

引用本文:潘云龙,周盈君,迟楠. 基于VLC的光互连关键技术研究[J]. 光通信技术, 2026, 50(1): 10-14.

基于VLC的光互连关键技术研究

潘云龙^{1,2,3}, 周盈君^{1,2,3}, 迟楠^{1,2,3*}

(1. 复旦大学 未来信息创新学院, 上海 200433;

2. 上海低轨卫星通信与应用工程技术研究中心, 上海 200433; 3. 上海市低轨卫星通信技术协同创新中心, 上海 200433)

摘要:为了应对数据中心与芯片间高速、低功耗互连的迫切需求,系统介绍了基于可见光通信(VLC)的光互连关键技术,重点分析了3类典型系统:基于激光器(LD)的50通道波分复用(WDM)系统,基于4通道Micro-发光二极管(LED)的芯片互连系统,以及基于304通道高密度Micro-LED阵列的互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容系统。分析结果表明:LD-WDM系统通过多波长复用传输,实现了519.21 Gb/s的总速率,适用于中长距离数据中心互连;Micro-LED系统在低功耗(<1 pJ/bit)下展现出优异性能,其中4通道系统支持15.05 Gb/s,304通道系统总带宽超过1 Tb/s,适用于短距离、高密度芯片间通信。最后,展望了VLC光互连技术在多场景融合、新器件与新架构等方面的发展方向。

关键词:可见光通信;光互连;数据中心网络;芯片间互连

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2026)01-0010-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.002

Research into key technologies for optical interconnection using VLC

PAN Yunlong^{1,2,3}, ZHOU Yingjun^{1,2,3}, CHI Nan^{1,2,3*}

(1. Future Information Innovation College, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Low-Farth-Orbit Satellite Communication and Applications, Shanghai 200433, China;

3. Shanghai Collaborative Innovation Center of Low-Earth-Orbit Satellite Communication Technology, Shanghai 200433, China)

Abstract: In response to the urgent demand for high-speed, low-power interconnections between data centers and chips, this paper systematically introduces the key technologies of optical interconnects based on visible light communication(VLC), with a focused analysis on three typical systems: a 50-channel wavelength division multiplexing(WDM) system based on laser diodes(LDs), a 4-channel micro-light-emitting diode(LED) based chip interconnect system, and a complementary metal-oxide-semiconductor compatible system(CMOS) utilizing a 304-channel high-density micro-LED array. The analysis results indicate that the LD-WDM system achieves a total data rate of 519.21 Gb/s through multi-wavelength multiplexed transmission, making it suitable for medium- to long-distance data center interconnections, the micro-LED systems demonstrate excellent performance under low power consumption(<1 pJ/bit), with the 4-channel system supporting 15.05 Gb/s and the 304-channel system achieving an overall bandwidth exceeding 1 Tb/s, making them suitable for short-distance, high-density inter-chip communications. Finally, future development directions for VLC-based optical interconnect technology in terms of multi-scenario integration, novel devices, and new architectures are outlined.

Key words: visible light communication, optical interconnect, data center network, inter chip interconnect

收稿日期: 2025-05-15。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62031011)资助。

作者简介: 潘云龙(2001—),男,硕士研究生,现就读于复旦大学未来信息创新学院通信工程专业,主要研究方向为高速VLC、大容量可见光互连、可见光频梳。

*通信作者: 迟楠(1974—),女,教授,博士生导师,院长,国家杰出青年科学基金获得者,美国光学学会会士,中国电子学会女科学家俱乐部轮值主席。已发表SCI检索论文300余篇,出版VLC相关专著10部。



0 引言

随着光通信技术的持续演进,基于可见光通信(VLC)的光互连技术已成为新兴研究热点。VLC工作在400~800 THz波段,具备带宽大、数据传输速率高等优势,同时兼具低功耗、高安全性以及对大气环境影响较小等特点^[1-3]。VLC光互连器件通过小型化设计与材料优化,进一步降低了功耗。基于GaN或InGaN材料的激光器(LD)与发光二极管(LED)因具备较窄

的带隙和良好的热管理特性,逐步替代传统红外器件,促进了VLC设备向小型化、低功耗方向发展。此外,GaN材料因其较低的俄歇(Auger)复合速率,能有效减少非辐射复合引起的热能积累,从而提升器件在密度集成环境中的散热性能与可靠性^[4-7]。随着LED、LD等光源技术日益成熟,VLC设备的成本显著下降,使其在室内无线通信、数据中心互连、智能照明及物联网等领域的应用不断扩大。

