

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.260144.

专题: 2025 全国硕博士光通信菁英论坛

唐钰茹,付红岩,李超,等. 基于反谐振空芯光纤的短距光互连研究进展[J]. 光通信研究, 2026(5):33-39.

Tang Y R, Fu H Y, Li C, et al. Recent Advances in Short-Reach Optical Interconnects based on Anti-Resonant Hollow-Core Fibers[J]. Study on Optical Communications, 2026(5):33-39.

基于反谐振空芯光纤的短距光互连研究进展(特邀)

唐钰茹^{1,2}, 付红岩^{1,2}, 李 超¹, 孙 鹏¹, 刘子晨¹, 贺志学¹

(1. 鹏城实验室, 广东 深圳 518055; 2. 清华大学 深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要:在短距光互连速率向 200 Gbit/s/λ 及以上演进背景下,传统石英单模光纤互连系统在容量提升方面面临日益突出的物理约束。文章聚焦反谐振空芯光纤(AR-HCF)在高容量、低复杂度强度调制直接检测(IM/DD)短距光互连系统中的应用价值,按照单波高速支撑、跨波段传输验证、波分复用(WDM)容量扩展和密集 WDM(DWDM)高密度容量验证的逻辑,总结了近年来基于 AR-HCF 的短距光互连代表性实验进展;并分析了其在信道、器件封装、调制格式和低复杂度数字信号处理方面的技术贡献。综述表明,AR-HCF 通过降低色散与非线性,拓展了 IM/DD 系统在 C+L 波段实现高密度 DWDM 传输的物理边界,为太比特级短距光互连提供了低复杂度拓展路径。

关键词:反谐振空芯光纤;短距光互连;强度调制直接检测;密集波分复用;高容量传输

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Recent Advances in Short-Reach Optical Interconnects based on Anti-Resonant Hollow-Core Fibers

TANG Yuru^{1,2}, FU Hongyan^{1,2}, LI Chao¹, SUN Peng¹, LIU Zichen¹, HE Zhixue¹

(1. Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: As short-reach optical interconnects evolve toward data rates of 200 Gbit/s/λ and beyond, the capacity scaling of conventional silica single-mode-fiber interconnect systems is facing increasingly physical constraints. This paper focuses on the application value of Anti-Resonant Hollow-Core Fiber (AR-HCF) in high-capacity and low-complexity Intensity Modulation/Direct Detection (IM/DD) short-reach optical interconnect systems. Following the logic of single-wavelength high-speed support, cross-band transmission validation, Wavelength Division Multiplexing (WDM) capacity expansion, and Dense WDM (DWDM) high-density capacity validation, this paper summarizes representative experimental progress in AR-HCF-based short-reach optical interconnects in recent years. It also analyzes its technical contributions in terms of the transmission channel, device packaging, modulation formats, and low-complexity digital signal processing. This review shows that AR-HCF extends the physical boundary for high-density DWDM transmission over the C+L bands in IM/DD systems by reducing dispersion and nonlinear impairments, thereby providing a low-complexity scaling path for terabit-class short-reach optical interconnects.

Key words: AR-HCF; short-reach optical interconnects; IM/DD; DWDM; high-capacity transmission

0 引 言

随着云数据中心和高性能计算系统等人工智能计算技术的发展,短距光互连在高带宽和低时延数据传输中承担着重要作用^[1]。在光纤通信网络中,短距光互连不仅服务于数据中心内部、园区互连、光接入和前传等多类场景,也可视为连接长距离骨干传输能力与终端应用需求的“最后一公里”数据动脉,其高速演进对于释放和有效利用骨干网容量具有重要意义。与长距离传输系统相比,短距光互连链路数量更多、端口密度更高且部署规模更大,链路

距离通常覆盖数十米至数千米量级,因此系统设计需在容量扩展、成本、功耗、集成密度和实现复杂度之间取得平衡^[2]。由于短距光互连具有链路数量多、端口密度高和规模化部署等特点,对成本和功耗较为敏感,因此结构简洁和产业成熟的强度调制/直接检测(Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD)方案被广泛采用^[3]。近年来,单波长速率持续向 200 Gbit/s 及以上演进,同时波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)对系统总容量的贡献愈发突出^[4]。

然而,传统石英单模光纤(Single-Mode Fiber,

收稿日期:2026-05-21; 修回日期:2026-07-21; 纸质出版日期:2026-10-10

基金项目:鹏城实验室重大攻关资助项目(PCL2025A01)

