graded in Composition Barriers[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2025, 46(1): 28–31.
- [37] Lei L, Zhu Z, Wei J, et al. Improved Modulation Bandwidth of C-Plane Micro-LED Arrays by Varying Si Doping in the Quantum Barrier[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2024, 71(3): 1969–1973.
- [38] 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: 7018.
- [39] Lei L, Yang T, Li D, et al. Design of AlInGaN Electron Blocking Layer of Micro-LED Arrays Grown on Si Substrates for High-Speed Visible Light Communication[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2025, 46(12): 2261–2264.
- [40] Dai Y, Lin Z, Lu T, et al. Enhancing Optoelectronic and Modulation Performance at Low Injected Current by Removing the P-AlGaIn Electron Blocking Layer of Micro-LEDs[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(11): 3521–3524.
- [41] Huang Z, Tao R, Li D, et al. Modulation Bandwidth Improvement of GaN-based Green Micro-LEDs Array by Polarization-Induced P-Type Doping[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(3): 031101.
- [42] Lu T, Lee T Y, Lai S, et al. Improving Optoelectronic Performance and Modulation Bandwidth of Green μ -LEDs via a Compound Pre-Strained Strategy[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(4): 883.
- [43] Hu F, Chen S, Li G, et al. Si-Substrate LEDs with Multiple Superlattice Interlayers for beyond 24 Gbps Visible Light Communication[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(8): 1581.
- [44] Wang L, Dai Y, Wang S, et al. Optoelectronic Performance and Modulation Bandwidth of Green μ -LEDs Using AlON Buffer Layer[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(22): 6983.
- [45] Liu X, Wei Z, Li M, et al. Experimental Investigation of 16.6 Gbps SDM-WDM Visible Light Communication based on a Neural Network Receiver and Tricolor Mini-LEDs[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(12): 2888–2891.
- [46] Wang L, Yu L, Li Z, et al. InGaN Quantum Dots for Micro-LEDs[J]. *APL Photonics*, 2024, 9(10): 100904.
- [47] Li Z, Zhang X, Hao Z, et al. Bandwidth Analysis of High-Speed InGaN Micro-LEDs by an Equivalent Circuit Model[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2023, 44(5): 785–788.
- [48] Li Z, Yu L, Liu B, et al. High-Speed Micro-LEDs based on Nano-Engineered InGaN Active Region towards Chip-to-Chip Interconnections[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(24): 8760–8770.
- [49] Lan H Y, Tseng I C, Kao H Y, et al. 752-MHz Modulation Bandwidth of High-Speed Blue Micro Light-Emitting Diodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2018, 54(5): 3300106.
- [50] Ferreira R X G, Xie E, McKendry J J D, et al. High Bandwidth GaN-based Micro-LEDs for Multi-Gb/s Visible Light Communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(19): 2023–2026.
- [51] Rao Z, Shan X, Wang G, et al. 10.5 Gbps Visible Light Communication Systems based on C-Plane Free-standing GaN Micro-LED[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(13): 4360–4364.
- [52] Shan X, Wang G, Zhu S, et al. Comparison of beyond 1 GHz C-Plane Freestanding and Sapphire-Substrate GaN-based Micro-LEDs for High-Speed Visible Light Communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(5): 1480–1486.
- [53] Zhang Z, Jin Z, Ruan Y, et al. High-Performance Green Micro-LED Array with Isolated n-GaN Layers for 6.58 Gbps High-Speed Visible Light Communication[J]. *Journal of Applied Physics*, 2025, 138(14): 145706.

- [54] Zhu L, Zhang Z, Shen D, et al. Modulation Bandwidth Analysis of GaN-based Micro-LED Deduced by an Equivalent Circuit Model[J]. *Optics Express*, 2024, 32(22): 39974–39983.
- [55] Jin Z, Lin R, Liu X, et al. Green Micro-LED with a Bandwidth Exceeding 2 GHz for 9-Gbps Visible Light Communication based on SNR Gap-Dependent Bit and Power Loading[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(2): 472–480.
- [56] Lin R, Jin Z, Qiu P, et al. High Bandwidth Series-biased Green Micro-LED Array Toward 6 Gbps Visible Light Communication[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(13): 3343–3346.
- [57] Shan X, Xu H, Wang G, et al. Thermal Effect Induced High-Bandwidth for Ring-Shaped Parallel Micro-LED Arrays Toward 10.25 Gbps Visible Light Communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(22): 10250–10255.
