综述

光纤通信空分复用技术研究进展分析

赖俊森[1]，汤瑞[1]，吴冰冰[1]，吴文宣[2]，李宏发[2]，刘国军[3]，赵文玉[1]，张海懿[1]

（1. 中国信息通信研究院技术与标准研究所，北京 100191；
2. 国网福建省电力有限公司，福建 福州 350003；
3. 全球能源互联网研究院，北京 102209）

摘　要：带宽容量需求的快速增长驱动光纤通信技术不断演进，目前多芯光纤复用、少模光纤复用、少模多芯光纤复用和轨道角动量模式复用等空分复用技术成为业界的关注焦点。基于此，对空分复用技术涉及的新型光纤设计、模式转换与控制、信道复用/解复用、光放大等关键技术及其研究进展进行了分析，同时对其技术特征进行了对比总结，并对光纤通信空分复用技术目前存在的问题和未来发展的应用前景进行了探讨和展望。

关键词：光纤通信；空分复用；多芯光纤；少模光纤；轨道角动量

中图分类号：TN929.11　　**文献标识码：**A

doi: 10.11959/j.issn.1000−0801.2017237

Analysis on the research progress of space division multiplexing in optical fiber communication

LAI Junsen[1], TANG Rui[1], WU Bingbing[1], WU Wenxuan[2],
LI Hongfa[2], LIU Guojun[3], ZHAO Wenyu[1], ZHANG Haiyi[1]

1. Technology and Standards Research Institute,
China Academy of Information and Communication Technology, Beijing 100191, China
2. State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350003, China
3. Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China

Abstract: The evolution of optical fiber communication technology is driven by the ceaseless growth of capacity demand of Internet. Space division multiplexing (SDM) based on multi-core fiber, few-mode fiber, few-mode multi-core fibers and orbital angular momentum has become the focus of academy and industry. Key technologies and latest research progress were reviewed, including novel fiber design, spatial mode conversion, spatial channel de/multiplexing and optical amplification. Based on the comparison and analysis of four kinds of SDM technologies, their bottlenecks and potential future application were also discussed.

Key words: optical fiber communication, space division multiplexing, multi-core fiber, few-mode fiber, orbital angular momentum

---

收稿日期：2017−06−14；**修回日期：**2017−07−31

基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.61471128，No.61671159）；国家高技术研究发展计划（“863”计划）基金资助项目（No.2015AA015502）；国家电网公司科技项目（No.SGFJ0000KXJS1600143）

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61471128, No.61671159), The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(No.2015AA015502), State Grid Corporation of Science and Technology Project(No. SGFJ0000KXJS1600143)

1　引言

近年来随着高清视频、云计算和物联网等新兴业务与应用的蓬勃发展，网络带宽需求的增长日益加速。根据 Cisco 公司预测，2015—2020 年全球 IP 流量将增长 3 倍，在 2020 年达到每月 194 EB，其中移动终端数据流量的年均复合增长率更高达 53%[1]。光纤通信技术和光网络作为支撑整个互联网的核心技术与基础设施，从 20 世纪 80 年代开始，经历了时分复用、波分复用和相干光通信等数代发展，目前的商用光通信系统能够实现基于双偏振复用、正交相移键控（quadrature phase shift keying，QPSK）调制和相干检测的单波长 100 Gbit/s 速率和单纤约 10 Tbit/s 传输容量[2]。

未来，随着 400 Gbit/s 和 1 Tbit/s 等超 100 Gbit/s 高速光传输技术的演进和发展，通过提高电信号波特率，引入高阶调制格式，例如正交幅度调制（quadrature amplitude modulation，QAM）以及扩展光纤 C+L 波段传输窗口等方式，可以进一步提高单纤传输容量[3]。但是，由于模拟前端器件的带宽速率电子瓶颈限制（最高约 75 GHz）以及后端数字信号处理（digital signal processing，DSP）器件的制程能力和集成度逐渐逼近摩尔定律极限，通过提高电信号波特率提升光通信带宽容量的技术路线将面临越来越大的困难。同时，高阶调制格式的引入将对光传输系统的传输性能提出更高的要求，由于光纤非线性效应的存在和香农信道容量极限的限制，在光纤通信中采用高阶调制提升带宽容量的技术路线在实际应用中同样面临诸多局限。总体而言，业界普遍认为单模光纤（single mode fiber，SMF）传输容量的极限约为 100 Tbit/s，进一步提升的空间已十分有限[4]。未来数年内，光网络传输能力的增长乏力与互联网业务的带宽饥渴之间的矛盾将导致带宽危机（capacity crunch），这已经成为光通信业界亟待解决的一个重要问题。

近年来广受关注的空分复用（space division multiplexing，SDM）技术是突破单纤传输容量极限、破解光传输网络带宽危机的一个重要技术方向[5]。具有代表性的空分复用传输实验中的光纤传输容量与总频谱效率如图 1 所示[6]，其中标准单模光纤的传输容量极限约为 100 Tbit/s[7]，少模模式复用的传输容量可以突破 115 Tbit/s[8]，而多芯复用可以大幅提高单光纤传输容量至 2.15 Pbit/s[9]，而通过将多芯复用和少模复用进行组合，还可以进一步提高传输容量与频谱效率[10-12]。

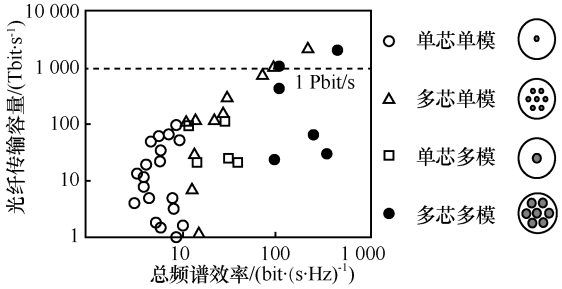


图 1　具有代表性的空分复用传输实验中的光纤传输容量与总频谱效率

与通过光纤集束来提高单根光缆中光纤密度的传统方式不同，光纤通信中的 SDM 技术主要包括在同一光纤包层内部放置多个纤芯的多芯复用（multi-core multiplexing，MCM）方式，在同一纤芯内部同时传输若干线偏振（linear polarization，LP）模式的少模复用（few-mode multiplexing，FMM）方式，将多芯复用和少模复用相结合的少模多芯复用（few-mode multi-core multiplexing，FM-MCM）方式以及利用光束的不同螺旋相位波前进行正交复用的轨道角动量（orbital angular momentum，OAM）方式。本文首先对上述 4 种 SDM 技术的基本原理、光纤特性、模式转换、复用器件、放大技术和研究进展等方面进行综述，其次对各种 SDM 方案的技术特征和研究现状进行横向对比与分析，最后对 SDM 技术研究目前存在的主要问题以及未来在光纤通信中进行推广应用的前景进行探讨和展望。

2 多芯复用技术

MCM 是提升单纤容量的直观方式，与在同一套管内放置多根 SMF 的集束光纤[13]方式相比，多芯光纤（multi-core fiber，MCF）能够有效提升光纤空间密度。从 20 世纪 80 年代起，日本和美国的光纤厂商在多芯光纤制造领域已有多年技术积累[14]，用于系统传输容量实验的 MCF 纤芯数量也从早期的 7~9 芯提升至 20~30 芯[15]，并采用异质结构和沟道槽辅助等技术进一步降低芯间串扰[16]。MCM 系统的关键技术包括 MCF 设计、扇入扇出复用、多芯光纤放大、多芯对准熔接和收发机集成等。MCF 与 SMF 的有效面积、损耗和色散等各项性能参数与特性接近，能够支持单光纤中的 Pbit/s 量级传输容量，并提供基于空间复用的交换维度[17]。

2.1 多芯光纤

多芯光纤的结构参数设计和性能是影响多芯复用技术发展与应用的关键因素。典型的 MCF 纤芯结构分布如图 2(a)所示，主要包括中心对称六边密排（HCPS）、单环型（ORS）、双环型（DRS）和阵列型（AS）等。通过新型 MCF 结构设计，能够在控制芯间串扰的条件下增加纤芯复用数量，但提升纤芯数量和芯间距将导致包层直径的增加，降低多芯光纤的机械性能与制造可靠性，目前可实用化 MCF 的最大纤芯复用数量为 30~50 芯[18]。通过在 MCF 折射率设计中采用沟道辅助结构，如图 2(b)所示，能够大幅降低 MCF 的芯间串扰，从而减小芯间距，提高 MCF 的纤芯密度。其中，沟道内径、直径和折射率差的设计对于 MCF 的性能参数都会产生影响，各纤芯之间的芯间串扰、芯区模场面积和截止波长 3 个重要参数之间存在相互制约关系，无法同时达到最优，在 MCF 设计中需要进行折中处理[19]。

对于相同纤芯结构的 MCF，随着光纤长度的增加，其机械结构中不可避免的宏弯和微弯将导致各纤芯之间光信号串扰增大，限制其可用传输距离。通过改变 MCF 各纤芯的截面形状、尺寸、芯间距和折射率等参数，可以形成异质结构 MCF[16]，如图 2(c)所示，异质结构能够增加各芯区之间光信号的传播常数差异，大幅降低由于光纤弯曲而引入的芯间串扰，但是不同纤芯设计将引入光传输时延差，不仅会增加额外传输损耗，并且对于生产工艺和对准熔接提出更高的要求。

对于 MCF 而言，提高纤芯数量、降低纤芯间距将导致光信号芯间串扰出现线性增长，并且芯间串扰引入的光信号传输损伤随传输距离线性累积[20]。对于 100 Gbit/s 光通信系统中广泛采用的 DP-QPSK 调制格式，在 MCF 中进行 1 000 km 传输要求各芯间串扰小于−50 dB[17]。根据基于 12 芯 MCF 的 14 350 km 传输实验报道[21]以及基于光功率耦合法对长飞公司 7 芯光纤样品的实际测试结果可知，对于芯间距大于 40 μm 的低纤芯数量 MCF，其芯间光功率串扰低于−60 dB，芯间隔离度能够满足千公里量级的传输需求。