作者简介:唐钰茹(1997-),女,重庆人。博士,主要研究方向为光通信系统。

通信作者:李超,副研究员。E-mail: lich03@pcl.ac.cn

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

SMF)的 IM/DD 系统在不同波段的性能扩展逐渐受到物理层约束。在 C/L 波段,色散对高符号率信号影响显著,易导致未补偿链路中的脉冲幅度调制(Pulse Amplitude Modulation, PAM)等格式在中短距离传输中出现频率选择性衰落和眼图闭合;在 O 波段,尽管色散接近零有利于高速传输,但多波道并行传输时更易满足四波混频(Four-Wave Mixing, FWM)的相位匹配条件,非线性串扰随着信道数的增加而累积^[5-6]。由此可见,在追求更高速率与更高 WDM 密度的同时,光纤所带来的色散与非线性效应已成为短距 IM/DD 系统进一步扩展的关键瓶颈之一。

反谐振空芯光纤(Anti-Resonant Hollow-Core Fiber, AR-HCF)通过在包层构建反谐振微结构实现空芯导光,使光场主要在空气中传播,从介质层面显著削弱了光与玻璃材料的相互作用^[7-12]。相较于 SMF, AR-HCF 往往具有更低的色度色散与更弱的非线性响应,同时传播速度更接近光速,从而为在 O/C/L 波段构建密集 WDM (Dense WDM, DWDM)的 IM/DD 架构提供了更有利的物理条件,并为系统总容量向多太比特每秒级扩展提供了新的路径^[13-25]。然而,相关研究仍处于快速发展阶段,其技术优势、适用场景及工程挑战有待系统梳理。基于此,本文面向短距光互连场景,按照“单波高速支撑-跨波段传输验证-WDM 容量扩展-DWDM 高密度容量验证”的逻辑梳理了近年来基于 AR-HCF 的代表性 IM/DD 实验进展;同时,从“信道物理裕量-端到端链路实现-低复杂度容量释放”的系统链条出发,提炼了 AR-HCF 信道、器件与封装以及调制格式与数字信号处理(Digital Sig-

nal Processing, DSP)3 类关键技术在容量扩展中的作用,并进一步讨论了其技术发展与应用前景。

1 基于 AR-HCF 的短距光互连进展与关键技术分析

在 AR-HCF 信道下,短距 IM/DD 光互连的容量扩展需要围绕单波速率提升与多波道并行传输两条路径开展联合优化。单波速率提升主要受端到端电光带宽、信噪比裕量、调制器线性度和 DSP 复杂度限制;多波道扩容则进一步受到波道间隔、复用/解复用滤波、通道串扰和波长稳定性等因素影响。为体现 AR-HCF 短距 IM/DD 容量扩展由单通道能力验证走向多波长并行和高密度波道验证的过程,本文按照“单波高速支撑-跨波段传输验证-WDM 容量扩展-DWDM 高密度容量验证”的逻辑梳理了代表性实验进展。

近年来,随着 AR-HCF 结构的持续优化,其在 O、S、C 和 L 等多个通信波段内展现出较宽的低损耗传输窗口,为多个波长信道在该窗口内并行传输和密集排布提供了系统可行性。已有研究从光纤结构、制备工艺、传输特性及系统应用等方面对 AR-HCF 技术及其传输系统进展进行了系统总结^[10-12]。图 1 所示为相关研究中采用的几类代表性 AR-HCF 横截面结构示意图,用于说明不同 AR-HCF 结构在反谐振管排布和嵌套单元结构上的差异。考虑到即使反谐振管数量相同,横截面几何结构仍可能不同,本文将 AR-HCF-5 按结构差异分为 AR-HCF-5 (I) 与 AR-HCF-5 (II), AR-HCF-6 记为 AR-HCF-6 (I),其典型横截面如图所示。

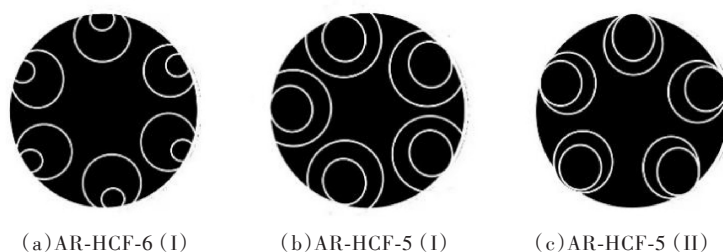


图 1 本文实验进展部分所涉及的 AR-HCF 横截面结构示意图

Figure 1 Schematic cross-sectional structures of AR-HCF used in the experiments reviewed in this paper

