

光纤通信技术演进与发展展望： 从基础突破到融合创新



Evolution and Development Prospects of Optical Fiber Communication Technology: From Foundational Breakthroughs to Convergent Innovation

张海懿/ZHANG Haiyi

(中国信息通信研究院, 中国 北京 100191)

(China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202505007

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20251016.1357.002>

网络出版日期: 2025-10-16

收稿日期: 2025-08-18

摘要: 总结了光纤通信技术从基础突破到融合创新的发展历程, 分析了光纤通信从光层基础到多域组网的关键技术进展, 并展望了其未来发展趋势, 同时指出中国面临的发展机遇和挑战。针对人工智能、6G 等未来发展新需求, 建议业界继续协同聚力, 推进光纤通信关键技术的基础突破和融合创新, 支撑信息基础设施高质量发展。

关键词: 光纤通信技术; 技术突破; 融合创新; 发展展望

Abstract: A review is provided of the development of optical fiber communication technology, from fundamental breakthroughs to integrated innovation. The analysis covers key technological advances spanning from optical-layer fundamentals to multi-domain networking, followed by a discussion of future trends and the corresponding opportunities and challenges for China. In response to emerging requirements such as artificial intelligence and 6G, it is recommended that the industry continue collaborative efforts to advance basic breakthroughs and integrated innovation in key optical fiber communication technologies, thereby supporting the high-quality development of information infrastructure.

Keywords: optical fiber communication technology; technical breakthrough; convergent innovation; development prospect

引用格式: 张海懿. 光纤通信技术演进与发展展望: 从基础突破到融合创新 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(5): 37-49. DOI: 10.12142/ZTETJ.202505007

Citation: ZHANG H Y. Evolution and development prospects of optical fiber communication technology: from foundational breakthroughs to convergent innovation [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(5): 37-49. DOI: 10.12142/ZTETJ.202505007

1 光纤通信技术发展历程

1.1 光纤通信基础技术突破阶段

光通信的起源可追溯至古代的“烽火台”, 这是一种基于目视的简易信息传递方式。1880年, 贝尔与其助手发明了“光电话”, 通过光作为载波来调制并传输声音, 奠定了现代光通信的基础。然而, 受限于光源质量与传输介质的可靠性等关键技术瓶颈, 光通信技术在此后数十年始终未能实现实际应用。尽管期间不乏新的尝试(例如利用玻璃等介质进行光信号传输的实验), 但均未能取得决定性突破。

自20世纪60年代起, 光通信在光源与传输介质领域陆续取得根本性突破。1960年, 美国科学家梅曼发明红宝石激光器, 为通信所用半导体激光器的出现与发展奠定了重要

基础。1962年, 美国通用电气公司工程师成功研制出首台基于砷化镓材料的同质结半导体激光器。1966年, 英国标准电信研究所华裔科学家高锟博士提出, 光导纤维的高损耗主要源于材料中所含杂质, 通过降低杂质含量并改进制备工艺, 可将光纤损耗降至20 dB/km。1970年, 美国、日本等相继研制出可在室温下连续工作的双异质结半导体激光器; 同时, 美国康宁公司拉制出世界上第一根损耗为20 dB/km的石英光纤。光源与光纤介质取得的重大突破, 开启了光通信技术发展的新纪元, 光纤通信由此逐步成为信息传输的主要方式之一。在光源、光纤等基础理论及关键器件实现重大突破之后, 光纤通信技术在后续数十年中持续革新并实现规模化商用。中国在该领域也经历了从跟随、追赶、并跑到部分领先的发展历程。

1.2 中国光纤通信技术发展

1.2.1 技术跟随与追赶阶段

中国光纤通信技术从20世纪70年代至21世纪初,整体处于持续跟进和追赶其他国家先进技术的发展阶段。该时期的技术突破主要体现在从多模光纤传输系统的实验与商用,逐步过渡到单模光纤传输系统的引入与规模部署,以及从准同步数字体系(PDH)、同步数字体系(SDH)等传输体制,演进至波分复用(WDM)大容量传输技术的初步应用与商业化。

1976年,美国部署了首条45 Mbit/s的多模光纤实验链路。随后,欧美日等地区或国家逐步推进光纤通信的商业化,传输速率从数百Mbit/s不断提升至10 Gbit/s,传输距离也从10 km级扩展至200 km级。期间出现的关键技术突破包括:单模光纤的研制与成功应用、光放大器技术的发明,以及半导体激光源的持续革新——如采用量子阱等新型增益材料结构,实现850 nm、1 310 nm和1 550 nm等多波段的覆盖,并显著提升激光器的能量转换效率、输出功率和稳定性。WDM技术的引入进一步推动了系统容量的增长。

1979年,武汉邮科院副总工赵梓森团队拉制出中国第一根实用化光纤,同时上海冶金所、武汉邮科院等已研制出通信用光源发光二极管(LED),标志着中国光纤通信逐步进入实用化阶段。1982年,中国第一条实用化光纤通信线路在武汉建成,贯通武昌、汉阳、汉口3镇,全长13.3 km,速率为8.448 Mbit/s。1986年,中国第一条长途光纤通信线路在武汉至荆州之间建成,速率达34 Mbit/s^[1]。从1988年开始,中国启动了为期10年的“八纵八横”骨干光纤网络建设,为后续国家信息通信网络发展奠定了坚实基础。在SDH和WDM系统初步部署方面,1997年中国首个采用国际电信联盟电信标准分局(ITU-T) SDH标准速率为622 Mbit/s光纤通信线路在攀枝花建成。1999年,中国首个8×2.5 Gbit/s WDM光纤通信线路在青岛至济南之间建成。

1.2.2 并跑和局部领先阶段

自2000年至今,中国逐步进入与国际先进水平并跑、在部分领域实现领先的发展阶段。光纤通信系统传输速率逐步从10 Gbit/s向40 Gbit/s、100 Gbit/s乃至400 Gbit/s升级演进,与欧美国家基本同步推进技术商用。在数字传输与组网技术方面,中国在多业务传送平台(MSTP)、分组传送网(PTN)、切片分组网(SPN)、光传送网(OTN)和光分插复用设备(ROADM)等技术方面,已实现全球技术应用引领或部署规模领先。在面向800 Gbit/s及以上速率、波段扩展、

空分复用、新型光纤等持续扩容的新型传输技术方面,除部分高端芯片制备工艺受限之外,中国的研发节奏基本与其他国家保持一致。另外,随着数据流量的爆发式增长和光纤通信技术的持续革新,宽带光纤接入技术逐步兴起。在国家政策引导和技术产业界的共同推动下,光纤到户(FTTH)成为中国宽带接入网络的重点发展方向。在此期间,中国光纤接入网建设持续加速,吉比特无源光网络(GPON)/以太网无源光网络(EPON)、10G无源光网络(10G PON)等关键技术以约十年一代的节奏稳步推进,实现了代际规模的有序部署。近年来,中国更率先提出光纤到房间(FTTR)技术,并引领其全球规模化部署进程。截至2025年,50G PON技术已进入全国试点应用阶段。无论是在技术选型还是在实际部署层面,中国均已引领全球光纤接入网络的发展潮流。

1.2.3 网络部署最新进展

经过多年发展,光纤通信网络已成为新型信息基础设施的关键承载底座,对5G、人工智能(AI)、大数据与算力等新兴业务发展起到关键支撑作用。在此过程中,中国逐步建立起坚实的产业发展基础,在通信设备、光纤光缆和光模块器件等领域已涌现出多家位列全球前十的企业。中国政府高度重视光纤通信网络的建设与发展,近年来已将千兆光网纳入国家顶层规划。2021年,工信部发布《“双千兆”网络协同发展行动计划(2021—2023年)》,明确提出推进千兆光网和5G协同发展。2024年9月,工业和信息化部(后简称工信部)联合多部委发布《关于推动新型信息基础设施协调发展有关事项的通知》,强调要深入开展“双千兆”网络建设,协同推进5G与千兆光网,推动IP承载和光传输融合发展,促进接入网、城域网和骨干网同步扩容升级。2025年1月,工信部办公厅发布关于开展万兆光网试点工作的通知。在政府积极引导及产学研协同推进下,中国光纤通信网络建设与应用成效显著,网络规模与应用水平已居全球领先地位。截至2025年3月^[2],全国支持千兆网络服务的10G PON端口数达2 925万个,千兆宽带用户数突破2.18亿个,光缆线路总长度达7 454 × 10⁷ km。中国基于ROADM的全光网络规模全球领先,自2023年下半年起启动400 Gbit/s干线传输网络部署,多家运营商持续推进建设。据不完全统计,截至2024年12月底,全网部署的400G长距接口已超过1.29万个。在新技术方面,近两年已逐步开展50G PON、800G速率智算拉远、空心光纤等试点验证工作。当前,中国光纤通信网络正处于千兆普及、万兆启航的关键发展阶段,未来将持续依托5G/6G、大数据、算力与人工智能等新型需求驱动,不断推动关键技术的创新与演进。