本文聚焦于基于VLC的光互连关键技术,系统阐述其近期发展现状,剖析核心技术的进展,并展望未来面临的挑战。

1 基于LD的50通道数据中心光互连

随着互联网服务和大数据应用的快速增长,数据中心互连需求呈现爆炸式增长。为满足这一需求,光互连技术需支持更高传输速率。波分复用(WDM)作为VLC系统中的关键复用技术之一,可通过将不同波长的光信号复用至同一传输介质,有效提升通信带宽与系统效率。文献[8]介绍了一种集成50通道的WDM-VLC系统,该系统采用了先进调制、复用与均衡技术。系统结构示意图如图1所示,其原理如下:

在发射端,系统先发送正交相移键控-离散多音(QPSK-DMT)测试序列至接收端,以估计各子载波的信噪比;随后,将信息反馈至输入端,利用自适应比特加载与负载控制分配算法,将实际数据映射为各子载波所能支持的最高阶正交幅度调制(QAM)信号。接着,对数据进行DMT调制,并采用数字预均衡以提升通信性能。生成的信号经任意波形发生器(AWG)数/模转换后送入机箱单元。发射端共集成50个发射器

单元,分布于5个4U机箱内,每箱容纳10个单元。为保证高密度发射单元下的系统稳定性,各机箱均配备热电冷却装置与温控系统。信号由AWG输入各发射单元后,先经电放大器提升输出功率,再通过驱动板上的偏置器与直流电源耦合以驱动激光器。所有电气元件集成于同一印刷电路板上,结构紧凑,可靠性高。发射光经微透镜精确耦合至多模光纤(MMF),以降低耦合损耗。随后,50路信号通过“MMF-自由空间-MMF”链路进行传输,其中发射端光纤芯径为50 μm ,接收端为105 μm ,光纤长度均为1 m,自由空间传输距离为17 cm。

在接收端,系统采用50通道光电探测器阵列完成光/电转换。各探测器与1 m长的MMF相连,接收信号经电放大器放大后,由示波器采集并进行离线数字信号处理。处理过程中,接收信号先经过重采样与同步,再进行DMT解调,通过逆傅里叶变换将时域信号转换为频域数据,以恢复各子载波信息。为抑制符号间干扰与信道失真,采用迫零均衡与相位恢复技术,通过信道响应逆变换对信号进行校正。最后,经由QAM解映射将信号恢复为原始比特流。

该系统共复用31种不同波长,子载波数量设为512,基于比特与功率加载原理,根据预估信噪比确定各子载波可支持的最高调制阶数。分配的比特数范围为1~8,对应调制格式从二进制相移键控(BPSK)至256QAM。各通道中最低数据传输速率为6.45 Gb/s,最高达12.15 Gb/s,速率差异主要源于激光器与光电探测器在不同波长上的响应特性。最终,该系统在1 m MMF+17 cm自由空间+1 m MMF链路上实现了519.21 Gb/s的总传输速率,各信道误码率均低于7%硬判决前向