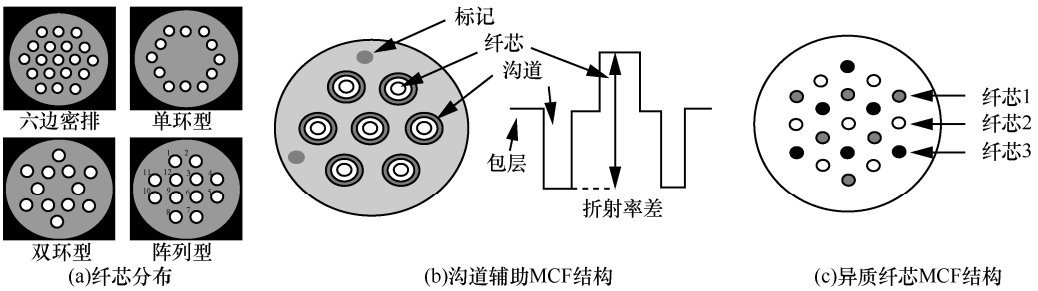


图 2 典型的多芯光纤

2.2　扇入扇出

在 MCM 系统中，需要在 MCF 输入端口和输出端口实现多根 SMF 尾纤的扇入扇出连接。目前基于自由空间光学系统的间接耦合法器件和基于光纤熔锥耦合器或者平面波导耦合器的直接耦合法器件均已有商用化产品[22]，其基本原理如图 3 所示。其中空间光耦合方法的主要问题是透镜系统复杂度高，集成和校准困难，而通过光纤熔锥或波导刻蚀能够实现高集成度和隔离度的多纤芯耦合与解耦，典型商用 7 芯复用器件的插入损耗约 1 dB，而相邻纤芯隔离度约为−50 dB 量级[23]。

2.3　多芯光放大

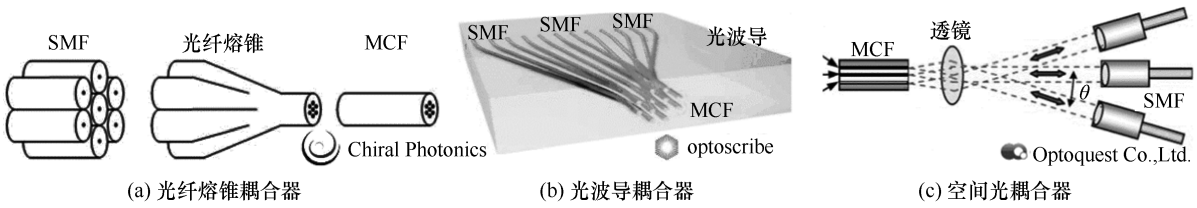
在 MCF 中进行光信号的长距离传输需要进行多芯光放大，根据泵浦光耦合方式的不同，可以将多芯光放大技术分为芯区泵浦和包层泵浦两类[24]。在芯区泵浦中，最简单的方式是通过扇入扇出器件将 MCF 解复用至多个 SMF，之后再采用掺铒光纤放大器（EDFA）阵列实现各 SMF 光信号放大，可重用现有 EDFA 技术，但集成度差。通过制备掺铒多芯光纤（ED-MCF）可以作为 MCM 光信号的增益介质，通过对各个芯区的独立泵浦，能够实现多纤芯光信号的同时放大，ED-MCF 已经可实现增益 G=20 dB 和噪声系数 NF=5 dB 的 7 芯信号放大[25]。直接利用 MCF 作为拉曼增益介质，对各纤芯直接泵浦，能够实现 MCF 拉曼放大器。但是，上述基于芯区泵浦的多芯光放大方案均需要多路泵浦光源和额外扇入扇出复用器件，降低了系统集成度，无法体现 MCM 优势。

MCF 中的包层泵浦是通过光纤包层功率耦合完成泵浦光在 MC-EDF 中对于各纤芯信号光的同时放大，根据泵浦光功率输入方式的不同，又可以分为中心泵浦和边泵浦两种[26]。中心泵浦利用中心纤芯进行泵浦光输入，通过内部包层功率耦合实现对其余纤芯的信号增益，而边泵浦是采用特殊设计的缠绕包层结构实现泵浦光功率注入，通过外围包层的功率耦合对多纤芯信号进行放大。包层泵浦方式只需单路泵浦光源，无需扇入扇出器件，利于提高系统集成度，但缺点是耦合效率低，和芯区泵浦相比，短波长光信号的增益较低但噪声系数很大。此外，包层泵浦可放大纤芯数量有限，并且难以对各个纤芯通道进行精确的增益控制。目前，多芯光放大器报道的光纤增益数量最高为 7 芯，能够支持多芯复用光信号的长距离传输[27]。

2.4　MCM 研究进展

由于 MCF 中包含多根纤芯，其端面的熔接需要对每个纤芯都进行精确的对准控制，相对于 SMF 而言更加复杂和困难。通过在 MCF 拉制过程中，在包层结构内部设置与纤芯排列具有空间对称关系的空心柱状标记（marker）芯，如图 3(b) 中所示，结合熔接过程中的标记条纹对准和旋转控制，能够实现 7 芯 MCF 中约 0.3 dB 损耗的端面熔接[28]。此外，通过采用多芯侧面亮度条纹分布的零均值归一化互相关函数峰值查找方法，能够进一步降低 MCF 端面的熔接损耗[29]。但是，目前对于多芯 MCF 的熔接损耗仍然无法达到 SMF 中小于 0.1 dB 的水平，这对 MCF 长距离传输应用会造成影响。

MCF 能够有效提升光纤传输容量，但仍需与



(a) 光纤熔锥耦合器　　(b) 光波导耦合器　　(c) 空间光耦合器

图 3　多芯光纤扇入扇出器件基本原理

之相匹配的转发和处理能力，所以基于光子集成电路（PIC）和硅光子（Si-photonic）集成技术提高收发机集成度是充分发挥 MCM 传输容量优势的重要条件。例如基于垂直腔表面发射激光器（VCSEL）和硅基光电二极管（PD）阵列实现的尺寸仅为 5.2 mm×5.8 mm 的 24 路集成收发机芯片，能够实现 480 Gbit/s 的光信号转发[30]。而直接为 MCF 设计的 7 芯分布反馈式（DFB）窄线宽激光器[31]和基于 PIC 的 7 芯硅基 PD 探测器[32]，能够进一步实现多路光收发机的高密度集成。未来，随着光子集成技术的发展和成熟，光层节点的信号转发处理能力和集成度将不断提高，基于 MCM 技术进行单纤超大容量传输的应用需求也会更加明确。

在 MCM 的系统容量方面，2016 年日本 NICT[33]报道了基于 31 km 长度的双环型同质纤芯结构结合沟道辅助折射率设计的 22 芯 MCF，其芯间串扰小于−45 dB，损耗系数为 0.21 dB/km，并采用 25 Gbit/s 波特率的 DP-64QAM 信号调制谱宽为 10 THz 的 399 组光梳信号，实现系统传输总容量为 2.15 Pbit/s 以及频谱效率（SE）为 214 bit/(s·Hz)。在 MCM 的传输距离方面，2016 年美国 TE SubCom[21]报道了基于 46 km 长、芯间串扰小于−54 dB、损耗系数为 0.21 dB/km 的 12 芯 MCF 环路结构以及 EDFA 阵列，以 8D-APSK 调制格式实现的 105 Tbit/s 容量光信号最远 26 圈共计 14 350 km 传输。

3 少模复用技术

传统多模光纤（MMF）出于降低激光器和连接器性能要求和成本的考虑，采用 50~62.5 μm 的大芯径设计，导致其中传输光信号的线偏振模式数量可达上百个，严重的模式耦合和模间色散限制了 MMF 的带宽容量和传输距离，例如新一代 OM4 等级 MMF[34]能够支持 10 Gbit/s 以太网信号（10GBASE-LX）传输 400 m。少模复用（FMM）或模式复用（MDM）通过对光纤芯区和包层的折射率进行设计，可以适当提高其归一化截止频率（V），实现若干个线偏振模式在光纤中的共同传输，如图 4(a)所示，这种光纤被称为少模光纤（FMF）[35]。FMF 介于 SMF 和 MMF 之间，通过引入数量可控的线偏振模式复用来提升光纤传输容量，通过 FMF 的折射率设计及接收机的多输入多输出数字信号处理（MIMO-DSP）来限制和补偿模式耦合和模间色散带来的不利影响，以保证其传输距离[36]。

3.1 少模光纤

按照是否需要大规模 MIMO-DSP 均衡处理，可以将 FMF 的设计分为弱耦合和强耦合两类[37]。弱耦合 FMF 通常采用阶跃折射率设计，通过提高芯区折射率的方法，增加各 LP 模式之间的折射率差异和差分模式时延（DMD），如图 4(b)所示，从而降低模间串扰，实现各个 LP 模式的独立探测和接收，对于每种 LP 模式仅需 2×2 或 4×4 的 MIMO 均衡对偏振复用或模式简并进行处理。强耦合 FMF 采用渐变折射率结合沟道辅助设计，实现所有 LP 模式的同时传输和检测接收，如图 4(c)所示。强耦合模式依靠接收机的均衡处理来补偿 LP 模式耦合串扰，对于 N 个偏振复用的传输模式，需要 $2N\times2N$ 规模的 MIMO-DSP。此外，强耦合 FMF 设计中需要尽量降低 LP 模式之间的 DMD，以减小 MIMO-DSP 中对多路信号时延进行缓存的要求。