2 光纤通信基础技术融合演进

2.1 信号调制和检测

随着各类业务传输需求的持续驱动及光纤通信技术的不断革新，光纤通信系统传输速率已从最初的数十 Mbit/s 提升至 Tbit/s 量级。相应地，光信号的发送与接收技术即调制与检测等基础光层处理技术也融合了技术方案、制备工艺与新型材料等多维度创新，持续推动其向前演进。

1) 强度调制直接检测 (IM-DD)

在光纤通信技术发展初期至 2000 年前后，商用系统中的信号调制与检测基本采用 IM-DD 机制。激光光源外延工艺从扩散法逐步演进为分子束外延 (MBE)、金属有机化合物气相淀积 (MOCVD) 等或多种结合的方式^[3]。光源类型也经历了从 LED 发展到法布里-珀罗 (FP-LD)、分布式反馈 (DFB-LD)、电吸收调制激光器 (EML) 和垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 等多种形态并存。通常情况下，短距离传输采用内调制方式，长距离传输采用外调制方式，相应的工作波长也从 850 nm (短距离) 逐步扩展到 1 310 nm (中短距离) 和 1 550 nm (长距离)。在此期间，得益于相干接收显著提升灵敏度等优势，光通信领域研究人员曾积极开展相干光通信技术的研究和探索。然而，由于该技术对光信号频率与相位处理性能要求过高，同时掺铒光纤放大器 (EDFA)、WDM 等新技术引入有效解决了传输容量和传输距离瓶颈问题，基于相干光通信的应用探索暂时搁置。

自 2000 年起，随着互联网的大规模部署与应用，特别是云计算、大数据等需求推动数据中心基础设施的规模建设，以以太网接口为代表的短距离传输速率持续提升。2010 年，随着 40 GE/100 GE 标准 (IEEE 802.3ba) 的发布，如何选择新的调制方式以满足高带宽、低成本的应用需求，成为业界关注的焦点。经过多轮的热评估与讨论，2017 年发布的 200 GE/400 GE 标准 (IEEE 802.3bs) 正式引入了基于四电平脉冲幅度调制 (PAM-4) 的强度调制方案，并继续沿用波分复用与光纤复用等技术。随后，在 2024 年发布的基于单通道 100 Gbit/s 的 800GE 标准 (IEEE 802.3df)，以及制定中的基于单通道 200 Gbit/s 的 800 GE 与 1.6 TE 标准 (IEEE 802.3dj) 中，这一调制方案继续被采纳。

随着信号处理速率持续提高 (当前商用产品普遍处于 50 ~ 100 Gbaud 水平，并逐步向 200 Gbaud 以上演进)，采用 PAM-4 调制的信号传输距离进一步缩短。业界正在持续评估是否需在 10 km 乃至更短距离中引入低成本相干检测技术，以应对此类传输挑战。

2) 多阶调制相干检测

自 2000 年起，随着 10 Gbit/s 干线传输网络的逐步商用部署，下一代传输速率的研究和选择也逐步提上日程，其中 SDH 和 WDM 技术均将 40 Gbit/s 作为重点探索方向。在该过程中，为提升传输性能，40 Gbit/s WDM 系统逐步引入了光双二进制码 (ODB)、差分相移键控 (DPSK)、差分四相相移键控 (DQPSK) 等多阶调制传输码型，接收侧仍采用直接检测，相关技术在实际网络中实现了小规模商用。2005 年，数字载波相位估计技术在相干接收机中成功实现演示，重新激发了业界对相干光通信的广泛关注。2008 年，北电网络推出了首个基于 DP-QPSK 传输码型、采用 DSP 技术的商用 40 Gbit/s 相干系统^[4]。随后阿尔卡特朗讯于 2009 年推出 100 Gbit/s 单波长光转发器并在 Verizon 网络启动商用。同期，中国设备商逐步推出了 100 Gbit/s 相干设备，运营商也于 2011 年启动了 100 Gbit/s 速率的干线网络建设，这标志着相干光通信正式进入大规模商用阶段。2023 年，中国启动了 400 Gbit/s 相干系统规模商用。近几年，业界也持续开展 800 Gbit/s ~ 1.2 Tbit/s 速率的技术试验与验证，信号处理速率超过 200 Gbaud 的 1.6 Tbit/s 系统在全球已有商用案例。目前业界公开的典型数字信号处理 (DSP) 芯片处理能力见表 1。

3) 调制和检测用光电材料

随着光通信信号速率持续以 4 倍或 10 倍为单位代际提升，为支撑更大带宽、更高集成度与更低能耗等高性能需求，新型光电子材料不断涌现。在调制和检测环节，激光器与探测器主要采用 III-V 族化合物磷化铟 (InP) 和砷化镓 (GaAs) 作为芯片衬底材料。其中，InP 衬底主要应用于 FP、DFB、EML 等边发射激光器芯片，以及 PIN、APD 等探测器芯片；GaAs 衬底则主要应用于 VCSEL 面发射激光器芯片。近 20 年来，随着硅光技术的发展。基于硅基 (Si) 外延锗材料的探测器芯片也取得明显进展，目前探测器带宽实验室水平达到 100 GHz 量级^[5]，与 InP 基材料的 200 GHz 水平仍存在一定差距。在调制器材料方面，除最早应用的 LiNbO₃ 体材料和 III-V 族材料 (如 InP) 外，基于硅光和 LiNbO₃ 薄膜的调制技术发展迅速。目前，硅光调制器、LiNbO₃ 薄膜调制器的

表1 业界公开的数字信号处理芯片处理能力进展

厂家	波特率/ Gbaud	支持速率	工艺/nm	发布时间/ 年
思科	136	800 Gbit/s ~ 1.2 Tbit/s	5	2023
NEL	140	800 Gbit/s ~ 1.2 Tbit/s	5	2023
富士通	140	800 Gbit/s ~ 1.2 Tbit/s	5	2023
诺基亚	130+	800 Gbit/s ~ 1.2 Tbit/s	5	2023
英飞朗	148	800 Gbit/s ~ 1.2 Tbit/s	5	2024
Ciena	200	800 Gbit/s ~ 1.2 Tbit/s	3	2024

带宽已超过 110 GHz^[6-7], 其中 LiNbO₃ 薄膜调制器的带宽提升潜力要更大。此外, 业界也在探索其他多种材料的调制技术, 如基于铁电薄膜绝缘体 (PLZT) 调制器已有 70 GHz 带宽实验报道^[8]。为应对未来 200 Gbaud 及以上速率对高集成、低功耗与高性能信号处理的要求, 除了上述材料外, 业界正在积极拓展如钛酸钡薄膜、等离子体、二维材料、有机材料等新兴材料的应用。如等离子体器件带宽可达 110 GHz^[9-10], 有望超过 500 GHz^[11], 这将共同推动 200 Gbaud 以上的光电子芯片器件的进一步发展。

在光纤通信系统中, 光信号调制和检测的功能主要由光模块来实现。近 10 年来, 光模块及芯片器件的发展情况及趋势如图 1 所示。

2.2 光信号放大

在光纤通信技术的发展进程中, 20 世纪 80 年代后期发明的 EDFA 是一个重大里程碑, 彻底解决了信号在长距离传输中的全光中继问题。随着光信号速率不断提高、传输波段逐渐扩展以及传输距离持续增加, 基于不同原理与材料的多种宽谱光放大器相继涌现, 并呈现出加速融合发展与持续演进的趋势。

1) 放大器基本类型

目前光纤通信系统中光放大器根据工作机制和介质等特点主要分为 3 类: 第 1 类是稀土掺杂类光纤放大器, 以掺杂光纤作为增益介质, 使用特定波长 (如 980 nm 或者 1 480 nm 等) 激光作为泵浦源, 通过稀土离子 (如铒、铥、镨等) 的亚稳态能级将泵浦能量转移至信号光以实现放大。该类放大器主要包括 EDFA、掺铋光纤放大器 (BDFA)、掺铥光纤放大器 (TDFA)、掺镨光纤放大器 (PDFA) 等, 其中 EDFA 在 SDH、WDM 等系统中得到广泛商用, 是目前光纤通信系统中最主要应用的放大器; 第 2 类是半导体光放大器 (SOA), 目前已在光模块内部信号放大等场景实现局部商用; 第 3 类为基于非线性效应的参量放大器, 利用增益介质 (光纤、硅基等) 的非线性效应实现信号放大, 包括已局部商用的光纤拉曼放大器 (FRA), 以及正在研究的硅基拉曼放大器 (SRA)、光纤布里渊放大器 (FBA)、光纤参量放大器 (FOPA) 和硅基参量放大器 (SOPA) 等。上述各类光放大器所支持的增益谱宽如图 2 所示^[12]。