从单波高速支撑看,AR-HCF 首先需要证明其在 200 Gbit/s 级 IM/DD 传输中的链路可用性和低时延优势。Chen 等人在 20 km AR-HCF 上验证了 C 波段超过 200 Gbit/s PAM4 低时延传输,并采用汤姆林森-哈拉希玛预编码(Tomlinson-Harashima Precoding, THP)与改进型前馈均衡(Modified Feed-

Forward Equalization, MFEE)进行补偿,该工作说明 AR-HCF 可在较长短距链路中支撑 200 Gbit/s 及以上级高速 IM/DD 通道,并通过发端预编码和接收端均衡缓解链路频响限制^[13];Cirjulina 等人基于行波马赫-曾德尔调制器(Traveling-Wave Mach-Zehnder Modulator, TW-MZM)在 3.1 km AR-

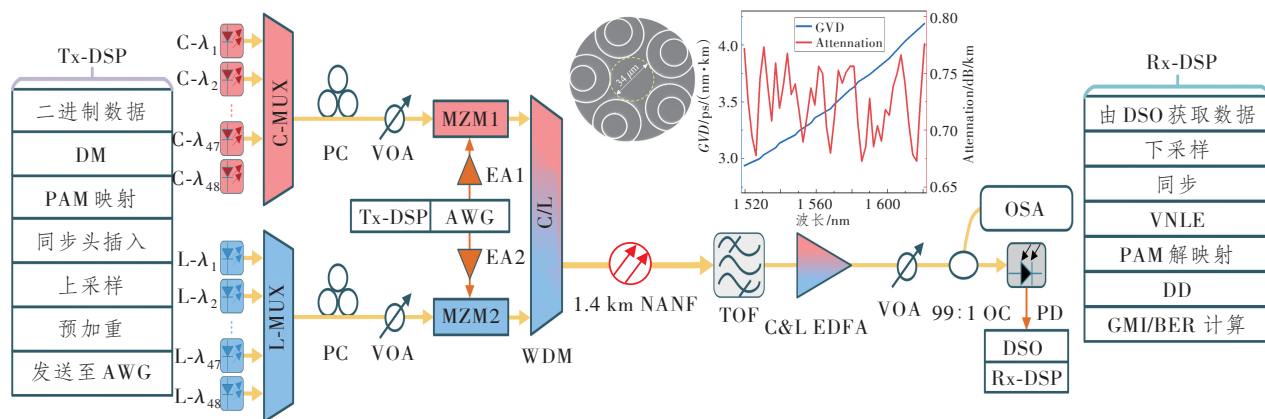
HCF 上实现 C 波段净 282 Gbit/s IM/DD 传输,并采用判决反馈均衡(Decision Feedback Equalization, DFE),突出了高速硅光调制器件与 AR-HCF 链路结合后对单波高速传输的支撑作用^[14];Wantee 等人在 11.1 km AR-HCF 上实现 C 波段 211.7 Gbit/s 高阶 PAM 传输,同样采用 DFE 进行接收端补偿,进一步表明高阶 PAM 格式在 AR-HCF 低损伤信道中具有提升频谱效率的潜力^[15]。这些单波实验虽然不直接构成 DWDM 高密度容量验证,但从链路距离、DSP 补偿、高速器件和调制格式等角度证明了 AR-HCF 支撑高速 IM/DD 通道的基础能力。

从跨波段传输验证看,早期工作主要侧重于宽带传输窗口和多波段可用性的确认。Sakr 等人首先验证了 AR-HCF 在 O/S/C/L 等通信波段的跨波段短距数据传输能力,并采用基于递归最小二乘(Recursive Least Squares, RLS)算法更新的 DFE 进行均衡,证明 AR-HCF 宽带低损耗窗口可覆盖多个通信波段^[16];Hong 等人随后将短距传输验证拓展至 S+C+L 波段,进一步表明 AR-HCF 的低色散、低非线性性和低时延特性有利于支撑多波段高速 IM/DD 传输,其接收端同样采用 DFE-RLS 进行补偿,该工作更突出多波段高速信号在同一类空芯链路中的传输一致性^[17];Chen 等人也在 6.1 km AR-HCF 上实现了 O/S/C/L 4 个波段超过 200 Gbit/s/ λ PAM4 传输,并采用 THP 辅助前馈均衡(Feed-Forward Equalization, FFE)提升补偿能力,进一步将跨波段验证推进到 200 Gbit/s/ λ 级别^[18]。这类实验的重点不是高密度复用本身,而是证明 AR-HCF 具备从单一波段向多波段容量扩展的物理基础。