在弱耦合模式复用中，以 4-LP 模（6 组传输模式）的弱耦合 FMF 为例，通过增加光纤芯区折射率使 $V<5.1$，可以实现高阶模式抑制，此时的模间串扰约为−30 dB/km，DMD 为 4.4~8.9 ns/km，无需 MIMO-DSP 均衡处理的传输极限约为 100 km[38]。进一步增大芯区折射率理论上可以传输更多 LP 模式，但是随着折射率的提高，将导致光纤损耗的线性增长，同时各 LP 模式模场直径减小，导致非线性效应损伤加剧。总体而言，弱耦合的模式复用极限为 9-LP 模，弱耦合 FMF 中的模间串扰

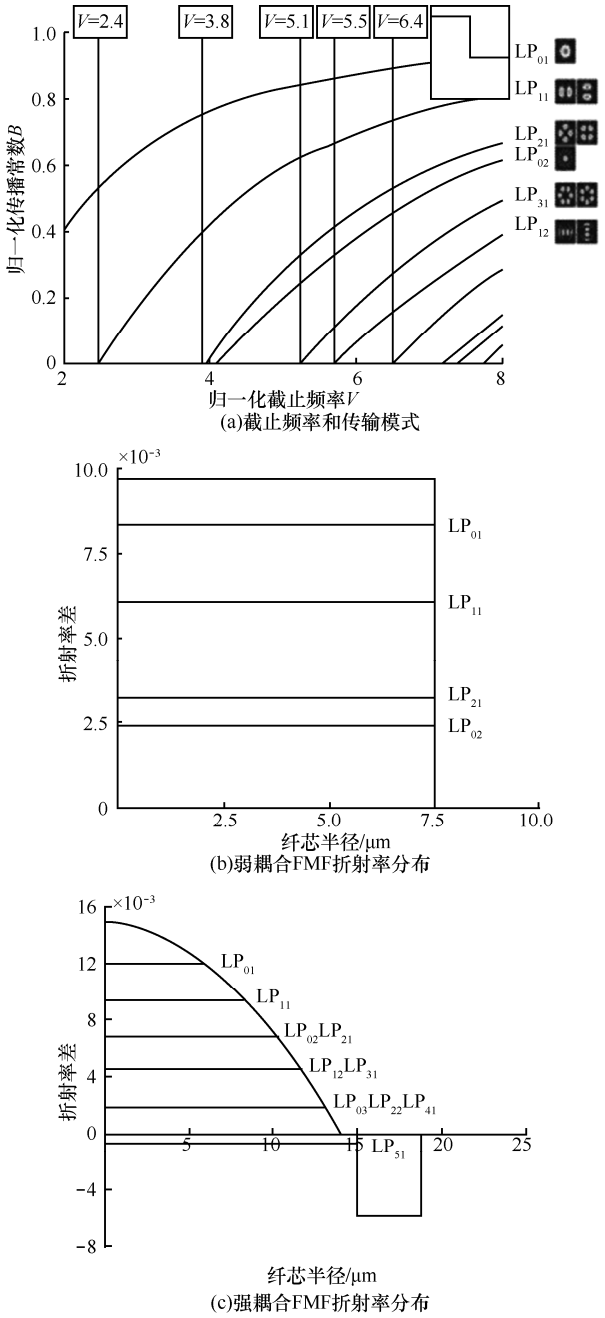


图 4　少模光纤结构特征

难以满足无 MIMO 均衡的长距离传输要求，可用于移动回传、数据中心互联和城域汇聚等中短距离应用场景。

在强耦合模式复用中，各 LP 模式间的串扰在模式相关损耗（MDL）可忽略的条件下，满足线性耦合的正交酉变化要求，在接收端可以采用基于 MIMO 线性矩阵求解其逆变换的方法进行均衡补偿，但要求均衡器缓存大于各通道间时延差。以 2-LP 模（3 组传输模式）的 DP-16QAM 信号的 FMM 传输为例，在接收端需要 6×6 规模的 MIMO-DSP 处理，以 36 组频域有限冲激响应（FIR）自适应滤波器进行线性均衡，并且对于 FMF 光纤中 1.43 ns 的 DMD，需要 120 级抽头的缓存处理[39]。

接收机 MIMO 处理中对于模式复用信号 DMD 和 MDL 的要求决定了强耦合 FMF 的设计参数需求。通过采用包层沟道辅助的渐变折射率芯区设计，可以控制各模式间的 *DMD*<100 ps/km，同时为了防止出现 MDL，还需要满足模式损耗差异（DMA）小于 0.02 dB[38]。在强耦合 FMF 中，模式数量的增长将导致更高的芯区折射率和更大芯径，导致 FMF 损耗和 DMA 的线性增长，同时 DMD 的控制也更加困难。由于存在 DMD 和 MDL 的限制，强耦合 FMF 的模式复用数量的极限是 12-LP 模式（21 组传输模式），而与之对应的 42×42 规模的 MIMO 均衡处理要求也超出现阶段 DSP 的集成度水平。此外，由于光纤生产工艺中沟道尺寸、掺杂浓度和折射率等参数的控制存在非理想偏差，导致实际 FMF 中的 DMD 参数与其设计值往往存在较大差异，实际应用中的 DMD 控制可以借助类似色散补偿的思路来进行优化[40]，即通过设计具有+DMD 和−DMD 特性的两种 FMF 进行级联，可以控制整个 FMF 链路满足 DMD 指标要求。

除了阶跃折射率和渐变折射率的标准光纤，还可以采用环型芯区光纤（RCF）[41]、椭圆芯少模光纤（EC-FMF）[42]及空芯光子带隙光纤（HC-PBGF）[43]等非标准光纤来实现模式复用和传输。虽然非标准光纤在模式耦合和串扰控制以及时延和非线性特性等方面具有独特的优势，但是普遍存在设计制造困难和传输损耗大（约 1 dB/km）的问题，目前研究水平仅能够覆盖百米量级的短距离传输应用。

3.2 模式转换与复用

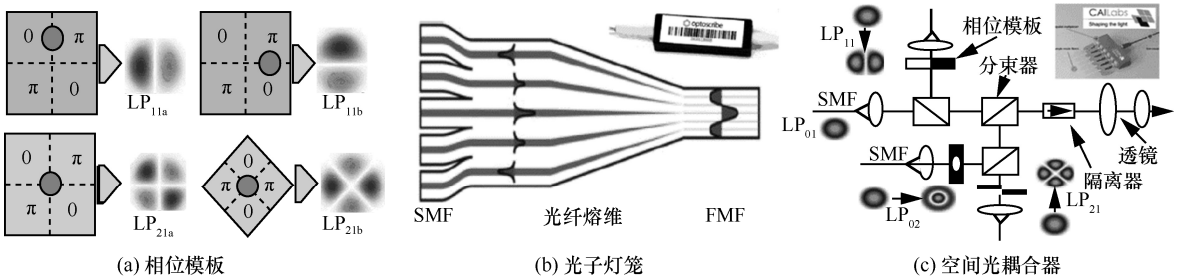
在 FMM 系统中，要实现不同线偏振模式的生成与控制以及在 FMF 中的复用传输，需要借助模式转换技术和模式复用/解复用技术。对于模式转换而言，可以分为基于光栅器件的导波光学法和基于相位模板调制器的空间光学法。在导波光学法中，压力应变光栅通过机械压力改变其模态的拍长和取向角，可以实现 LP_{01} 和 LP_{11} 之间的转换[44]；长周期光栅通过设置光栅周期为不同模式间的折射率差，实现两种模式之间的转换[45]。光栅结构插入损耗小，易于集成耦合，但仅适用于低阶模式转换，不可重构。在空间光学法中，相位模板控制基模光束入射相位模板特定位置，实现多个高阶模式转换[46]，如图 5(a)所示；而空间光调制器采用透镜和乘性模板完成二维空间光学傅里叶变换，也可实现任意 LP 模式转换[47]。空间光学法可实现高阶模式转换、可重构性强，缺点是耦合对准结构复杂、插入损耗大。

在空间模式复用/解复用中，同样可以分为基于光纤耦合器的导波光学法和基于透镜和相位模板组合的空间光学法。在导波光学法中，光子灯笼（photonic lantern）复用器通过光纤融锥结构将若干个单模纤芯合并为一个超模纤芯实现模式复用，如图 5(b)所示，其中各单模纤芯与空间模式之间的对应关系满足正交酉矩阵要求，可利用 MIMO 均衡处理求逆变换还原[48]，目前已有能够支持 2~4 组 LP 模式复用/解复用的商用光子灯笼器件[49]。此外，定向耦合器通过多个 SMF 与 FMF 的并行结构设计，以包层模式定向耦合的方法能够实现一芯对应一模的模式复用/解复用[50]。导波光学法的优点是结构紧凑、集成度高，插入损耗和模式相关损耗小，但目前的制造工艺限制了可复用的模式数量。在空间光学法中，空间光耦合器采用多组如图 5(c)所示的不同相位模板和透镜组合，将若干 SMF 中的多个模式耦合进 FMF[39]，目前已有支持 6-LP 模式的商用器件[51]。空间光学法能够实现可重构的高维度模式复用，但分立器件结构复杂、集成度较低。

3.3 少模光放大

若干个 LP 模式复用光信号在 FMF 中进行长距离传输需要进行少模光放大，早期实验通过 LP 模式解复用结合多个 EDFA 组合的方式实现，但是该方法的集成度很低，不能满足 FMM 系统要求[52]。此外，在 FMF 传输过程中，由于弯曲损耗和模式耦合的影响，高阶 LP 模式的传输损耗略大于低阶模式，需要在少模光放大的增益设计中进行适当补偿，降低模式相关损耗的累积。