- [58] Lai S Q, Lu T W, Lin S H, et al. Improved Modulation Bandwidth of Blue Mini-LEDs by Atomic-Layer Deposition Sidewall Passivation[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(9): 4936–4943.
- [59] Dai Y, Jiang S, Lu T, et al. Impact of Sidewall Treatment on Modulation Bandwidth and Optoelectronic Performance of M-LEDs[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1040: 183345.
- [60] Zhang G, Zhang L, Ren F F, et al. High Brightness and Broad Modulation Bandwidth InGaN-based Red Micro-LEDs Integrated with Plasmonic Gratings[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(21): 5485.
- [61] Rogers D J, Xue H, Kish F A, et al. High Bandwidth GaN-based Micro-LEDs at Temperatures up to 400 °C[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2024, 36(17): 1069–1072.
- [62] Ma Z, Cao H, Lin S, et al. Optical and Frequency Degradation Behavior of GaN-based Micro-LEDs for Visible Light Communication[J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 12795.
- [63] Shi J W, Chi K L, Wun J M, et al. III-Nitride-based Cyan Light-Emitting Diodes with GHz Bandwidth for High-Speed Visible Light Communication[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2016, 37(7): 894–897.
- [64] Lu T, Dai Y, Lee T Y, et al. Experimental Investigation of High-Speed WDM-Visible Light Communication Using Blue, Green, and Red InGaN μ LEDs[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(16): 4697.
- [65] Jin Z, Ying H, Zhang Z, et al. Toward 20-Gbps Single-Chip Space Division Multiplexing Visible Light Communication based on a Low-Crosstalk Micro-LED Array[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(24): 10960–10967.
- [66] Ren T, Liang Z, Wang D, et al. Size-Dependent Performance of White Light μ LEDs for Intelligent Vehicle Lighting and Communication[J]. *Optics Express*, 2025, 33(13): 28255.
- [67] Sadhu A S, Chen L Y, Pai Y H, et al. High-Speed Visible Light Communication Using Phenothiazine/Dimesitylborane Derivatives as Color Conversion Materials in Semipolar Micro-LED-based White-Light Systems[J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(2): 489–497.
- [68] Chow C W, Yeh C H, Liu Y F, et al. Adaptive Scheme for Maintaining the Performance of the In-Home White-LED Visible Light Wireless Communications Using OFDM[J]. *Optics Communications*, 2013, 292: 49–52.
- [69] Yeh C H, Chen H Y, Chow C W, et al. Utilization of Multi-Band OFDM Modulation to Increase Traffic Rate of Phosphor-LED Wireless VLC[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1133–1138.
- [70] Wei Z, Liu Z, Liu X, et al. 8.75 Gbps Visible Light Communication Link Using an Artificial Neural Network Equalizer and a Single-Pixel Blue Micro-LED[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(18): 4670–4673.
- [71] Zhu S, Qiu P, Shan X, et al. High-Speed Long-Distance Visible Light Communication based on Multicolor Series Connection Micro-LEDs and Wavelength Division Multiplexing[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(8): 1892.
- [72] MacLure D M, McKendry J J D, Islim M S, et al. 10 Gbps Wavelength Division Multiplexing Using UV-A, UV-B, and UV-C Micro-LEDs[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(2): 516.
- [73] Lin G R, Kuo H C, Cheng C H, et al. Ultrafast 2×2 Green Micro-LED Array for Optical Wireless Communication beyond 5 Gbit/s[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(10): 2077.
- [74] Carreira J F C, Xie E, Bian R, et al. Gigabit Per Second Visible Light Communication based on AlGaInP Red Micro-LED Micro-Transfer Printed onto Diamond and Glass[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 12149–12156.
- [75] Lan H Y, Tseng I C, Lin Y H, et al. High-Speed Integrated Micro-LED Array for Visible Light Communication[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2203.
- [76] Wei Z, Zhang L, Wang L, et al. 2 Gbps/3 m Air-Underwater Optical Wireless Communication based on a

- Single-Layer Quantum Dot Blue Micro-LED[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(9): 2616–2619.
- [77] Xie E, Bian R, He X, et al. Over 10 Gbps VLC for Long-Distance Applications Using a GaN-based Series-Biased Micro-LED Array[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(9): 499–502.