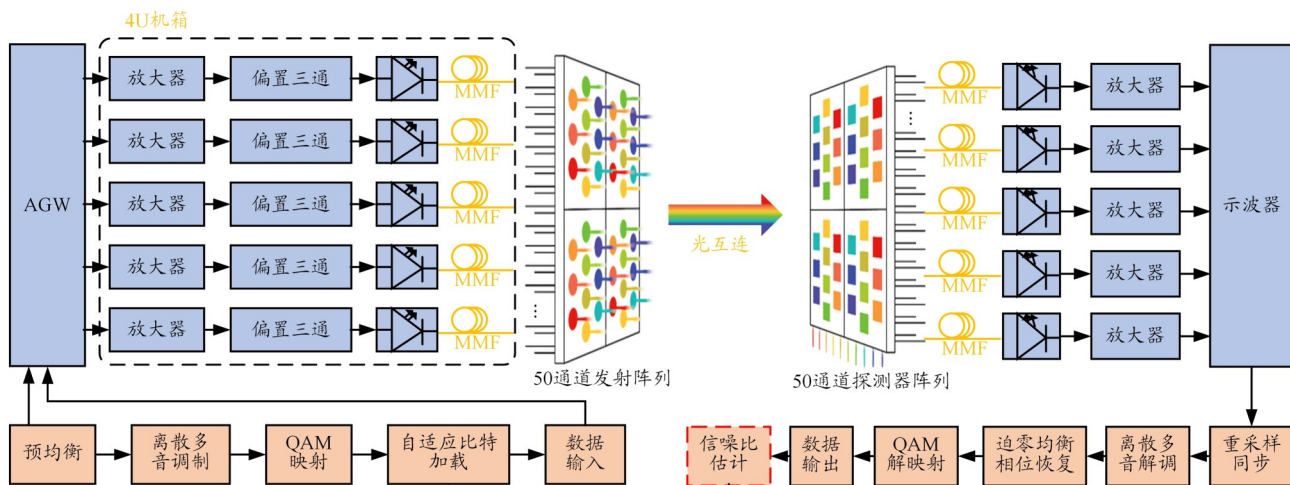


图1 50信道WDM-VLC系统示意图

潘云龙,周盈君,迟楠. 基于VLC的光互连关键技术研究

纠错(HD-FEC)阈值(3.8×10^{-3})。

该成果充分体现了VLC系统在光互连领域的应用潜力。通过高效利用可见光谱资源,不仅能缓解传统光互连中频谱资源紧张的问题,还可显著提升系统容量。

2 基于Micro-LED的芯片间光互连

2.1 4通道Micro-LED互连

传统电互连技术因功耗高、热效应显著、传输距离受限及扇出密度低等问题,难以满足高性能计算、人工智能中处理器与存储器间的高速通信需求。尽管LD在光互连中表现优异,但其能耗高、散热要求苛刻且体积较大,限制了其在短距离高速互连中的应用。相比之下, Micro-LED作为新兴光源,具备低成本^[9]、低功耗^[10]、响应速度快、扇出密度高^[11]及环境适应性强等优势,为芯片间光互连提供了一种有效解决方案。因此,采用Micro-LED作为数据互连的发射器,有助于显著提升计算性能^[12]。

文献[13]介绍了一种基于纳米结构InGaN有源区的Micro-LED芯片间光互连系统^[13]。该系统通过材料与结构优化发射端器件,并运用先进调制、均衡及4通道并行传输技术,支持短距离高速数据通信,显著提升了系统性能。系统结构示意图如图2所示,其原理如下:

发射端的信号处理流程与前述系统基本相似,其中信道估计是关键步骤。首先,借助QPSK-DMT信号对信道进行估计,计算各子载波在7% HD-FEC误码

率阈值下可支持的最高调制阶数。随后,采用负载控制算法进行比特与功率加载,并通过实际数据传输测试获取通信误码率。调制信号经AWG生成后,由功率放大器放大,再与偏置电源混合以驱动Micro-LED芯片发光。该Micro-LED芯片采用3层纳米结构设计,基于InGaN有源区实现高效光发射,输出光功率达 $508.81 \mu\text{W}$,带宽为2.644 GHz。光信号经微透镜阵列高效耦合至成像光纤,完成短距离多模传输。成像光纤作为主要传输介质,具备高传输效率与低串扰特性,有效保障了信号保真度。

接收端的数据恢复过程与50信息WDM-VLC系统一致。光信号由光电探测器阵列转换为电信号,经跨阻放大器放大后进入DMT解调流程,最终通过QAM解映射将频域信号恢复为原始比特流。

Micro-LED光互连系统在单通道自由空间传输中实现了2.125 Gb/s的通信速率,眼图质量因子达14.1,传输无误码;在光纤传输条件下,通信速率提升至2.60 Gb/s,误码率降低至 2.83×10^{-13} 。4通道并行传输测试中,采用非归零-开关键控(NRZ-OOK)调制时总速率达12.00 Gb/s,而采用DMT调制时进一步提升至15.05 Gb/s。由于成像光纤具备优良传输特性,多通道间的光学串扰可忽略不计,系统可靠性与整体性能得以提高。然而,随着芯片间通信需求持续增长,接收端光电二极管与跨阻放大器的带宽仍制约系统传输速率,突破更高容量、更低功耗的瓶颈成为后续研究的关键。