2) 宽谱信号放大

综合考虑光源与光纤等技术特性, 光纤通信系统的长距离传输波段主要集中于 C 波段 (1 550 nm 窗口), 该波段也是 EDFA 的主要应用范围。在部分传输距离要求更高的应用场景中, 常结合使用 FRA 与 EDFA 协同放大光信号。随着信

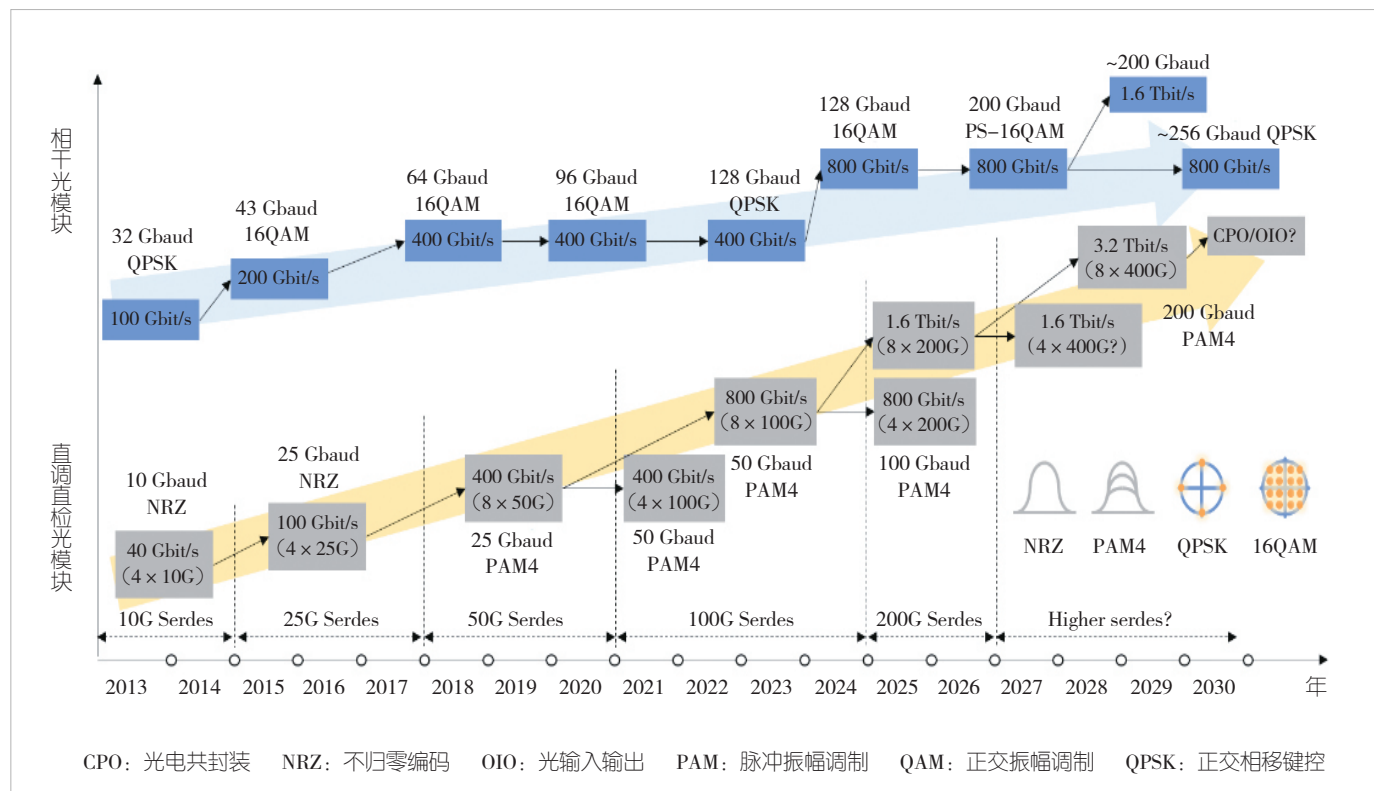


图1 光模块及收发芯片器件发展趋势

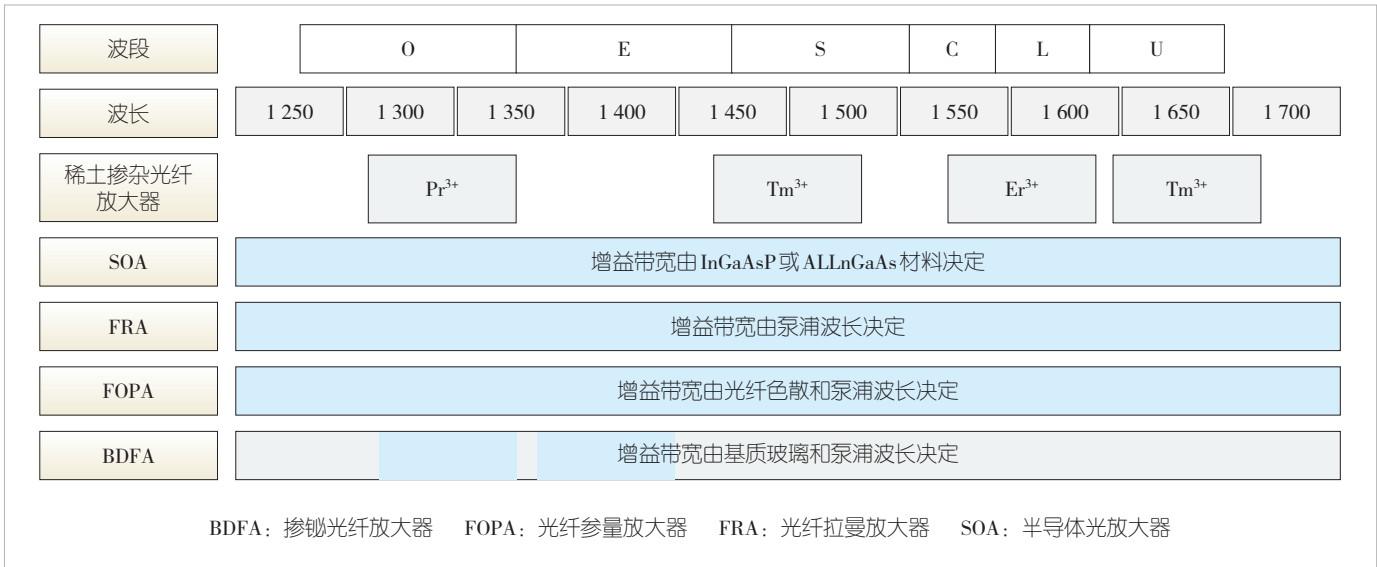


图2 各类光放大技术的增益谱宽

息传输需求的持续增长，光纤通信的传输波段不断扩展。例如，在部署 400 Gbit/s 系统时，传输窗口的带宽已从常规 C 波段的 4.8 THz 扩展至 C 波段与 L 波段各 6 THz。然而，目前能够同时覆盖 C+L 波段的一体化光纤放大器尚未形成成熟的技术方案。传统并联式结构存在增益带隙死区的问题；采用铋铈共掺光纤的光放大器虽可覆盖 C+L 增益带宽，但存在增益均衡性较差的问题。如何实现高增益、低噪声的宽带放大仍是当前研究的重点。

为支持未来 O、E、S、U 等更多波段的信号放大应用，业界正在积极研究其他类型的稀土掺杂光纤放大器。目前该类研究整体仍处于实验室探索阶段，尚未成熟^[13]。此外，面向更宽传输波段的应用需求，SOA、FRA 及参量放大器等也是具有竞争力的技术方案。然而，除 SOA 在 1 310 nm 窗口、FRA 在 C+L 波段已有一定应用外，大多数宽带放大技术仍处于研究阶段。例如，2017 年诺基亚贝尔实验室采用 SOA 在 100 km 光纤链路上实现了超过 100 nm 的多波段信号放大^[14]；2020 年阿斯顿大学采用了两级分布式拉曼放大（DRA），在 70 km 单模光纤上实现了 1 475~1 625 nm 的连续谱放大^[15]；2022 年 NTT 利用基于周期极化铌酸锂（PPLN）的 FOPA 结合分布式拉曼放大，实现了两个 6.25 THz 波段（S+C 或 C+L）的传输实验^[16]等。面向空分复用（SDM）等多维复用场景的未来需求，SDM 光放大器仍需在增益光纤结构设计、泵浦方式创新及制备工艺优化等方面开展深入研究。

2.3 传输光纤

自传输光纤实现商业化应用以来，其已逐步替代铜缆成

为固定通信网络最主要的传输介质。传输光纤的应用重塑了通信网络架构、产业格局与应用生态。在更高传输性能与技术持续革新的需求推动下，传输光纤正不断融合多维新兴技术，持续向前演进。