- [78] Wu T, Lin Y, Huang Y M, et al. Highly Stable Full-Color Display Device with VLC Application Potential Using Semipolar μ LEDs and All-Inorganic Encapsulated Perovskite Nanocrystal [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(11): 2132.
- [79] Huang Y M, Peng C Y, Miao W C, et al. High-Efficiency InGaN Red Micro-LEDs for Visible Light Communication[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(8): 1978.
- [80] Huang W T, Peng C Y, Chiang H, et al. Toward High-Bandwidth Yellow-Green Micro-LEDs Utilizing Nanoporous Distributed Bragg Reflectors for Visible Light Communication [J]. *Photonics Research*, 2022, 10(8): 1810.
- [81] Qiu P, Zhu S, Jin Z, et al. Beyond 25 Gbps Optical Wireless Communication Using Wavelength Division Multiplexed LEDs and Micro-LEDs [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 317–320.
- [82] Yao S, Chai H, Lei L, et al. Parallel Micro-LED Arrays with a High Modulation Bandwidth for a Visible Light Communication[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(14): 3584–3587.
- [83] Huang Z, Tao R, Li D, et al. Excavating the Communication Performance in GaN-based Green Micro-LEDs: Modular-Architected P-Type Region [J]. *Advanced Photonics Research*, 2023, 4(4): 2200076.
- [84] Zhu S, Shan X, Lin R, et al. Characteristics of GaN-on-Si Green Micro-LED for Wide Color Gamut Display and High-Speed Visible Light Communication[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(1): 92–100.
- [85] Lu T, Lai S, Dai Y, et al. Improving Modulation Bandwidth and Detection Performance of Green Micro-LEDs with Pre-Strained Structure at Positive Bias[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2024, 45(3): 332–335.
- [86] Xu F, Zhao R, Tao T, et al. Micro-LED for Short Distance Optical Links with Low Power Consumption[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(10): 3453.
- [87] Pezeshki B, Tselikov A, Kalman R, et al. Micro-LED Data Interconnect for Scale-up Networks with Record Energy Efficiency [C]//2025 IEEE Symposium on High-Performance Interconnects (HOTI). CA, USA: IEEE, 2025: 11244769.
- [88] Yuan Z, Ma C, Wang Y, et al. High-Efficiency Small-Pixel-Size InGaN Green Micro-LED Arrays Using Ion Implantation Pixelization [J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 126(10): 101101.
- [89] Wu Y C, Hsiao F H, He P W, et al. OFDM Four-Color Micro-LED Point-to-Point Data Link beyond 17 Gbit/s [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(24): 10871–10881.
- [90] Haas H, Yin L, Chen C, et al. Introduction to Indoor Networking Concepts and Challenges in LiFi[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(2): A190–A203.
- [91] Farfán-Guillén D E, Monteiro P P, Rodríguez J C C, et al. Balancing Illumination and Communication in Indoor VLC: Impact of Multiple LED Configurations on System Performance [J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 70195–70210.
- [92] Lv Z, Liu X, Wu S, et al. Massive GaN Micro-LED Array based Underwater Wireless Optical Communication[J]. *Optics Express*, 2025, 33(9): 19527–19534.
- [93] Szilagyi L, Khafaji M, Pliva J, et al. 40-Gbit/s 850-nm VCSEL-based Full-CMOS Optical Link with Power-Data Rate Adaptivity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(7): 611–613.
- [94] Margalit N, Xiang C, Bowers S M, et al. Perspective on the Future of Silicon Photonics and Electronics[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(22): 220501.
- [95] Le Maitre P, Cibié A, Rol F, et al. Short Range Optical Communication with GaN-on-Si microLED and microPD Matrices[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2024, 32(12): 797–814.
- [96] Prades J D, Meierhofer F, Diéguez A, et al. MicroLED Arrays - A Perspective beyond Displays [J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 125(15): 150504.
- [97] Wan R, Wang L, Huang J, et al. Improving the Modulation Bandwidth of GaN-based Light-Emitting Diodes for High-Speed Visible Light Communication: Countermeasures and Challenges [J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, 2(12): 2100093.
- [98] Chang Y H, Hsu T C, Liou F J, et al. High-Bandwidth InGaN/GaN Semipolar Micro-LED Acting as a Fast Photodetector for Visible Light Communications[J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 37245–37252.
- [99] Mathias L C, de Melo L F, Abrao T. Modeling and Mitigation of Spectral Crosstalk in OFDM WDM-VLC System [J]. *Optics Communications*, 2021, 478: 126361.