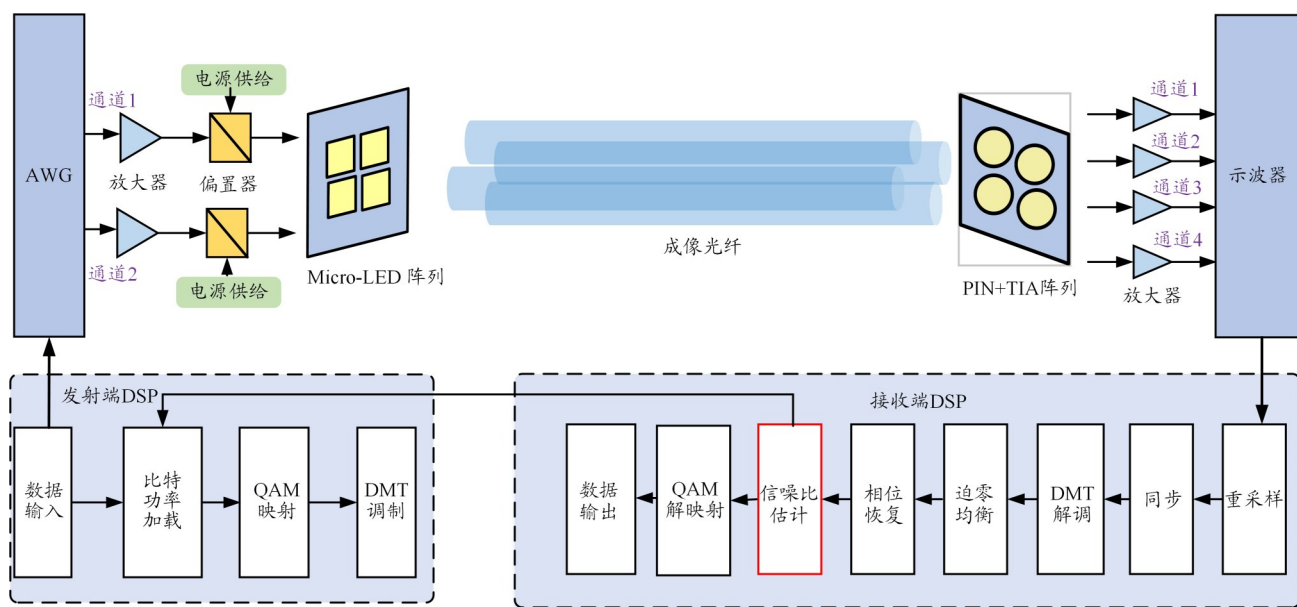


图2 基于4通道Micro-LED阵列的光互连系统结构示意图

2.2 304通道Micro-LED互连

为应对上述挑战,文献[14]提出一种基于互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容工艺的高密度光互连系统^[14],通过集成304通道Micro-LED阵列,实现了总带宽超过1 Tb/s的双向数据链路。该系统在发射端器件材料与结构方面进行了关键技术优化,为大规模芯片间通信提供了新方案。系统延续了Micro-LED的高效特性,大幅增加并行传输通道数量,并通过光电组件的高度集成设计,进一步提升能效与性能。整体架构包括发射端、成像光纤与接收端三部分,对光信号的产生、传输与接收过程进行了系统优化,实现了低功耗、高带宽的芯片互连。系统结构示意图如图3所示,其原理如下:

发射端集成304个有源单元,每个单元包含Micro-LED驱动器、单抽头预加重电路及偏置电流源。驱动器采用阴极驱动方式调控Micro-LED发光特性,预加重电路优化信号调制性能,偏置电流源确保信号零电平与消光比稳定。Micro-LED芯片直接集成于驱动器上方,通过多量子阱结构实现高效发光,中心波长约为425 nm,产生的光信号经微透镜阵列耦合至成像光纤。成像光纤由331根直径为50 μm 的硼硅酸盐光纤以六边形套圈形式组装而成,保持光信号的空间有序传输。光纤排列精度优于2 μm ,串扰抑制达-20 dB,有效降低了信道间干扰。光纤两端阵列与收发光模块精确对准,传输效率显著提升。

接收端集成304个接收单元,每个单元包含跨阻放大器、锁相放大器与重定时电路,所有组件通过硅中介层集成于专用集成电路中。跨阻放大器采用差分分流反馈结构,具备良好的电源与地噪声抑制能力。光电探测器芯片直接置于接收阵列上方,配有聚合物微透镜以提升光耦合效率。接收光信号经光电探测器(PD)转换为电信号,由锁相放大器放大并经直流偏移消除电路处理后,通过重定时电路完成信号恢