1) 基本类型

按照光纤支持信号模式传输能力的差异，通信用光纤主要分为多模光纤和单模光纤。多模光纤主要适用于局域网以及近年来加速发展的数据中心内部短距互联的应用场景。随着信号传输速率从数十 Mbit/s 到 1 Gbit/s、10 Gbit/s，再到 100 Gbit/s、1 Tbit/s 及以上的逐步提升，多模光纤也在不断演进。目前多模光纤主要标准包括 OM1 到 OM5 等多个系列，其中 OM1 和 OM2 主要采用 LED 光源，而 OM3、OM4 和 OM5 采用垂直腔面发射激光器（VCSEL）光源，后者已成为当前主流或即将广泛使用的多模光纤类型。与此同时，业界也正在开展结合 VCSEL 光源优化性能后的波长（如 1 310 nm 等）多模光纤研制^[18]。

单模光纤通常应用于干线网、城域网、接入网以及传输距离较长的局域网和数据中心等应用场景。随着激光器性能提升和传输技术的演进等，自 20 世纪 80 年代以来，基于光纤色散、损耗、抗弯能力等关键特性，单模光纤逐步形成 G.652、G.653、G.654、G.655、G.656、G.657 等六大类型，如表 2 所示。每种类型又可根据损耗、色度色散、偏振模色散等特性细分为不同的子类。G.652 是目前应用最为广泛的单模光纤，其超低损耗变种于 2007 年前后研制成功，并与 G.652 标准兼容，目前已实现规模商用。相比于 G.652D，G.657 光纤具有更优的抗弯性能，逐渐应用于光纤到房间等

表2 单模光纤基本类型及特性

ITU-T 标准号	单模光纤标准名称	子分类	性能特点
G.652	非色散位移单模 光纤	G.652A	适用的波段范围为O波段和C波段,在1 550 nm波长的最大损耗为0.4 dB/km
		G.652B	适用的波段范围为O波段、C波段和L波段,在1 550 nm波长的最大损耗为0.35 dB/km
		G.652C	在G.652.A基础上消除了1 383 nm附近的水峰,在1 550 nm波长的最大损耗为0.3 dB/km
		G.652D	在G.652.B基础上消除了1 383 nm附近的水峰,在1 530~1 565 nm波长范围的最大损耗为0.3 dB/km
G.653	色散移位单模光纤	G.653A	在1 550 nm波长附近具有标称零色散,在1 550 nm波长的最大损耗为0.35 dB/km
		G.653B	在G.653A基础上定义了1 460~1 625 nm波长范围内的色散系数与波长对应的关系
G.654	截止波长移位单模 光纤	G.654A	截止位移光纤的一个基础分类,模场直径大、损耗低
		G.654B	模场直径比G.654.A更大,适用于长距、大容量的WDM传输系统,如海底传输系统
		G.654C	光纤规格特性跟G.654A类似,PMD的要求更严格
		G.654D	光纤规格特性与G.654B类似,但降低了衰减,在1 550 nm波长的最大损耗为0.2 dB/km
		G.654E	规格特性与G.654B类似,更适用于陆缆传输系统
G.655	非零色散移位 光纤	G.655A	在1 550 nm波长附近衰耗最小、色散较小且不为0,可以用于WDM系统
		G.655B	光纤规格特性与G.654A类似,色散斜率更小
		G.655C	光纤规格特性与G.654B类似,PMD的要求更严格
		G.655D	色散特性在C波段和L波段都有较好的表现,更适用于L波段的波分复用系统
		G.655E	光纤规格特性与G.654A类似,对有效面积和非线性效应的控制更严格
G.656	宽带光传输用 非零色散光纤	——	相比G.655支持的波长范围更广,定义了1 460~1 625 nm波长范围内色散大于某个非零值的单模光纤
G.657	弯曲损耗不敏感 光纤	G.657A	部署在接入网中,可用于1 260~1 625 nm波长范围
		G.657B	通常用于接入网末端的短距离(小于1 000 m)连接,特别是在建筑物内部或建筑物附近,可以用于1 260~1 625 nm波长范围

ITU-T: 国际电信联盟电信标准分局 PMD: 偏振模色散 WDM: 波分复用

场景。

2) 新型光纤

随着信号传输速率的持续提升和单模光纤非线性传输逐渐接近香农极限^[19],如何研制出传输性能更优、支撑更大传输容量的新型光纤,已成为业界关注的重点。

目前备受关注的新型光纤主要包括超低损耗大有效面积光纤(G.654E)、空分复用光纤和空芯光纤等。自2016年其标准正式发布以来,G.654E光纤已逐步成为干线网络建设的主要选择。据不完全统计,在2024年建设的光缆中,G.654E光纤占比超过80%。

自2010年非线性传输香农极限提出后,空分复用技术已成为未来传输扩容的重要研究方向。根据复用维度差异,空分复用光纤主要包括多芯光纤、少模光纤和少模多芯光纤3种。目前除多芯光纤在海缆系统中有初步应用外,其他两类主要仍处于实验室探索阶段。例如,NICT于2024年报道了基于15种强耦合模式、在1 001 km传输距离上实现的273.6 Tbit/s数据速率与273.9 Phit/s·km容量距离乘积,创下了多模传输的最高纪录^[20]。2024年,北大与长飞联合,基于7芯×10模光纤完成了55 km的弱耦合SDM传输系统搭建,

传输容量为5.27 Phit/s^[21];2025年,NICT通过单模纤芯分布实现了光频梳再生技术,以PDM QPSK调制方式在13 km的39芯少模多芯光纤中完成了传输实验,这验证了12.7 Phit/s的传输容量^[22]。面对单模光纤传输容量瓶颈与信息流量快速增长之间的矛盾,空分复用光纤的研究与应用探索预计将持续推进。

自20世纪80年代光子晶体概念提出以来,业界对空芯光纤的研究持续不断。2010—2017年,随着反谐振包层结构的提出,空芯光纤的损耗从早期的约1 000 dB/km显著降低至7.7 dB/km左右。2018年,英国南安普顿大学提出的嵌套反谐振无节点光纤(NANF)将损耗降至1.3 dB/km。通过后续结构与工艺的持续优化,2024年基于双嵌套反谐振无节点结构(DNANF)的空芯光纤损耗已降至0.11 dB/km,低于普通实芯单模光纤在1 566 nm波长处的理论损耗极限(0.139 7 dB/km)^[23]。2025年,中国长飞公司在OFC会议上报道了0.05 dB/km的最新记录。鉴于空芯光纤具备超宽带、超低时延、超低传输损耗和超低非线性等本征优势,近年来其在损耗性能上的突破引起了业界的广泛关注。例如,微软收购了在空芯光纤技术方面具有优势的英国Lumenisity公

司,以推动其应用探索^[24];中国电信、中国移动和中国联通三大运营商也联合企业及高校团队,积极开展相关技术与试点应用^[25-27]。展望未来,空芯光纤仍处于发展初期,面临工艺尚未成熟、应用特性需深入验证,以及光缆建设与替换周期较长等挑战。预计空芯光纤将持续完善,并有望在延时敏感的数据中心互联等场景中优先开展试点应用。

2.4 光子集成与光电融合

随着光纤通信技术的持续发展,业界不断探索如何将多种光芯片或光电分立器件进一步集成,以实现更高集成度、更低能耗和更优性能的光子集成技术。与此同时,基于光、电技术各自优势进行功能协同与融合的光电融合技术,已成为近年的研究热点。

1) 光子集成 (PIC)

PIC通过将相同或不同功能的分立光器件集成在一起,其概念最早可追溯至20世纪60年代末^[28]。到20世纪80年代,在光通信快速发展的推动下,光子集成技术取得了显著进展,阵列波导光栅等重要无源器件相继被研制出来。1986年,首个商用PIC——电吸收调制激光器(EML)问世^[29]。2000年以后,随着硅基光电子技术的逐步兴起,PIC的集成度进一步提升,进入新的发展阶段。从集成规模来看,中小规模PIC技术已较为成熟并实现广泛商用;大规模PIC在实验室中的集成度可达 $10^4 \sim 10^5$ 量级^[30]。在材料方面,早期PIC平台以III-V族材料(如InP)为主;近年来,硅基光电子凭借其在更高集成度、互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容性与低成本制造方面的优势日益突出。未来,以硅光为基础平台,结合不同材料体系的异质异构集成技术,具有广阔的发展前景。

从集成方式来看,异构/混合集成是当前重要的发展方向,涵盖光芯片与电芯片之间的集成以及光芯片与光芯片之间的集成。在光电芯片集成中,连接方式已从传统的引线键合逐步演进至2.5D芯片倒装和3D集成技术,如硅通孔(TSV)和氧化物通孔(TOV)。3D集成通过在垂直方向上堆叠光电芯片,可实现更短的互连长度、更高的集成密度和更优的高频性能,然而受限于散热问题尚未完全解决,目前仍以2.5D集成为主,台积电、英特尔等企业已较早布局该领域。在光芯片之间的集成方面,异构/混合集成主要用于实现III-V族激光器与硅光芯片的连接,集成结构也从平面走向立体,涵盖多种2.5D/3D封装方式,其中3D倒装是目前的主流技术方案。