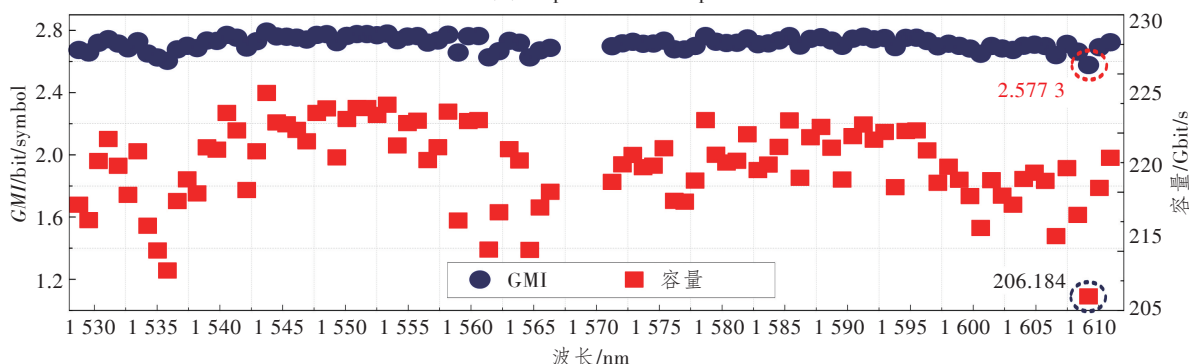
从 WDM 容量扩展看,多波长并行传输实验进一步验证了 AR-HCF 从单通道高速向系统容量提升的可行性。Hong 等人在 1 km AR-HCF 上实现了 O+C 波段 WDM IM/DD 传输演示,实现了 600 Gbit/s 系统容量,并采用 DFE-RLS 算法进行接收端均衡,证明了 AR-HCF 支撑宽带 WDM IM/DD 系统的可行性^[19];Yang 等人利用超高带宽薄膜铌酸锂(Thin-Film Lithium Niobate, TFLN)调制器,在 1.4 km 低色散 AR-HCF 上实现了 C+L 波段 8 波长、500 Gbit/s/ λ PAM16 WDM IM/DD 传输,总容量达到 4 Tbit/s,并采用 Volterra 非线性均衡器(Volterra Nonlinear Equalizer, VNLE)补偿非线性失真,其代表性在于突出了高速调制器件、高阶 PAM 和 AR-HCF 宽带信道协同带来的单波与

总容量提升^[20];Li 等人在 1.4 km AR-HCF 上实现了双向合计容量为 3.2 Tbit/s 的 C 波段多波长 IM/DD 光互连系统,采用 4 波长、400 Gbit/s/ λ 和双向传输架构,并且接收端仅采用线性 FFE 即可支撑概率整形(Probabilistic Shaping, PS)-PAM16 高速传输,该工作更突出双向互连和低复杂度 DSP 对实用化短距互连的意义^[21];Hu 等人在 6.2 km AR-HCF 上实现了 O、S、C 和 L 4 个波段 4 波长 PAM8 共传输,单波道速率达到 240 Gbit/s,总容量达到 960 Gbit/s,并且仅采用线性 FFE,说明多波段 WDM 扩展并不必然依赖高复杂度均衡^[22];此外, Li 等人通过多任务学习(Multi-Task Learning, MTL)在 AR-HCF 上实现了 C 波段 4 波长 960 Gbit/s PAM4 传输,则体现了数据驱动型 DSP 在带宽受限链路中的补偿潜力^[23]。上述 WDM 实验虽然均涉及信道、器件、调制和 DSP 等系统环节,但各自突出的技术重点不同,共同说明 AR-HCF 容量扩展需要由宽带低损伤信道、可用的端到端器件链路以及合适的调制与 DSP 方案共同支撑。