典型的少模复用掺铒光纤光放大器（FM-EDFA）同样可以分为芯区泵浦和包层泵浦两类。以 4-LP 模（6 组传输模式）的芯区泵浦 FM-EDFA 为例[53]，基于芯区环型铒离子掺杂控制差分模式增益（DMG），采用两组单模光源双向泵浦方式，并结合相位模板对泵浦光进行模式控制，从而实现对 FMF 芯区中各 LP 模式光信号的准确增益，能够实现 C 波段平均增益 G>20 dB，差分模式时延 DMG<2 dB，噪声系数 NF<5 dB。



(a) 相位模板　(b) 光子灯笼　(c) 空间光耦合器

图 5　模式转换与复用/解复用

芯区泵浦 FM-EDFA 的主要问题在于，需要单模泵浦光源阵列实现对各个 LP 模式光信号的同时放大，单模激光器泵浦功率受限并且集成难度大。

基于包层泵浦的 FM-EDFA 可以采用更高功率和更低成本的多模激光器作为泵浦光源，以 4-LP 模（6 组传输模式）FM-EDFA 为例[54]，掺铒光纤部分具有双包层结构设计，通过低折射率的聚合物外层将反向泵浦的 980 μm 多模光源以包层耦合方式输入，能够实现单泵浦光源对多个 LP 模式的同时增益，降低成本并且易于实现全光纤结构集成。相比芯区泵浦方式，需要更高的泵浦光功率，并且 DMG 控制更为困难。总体而言，现阶段 FM-EDFA 实验报道增益模式数仅为 4~6-LP 模[55]，限制高维模式复用的长距离传输应用。

3.4　FMM 研究进展

在 FMM 的频谱效率方面，2016 年美国 Bell 实验室报道了基于 87 km 沟道辅助渐变折射率强耦合 FMF，实现 6-LP 模式（10 组传输模）复用[56]。通过精密控制的 P-CVD 工艺实现 FMF 中的 DMD 为 120 ps/km，有效面积为 120 μm^2，光纤损耗为 0.23 dB/km。采用 10 端口光纤熔锥型光子灯笼实现模式复用，该器件平均插入损耗为 8.7 dB，不同模式间损耗差异小于 3 dB。采用 30 Gbit/s 波特率 16QAM 调制格式，结合 30 波长 WDM，在接收端采用 20×20 规模的离线 MIMO 均衡处理，实现 FMM 传输容量 67.5 Tbit/s，频谱效率达到 58 bit/(s·Hz)。

在 FMM 的长距离传输中，模式复用信号光放大的实现方式对其传输能力有重要影响。2013 年美国 Bell 实验室报道了基于 EDFA 阵列光放大的 4-LP 模式（6 组传输模）复用在 59 km 长度 FMF 环路中传输 177 km 的实验[52]。其中，通过 FMF 渐变折射率设计结合分段时延差补偿方式控制各模式间 DMD，采用 3D 波导结构光子灯笼实现模式间复用，EDFA 阵列对未复用的各模式进行独立增益。32 波长 20 Gbit/s 波特率 DP-16QAM 实现频谱效率 *SE*=32 bit/(s·Hz)，接收端 12×12 规模 MIMO-DSP 离线处理，均衡滤波器抽头数 800 对应存储时延 20 ns。2016 年美国 Bell 实验室报道了利用 FMF 中的拉曼增益效应，实现 2-LP 模式（3 组传输模）在 70 km 长度 FMF 环路中传输 1 050 km 的实验[57]。其中，多段式 FMF 进行 DMD 补偿，高功率双向泵浦源通过高阶模式光纤进行输入，控制其开关增益实现整体 FMF 链路的 0 dB 损耗，辅助 EDFA 补偿环路器件插入损耗。60 波长 30 Gbit/s 波特率 DP-QPSK 实现频谱效率 *SE*=9 bit/(s·Hz)，接收端 6×6 规模 MIMO 均衡处理，滤波器抽头数 1 000，对应存储时延 33.3 ns。

4　少模多芯复用技术

4.1　FM-MCM 技术优势

少模多芯复用（FM-MCM）技术通过将多芯复用技术和少模复用技术相结合，既在光纤包层内放置多个纤芯，又在每个纤芯中同时传输若干 LP 模式，如图 6（a）所示。其优势主要体现在 3 个方面：第一，通过少模复用和多芯复用的结合，能够将纤芯数与模式数相乘，实现 Pbit/s 量级的超高单纤传输容量[6]以及数百 bit/(s·Hz)的高频谱效率[10]，为光纤传输的容量增长提供了巨大空间。第二，通过两种复用方式的组合，能够取长补短，降低对性能参数和制造工艺的要求。在以多芯复用方式降低高阶模式复用的串扰损伤和折射率设计困难的同时，又以模式复用方式减轻了高密度纤芯复用对光纤设计与制造提出的苛刻要求。第三，与 FMM 相比，在相同的空间复用通道数量条件下，FM-MCM 能够显著降低对于接收机 MIMO-DSP 均衡处理的要求。以图 6（b）所示 6 组传输模式复用的 FMM 为例，其传输函数为 6×6 维度正交酉矩阵，需要 36 组 MIMO 处理才能还原，而同样空间维度的 3 芯 2 模式复用，则只需要 3 组 2×2 维度的 MIMO 均衡。总体而言，结合了 MCM 和 FMM 两种技术优势的 FM-MCM 技术，

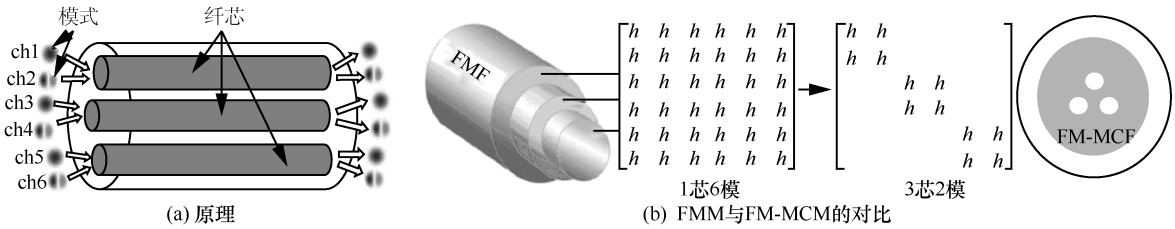


图 6　少模多芯复用光纤

是未来 SDM 光网络实现高传输容量和灵活可扩展的重要备选方案。

4.2　FM-MCM 研究进展

在 FM-MCF 设计方面，提高纤芯复用密度的设计，例如 5.5 km 长度 HCPS 端面 36 芯 3 模光纤[58]，通过增加包层直径和采用异质结构来降低芯间串扰。增加高阶模式复用数量的设计，例如 9.8 km 长度 HCPS 端面 19 芯 6 模光纤[6]，通过提高各纤芯与包层的折射率差异和纤芯非圆度来增加模式传播常数差异，抑制模间串扰。折中纤芯复用密度和模式复用数量的设计，例如 52.7 km 长度 AS 型端面 12 芯 3 模光纤[59]，采用沟道辅助结构降低芯间串扰，通过控制沟道尺寸和模场面积来降低模式间 DMD。需要说明的是，FM-MCF 的设计同样受到 MCF 和 FMF 设计要求的限制，例如过大的包层尺寸将导致光纤制造良品率和机械可靠性下降，过高的纤芯折射率降低模场直径将导致非线性损伤等。总体而言，目前实用化 FM-MCF 设计的 SDM 维度上限为 150~180 通道。

在少模多芯复用/解复用方面，36 芯 3 模复用[58]，将 108 根 SMF 分为 3 组，每组的 36 根 SMF 通过相位模板和透镜的自由空间光学系统实现各自独立的模式转换，之后再通过透镜分别耦合到 36 个纤芯中进行传输。19 芯 6 模复用[6]，则先通过商用模式复用器件完成 19 根 FMF 中的 4-LP 模式复用，之后再通过透镜系统将多根 FMF 信号耦合进 19 个纤芯进行传输。上述基于空间光学耦合的 MCM 和 FMM 两级分离式的组合复用无法体现少模多芯高维度复用的优势，需要研究集成度更高的集中式少模多芯复用方法。2016 年美国中佛罗里达大学报道了全光纤结构的 7 芯 3 模光子灯笼复用器[60]，将不同芯径的 FMM 插入 7 个低折射率掺氟毛细管中，能够实现 0.2 dB 插入损耗和芯间串扰小于−60 dB 的少模多芯复用。

在少模多芯光放大方面，12 芯 3 模传输实验[59]采用具有环型芯区掺杂结构的 FM-EDFA 阵列对各纤芯中的 FMM 信号进行放大，其中增益>18 dB，*DMG*<1.4 dB，并且结合空间光学透镜系统进行 MDL 补偿，抑制各纤芯中的模式复用信号 *MDL*<0.2 dB。EDFA 阵列降低了少模多芯复用系统的集成度，而 2015 年美国 Bell 实验室报道的基于环型包层结构和包层泵浦方式的少模多芯 FM-MC-EDFA[61]已解决上述问题，其中的环型包层结构中包含 6 组掺铒增益介质纤芯，通过包层泵浦方式输入多模泵浦光功率，能够在各纤芯中对 3 组传输模式，共 18 组空间光信号进行放大，增益>20 dB，芯间和模式间的 *DMG*<3 dB，但是由于泵浦耦合效率较低，导致高泵浦光功率要求和高噪声系数 *NF*=6~9 dB。