从光子集成技术的长远发展来看,硅基单片集成被认为是未来的终极目标。异质集成能够融合多种材料的优势,实

现系统性能的最优化,其主要实现方式包括晶圆级键合与异质外延生长两种。晶圆级键合通过化学或物理作用以及光刻对准等技术将两片同质或异质晶圆紧密结合,随后再制备芯片结构。该技术目前面临晶圆尺寸匹配、表面处理精度高、无法预先筛选已知良品芯片等挑战,预计仍将在中短期内作为主流技术路线。异质外延生长则是在已制作好的晶圆上,选区外延生长其他材料,进而构建芯片结构。若能在光耦合和异质选区外延生长等关键环节实现突破,硅基单片集成有望成为最接近传统CMOS工艺的异质集成方案,并将作为长期发展的重要方向。

2) 光电融合

光电融合基于光域与电域的技术特性,旨在实现信息处理功能的高效协同或融合。其概念与内涵较为宽泛,本文主要聚焦于面向连接场景的典型光电融合技术——光电共封装(CPO)与光输入输出(OIO)。这些技术推动光连接从板级、设备级向芯片级演进,逐步实现芯片级光互联。

CPO已成为绿色数据中心领域的热点候选技术。该技术将光引擎与专用集成电路(ASIC)芯片共同封装在同一高速基板上,可显著降低电学损耗,从而减少信号衰减,降低系统功耗和成本,并实现更高的集成度。自2020年起,多家企业相继发布CPO样机,其传输容量持续提升。同年,在美国光纤通信展上,英特尔发布了首款25.6 Tbit/s的CPO样机。2022年,美满公司展示了1.6 Tbit/s的CPO光引擎,未来计划支持其51.2 Tbit/s交换机。博通于2024年展示了51.2 Tbit/s CPO交换机及6.4 Tbit/s FR4光引擎,并于2025年6月发布了102.4 Tbit/s交换机。2025年,英伟达宣布即将推出分别支持InfiniBand和以太网的CPO交换机,其带宽分别达到115.2 Tbit/s和409.6 Tbit/s。

目前,CPO被视为提升单通道速率、实现光芯片与交换芯片间单通道速率超过400 Gbit/s的关键技术方案之一,预计将迎来市场的显著增长。据预测,至2029年,3.2 Tbit/s CPO端口数量将超过1 000万个^[31]。

OIO技术是目前业界持续探索的研究方向。该技术面向存算网络,通过将计算/存储芯片与光芯片进行封装集成,实现与外部其他芯片之间的高速光互连。Ayar Labs在该领域开展了持续研究,于2023年展示了与英特尔现场可编程门阵列(FPGA)集成的OIO解决方案,可实现双向4 Tbit/s的数据传输。Nvidia、AMD、Intel、NTT等多家行业巨头已对Ayar Labs进行投资,旨在借助其OIO技术突破人工智能数据传输的瓶颈。

2024年,英特尔发布了与中央处理器实施三维共封装的OIO芯粒,其双向带宽达到4 Tbit/s;曦智科技于2023年

推出光互连产品 Photowave,并在2024年将OIO技术应用于新华三的CXL-O光互连解决方案中。目前,台积电正在开发面向OIO应用的COUPE硅光平台,该平台将扩展处理器(XPU)芯片与CPO光引擎集成于同一中介层上,预计可实现功耗降低90%以上、延迟减少95%以上的显著效益^[32]。

整体而言,光子集成技术正沿两个主要方向演进:一方面,器件集成度持续提高,实现了从分立器件到异质异构集成,并进一步向单片集成发展;另一方面,功能复杂度不断提升,从无源器件扩展到有源/无源混合集成,并朝着光电融合集成的方向推进,最终目标为实现“光-电-连-算”的一体化融合。

3 光纤通信组网技术融合演进

经过数十年发展,光纤通信网络已成为信息基础设施的核心承载平台,在干线网络、城域网、数据中心互联及接入网等多个领域实现了多技术融合与协同演进。面对AI与算力需求提升以及5G/6G等新型业务承载挑战,当前光纤通信网络正持续向更大容量、更远距离、更高智能灵活性及更优能效的方向演进。

3.1 干线网络大容量传输技术

干线网络组网技术的演进始终以持续提升传输容量与距离、增强网络可靠性与灵活性为目标,以适配不断发展的业务需求。PDH、SDH、WDM、OTN/ROADM等技术逐步成为主流组网方式。20世纪80年代,PDH技术开始应用于干线网络,但随着网络规模扩大和业务需求增长,其标准化程度低、信号复接复杂、管理能力弱及仅支持点对点传输等局限性逐渐凸显。SDH技术针对上述问题进行了改进,自90年代初起逐步成为干线网络的主要组网技术,并将最高传输速率从PDH的565 Mbit/s提升至SDH的40 Gbit/s(实际规模商用的速率为10 Gbit/s)。

光放大与WDM技术的出现显著增强了干线网络的传输能力。自20世纪90年代中后期起,SDH数字组网与WDM大容量传输相结合,逐渐成为主流组网方式。至2000年左右,互联网数据业务取代语音业务,成为带宽需求的主要驱动力,面向传统语音业务构建的SDH体系逐渐显现出承载瓶颈。为解决该问题,融合了SDH与WDM技术优势的OTN技术完成标准化,并于2005年后逐步在干线网络中规模部署,至今仍是主流组网技术。OTN技术传输速率也实现了从10 Gbit/s到40 Gbit/s(2008年)、100 Gbit/s(2011年)乃至400 Gbit/s(2023年)的跨越。

此外,全光组网始终是业界重点发展方向。随着光层器

件技术的进步及大带宽业务对灵活调度需求的提升,基于ROADM技术的干线全光网络自2010年起逐步实现规模部署。目前,中国已建成全球规模最大的全光网络。

为满足未来干线网络对大传输带宽的需求,业界正围绕更高单通路速率、更宽传输波段以及空分复用等技术方向持续开展研究。在单通路速率方面,800 Gbit/s及以上速率的技术攻关与产品研发已广泛启动,未来需结合多波段扩展、先进均衡算法及高波特率新型光电器件等多种手段以实现长距离高性能传输。然而,为支持200 Gbaud及以下的信号处理能力,仍需开发更高带宽的光电芯片,包括引入如薄膜铌酸锂等新型调制器材料。目前,全球的主流设备商已可提供800 Gbit/s设备样品,部分厂商更已研制出支持1.6 Tbit/s速率的数字信号处理(DSP)芯片及设备,并逐步开展试点商用。

在波段扩展方面,除400 Gbit/s系统已引入C+L波段外,进一步扩展至E、S、U等波段成为新的候选方案。全球实验室内多波段系统(涵盖O、E、S、C、L和U 6个波段)的单纤传输容量已达402 Tbit/s^[33],传输距离为50 km,但距离实际商用仍面临诸多挑战,包括多波段放大器设计,以及配套器件如多波段光源、相干光模块、合分波器和波长选择开关(WSS)等的关键技术攻关。

在空分复用方面,已报道多项实验与试验结果,在传输容量与系统性能方面均取得显著进展。部分基于多芯光纤的空分复用技术已在海缆系统中尝试商用,但距离规模化部署仍存在较大距离。弱耦合/强耦合光纤制备、空分集成放大、多通道DSP处理及高性能连接器件等关键技术尚待进一步突破。部分重要实验结果已在本文“新型光纤”章节中予以介绍。

3.2 城域网络多样化传送技术

城域网络在引入干线网络相关技术进行构建的同时,也根据所承载的主流业务从时分复用(TDM)语音向分组数据转变,持续增强分组化承载能力。截至目前,伴随承载业务需求的变迁与组网技术的革新,城域传送网的分组化演进大致经历了3个阶段。

2000—2006年为第1阶段,以基于SDH的多业务传送平台(MSTP)为代表技术。该技术在继续承载TDM语音业务的基础上,引入通用成帧规程(GFP)等数据封装协议,实现对分组类业务的透明传送与尽力而为的承载。

2006—2015年为第2阶段,为适应固定网络和移动网络全面IP化发展及其电信级传送需求,先后出现了多协议标签交换-流量工程(MPLS-TE)、电信级以太网、分组增强

型 OTN，以及基于 MPLS-TP 的分组传送网（PTN）等代表性技术方案，分组承载能力显著增强。

2015 年至今为第 3 阶段，为满足云计算/数据中心互联及 5G 网络切片等发展需求，应对网络扩展性、多业务融合承载与确定性保障等挑战，业界推动了灵活光传送（FlexO）、灵活以太网（FlexE）和 SPN 等创新技术的落地。网络建设逐步演进为综合业务传送网和数据中心互联（DCI）等不同形态，其中 DCI 主要依托 WDM/OTN 技术承载，相关设备形态也根据数据中心具体需求进行了针对性优化。