作为 WDM 容量扩展技术向高密度波道规划发展的进一步验证, DWDM 实验主要面向更高波道密度、更高系统容量和更严格的滤波与串扰约束。2024 年, Li 等人实验验证了基于 AR-HCF 的 C 波段 DWDM IM/DD 系统,在 1.4 km AR-HCF 链路上实现了 8 波长并行传输,单波道速率达到 240 Gbit/s,净总容量达到 1.8 Tbit/s,并且接收端仅采用线性 FFE^[24]。该工作的突出意义在于说明,在 AR-HCF 低色散、弱非线性信道条件下, C 波段密集波道并行传输可以在低复杂度 DSP 条件下获得太比特级容量; 2026 年, Sun 等人进一步将 DWDM 实验扩展至 C+L 波段,在 1.4 km 低色散 AR-HCF 链路上实现了 96 波长 DWDM IM/DD 传输,总容量达到 20.8 Tbit/s,并结合 VNLE 实现了大规模多波道传输性能优化^[25]。图 2 所示为 20.8 Tbit/s C+L 波段 DWDM IM/DD 传输系统示意图及其性能结果,该系统在 C+L 波段内构建了 96 个密集波长通道,并采用 80 GBaud 概率星座整形(Probabilistic Constellation Shaping, PCS)-PAM8 信号进行 IM/DD 传输;其中, 1.4 km AR-HCF 在 1 520~1 620 nm 范围内的群速度色散(Group Velocity Dispersion, GVD)和衰减特性为宽带 DWDM 传输提供了物理基础, 96 个波道的广义互信息(Generalized Mutual Information, GMI)与容量结果进一步验



(a) 实验装置
(a) Experimental setup



(b) PCS-PAM8 信号的 GMI 与容量性能

(b) GMI and capacity performance of the PCS-PAM8 signals

注:Tx为发射端;Rx为接收端;C-MUX和L-MUX分别为L波段和C波段复用器;L- λ_n 为L波段第n个波长通道;C- λ_n 为C波段第n个波长通道;VOA为可调光衰减器;PC为偏振控制器;MZM为马赫-曾德尔调制器;NANF为嵌套反谐振无节点光纤;EDFA为掺铒光纤放大器;OC为光耦合器;PD为光电探测器;AWG为任意波发生;OSA为光谱分析仪;DM为分布匹配器;EA为电放大器;DSO为数字存储示波器;DD为分布解匹配;BER为误码率。

图 2 20.8 Tbit/s C+L 波段 96 波长 DWDM IM/DD 传输系统及性能^[25]Figure 2 20.8 Tbit/s C+L-band 96-wavelength DWDM IM/DD transmission system and performance^[25]

证了 AR-HCF 支撑超大容量短距 IM/DD 传输系统的潜力。

为进一步梳理近年来 AR-HCF IM/DD 短距光互连实验进展,表 1 所示为按照“单波高速支撑—跨波段传输验证—WDM 容量扩展—DWDM 容量验证”的递进逻辑对代表性工作进行归纳。其中,单波支撑实验主要证明 AR-HCF 承载 200 Gbit/s/ λ 级高速 IM/DD 通道的能力;跨波段验证实验体现其宽带传输窗口和多波段可用性;WDM 扩展实验证明多波长并行传输和系统容量提升的可行性;DWDM 验证实验则直接面向高密度波道规划和太比特级系统容量提升。这些实验共同说明,AR-HCF 短距光互连容量扩展不是单一依赖光纤损耗降低、单波速率提升或 DSP 算法增强,而是一个多环节协同的系统问题。

综上,现有基于 AR-HCF 的短距 IM/DD 互连

实验虽然在波段、容量、调制格式和 DSP 复杂度方面各有侧重,但其技术内核可以归纳为信道、器件与封装、调制格式与低复杂度 DSP 3 类关键支撑。第一,AR-HCF 通过低色散、弱非线性、宽带窗口和低时延等特性,缓解了 SMF 在高符号率和多波长并行传输中的信道约束,为单波高速、跨波段传输和 WDM/DWDM 容量扩展提供了物理基础;第二,高速收发器件、复用/解复用器件、耦合连接和封装互连决定了 AR-HCF 信道优势能否转化为实际链路裕量;第三,PAM、PS/PCS 等调制编码方式以及 FFE、DFE、VNLE 和 MTL 等 DSP 方法决定了系统在速率、BER 性能、功耗和实现复杂度之间的折中关系。由此可见,AR-HCF 短距光互连的容量扩展并非依赖单一因素,而是遵循“信道优势奠基、器件封装保障以及调制与低复杂度 DSP 释放容量”的协同演进逻辑。

表 1 面向短距 IM/DD 容量扩展的 AR-HCF 代表性实验进展

Table 1 Representative AR-HCF short-reach IM/DD experiments toward capacity scaling