复。单通道支持最高4 Gb/s的数据传输速率,系统总带宽超过1 Tb/s。

该系统在3.3 Gb/s速率下实现每比特能耗低于1 pJ。当接收光功率为-14 dBm时,各通道误码率低于 10^{-13} ,展现出高密度并行传输下的可靠性。成像光纤的有序排列有效维持了信号完整性,串扰水平较低。通过进一步优化器件与封装设计,该系统有望实现超过10 Tb/(s $\cdot\text{mm}^2$)的带宽密度,为未来数据中心与人工智能应用中的光互连技术奠定基础。

综上所述,基于Micro-LED的光互连系统在短距离芯片间通信中显示出显著潜力。4通道系统通过优化DMT调制、纳米结构InGaN Micro-LED芯片及短距离成像光纤链路,实现了单通道与多通道高速传输,并验证了低功耗与高可靠性。304通道系统进一步扩展并行通道规模,借助304通道高密度Micro-LED阵列与互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容架构,在每比特功耗低于1 pJ的同时,实现了总带宽超过1 Tb/s的高容量通信。

3 对比与讨论

不同光互连系统对比情况如表1所示。可以看出,这3套光互连系统均通过创新设计提升了整体性能,但在架构、技术路径与应用场景方面存在明显差异。基于LD的50通道数据中心互连系统,融合光纤与自由空间传输,在多通道架构下实现了519.21 Gb/s的总速率,适用于中长距离的数据中心及云计算互连。4通道Micro-LED互连系统采用纳米结构优化的Micro-LED芯片,结合DMT调制与成像光纤链路,在低功耗与高可靠性方面表现突出,具备良好的并行传输潜力,主要面向短距离芯片级互连。304通道Micro-LED互连系统进一步扩展了并行规模,通过集成304通道高密度Micro-LED阵列,实现了超过1 Tb/s的总带宽,更适用于人工智能、大规模计算等高带宽需求场景。

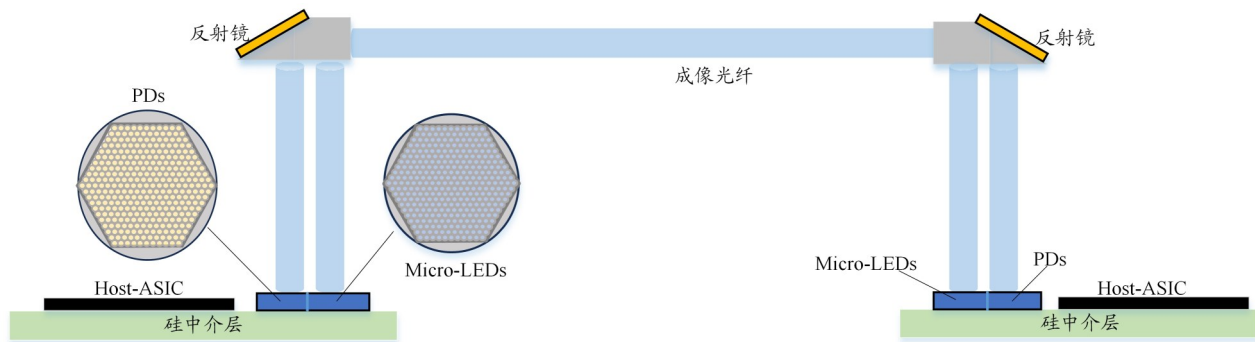


图3 基于304通道Micro-LED阵列的光互连系统结构示意图

潘云龙,周盈君,迟楠. 基于VLC的光互连关键技术研究

表 1 不同光互连系统的对比分析

系统	成本	设计复杂度	功耗	通信速率	通道数/个	传输介质	串扰抑制	适用距离	应用场景
LD光互连	较高	高度复杂	中等	单通道:最高 12.15 Gb/s 总速率:519.21 Gb/s	50	光纤与自由空间融合	较好	中长距离(数十米至数十米)	数据中心、云计算互连
4通道 Micro-LED互连	较低	简单	极低(<1 pJ/bit)	单通道:2.125~2.60 Gb/s 总速率:12.00~15.05 Gb/s	4	成像光纤	极好(几乎无串扰)	短距离(<1 m)	芯片级互连、低功耗计算
304通道 Micro-LED互连	中等	较复杂	低(1 pJ/bit)	单通道:2.125~2.60 Gb/s 总速率:12.00~15.05 Gb/s	304	成像光纤	极好(串扰抑制 -20 dB)	短距离(<1 m)	人工智能、大规模计算