展望未来，在 AI 和 5G-A/6G 等应用驱动下，城域传送网的发展重点将从固定与移动承载的持续演进，转向智算中心互联等新兴场景。随着 AI 大模型训练与推理能力的不断发展，针对智算中心内高性能服务器图形处理器（GPU）间后端互联（Scale up）及服务器间前端互联（Scale out）等方面日益增长的传输需求，大带宽、低时延、高通量、可靠拥塞控制与无损传输等功能的实现，亟需城域传送网与城域数据网协同演进予以支撑。

支持智算中心分布式部署的 800 Gbit/s、1.6 Tbit/s 及更高速率传输技术，适用于智算中心内部互联的 800 Gbit/s、1.6 Tbit/s、3.2 Tbit/s 等多类型高速光模块技术，旨在提升调度效率与降低能耗的多端口光电路交换（OCS）技术，以及在组网与连接层面多维度发展的光电融合技术等，预计将成为未来几年的关键技术关注点。

3.3 接入网络全光接入技术

作为宽带接入的主流技术，无源光网络（PON）在速率与技术融合上持续演进，目前已进入千兆光网规模部署阶段，并正向万兆光网试点过渡。基于其关键技术特征的演进，PON 技术的发展大致可划分为 4 个主要阶段，各阶段相

应技术标准的演进情况如表 3 所示。

一是 PON 概念兴起与初步应用阶段（约 1995—2005 年）。20 世纪 90 年代，随着万维网（WWW）的兴起，数字用户线（DSL）技术、Cable modem 技术及 PON 技术等新型宽带接入技术成为标准化与产业竞争的焦点。全业务接入网联盟（FSAN）于 1995 年成立，推动 ITU-T 于 1998 年发布首个 PON 国际标准 G.983.1。该标准采用基于异步传输模式（ATM）的链路层封装技术。然而，由于当时从端局到用户侧主要基于电缆连接，基于铜缆的 xDSL 技术得到广泛应用，而基于 ATM 无源光网络（APON）因光缆基础设施缺乏与成本较高等原因，未获得大规模部署。

二是 1 Gbit/s 速率 PON 的规模应用启动阶段（约 2005—2015 年）。随着 IP 技术快速取代 ATM，ITU-T 与 IEEE 分别于 2003 年和 2004 年发布了第 2 代 PON 系统标准——GPON 与 EPON。GPON 采用通用封装方法（GEM）协议替代了 APON 中的 ATM 封装，而 EPON 直接采用以太网帧传输协议。与此同时，用户对带宽需求的持续增长使 DSL 技术面临明显瓶颈，仅能通过牺牲传输距离以提升速率。因此，铜光混合的 FTTx 接入网架构被多数运营商所采纳。中国电信于 2006 年逐步停止长距离铜缆建设，2007 年启动 EPON 设备集采；中国网通也于同年提出“光进铜退”计划，并在北京等城市开展 FTTN 试点。至此，PON 技术正式步入规模商用阶段。

三是 10 Gbit/s 速率 PON 的规模应用的启动阶段（约 2015—2025 年）。自 2007 年起，在中国运营商的推动下，GPON 与 EPON 进入大规模部署阶段。同期，ITU-T 与 IEEE 分别推进 10 Gbit/s 速率 PON 标准的制定：ITU-T 于 2010 年发布 G.987 系列标准，确立 XG-PON 的技术要求；IEEE 于 2009 发布 IEEE 802.3av 标准，定义 10G-EPON 规范；ITU-T 又于 2016 年发布 G.9807 标准，明确对称型 XGS-PON 的规

表 3 TDM-PON 技术标准体系演化

技术体系	ITU-T	速率	IEEE	速率
第 1 代	APON (ITU-T G.983x)	上行: 155 Mbit/s 下行: 622 Mbit/s	—	—
第 2 代	GPON (ITU-T G.984x)	上行: 1.25 Gbit/s 下行: 2.5 Gbit/s	EPON (IEEE 802.3ah)	上行: 1 Gbit/s 下行: 1 Gbit/s
第 3 代	XG-PON/XGS-PON (ITU-T G.987x/G.9807)	上行: 2.5 Gbit/s、10 Gbit/s 下行: 10 Gbit/s	10G-EPON (IEEE 802.3av)	上行: 10 Gbit/s 下行: 10 Gbit/s
第 4 代	50G-PON (ITU-T G.9804x)	上行: 25 Gbit/s、50 Gbit/s 下行: 50 Gbit/s	25G/50G-EPON (IEEE 802.3ca)	上行: 25 Gbit/s、50 Gbit/s 下行: 25 Gbit/s、50 Gbit/s
APON: 基于无源光网络 EPON: 以太网无源光网络		GPON: 千兆无源光网络 IEEE: 美国电气电子工程师学会		ITU-T: 国际电联电信标准化局 XG-PON: 10G 无源光网络
				XGS-PON: 10G 对称无源光网络

范。XG-PON与10G-EPON的带宽较前代提升4~10倍,并可实现平滑演进。2021年,工信部提出推进10 Gbit/s PON规模部署的建设目标,进一步加速了其商用进程。

四是50 Gbit/s速率PON的应用试点启动阶段(自2025年起)。2018年,ITU-T启动了单波长50G-PON的标准制定工作,命名为“G.HSP(Higher Speed PON)”,并于2021年9月发布第1版50G-PON标准G.989x系列。2022年9月,ITU-T批准了该标准的首个修订版本;2023年2月又发布增补标准,新增对称50G-PON光接口技术规格,并支持GPON、XG(S)-PON与50G-PON 3代系统共存。目前,50G-PON已基本完成技术标准化工作。其带宽能力为XG-PON的5倍,并在时延、抖动和可靠性等方面实现技术优化,具备提供确定性业务体验的能力,可支撑更丰富的应用场景,成为“万兆光网”主要技术选择,目前已启动试点部署。

另外,随着视频直播、在线教育、虚拟现实(VR)、超高清视频等千兆应用的广泛发展,用户对家庭网络、企业驻地网等驻地网络的体验需求持续提升。当前,驻地网络仍存在上网质量不佳、Wi-Fi设备能力受限、回传网络质量不稳定及运营商运维手段不足等问题。FTTR作为一种全新的驻地网内组网技术,通过与Wi-Fi协同优化组网,为上述问题提供了有效的解决方案,目前已实现初步规模商用。截至2024年底,中国FTTR用户规模已突破3 000万户。

面向未来更多应用需求,更高速率的100/200G-PON目前已进入技术与标准预研阶段,预计仍需5~10年时间实现成熟。同时,业界对WDM PON的发展也保持开放研究态度。ITU-T于2022年9月启动下一代更高速PON预研项目G.Sup.VHSP,重点关注每波长50 Gbit/s以上光接入物理层所面临的挑战与候选技术,涉及信号调制、多址接入(如共享子载波、TDM、WDM等)、光发射/接收机设计及波长方案等领域。当前光信号处理的调制解调技术主要包括IM-DD与多阶调制-相干检测两类方案。IM-DD在单波长50 Gbit/s以上速率接入应用中面临色散、功率预算、非线性等光层限制,以及波长选择与低成本高功率实现等挑战;而基于相干检测的100G/200G PON具有更优的信号传输能力和更灵活的组网配置潜力。具体技术路线选择仍有待业界持续研究。2024年OFC会议上,加拿大麦吉尔大学首次报道了O波段基于硅光集成的200G相干PON实验^[34];2025年OFC会议中,诺基亚贝尔实验室展示了基于硅光、支持突发波长测量与快速本振调谐的100G相干PON实验系统^[35]。

3.4 管理控制

光网络管控系统的发展结合了组网技术演进与新型业务

应用需求的变化,经历了传统网络管理、分布式控制与转发分离、集中式软件定义网络(SDN)架构,以及引入人工智能实现智能化管控等不同阶段。

在传统网络管理架构中,光通信网络及设备主要依赖厂商管理系统及运营商跨厂商管理系统进行控制。该系统通过定义北向接口,实现厂商管理系统与跨厂商系统之间的互通,以解决跨域网络的统一管控问题。

21世纪初,自动交换光网络(ASON)概念被提出。ASON通过引入控制平面,实现了控制与转发的分离,将控制平面功能分布于各传送网设备中,并依托信令协议完成网络控制。2008年前后,ITU-T发布G.8080 ASON体系架构,IETF也基本完成基于通用多协议标签交换(GMPLS)扩展的RFC规范制定,这标志着ASON国际标准化工作趋于成熟。该技术随后在巴西电信、西班牙电信等海外运营商网络中实现规模部署。中国自2004年起开展省内干线试验网建设,2006年中国电信首次在省际干线网络中采用ASON技术,用于承载大客户专线和高等级数据业务。中国电信与中国联通还相继启动了基于ROADM网络的波长交换光网络(WSON)建设,采用分布式计算策略,由首节点负责业务路径计算与端到端连接的建立^[36]。