实验类型	年份	文献	距离/km	波段	单波速率/格式	DSP 特征	光纤类型	系统容量
单波	2024	[13]	20.0	C	>200 Gbit/s/ λ PAM4	THP + MFFE	AR-HCF-5 (II)	—
单波	2025	[14]	3.1	C	256 GBaud OOK, 145 GBaud PAM4 and 120 GBaud PAM6	DFE	AR-HCF-5 (II)	—
单波	2025	[15]	11.1	C	90 GBaud PAM6 and 75 GBaud PAM8	DFE	AR-HCF-5 (II)	—
跨波段	2020	[16]	约 1.0	O/S/C/L	50 Gbit/s OOK / 100 Gbit/s PAM4	DFE-RLS	AR-HCF-6 (I)	—
跨波段	2021	[17]	约 5.0	S+C+L	80/100/112 Gbit/s PAM4	DFE-RLS	AR-HCF-6 (I)	—
跨波段	2026	[18]	6.1	O/S/C/L	>200 Gbit/s/ λ PAM4	THP + FFE	AR-HCF-5 (II)	—
WDM	2020	[19]	约 1.0	O+C	50/100 Gbit/s/ λ PAM4	DFE-RLS	AR-HCF-6 (I)	600 Gbit/s
WDM	2024	[20]	1.4	C+L	500 Gbit/s/ λ PAM16	VNLE	AR-HCF-5 (I)	4 Tbit/s
WDM	2025	[21]	1.4	C	400 Gbit/s/ λ PS-PAM16	FFE	AR-HCF-5 (I)	3.2 Tbit/s
WDM	2025	[22]	6.2	O/S/C/L	240 Gbit/s/ λ PAM8	FFE	AR-HCF-5 (II)	960 Gbit/s
WDM	2026	[23]	1.4	C	240 Gbit/s/ λ PAM4	MTL	AR-HCF-5 (I)	960 Gbit/s
DWDM	2024	[24]	1.4	C	240 Gbit/s/ λ	FFE	AR-HCF-5 (I)	1.8 Tbit/s
DWDM	2026	[25]	1.4	C+L	>200 Gbit/s/ λ PCS-PAM8	VNLE	AR-HCF-5 (I)	20.8 Tbit/s

注:OOK 为开关键控。

2 技术与应用展望

基于 AR-HCF 的短距 IM/DD 光互连研究已由早期跨波段传输和 WDM 可行性验证,逐步发展到 C+L 波段高密度 DWDM 传输和太比特级系统容量演示,显示出良好的应用前景。总体来看,AR-HCF 的核心价值不仅体现在低色散、弱非线性和低时延等物理层特性上,也体现在其有望缓解传统 SMF 在高符号率、DWDM 传输中面临的色散和非线性限制,为短距互连系统在波段利用、波道密度、功率预算和 DSP 复杂度之间提供了更大的设计空间。

从技术发展看,AR-HCF 在短距互连中的进一步应用仍需在光纤本体性能、接口与封装协同以及系统级可靠性等方面持续推进。一方面,应进一步优化光纤损耗、宽带低损耗窗口、色散特性、弯曲容限及制造一致性,并结合微结构空芯光纤的特性测试与工程应用需求,提升其工程可实现性^[26];另一方面,还需解决光纤与模块接口之间的耦合损耗及其一致性控制、模式稳定性以及集成封装适配等问题,其中 AR-HCF 与传统 SMF 之间的低损耗连接和熔接技术是提升系统工程可用性的关键环节之一^[27]。同时,还需与高速调制器、宽带复用/解复用器件及低复杂度 DSP 协同优化。只有在这些条件下,AR-HCF 的介质优势才更有可能稳定地转化为

系统级性能收益。

从应用场景看,AR-HCF 支撑的高容量 IM/DD 系统可主要面向接入侧光互连和计算基础设施互连两类场景^[2]。一方面,第五代移动通信技术(5th Generation Mobile Communication Technology, 5G)前传、光接入和客户端光接口等接入侧应用推动了 IM/DD 系统向单波 200 Gbit/s 及以上速率升级,其系统设计需兼顾容量、成本、功耗、模块尺寸和 DSP 实现复杂度^[28];另一方面,数据中心和高性能计算等计算基础设施中的流量持续增长,对数据中心内部互连和短距数据中心互连提出了更高的容量密度、低时延和低功耗要求。AR-HCF 的宽带低损耗窗口、弱非线性和低传播时延特性,有望在上述场景中为 WDM/DWDM IM/DD 容量扩展提供新的传输介质选择。