4 结束语

本文对3套基于VLC的光互连系统进行了系统性与深入探讨。分析结果表明,不同技术路线在架构设计、性能指标与应用场景上各具特点。这些成果不仅验证了VLC光互连技术的高效性与实用性,也表明通过优化调制策略、提升通道集成度以及创新传输介质,能够显著增强系统性能,适应多样化的通信需求。然而,所述系统仍存在一定的局限性:基于LD的50通道数据中心互连系统在长距离传输中的稳定性有待进一步提升;4通道 Micro-LED互连系统受通道数量限制,难以应对超高带宽场景;304通道 Micro-LED互连系统在高集成度下的散热管理与能耗优化仍需深入探索。这些挑战为后续研究指明了方向,包括开发更高效率的调制方法、设计更低功耗的光电器件,以及优化混合信道中的信号完整性等。

展望未来,相关研究应致力于推动光互连技术在数据中心与超大规模计算系统中的规模化应用,并针对短距与长距通信的不同需求,发展更高效、低成本、适应性强的光互连解决方案。这不仅为高性能计算与人工智能等领域提供更强大的通信支撑,也有望促进新一代通信技术的跨领域融合与创新突破。

参考文献:

[1] Chi N, Zhou Y, Wei Y, et al. Visible light communication in 6G: advances, challenges, and prospects[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(4): 93–102.

[2] Chi N, Haas H, Kavehrad M, et al. Visible light communications: demand factors, benefits and opportunities [Guest Editorial][J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 5–7.

[3] Niu W. Key technologies for high-speed Si-substrate LED based visible light communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(11): 3316–3331.

[4] Coldren L A, Corzine S W, Mashanovitch M L. Diode lasers and photonic integrated circuits[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

[5] Haug A. Relations between the T_0 values of bulk and quantum-well GaAs[J]. Applied Physics B, 1987, 44: 151–153.

[6] Sweeney S J, Lock D A, Adams A R. Carrier recombination in InGaAs (P) quantum well laser structures: band gap and temperature dependence [J]. American Institute of Physics, 2005, 772(1): 1545–1546.

[7] Witzigmann B, Hybertsen M S. A theoretical investigation of the characteristic temperature T_0 for semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2003, 9(3): 807–815.

[8] Lin X, Zhang H, Lu Z, et al. 519.21 Gbps optical interconnect using 50-channel pre-equalized WDM visible light laser communication system [C]// Optica Publishing Group. Proceeding of Optical Fiber Communication Conference. San Diego: Optica Publishing Group, 2024: Tu2K. 1–1–Tu2K. 1–3.

[9] Li X, Xing Z, Alam M S, et al. Demonstration of C-band amplifier-free 100 Gb/s/λ direct-detection links beyond 40-km SMF using a high-power SSB transmitter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(22): 6170–6177.

[10] Pezeshki B, Tselikov A, Kalman R, et al. Parallel micro LED based optical links with record data rates and low power consumption[C]//OSA. Proceedings of 2023 Conference on Lasers and Electro-Optics: Applications and Technology. San Jose: OSA, 2023: 24481720-1–24481720-4.

[11] Pezeshki B, Tselikov A, Kalman R, et al. Wide and parallel LED-based optical links using multi-core fiber for chip-to-chip communications [C]//IEEE. Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. Washington: IEEE, 2021: 1–3.

[12] Pezeshki B, Kalman R, Tselikov A, et al. High speed light microLEDs for visible wavelength communication[C]//SPIE. Proceedings of 25th Conference on Light-Emitting Devices, Materials, and Applications. Online. SPIE, 2021: 117060N.1–117060N.7.

[13] 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.

[14] Pezeshki B, Rangarajan S, Tselikov A, et al. 304 channel Micro LED based CMOS transceiver IC with aggregate 1 Tbps and sub-pJ per bit capability[C]//IEEE. Proceedings of 2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition(OFC). San Diego: IEEE, 2024: 1–3.