在 FM-MCM 系统容量实验方面，2016 年日本 KDDI 报道 19 芯 6 模光纤 9.8 km 传输[6]，光纤设计和复用/解复用见前所述，采用 360 波 15 Gbit/s 波特率的双二进制 DP-QPSK 信号，在接收端使用滤波器抽头数为 10 000 的 12×12 规模 MIMO 均衡处理，实现空间通道数为 114，系统容量为 2.05 Pbit/s，频谱效率为 456 bit/(s·Hz)的 SDM 传输。在 FM-MCM 传输距离实验方面，2016 年日本 NTT 报道的基于 52.7 km 长度 12 芯 3 模光纤环路

结构的单纤芯传输 10 圈共 527 km 实验[59]。其中光纤设计和光放大方案如前述，采用 20 波 10 Gbit/s 波特率 DP-QPSK 信号，36 空间通道的系统容量为 28.8 Tbit/s，频谱效率为 94.32 bit/(s·Hz)。

5　轨道角动量复用技术

模分复用（MDM）基于同一空间（纤芯）中传输不同模式间的正交性，实现有效的信道复用/解复用，FMM 是 MDM 的一种实现方式，而轨道角动量（OAM）复用是另一种可行的 MDM 方式。光波中的粒子具有自旋角动量（SAM）和轨道角动量（OAM）两种特性[62]，如图 7（a）所示，其中 SAM 为粒子在与其传播方向相垂直的平面内的自转，在光波中表现为偏振态（电场）的旋转，其光强呈高斯分布，而 OAM 是粒子在与其传播方向相同的螺旋轨道内的旋转运动，在光波中表现为螺旋相位波前和环型光强分布。通过控制 OAM 光束螺旋相位波前的旋转方向、角度和半径，可以实现不同阶数的 OAM 模式复用，成为提升光纤通信传输容量的全新维度[63]。OAM 复用的关键技术包括模式转换与控制、模式复用与交换、光纤系统传输等方面。

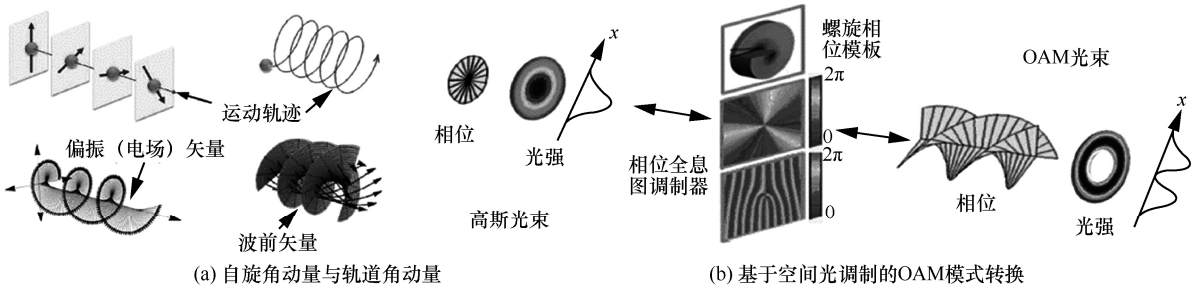
5.1　模式转换与控制

实现传统高斯光束和不同OAM模式光束之间转换控制的方法主要可分为空间光学系统调制和光子集成器件调制两类。空间光调制方法采用螺旋相位玻片（SPP）[64]或可编程的相位全息图模板[65]，对输入光束的相位波前进行调制，如图 7（b）所示，通过采用不同类型的螺旋相位模板或相位全息图，能够实现多个维度的 OAM 模式转换，而接收端采用相反的螺旋相位模板，即可实现 OAM 模式的探测和解调。在螺旋相位模板调制中要保证 OAM 模式转换的精度，需要使用对光束相位和幅度进行联合控制。空间光调制还可以使用新型材料结构，例如超表面（meta-surface）[66]，利用在等离子体材料表面加工的子波长微型天线阵列结构，对入射光束进行反射控制和相位波前旋转完成 OAM 模式调制。

空间光学调制方法器件复杂，集成度较低，为了解决这一问题，英国 Bristol 大学提出基于微环型谐振腔附加光栅结构的光子集成调制器[67]。通过在环型谐振腔内部嵌入不同角度的光栅结构，周期性地改变其方位角方向的折射率，使得输出衍射光束具有螺旋相位波前。环型腔中的方位角状态由环内导模和光栅周期的差值决定，通过热光控制可以在环型腔中产生不同阶导模，实现多种 OAM 模式的激励，不同 OAM 模式的切换时间小于 20 μs。微型环腔结构光子集成调制器能够在单个光子芯片中集成多个 OAM 调制器，仅适用于高斯光束到 OAM 模式光束的调制，无法实现 OAM 模式探测与解调。

5.2　模式复用与交换

多维 OAM 模式的复用/解复用方案主要包括空间光耦合、模式分类和光子集成复用。其中空间光耦合方案[64]通过级联合波方式实现复用，在接收端分路后以反相位模板进行各 OAM 模式的



(a) 自旋角动量与轨道角动量　　(b) 基于空间光调制的OAM模式转换

图 7　轨道角动量复用

探测解调，如图 8（a）所示，之后再以空间滤波方式恢复单通道信号，其特点是器件简单可重构，但高维度复用系统复杂，插入损耗较大。模式分类器通过空间光学几何变换将各个 OMA 模式对数极坐标系的环型光场转换为直角坐标系的纵向空间分布，之后通过透镜组合实现通道解复用[68]。光子集成复用器通过孔阵列光栅级联星型 3D 波导耦合器，完成 OAM 光束方位角相位幅度与耦合器空间相位分布之间的转换，并将解调后单通道信号汇聚至各个 SMF 端口输出，能够实现 32 维度的 OAM 复用/解复用[69]。

采用反射式 SPP 空间光调制器[70]，对输入的 OAM 模式设置相反的相位波前阶数之和，如图 8（b）所示，可以实现反射输出 OAM 模式与原 OAM 模式的模式交换以及 OAM 通道数据的空间交换，模式交换的功率代价约为 1 dB。而采用透射式 SPP 和空间光调制器（SLM）可以实现 OAM 模式的上下路复用[71]，如图 8（c）所示，SPP 将在复用 OMA 模式中的特定模式下变换为高斯光束，而反射式相位全息图光栅将 OMA 模式和高斯光束分为下路，同时耦合上路新的高斯光束，在经过相应 SPP 上变换恢复 OAM 模式的复用组合。

5.3 光纤传输实验

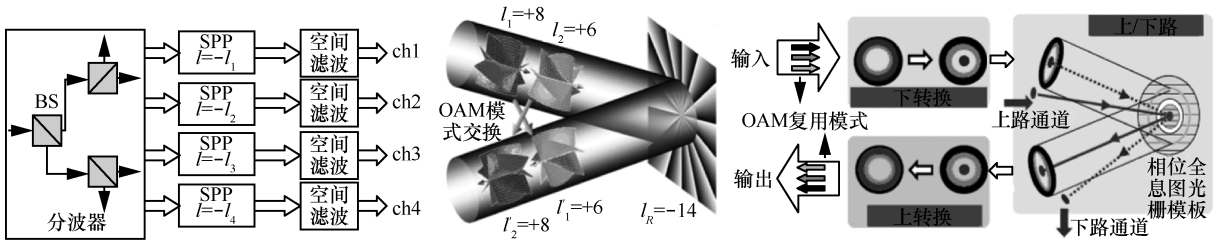
由于各 OAM 模式与基模在 SMF 中的有效折射率接近，传输过程中的功率耦合会导致 OAM 模式的简并与退化。通过设计具有双环型芯区折射率分布的涡旋（vortex）光纤，可增大各 OAM 模式之间以及和 LP 模式之间的折射率差异和隔离度，减轻模式耦合影响。2013 年，美国波士顿大学研制 1.1 km 双环型芯区分布涡旋光纤[72]，其中损耗系数为 1.6 dB/km，OAM 模式串扰小于−14.8 dB。基于此，完成了基模（$\pm LP_{01}$）和一阶 OAM 模式（l=±1）共 4 种模式复用的光纤传输，结合 10 波长 20 Gbit/s 波特率 16QAM 调制信号，实现传输系统容量 1.6 Tbit/s，频谱效率为 16 bit/(s·Hz)。

相对于特殊设计的涡旋光纤，采用现有的多模光纤进行 OAM 模式传输将大大提高 OAM 复用技术的实用性。2014 年，美国纽约城市大学采用模式分类器实现双 OAM 双偏振态的模式复用，并在渐变折射率 4-LP 模式 FMF 中实现 2 km 传输[73]。2016 年，我国华中科技大学报道了采用空间光调制器结合光纤结构的模式激励器和滤波器，激发和检测 4 个正交 OAM 模式组（l=01,±11,21,31），并在 2.6 km 长度的标准渐变折射率 MMF（OM3 型）中实现无误码传输[74]。目前 OAM 模式复用信号在光纤中的传输仍然存在较大瓶颈，仅能实现数公里量级的传输距离，限制了 OAM 复用技术的可能应用。

6 空分复用技术

6.1 研究进展与对比分析

近年来，光纤通信中的 SDM 技术研究的代表性实验报道见表 1，其中 MCM 的最高纤芯复用数量可达 22 芯，系统容量达 2.15 Pbit/s，而单纤芯光纤环路模拟的最远传输距离可达 14 350 km，验