3 结束语

本文围绕 AR-HCF 支撑的短距 IM/DD 光互连扩容展开综述,从系统需求与代表性实验进展等方面进行了梳理。对比传统 SMF 可见,AR-HCF 在低色散、弱非线性响应、大功率预算裕量与低传播时延等维度具有综合优势,为构建高容量和低复杂度的短距光互连传输体系提供了可行路径。近年来的实验结果进一步表明,AR-HCF 不仅能够支撑

200 Gbit/s/ λ 级高速传输,也已在跨波段传输、WDM 容量扩展和 DWDM 容量验证中展现出良好的系统潜力。其中,单波、跨波段和 WDM 实验从高速通道能力、宽波段覆盖和多波长并行传输等方面支撑短距 IM/DD 容量扩展;DWDM 实验则进一步验证了 AR-HCF 支撑高密度波道规划和太比特级容量扩展的可行性。

仍需指出的是,面向实际工程部署,AR-HCF 在光纤制造一致性、弯曲与连接容限、器件与封装协同设计以及系统级可靠性验证等方面仍有待持续推进。随着光纤工艺与高速光电集成技术的进一步成熟,AR-HCF 有望成为 200 Gbit/s/ λ 时代短距光互连的重要传输介质,为高容量和低时延互连提供支撑。

参考文献:

- [1] Lu Y, Gu H. Flexible and Scalable Optical Interconnects for Data Centers: Trends and Challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(10): 27–33.
- [2] Pang X, Ozolins O, Lin R, et al. 200 Gbps/Lane IM/DD Technologies for Short Reach Optical Interconnects[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 492–503.
- [3] Krause Perin J, Shastri A, Kahn J M. Data Center Links beyond 100 Gbit/s per Wavelength [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 44: 69–85.
- [4] Che D, Chen X. Modulation Format and Digital Signal Processing for IM-DD Optics at Post-200 G Era [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(2): 588–605.
- [5] Zhang J, Wu X, Yan Q, et al. Nonlinearity-Aware PS-PAM-16 Transmission for C-Band Net-300-Gbit/s/ λ Short-Reach Optical Interconnects with a Single DAC [J]. Optics Letters, 2022, 47(12): 3035–3038.
- [6] Zhang J, Tan H, Li F, et al. Ultra-Low-Complexity Weight-Sharing Trigonometric Nonlinear Equalizer for beyond Net-200-Gb/s/ λ Short-Reach Optical Interconnects [J]. Optics Letters, 2024, 49(20): 5937–5940.
- [7] Komanec M, Dousek D, Suslov D, et al. Hollow-Core Optical Fibers [J]. Radioengineering, 2020, 29(3): 417–430.
- [8] Chen Y, Petrovich M, Numkam Fokoua E, et al. Hollow Core DNANF Optical Fiber with <0.11 dB/km Loss [C]//2024 Optical Fiber Communication Conference (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE. 2024: Th4A.8.
- [9] Pryamikov A D, Gladyshev A V, Kosolapov A F, et al. Hollow-Core Optical Fibers: Current State and Development Prospects [J]. Physics - Uspekhi, 2024, 67(2): 129–156.
- [10] 常彦彪, 沈世奎, 张贺, 等. 反谐振空芯光纤技术研究进展 [J]. 光通信研究, 2026(1): 240175.
Chang Y B, Shen S K, Zhang H, et al. Research Progress in Anti-Resonant Hollow-Core Fiber Technology [J]. Study on Optical Communications, 2026(1): 240175.
- [11] Hong Y, Taengnoi N, Bottrill K R H, et al. Ultra-Wideband IM/DD Transmission over Hollow-Core Fibres [C]//26th Optoelectronics and Communications Conference. Hong Kong, China: Optica Publishing Group, 2021: W3B.2.
- [12] 张成良, 冯立鹏, 高霞, 等. 反谐振空芯光纤及其传输系统研究进展 [J]. 光学学报, 2025, 45(13): 1306008.
Zhang C L, Feng L P, Gao X, et al. Research Progress on Anti-Resonant Hollow Core Fiber and Its Transmission System (Invited) [J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(13): 1306008.
- [13] Chen H, Zhao Y Y, Zhang L, et al. Beyond 200 Gb/s/ λ C-Band PAM-4 Low-Latency Transmission over 20-km Nested Antiresonant Nodeless Fiber [J]. Optics Express, 2024, 32(27): 48329–48339.
- [14] Cirjulina D, Wantee S, Ostrovskis A, et al. Net 282 Gb/s IM/DD Transmission in C-Band over 3.1 km Long NANF Using Silicon Photonics TW-MZM [C]//2025 European Conference on Optical Communications (ECOC). Copenhagen, Denmark: IEEE, 2025: 11263246.
- [15] Wantee S, Ostrovskis A, Liu H, et al. 211.7-Gbit/s High-Order PAM Transmission over 11.1 km of Hollow-Core NANF in C-Band [C]//2025 European Conference on Optical Communications (ECOC). Copenhagen, Denmark: IEEE, 2025: 11263252.
- [16] Sakr H, Hong Y, Bradley T D, et al. Interband Short Reach Data Transmission in Ultrawide Bandwidth Hollow Core Fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(1): 159–165.
- [17] Hong Y, Bradley T D, Taengnoi N, et al. Hollow-Core NANF for High-Speed Short-Reach Transmission in the S+C+L-Bands [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(19): 6167–6174.
- [18] Chen H, Zhang X, Xu Z, et al. Beyond 200 Gb/s/ λ PAM4 Optical Transmission in the O, S, C, and L Bands over 6.1 km NANF [J]. IEEE Photonics Tech-