在光接入网领域,传统网络管理协议操作复杂,海量固定终端设备为接入网运维带来巨大挑战。2004年,宽带论坛(BBF)发布TR-069技术报告,提出基于IP的终端远程管理协议。该协议采用互联网C/S架构构建管理体系,并定义灵活可扩展的数据模型,有效解决了海量终端的管理效率问题。目前在中国光接入网中,无论是FTTH家庭智能网关还是FTTR主网关,均采用传统网管协议与基于IP的管理协议并存的双栈管理架构。

2012年4月,ONF发布SDN白皮书,获得业界广泛认同,SDN在光传送网中的应用随之成为研究热点。ITU-T、IETF、ONF等多个标准化组织分别从架构、YANG模型和信息模型等方面展开研究。ITU-T扩展了原有ASON控制组件架构,结合SDN技术特点,形成G.7701(通用管控)、G.7702(SDN管控)等系列规范,构建了管控一体化(MCC)架构。IETF基于传送网的抽象与控制(ACTN)架构,形成涵盖体系架构、接口及层协议扩展等一系列标准。ONF定义了传送网管控新型模型TAPI 2.0,适用于L0~L2层的技术建模。软件定义光网络(SDON)在中国的标准化工作已基本完成,三大运营商也已部署基于SDN架构的传送网管控系统。

随着AI技术的引入,基于开放接口架构,融合大模型、机器学习与数字孪生等技术,实现网络管控与运维的智能化

已成为当前光网络管控的研究热点。中国已基本完成网络智能化应用场景及分级评估等相关标准的研究。2025年成为网络智能体应用元年,光通信网络智能体相关研究加速推进,传送网故障管理智能体、接入网家宽装维智能体等标准研究相继立项,相应的测试评估与验证工作也在逐步展开。

图3为光网络智能管控与人工智能结合示意。在设备智能层,通过引入端侧大模型提升设备智能化水平,实现多维度网络态势感知,并基于感知结果开展预测性、预防性的分布式网络控制。在管控智能层,依托统一的采集能力,实现对网络资源及哑资源的全面采集,结合光网络数字孪生与AI技术,形成网络仿真分析等能力;通过智能体实现感知、分析、决策与执行的闭环,增强网络自智能能力,并协同传统网管流程,以开放接口支持运维人员参与管控。在运维智能层,借助大模型赋能智能体应用,增强人机交互能力,实现端到端自动化编排,提升运维效率与水平。

4 光纤通信技术未来发展展望

光纤通信网络作为新型信息基础设施的关键组成部分与承载底座,在5G/6G、人工智能、算力及数据中心等多种新型应用与业务的推动下,其基础技术与组网技术正持续创新与演进,支撑千兆光网向万兆光网的平滑演进,未来发展前景广阔。

在基础技术发展方面,调制、探测、放大和光纤等技术将依托新型光电/电光材料,持续向高速率、宽频谱、集成

化与低能耗方向演进。在光通信调制与探测方面,直调直检光模块速率预计至2030年将达到3.2 Tbit/s,超长距相干光收发模块速率预计同期可达800 Gbit/s甚至1.6 Tbit/s量级。硅光平台通过异质异构集成与光电融合技术,显著提升集成规模与器件性能,发展路径预计从2.5D/3D集成、中等规模异质异构集成,演进至2035年的大规模异质异构集成,并逐步实现中等规模光电单片集成,推动高密度低能耗光互连、光计算与光传感等领域的进步。同时,CPO将逐步投入应用,OIO的应用场景亦持续扩展。

在光信号放大方面,支持多波段拓展的超宽谱光放大器有望逐步突破,尤其是SOA在O波段的应用将进一步扩展,面向SDM等场景的新型光放大技术也将持续研究。在新型光纤方面,除海缆领域继续应用空分复用技术外,也有可能短距互联等场景发掘新需求,但整体仍处于实验室研究阶段。G.654E光纤将逐步成为干线新建线路的主流选择,空芯光纤在制备工艺与应用探索方面预计取得更多进展,其在数据中心互联等实用化场景中的规模应用时间节点目前仍不确定。

在组网技术发展方面,干线网络、城域网络和接入网络整体呈现向高速化、融合化与智能化演进的趋势。在干线网络中,400 Gbit/s OTN/ROADM持续规模化应用,下一代主流速率技术将更多聚焦于400 Gbit/s+,并逐步向更高速率演进。根据历史发展经验推断,1.6 Tbit/s有望成为未来干线网络的主要速率选择。同时,基于多波段扩展、空分复用和空芯光纤等技术的超大容量传输,预计在未来3~5年内仍以实验与试验探索为主。在城域网络方面,OTN/ROADM/SPN等多样化组网技术持续部署与演进,并积极面向6G承载、智算中心分布式互联等新需求,推动新型光通信技术的发展,进一步深化分组技术与光层技术的融合。在接入网络中,10G PON继续规模部署,50G PON应用试点规模逐步扩大,预计需至少3~5年实现规模商用。下一代更高速率B100G PON的预研工作持续推进,其信号传输速率与技术制式将逐步明确。FTTR结合Wi-Fi技术的应用部署范围持续扩展,为未来新业务构建高质量接入环境。以PON为代表的光接入网络正不断拓展至工业PON、工业光总线、车载光通信等更多应用场景。在管理控制方面,光网络将逐步实现设

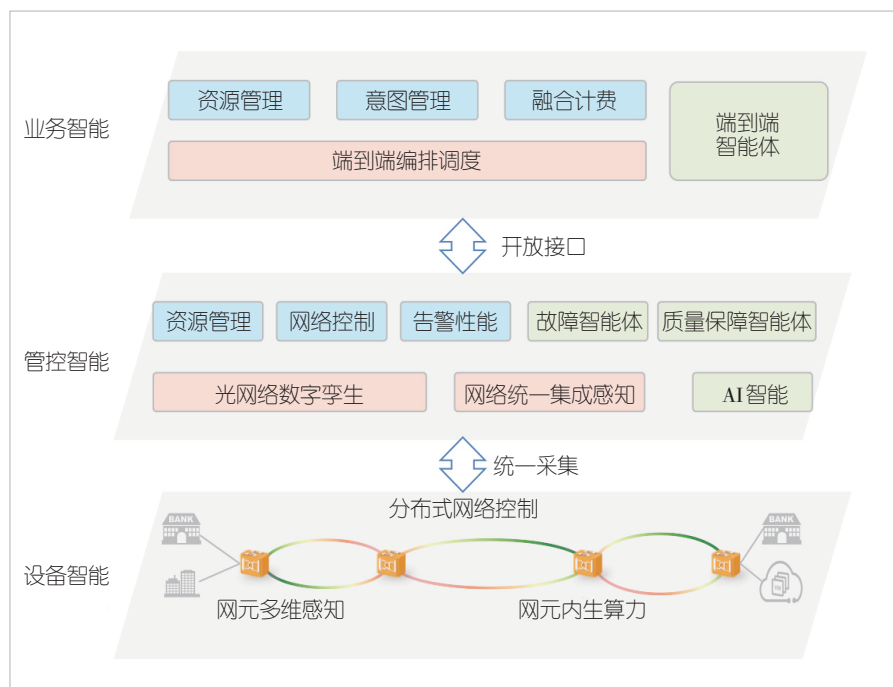


图3 光网络智能管控与人工智能结合示意图

备层智能、网络管控系统智能化及业务运营智能化,进一步提升整体智能化水平。此外,基于光纤介质的通信与感知融合技术日益受到业界关注,目前已在地震波探测、管道检测等领域开展探索性应用,未来应用范围将进一步扩大。

随着产业数字化与数字产业化进程的不断深入,高速光纤通信技术面临强劲的发展需求。然而,中国在该领域仍存在多方面的短板与挑战,包括原始理论创新不足、新型材料研发滞后、超高波特率光电器件关键技术尚未突破、高端平台制备工艺及核心仪器仪表依赖外部供应等问题。此外,中国产业同质化竞争加剧以及国际技术环境的持续压制,也进一步制约了行业的高质量发展。面对这一态势,亟需整合产学研用各方资源,充分发挥协同优势,围绕核心产品与工艺装备攻关、国际标准制定与产业应用推广等重点环节加强协作。应积极利用如ITU-T近期发起的ION-2030等国际项目契机,巩固并提升中国在全球光通信领域的竞争实力,推动光纤通信技术及产业实现健康、有序发展,为制造强国、网络强国和数字中国战略的顺利实施提供坚实支撑。