(a) 解复用　(b) 交换　(c) 上下路复用

图 8　OAM 模式的复用/解复用方案

表 1　光纤通信中的 SDM 技术研究的代表性实验报道

报道时间	研究机构	光纤类型	通道/模式数(C/M)	传输距离/km	系统容量/(Tbit·s^{-1})	频谱效率/(bit·(s·Hz)$^{-1}$)
2017 年[75]	NTT	MCF	32-C	1 645	61.44	201.46
2016 年[12]	TE Subcom	MCF	12-C	14 350	105	3.2
2015 年[9]	NICT	MCF	22-C	31	2 150	214
2016 年[57]	LU/Bell	FMF	3-M (2-LP)	1 050	18	9
2016 年[56]	Bell	FMF	10-M (6-LP)	87	67.5	58
2015 年[36]	Bell	FMF	15-M (9-LP)	22.8	——	43.63
2013 年[52]	Bell	FMF	6-M (4-LP)	177	24.6	32
2016 年[59]	NTT	FM-MCF	3-M×12-C	527	28.8	94.32
2016 年[6]	KDDI	FM-MCF	6-M×19-C	9.8	2 050	456
2015 年[58]	NICT	FM-MCF	3-M×36-C	5.5	432	432
2016 年[74]	HUST	MMF	4-OAM	2.6	——	8
2013 年[72]	BU	Vortex	2-OAM×2-Pol	1.1	1.6	16

证了 MCM 在有效提升系统传输容量的同时，仍然能够保证千公里量级的传输能力。FMM 实验的最高模式复用数量为 9-LP 模（15 传输模式），最大频谱效率为 58 bit/(s·Hz)，在光纤环路环境中的最远传输距离可达 1 050 km，FMM 在提升频谱效率的同时，也能够满足百公里量级距离的传输应用需求。对于 FM-MCM 而言，通过两种复用维度的结合，可以显著提升系统传输容量至 2.05 Pbit/s，最大空间通道数量为 114，频谱效率为 456 bit/(s·Hz)，在传输距离方面，通过控制纤芯和模式复用数量至 3 模×12 芯，可以在光纤环路实验环境中达到 527 km 的传输距离，但需要有效的集成式光放大方案以支持长距离传输。对于 OAM 模式复用，光纤传输的最高模式复用数量为 4-OAM 模式，最大传输距离仅为 2.6 km，距离实用化仍有一定差距。

从代表性实验和文献报道可以看出，以 NTT、KDDI 和 NICT 为代表的日本研究机构在 MCM 的研究方面具有良好的技术积累，同时在 FM-MCM 实验研究方面也处于领先水平。以 Bell 实验室为代表的欧美研究机构更关注 FMM 技术的研究和可能应用，在该研究领域中处于领先水平。OAM 模式复用是近年来新兴的 SDM 技术分支，以 UCLA（加利福尼亚大学洛杉矶分校）和波士顿大学为代表的美国研究机构在该领域的研究处于领先水平。近年来，国内以华中科技大学、北京邮电大学、北京交通大学、天津大学和南京邮电大学等为代表的研究机构也在光纤通信空分复用技术的各个领域进行了深入研究并取得了一系列重要成果[19,76-81]。

SDM 技术主要方案的技术特性对比见表 2，其中在一根光缆内部集成多根光纤的集束光纤方案作为现有技术方案提供对比基准。在光纤参数设计与制备方面，MCF 的研究和制备技术积累较为成熟，与 SMF 特性十分接近，目前已有 7 芯复用的商用化产品[82]，更高纤芯复用的 MCF 制备也不存在原理性限制，FMF 则受到光纤设计参数和模式复用数量的限制，设计与制造较为复杂，同时多模式传输导致的高入纤功率引入较高的非线性影响，目前产业界也已推出了支持 2~4-LP 模式的 FMF 商用化产品[83]。FM-MCF 设计与制备相对而言复杂度更高，目前处于实验室研究阶段，其光纤特性由于纤芯数量和模式数量。而支持 OAM 传输的涡旋光纤由于结构设计特殊，损耗更大，非线性特性尚待研究，并且制备较为困难。对于新型光纤的熔接对准，MCF 需要采用标识辅助降低熔接损耗，设备技术要求较高，而 FMF 可以直接使用现有设备获得低损耗和模式串扰的端面接续[84]。

表 2　SDM 技术主要方案的技术特性对比

SDM 方案 技术特性	集束光纤 （多纤）	多芯复用 MCM	少模复用 FMM	少模—多芯复用 FM-MCM	轨道角动量 OAM 复用
光纤制备	成熟 约 300 光纤	较成熟 约 30 纤芯	较复杂 约 15 模式	复杂 约 150 通道	困难 特殊结构
光纤损耗	低	低	较高	中	高
非线性	低	中	较高	中	待研究
信道串扰	无	低	中/高	中	高
对准/熔接	单纤量大 难度低	标识辅助 中	现有设备 抵	标识辅助 中	待研究
模式 转换/控制	无	无	较成熟 空间/波导	较成熟 空间/波导	复杂 空间/PIC
信道 复用/解复用	成熟 单纤 WDM	较成熟 空间/波导	较成熟 空间/波导	集成式复用 待研究	复杂 空间/PIC
光放大方案	单纤放大 EDFA	芯/包层 约 7 纤芯	芯/包层 约 6 模式	包层泵浦 $3M\times6C$	待研究
MIMO-DSP	2×2	$C\times(2\times2)$	$2M\times2M$	$C\times(2M\times2M)$	$2M\times2M$

在模式转换控制和信道复用/解复用方面，MCM 无需模式转换，并且已有较为成熟的基于空间光学、光纤熔锥或波导器件的商用化 7 芯复用器产品。FMM 的模式转换与复用同样有基于相位模板空间光耦合器和光子灯笼波导耦合器的不同解决方案，两种方案各有长短，并且都有商用化产品，能够支持 4~6-LP 模式的转换与复用。SDM 技术实现长距离传输需要多芯/多模光放大技术的支持，对于 MCM 而言，基于芯区泵浦或包层泵浦的多芯光放大均能够实现 7 芯 MCF 的信号增益，其中包层泵浦方案的集成度有优势，但泵浦效率较低增益控制困难，现有 MC-EDFA 的研究水平能够支持低芯数 MCM 的长距离传输应用。对于 FMM，同样存在芯区泵浦和包层泵浦两种方案，并且需要进行 DMG 控制，目前实验报道仅支持 4~6-LP 模式增益。在 FM-MCM 中，包层泵浦方案将是可行选择，由于纤芯数和模式数的折中，FM-MC-EDFA 能够实现高空间通道数量的光信号增益，但是仍然存在 DMG 控制困难和高噪声系数等问题。

在接收机 MIMO-DSP 均衡处理复杂度方面，MCM 对每个纤芯中的光信号进行独立处理，只需对偏振复用进行 2×2-MIMO 均衡，FMM 中弱耦合系统无需模式串扰处理，但强耦合系统需要根据复用模式数量 M，采用 $2M\times2M$-MIMO 均衡，对于 FM-MCM 而言，C 个纤芯中的 M 个复用模式均需要进行均衡处理，共需要 $C\times(2M\times2M)$-MIMO，但是在相同维度下，其 MIMO-DSP 规模的要求相对于 FMM 显著降低。OAM 复用实质上仍然模式复用，对于 M 个 OAM 模式，同样需要 $2M\times2M$-MIMO 均衡处理。

6.2　存在问题与应用前景

上述 4 种 SDM 技术能够从纤芯数量、模式数量和 OAM 模式等不同维度提升光纤传输容量，是未来光通信技术发展的重要方向，但是其研究发展和推广应用仍然面临一些瓶颈问题。虽然 MCM 相对现有的集束光纤技术能够进一步提高纤芯复用的空间密度，并能够支持千公里量级的长距传输，但是光网络整体传输容量的增长还需要收发端机集成度的提升和网络节点转发处理能力的增强予以配合，而上述能力提升需要依靠光子集成技术和全光交换技术的进一步发展。FMM 能够提升单纤芯的传输容量，但弱耦合模式的可用模式数量有限，并且仅能够支持百公里量级的传输距离，强耦合模式需要借助接收机 MIMO-DSP 来补偿长距离传输过程中累积的模式间串扰，对于 DSP 技术的集成度和处理能力提出了很高要求。FM-MCM 通过两种复用方式的折中提高了其实用性，但是仍然在集成式复用和光放

大方案等方面存在一定瓶颈。对于 MCF、FMF 和 FM-MCF 等新型光纤和相应的复用/解复用器件而言，其技术成熟度和生产制备能力与可靠性也是其推广应用需要解决的问题。对于 OAM 模式复用而言，目前研究水平仍然限于模式转换控制和光纤传输验证的初级阶段，在光纤设计制备、复用维度提升和传输特性研究等方面仍有一些基础性问题亟待解决。

在标准化方面，在 2016 年的 ITU-T SG15 全会期间，日本代表团在多个场合力对 SDM 技术展开标准化研究，但未获得与会专家支持。以欧美运营商和设备商为代表的专家观点普遍认为 SDM 技术仍处于发展早期，商用前景不明确，目前进行标准化研究为时尚早。国内通信运营商与设备商对 SDM 技术也处于前沿进展的跟踪研究阶段，未见相关路线规划、产品开发和标准研究的动作。

预计在未来 3~5 年，FMM 技术可能率先在现有局域网 MMF 容量升级、数据中心内部互联和大容量移动前/回传等短距离传输场景获得应用，而 FM-MCM 技术则有可能在流量热点地区的城域汇聚/核心等中距离传输和大容量灵活交换的场景中受到重视[85-87]。随着光子集成技术、新型光纤和光放大技术以及 DSP 制程与处理能力的发展和成熟，最终可能实现 SDM 技术在长距离干线传输中的应用。需要指出的是，SDM 技术在光纤通信系统和光传输网络中能否获得升级换代式的大规模应用以及获得应用的路线图及其时间，将取决于其是否能够有效地降低数据流量的比特成本，能否提供全新的空间通道交换维度与灵活性以及能否实现与现有技术和存量网络的后向兼容与平滑演进，上述这些问题还需根据 SDM 技术和产业在未来数年的进一步发展情况才能做出合理的评估与分析。

7　结束语

以 MCM、FMM、FM-MCM 和 OAM 模式复用为代表的 SDM 技术是未来光纤通信系统和光传输网络容量扩展和升级演进的重要方向，也是光通信领域学术界和产业界研究关注的焦点。本文对上述 4 种 SDM 技术路线中涉及的新型光纤设计、模式转换与控制、信道复用/解复用、光放大等关键技术及其最新实验进展进行综述分析，同时对各种 SDM 技术的研究现状和技术特征进行横向对比和总结，并在此基础上对 SDM 技术目前存在的问题和未来发展与应用的前景进行探讨和展望。未来，随着 SDM 技术的发展成熟，其将在光通信网络中获得越来越广泛的应用，成为下一代光纤通信的重要技术特征。

参考文献：

[1] Cisco. Cisco visual networking index: forecast and methodology, 2015–2020[S]. 2016.