- nology Letters, 2026, 38(1): 25–28.
- [19] Hong Y, Sakr H, Taengnoi N, et al. Multi-Band Direct-Detection Transmission over an Ultrawide Bandwidth Hollow-Core NANF [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(10): 2849–2857.
- [20] Yang C, Li C, Gong Y, et al. C+L-Band 4 Tb/s (500 Gb/s/ $\lambda \times 8\lambda$) WDM IM/DD Optical Interconnection over Anti-Resonant Hollow-Core Fiber Enabled by Ultra-High Bandwidth TFLN Modulator [C]//50th European Conference on Optical Communication. Frankfurt, Germany: VDE, 2024: 10926666.
- [21] Li C, Liu Z, Sun P, et al. Bidirectional 3.2T (400 Gb/s/ $\lambda \times 4\lambda \times 2$) Optical Interconnect Enabled by 1.4 km NANF and PS-PAM16 with Linear FFE [C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2025. San Francisco, California: Optica Publishing Group, 2025: M4C.3.
- [22] Hu S, Yang C, Li C, et al. Co-Transmission of OSCL-Band 4λ 240 Gb/s/ λ PAM8 Signals over 6.2 km Anti-Resonant Hollow-Core-Fiber with Linear FFE [C]//2025 European Conference on Optical Communications (ECOC). Copenhagen, Denmark: IEEE, 2025: 11263422.
- [23] Li S, Sun P, Wang J, et al. C-Band 4λ 960 Gb/s PAM4 Transmission over AR-HCF Enabled by Multi-Task Learning [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2026, 38(13): 936–939.
- [24] Li C, Liu Z, Sun Y, et al. C-Band Net 1.8 Tb/s (240Gb/s/ $\lambda \times 8\lambda$) DWDM IM/DD Transmission over 1.4 km AR-HCF with Linear FFE Only [C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024. San Diego, California, USA: Optica Publishing Group, 2024: Tu3H.6.
- [25] Sun P, Yang C, Li C, et al. 20.8 Tbit/s C+L-Band DWDM IM/DD Transmission over Nested Anti-Resonant Nodeless Fiber Link [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2026, 38(13): 892–895.
- [26] 张博, 顾帅, 廉正刚, 等. 微结构空芯光纤特性及光纤测试和工程应用 [J]. 光通信研究, 2023(2): 9–18.
Zhang B, Gu S, Lian Z G, et al. The Characteristics and Fiber Test of Micro-Structure Hollow Core Fiber and Its Engineering Application [J]. Study on Optical Communications, 2023(2): 9–18.
- [27] 马晓辉, 李楚晨, 宋超, 等. 基于GIMF的空芯反谐振光纤与单模光纤低损耗熔接 [J]. 光电工程, 2025, 52(1): 240225.
Ma X H, Li C C, Song C, et al. Low-Loss Fusion Splice of Hollow-Core Antiresonant Fiber and Single Mode Fiber based on GIMF [J]. Opto-Electronic Engineering, 2025, 52(1): 240225.
- [28] Zhong K, Zhou X, Huo J, et al. Digital Signal Processing for Short-Reach Optical Communications: a Review of Current Technologies and Future Trends [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 377–400.