5 结束语

在国家政策引导、新兴业务需求拉动及产业各界的协同努力下,中国光纤通信技术实现了从跟随追赶到部分领跑的跨越,在技术研究、产品开发与规模部署等方面取得显著进展,目前已步入千兆网络广泛普及、万兆光网初步启动的新阶段。回顾其发展路径,光纤通信技术始终以基础技术突破与融合创新为主要演进模式。面向未来AI、6G与算力应用等高需求场景,亟需重点突破超高速光电处理、新型材料、光子集成与光电融合、新型光纤及放大等基础技术,并推动干线网、城域网(含智算中心互联)与接入网等多维组网技术的深度融合。与此同时,人工智能与光通信技术的双向赋能趋势日益明显。展望中国高速光纤通信技术的发展,机遇与挑战并存。呼吁业界围绕关键技术与产业瓶颈,协同攻坚、有序推进创新,持续强化新型信息基础设施的承载能力,从而支撑中国新质生产力加快形成,为数字经济高质量发展提供坚实根基。

参考文献

- [1] 赵梓森. 光纤通信的过去、现在和未来 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 1-3. DOI:10.3788/AOS201131.0900109
- [2] 工业和信息化部. 2025年一季度通信业经济运行情况 [R]. 2025
- [3] 王德, 李学干. 半导体激光器的最新进展及其应用现状 [J]. 光学精密工程, 2001, (3): 279-283. DOI: 10.3321/j.issn: 1004-924X. 2001.03.018
- [4] SUN H, WU K T, ROBERTS K. Real-time measurements of a 40 Gb/s coherent system [J]. Optics express, 2008, 16(2): 873-879. DOI:

- 10.1364/oe.16.000873
- [5] SHI Y, LI X, ZOU M J, et al. 103 GHz germanium-on-silicon photodiode enabled by an optimized U-shaped electrode [J]. Photonics research, 2024, 12(1): 1-6. DOI: 10.1364/prj.495958
- [6] HAN C H, JIN M, TAO Y S, et al. Ultra-compact silicon modulator with 110 GHz bandwidth [C]//Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2022: 1-3
- [7] HE Y T, LIU H, SUN C Z, et al. Dual-band 390 gbps high coupling efficiency thin film lithium niobate modulator with 3-dB bandwidth exceeding 110 GHz [C]//Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2025: 1-3
- [8] YOKOYAMA S, YIN Y X, YAZDANI S A, et al. 200 GBd electro-optic PLZT modulator for O-band transmission [C]//Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2025: 1-3
- [9] BLATTER T, KULMER L, XU C R, et al. Plasmonic ring resonator modulator demonstrating IM/DD >400G per lane [C]//Proceedings of ECOC 2024; 50th European Conference on Optical Communication. VDE, 2024: 418-421
- [10] HENI W, BAEUERLE B, LEUTHOLD J, et al. Plasmonic photonic integrated circuits: technology, performance, applications, and future prospects [C]//Proceedings of ECOC 2024; 50th European Conference on Optical Communication. VDE, 2024: 636-639
- [11] LEUTHOLD J, SMAJIC J, FEDORYSHIN Y, et al. Plasmonic-based devices with >500 GHz bandwidth [C]//Proceedings of ECOC 2024; 50th European Conference on Optical Communication. VDE, 2024: 1968-1971
- [12] AGRELL E, KARLSSON M, POLETTI F, et al. Roadmap on optical communications [J]. Journal of optics, 2024, 26(9): 093001. DOI: 10.1088/2040-8986/ad261f
- [13] 文建湘, 庞拂飞, 杨媛媛, 等. 超宽带光纤放大器研究进展与发展瓶颈(特邀) [J]. 光学学报, 2024, 26(9): 1-16. DOI: 10.3788/AOS250901
- [14] RENAUDIER J, MESEGUER A C, GHAZISAEIDI A, et al. First 100-nm continuous-band WDM transmission system with 115Tb/s transport over 100km using novel ultra-wideband semiconductor optical amplifiers [C]//Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2017: 1-3. DOI: 10.1109/ECOC.2017.8346084
- [15] IQBAL M A, KRZCZANOWICZ L, PHILLIPS I, et al. 150nm SCL-band transmission through 70km SMF using ultra-wideband dual-stage discrete Raman amplifier [C]//Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2020: 1-3
- [16] KOBAYASHI T, SHIMIZU S, NAKAMURA M, et al. 50-Tb/s (1 tb/s × 50 ch) WDM transmission on two 6.25-THz bands using hybrid inline repeater of PPLN-based OPAs and incoherent-forward-pumped dra [C]// 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2022
- [17] CCSA. 空分复用光器件技术研究 [R]. 2025
- [18] 陈皓. 数据中心用多模光纤技术及发展趋势 [J]. 现代传输, 2019, (6): 11-14
- [19] ESSIAMBRE R J, KRAMER G, WINZER P J, et al. Capacity limits of optical fiber networks [J]. Journal of lightwave technology, 2010, 28(4): 662-701. DOI: 10.1109/JLT.2009.2039464
- [20] VAN DEN HOUT M, DI SCIULLO G, LUÍS R S, et al. Transmission of 273.6 Tb/s over 1001 km of 15-mode multi-mode fiber using C-band only 16-QAM signals [J]. Journal of lightwave technology, 2024, 42(3): 1136-1142
- [21] QIAO G, YANG Y, JI H L, et al. 5.27 peta-bit/s weakly-coupled SDM-WDM transmission over 55-km 10-mode 7-core fiber for SDM-priority scheme [C]//Proceedings of Optical Fiber

- Communication Conference (OFC). IEEE, 2024
- [22] ORSUTI D, PUTTNAM B J, LUÍS R S, et al. S/C/L-band transmission in few-mode MCF with optical frequency comb regeneration via single-mode core seed distribution [J]. Journal of lightwave technology, 2025, 43(4): 1786–1793
- [23] SATO S, KAWAGUCHI Y, SAKUMA H, et al. Record Low Loss Optical Fiber with 0.1397 dB/km [C]// 2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2024
- [24] SAKR H, BRADLEY T D, JASION G T, et al. Hollow core NANFs with five nested tubes and record low loss at 850, 1060, 1300 and 1625nm [C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC). IEEE, 2021
- [25] 中国移动. 中国移动开通全球首个800G空芯光纤传输技术试验网 [EB/OL]. [2025-06-28]. https://www.10086.cn/aboutus/news/groupnews/index_detail_50009.html
- [26] 中国通信网. 中国电信联合业界发布全球首个单波1.2Tbit/s、单向超100Tbit/s空芯光缆传输系统现网示范工程 [EB/OL]. [2025-07-08]. <https://www.c114.com.cn/news/117/a1265976.html>
- [27] 通信世界网. 中国联通携手北理工、上海诺基亚贝尔及长飞突破空芯光纤单波传输速率记录 [EB/OL]. [2025-07-08]. <http://www.cww.net.cn/article?id=589787>
- [28] MILLER S E. Integrated optics: an introduction [J]. The bell system technical journal, 1969, 48(7): 2059–2069
- [29] KAWAMURA Y, WAKITA K, ITAYA Y, et al. Monolithic integration of InGaAs/InP DFB lasers and InGaAs/InAlAs MQW optical modulators [J]. Electronics letters, 1986, 22(5): 242–243. DOI: 10.1049/el:19860166
- [30] PEREZ-LOPEZ D, TORRIJOS-MORAN L. Large-scale photonic processors and their applications [EB/OL]. [2025-06-28]. <https://www.nature.com/articles/s44310-025-00075-4>
- [31] Lightcounting. A resurgence in CPO development [EB/OL]. [2025-06-28]. <https://www.lightcounting.com/newsletter/en/december-2024-aocs-dacs-linear-drive-pluggable-and-co-packaged-optics-303>
- [32] ANAND. Forum list [EB/OL]. [2025-06-25]. <https://www.anandtech.com/show/21373/tsmc-adds-silicon-photonics-coupe-roadmap-128tbps-on-package>
- [33] PUTTNAM B, LUÍS R, PHILLIPS I, et al. 402 Tb/s GMI data-rate OESCLU-band transmission [EB/OL]. [2025-06-25]. <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=ofc-2024-Th4A.3>
- [34] ZHANG J S, WEI Z X, MISAK S, et al. First demonstration of 200-G coherent PON at O-band with heterogeneously-integrated SiP tx and rx with lasers [C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024. IEEE, 2024
- [35] BORKOWSKI R, STERN B, VIJAYAN K, et al. Burst-mode coherent PON upstream with rapid wavelength measurement and fast local oscillator tuning over 20 nm [C]// 2025 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2025
- [36] 吕凯, 齐斌, 钟胜前, 等. ROADM全光交换网络关键技术发展与应用展望 [J]. 电信科学, 2022, 38(7): 37–42

作者简介



张海懿, 正高级工程师, 中国信息通信研究院技术与标准研究所所长; 主要从事高速光通信、量子信息和人工智能等领域的技术研究、产业咨询与标准制定等工作; 曾获国家科技进步奖二等奖3次, 中国通信标准化协会科学技术奖一等奖3次、二等奖2次, 中国通信学会科学技术奖二等奖2次, 中国标准创新贡献奖三等奖1次, 2013年享受政府特殊津贴; 已发表论文10余篇, 提交国际标准文稿10余篇, 出版专著2部。