[2] 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.

[3] RAYBON G. High symbol rate transmission systems for data rates from 400 Gb/s to 1Tb/s[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-25.

[4] QIAN D, HUANG M F, IP E, et al. 101.7-Tb/s (370×294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM Transmission over 3×55-km SSMF using Pilot-based Phase Noise Mitigation[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition, March 6-10, 2011, Los Angeles, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-3.

[5] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.

[6] IGARASHI K, SOMA D, WAKAYAMA Y, et al. Ultra-dense spatial-division-multiplexed optical fiber transmission over 6-mode 19-core fibers[J]. Optics Express, 2016, 24(10): 10213.

[7] SANO A, KOBAYASHI T, YAMANAKA S, et al. 102.3-Tb/s (224×548-Gb/s) C- and extended L-band all-Raman transmission over 240 km using PDM-64QAM single carrier FDM with digital pilot tone[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition, March 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2012: 1-3.

[8] RYF R, FONTAINE N K, CHEN H, et al. Mode-multiplexed transmission over conventional graded-index multimode fibers[J]. Optics Express, 2015, 23(1): 235.

[9] PUTTNAM B J, LUÍS R S, KLAUS W, et al. 2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core

fiber and wideband optical comb[C]//European Conference on Optical Communication, September 27-October 1, 2015, Valencia, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-3.

[10] IGARASHI K, SOUMA D, WAKAYAMA Y, et al. 114 space-division-multiplexed transmission over 9.8-km weakly-coupled-6-mode uncoupled-19-core fibers[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015.

[11] MIZUNO T, KOBAYASHI T, TAKARA H, et al. 12-core × 3-mode dense space division multiplexed transmission over 40 km employing multi-carrier signals with parallel MIMO equalization[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 9-13, 2014, San Francisco, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-3.

[12] QIAN D, IP E, HUANG M F, et al. 1.05Pb/s transmission with 109b/s/Hz spectral efficiency using hybrid single- and few-mode cores[C]//Frontiers in Optics 2012, October 14-18, 2012, Rochester, NY, USA. [S.l.:s.n.], 2012: 1-3.

[13] OFS. Fiber optic cables[EB/OL]. [2017-06-14]. http://www.ofsoptics.com.

[14] IANO S, SATO T, SENTSUI S, et al. Multicore optical fiber[J]. Lightwave, 1979: 321-352.

[15] MIZUNO T, TAKARA H, SANO A, et al. Dense space-division multiplexed transmission systems using multi-core and multi-mode fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(2): 582-592.

[16] AMMA Y, SASAKI Y, TAKENAGA K, et al. High-density multicore fiber with heterogeneous core arrangement[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-3.

[17] SAITOH K, MATSUO S. Multicore fiber technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 55-66.

[18] MATSUO S, TAKENAGA K, SASAKI Y, et al. High-spatial-multiplicity multicore fibers for future dense space-division-multiplexing systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(6): 1464-1475.

[19] 杨芳, 唐明, 李博睿, 等. 低串扰大模场面积多芯光纤的设计与优化[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 58-62.
YANG F, TANG M, LI B R, et al. Design and optimization of multi-core fibers with low crosstalk and large effective area[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 58-62.

[20] 李明军, 陈皓. 用于大容量光传输系统的新型光纤[J]. 电信科学, 2014, 30(6): 1-15.
LI M J, CHEN H. Novel optical fibers for high-capacity transmission system[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(6): 1-15.

[21] TURUKHIN A, SINKIN O V, BATSHON H, et al. 105.1 Tb/s power-efficient transmission over 14,350 km using a 12-core fiber[C]//Optical Fiber Communication Conference. 2016: Th4C.1.

[22] SARIDIS G M, ALEXANDROPOULOS D, ZERVAS G, et al. Survey and evaluation of space division multiplexing: from technologies to optical networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2136-2156.

[23] ChiralPhotonics. MCF_Fanout[EB/OL]. [2017-06-14]. http://www.chiralphotonics.com/.

[24] ABEDIN K S, FINI J M, THIERRY T F, et al. Multicore erbium doped fiber amplifiers for space division multiplexing systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(16): 2800-2808.

[25] TAKAHASHI H, IGARASHI K, TSURITANI T. Long-haul transmission using multicore fibers[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 9-13, 2014, San Francisco, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-3.

[26] RICHARDSON D J. Optical amplifiers for space division multiplexed systems[C]//Optical Fiber Communication Conference. [S.l.:s.n.], 2013: OTu3G.1.

[27] IGARASHI K, TAKESHIMA K, TSURITANI T, et al. 110.9-Tbit/s SDM transmission over 6,370 km using a full C-band seven-core EDFA[J]. Optics Express, 2013, 21(15): 18053-18060.

[28] WATANABE K, SAITO T, IMAMURA K, et al. Study of fusion splice for single-mode multicore fiber[C]//Microopics Conference, October 30-November 2, 2011, Sendai, Japan. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-2.

[29] SAITO K, SAKAMOTO T, MATSUI T, et al. Side-view based angle alignment technique for multi-core fiber[C]//Optical Fiber Communication Conference. [S.l.:s.n.], 2016: M3F.3.

[30] DOANY F E, LEE B G, KUCHTA D M, et al. Terabit/Sec VCSEL-based 48-channel optical module based on holey CMOS transceiver IC[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 672-680.

[31] WESTBROOK P S, ABEDIN K S, TAUNAY T F, et al. Multicore fiber distributed feedback lasers[J]. Optics Letters, 2012, 37(19): 4014-4016.

[32] DOERR C R, TAUNAY T F. Silicon photonics core, wavelength, and polarization-diversity receiver[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(9): 597-599.

[33] PUTTNAM B J, LUÍS R S, SAKAGUCHI J, et al. High capacity multi-core fiber systems[C]//European Conference on Networks and Optical Communications, June 1-3, 2016, Lisbon, Portugal. New Jersey: IEEE Press, 2016: 29-34.

[34] ISO/IEC. 11801: Information technology-Generic cabling for customer premises[S]. 2014.

[35] SILLARD P, BIGOT-ASTRUC M, MOLIN D. Few-mode fibers for mode-division-multiplexed systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(16): 2824-2829.

[36] FONTAINE N K, RYF R, CHEN H, et al. 30×30 MIMO transmission over 15 spatial modes[C]//Optical Fiber Communica-

tions Conference and Exhibition, March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. [S.l.:s.n.], 2015: PDP-Th5C.1.

[37] SILLARD P. Next-generation fibers for space-division- multiplexed transmissions[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(5): 1092-1099.

[38] SILLARD P. Few-mode fibers for space division multiplexing[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 20-25, 2016, Anaheim, CA, USA. [S.l.:s.n.], 2016: Th1J.1.

[39] RANDEL S, RYF R, SIERRA A, et al. 6×56-Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33-km few-mode fiber enabled by 6×6 MIMO equalization[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16697-16707.

[40] MORI T, SAKAMOTO T, WADA M, et al. Six-LP-mode transmission fiber with DMD of less than 70 ps/km over C+L band[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 9-13, 2014, San Francisco, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: M3F.3.

[41] RICHARDSON D J, FENG F, PAYNE F, et al. All-optical mode-group division multiplexing over a graded-index ring-core fiber with single radial mode[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 20-25, 2016, Anaheim, CA, USA. [S.l.:s.n.], 2016: W3D.5.

[42] MILIONE G, IP E, LI M J, et al. Spatial mode analysis of an elliptical-core, few-mode, optical fiber for MIMO-less space-division-multiplexing[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 20-25, 2016, Anaheim, CA, USA. [S.l.:s.n.], 2016: W1F.3.

[43] WHEELER N V, CHEN Y, HAYES J R, et al. High capacity, low latency data transmission using hollow core-photonic bandgap fibers[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 20-25, 2016, Anaheim, CA, USA.. [S.l.:s.n.], 2016: Th4E.1.

[44] AMIN A A, LI A, SHIEH W, et al. Transmission of 107-Gb/s mode and polarization multiplexed CO-OFDM signal over a two-mode fiber[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8808-8814.

[45] HANZAWA N, SAITOH K, SAKAMOTO T, et al. Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fiber with mode coupler[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 6-10, 2011, Los Angeles, CA, USA. [S.l.:s.n.], 2011: OWA4.

[46] KOEBELE C, SALSI M, MILORD L, et al. 40km transmission of five mode division multiplexed data streams at 100Gb/s with low MIMO-DSP complexity[C]//European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 18-22, 2011, Geneva, Switzerland. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-3.

[47] KOEBELE C, SALSI M, SPERTI D, et al. Two mode transmission at 2×100 Gb/s, over 40 km-long prototype few-mode fiber, using LCOS-based programmable mode multiplexer and demultiplexer[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16593-16600.

[48] BIRKS T A, GRISSÁNCHEZ I, YEROLATSITIS S, et al. The photonic lantern[J]. Advances in Optics & Photonics, 2015, 7(2): 107-167.

[49] OPTOSCRIBE. Photonic Lantern[EB/OL]. [2017-06-14]. http://www.optoscribe.com.

[50] HUANG B, XIA C, MATZ G, et al. Structured directional coupler pair for multiplexing of degenerate modes[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 17-21, 2013, Anaheim, USA. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-3.

[51] DENOLLE B, LABROILLE G, MORIZUR J F, et al. Mode selective 10-mode multiplexer based on multi-plane light conversion[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. [S.l.:s.n.], 2017: Th3E.5.

[52] RYF R, RANDEL S, FONTAINE N K, et al. 32-bit/s/Hz spectral efficiency WDM transmission over 177-km few-mode fiber[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 17-21, 2013, Anaheim, USA. New Jersey: IEEE Press, 2013:1-3.

[53] JUNG Y, KANG Q, SAHU J K, et al. Reconfigurable modal gain control of a few-mode EDFA supporting six spatial modes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(11): 1100-1103.

[54] JUNG Y, LIM E L, KANG Q, et al. Cladding pumped few-mode EDFA for mode division multiplexed transmission[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 29008-29013.

[55] GENEVAUX P, SIMONNEAU C, CHARLET G. Challenges in the design of few mode EDFAs[C]//Optical Fiber Communication Conference. [S.l.:s.n.], 2016: Tu2I.2.

[56] CHEN H, RYF R, FONTAINE N K, et al. High spectral efficiency mode-multiplexed transmission over 87-km 10-mode fiber[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 20-24, 2016, Anaheim, USA. New Jersey: IEEE Press, 2016: Th4C.2.

[57] GNAUCK A H, CHEN H, TOULOUSE J, et al. Transmission over 1050-km few-mode fiber based on bidirectional distributed raman amplification[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(8): 1864-1871.

[58] SAKAGUCHI J, KLAUS W, MENDINUETA J M D, et al. Realizing a 36-core, 3-mode fiber with 108 spatial channels[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-3.

[59] SHIBAHARA K, MIZUNO T, TAKARA H, et al. Dense SDM (12-core × 3-mode) transmission over 527 km with 33.2-ns mode-dispersion employing low-complexity parallel MIMO frequency-domain equalization[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-3.

[60] EZNAVEH Z S, LOPEZ J E A, GALMICHE G L, et al. Few

mode multicore photonic lantern multiplexer[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 20-24, 2016, Anaheim, USA. New Jersey: IEEE Press, 2016: Tu3I.5.

[61] JIN C, HUANG B, SHANG K, et al. Efficient annular cladding amplifier with six, three-mode cores[C]//European Conference on Optical Communication, March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. [S.l.:s.n.], 2015: 1-3.

[62] WILLNER A E, MOLISCH A F, BAO C, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. Advances in Optics & Photonics, 2015, 7(1): 66-106.

[63] 赖俊森, 吴冰冰, 赵文玉, 等. 光通信中轨道角动量技术及应用前景分析[J]. 电信科学, 2014, 30(5): 46-50.
LAI J S, WU B B, ZHAO W Y, et al. Orbital angular momentum technology in optical communication and its application analysis[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(5): 46-50.

[64] HARM W, BERNET S, RITSCH-MARTE M, et al. Adjustable diffractive spiral phase plates[J]. Optics Express, 2015, 23(1): 413-21.

[65] SHEN Y, CAMPBELL G T, HAGE B, et al. Generation and interferometric analysis of high charge optical vortices[J]. Journal of Optics, 2013, 15(4): 4005.

[66] KARIMI E, SCHULZ S A, LEON I D, et al. Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface[J]. Light Science & Applications, 2014, 3(5): e167.

[67] CAI X, WANG J, STRAIN M, et al. Integrated compact optical vortex beam emitters[J] Science, 2012, 338(6105): 363-366.

[68] HUANG H, REN Y, XIE G, et al. Tunable orbital angular momentum mode filter based on optical geometric transformation[J]. Optics Letters, 2014, 39(6): 1689-1692.

[69] DOERR C R, BUHL L, FONTAINE N K. Efficient multiplexing and demultiplexing of free-space orbital angular momentum using photonic integrated circuits[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition, March 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2012: OTu1I.2.

[70] WANG J, YANG J Y, FAZAL I, et al. Experimental demonstration of 100-Gbit/s DQPSK data exchange between orbital-angular-momentum modes[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition, March 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2012: OW1I.5.

[71] HUANG H, YUE Y, YAN Y, et al. Liquid-crystal-on- silicon-based optical add/drop multiplexer for orbital-angular- momentum-multiplexed optical links[J]. Optics Letters, 2013, 38(23): 5142.

[72] BOZINOVIC N, YUE Y, REN Y, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. Science, 2013, 340(6140): 1545-1548.

[73] MILIONE G, HUANG H, LAVERY M, et al. Orbital- angular-momentum mode (de)multiplexer: a single optical element for MIMO-based and non-MIMO-based multimode fiber systems[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 9-13, 2014, San Francisco, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: M3K.6.

[74] WANG A, DU C, WANG J, et al. Experimental demonstration of orbital angular momentum (oam) modes transmission in a 2.6 km conventional graded-index multimode fiber assisted by high efficient mode-group excitation[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. [S.l.:s.n.], 2016: W2A.32.

[75] MIZUNO T, SHIBAHARA K, YE F, et al. Long-haul dense space division multiplexed transmission over low-crosstalk heterogeneous 32-core transmission line using partial recirculating loop system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017(99): 488-498.

[76] 付松年, 于大伟. 基于少模光纤的模分复用光传输技术[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 62-68.
FU S N, YU D W. Mode division multiplexing transmission over few-mode fiber[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(16): 62-68.

[77] 乐燕思, 王智, 李强, 等. 光纤型三模式复用解复用器的研究[J]. 中国激光, 2016(6): 185-190.
LE Y S, WANG Z, LI Q, et al. Research on three mode fiber multiplexer and demultiplexer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016(6): 185-190.

[78] 郑兴娟, 任国斌, 林黄, 等. 少模光纤的弯曲损耗研究[J]. 物理学报, 2016, 65(6): 064208.
ZHENG X J, REN G B, LIN H, et al. Study on bending losses of few-mode optical fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(6): 064208.

[79] 黄战华, 赵宇璐, 李桂芳, 等. 少模光纤通信频域均衡中的大点数 FFT 设计[J]. 激光技术, 2016, 40(2): 161-165.
HUANG Z H, ZHAO Y L, LI G F, et al. Long point FFT design for frequency domain equalization of few-mode fiber communication[J]. Laser Technology, 2016. 40(2): 161-165.

[80] 赵生妹, 蒋欣成, 巩龙延, 等. 轨道角动量态复用通信研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2015, 35(6): 1-13.
ZHAO S M, JIANG X C, GONG L Y, et al. Communications using orbital angular momentum multiplexing[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2015, 35(6): 1-13.

[81] 袁小聪, 贾平, 雷霆, 等. 光学旋涡与轨道角动量光通信[J]. 深圳大学学报(理工版), 2014, 31(4): 331-346.
YUAN X C, JIAN P, LEI T, et al. Optical vortices and optical communication with orbital angular momentum[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2014, 31(4): 331-346.

[82] FIBERCORE. Multicore fiber[EB/OL]. [2017-06-14]. http://fibercore.com.

[83] OFS. Few Mode fiber[EB/OL]. [2017-06-14]. http://www.ofsoptics.com.

[84] GRUNER-NIELSEN L, SUN Y, JENSEN R V, et al. Splicing of few mode fibers[C]// European Conference on Optical Communication, September 21-25, 2014, Cannes, France. [S.l.:s.n.], 2014: 1-3.

[85] 余少华, 杨奇, 薛道均, 等. 超高速超大容量超长距离光传输基础理论与关键技术研究[J]. 电信科学, 2014, 30(10): 52-63.

YU S H, YANG Q, XU D J, et al. Research on basic theory and key technology of ultra-high-speed, ultra-large-capacity, ultra-long-haul optical transmission[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(10): 52-63.

[86] 罗鸣, 贺志学, 胡荣, 等. 面向单纤 100 Tbit/s 容量的光传输技术[J]. 电信科学, 2015, 31(10): 49-56.
LUO M, HE Z X, HU R, et al. 100 Tbit/s optical transmission technology on single mode fiber[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(10): 49-56.

[87] 崔秀国, 刘翔, 操时宜, 等. 光纤通信系统技术的发展、挑战与机遇[J]. 电信科学, 2016, 32(5): 34-43.
CUI X G, LIU X, CAO S Y, et al. Development, challenge and opportunity of optical fiber communication system technologies[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(5): 34-43.

[作者简介]

赖俊森（1983−），男，博士，中国信息通信研究院技术与标准研究所高级工程师，主要研究方向为高速光传输、WDM/OTN、量子通信等。

汤瑞（1984−），男，中国信息通信研究院技术与标准研究所高级工程师，主要研究方向为高速光传输、WDM/OTN、光网络技术等。

吴冰冰（1984−），女，博士，中国信息通信研究院技术与标准研究所高级工程师，主要研究方向为光传输系统、高速光传输与光网络技术。

吴文宣（1960−），男，国网福建省电力有限公司高级工程师，主要研究方向为电力通信、光传输。

李宏发（1976−），男，国网福建省电力有限公司高级工程师，主要研究方向为光网络技术、OTN/SDH。

刘国军（1983−），男，全球能源互联网研究院高级工程师，主要研究方向为电力通信、通信安全等。

赵文玉（1973−），男，博士，中国信息通信研究院技术与标准研究所主任工程师，主要研究方向为高速光纤通信网、WDM/OTN、量子通信等光网络新技术、标准制定和系统测试评估等。

张海懿（1972−），女，中国信息通信研究院技术与标准研究所高级工程师、宽带网络研究部主任，主要研究方向为高速光纤通信网、自动交换光网络、SDN 和量子通信等新技术研究、体制标准制定、运营商技术咨询等。