

# 多芯光纤制备技术与应用的新进展

杨晨 李博睿 童维军

**摘要:** 多芯光纤因其特殊的结构, 其光纤的设计与制备以及应用, 受到越来越多的关注。本文介绍了长飞公司多芯光纤制备技术的最新进展, 包括耦合器的研制进展。同时也介绍了多芯光纤利用其空分复用特性, 在通信及传感中的应用研究进展。

**关键词:** 多芯 扇入扇出 空分复用 通信 传感

## 1. 引言

近年来, 长飞公司特种产品事业部联合华中科技大学光通信与光网络工程研究团队率先在国内拉制了同质型弱耦合 7 芯单模光纤, 填补了国内在该特种光纤领域的技术空白。

## 2. 多芯光纤与空分复用技术的兴起

根据贝尔实验室、思科公司等业界巨头对现有光纤网络不同应用的流量增长趋势统计结果, 当前光纤通信网络的流量正以 20%~60% 高速增长。如图 1 所示, 考虑到 2010 年商用光通信系统实现端口速率 100Gb/s, 系统容量 10Tb/s, 在未来十年, 光纤通信系统容量将达到 100Tb/s 左右。然而目前光纤通信系统存在着若干限制: 首先, 结合低损耗传输窗口和放大器带宽, 有用频谱约为 10THz; 其次, 信号在光纤传输中会面临着放大器的自发辐射噪声(ASE)带来的光信噪比恶化, 以及由光纤非线性克尔效应带来的非线性损伤, 使得系统容量存在非线性香农极限, 即通过提高信噪比来提高高频谱效率信号的传输质量会产生非常严重的非线性畸变。

从光信号的本质出发, 其物理复用维度包括五个方面(如图 2 所示), 分别为时间、

偏振、频率、正交及空间。光纤通信系统中高速信号正在采用多种复用技术, 如时分复用、波分复用、偏振复用以及利用相干探测技术的振幅-相位正交复用。而在光纤物理层中唯一未被深入研究的空间维度(space)一空分复用技术(SDM)成为了突破光纤通信系统容量限制的必然选择。

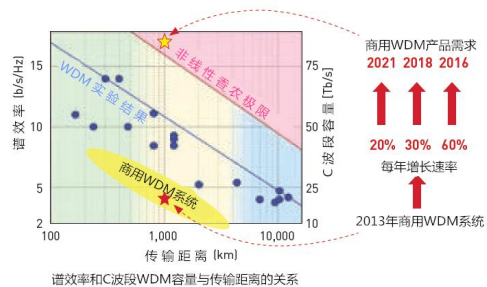


图 1 光纤通信系统容量增长趋势

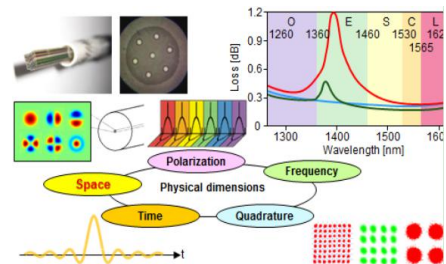


图 2 光信号物理复用维度

2010 年在欧洲光通信会议上, 以多芯光纤和少模光纤为基础的空分复用技术(SDM)作为提升光纤通信系统的关键技术得到了众机构科学家的认同, 被视作继波分复用技

术之后的光纤传输技术的第二次技术革命。WDM之父厉鼎毅先生对SDM给予很高的评价。

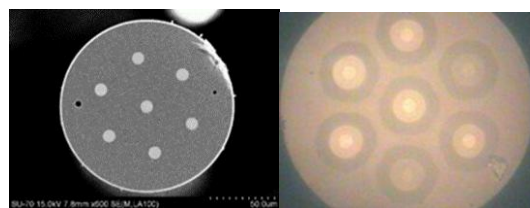
自SDM技术被提出之后，6年来得到了欧美日等国科研机构的高度重视，其中日本情报通信研究机构(NICT)、日本电话电报公司(NTT)牵头，东北大学、北海道大学、大阪大学、住友公司及藤仓公司等多家机构参与的EXAT项目提出2020年实现光纤通信系统容量千倍跃升的目标。在短短几年的时间里就完成了多批次低损耗、低串扰多芯光纤的设计、拉制以及测试，制作了多种低损耗低串扰的复用/解复用器，并多次在OFC、ECOC等国际会议上报导英雄传输实验。在欧洲，欧盟针对空分复用技术的研究建立了MODE-GAP项目，联合了包括南安普顿大学、阿斯顿大学、埃因霍温理工大学等多家大学和公司，重点开展基于少模光纤的空分复用技术的研究，尤其是基于少模光纤的复用/解复用器件的制作和开发，并迅速地将其产业化。在美国，贝尔实验室等科研机构利用康宁公司、OFS公司研制的多芯光纤、少模光纤，报导了大量的传输实验结果，并实现了空分复用实时传输实验，标志着空分复用传输从实验室理想环境走向了更复杂的现场实时传输。

### 3. 多芯光纤及其复用器件的制备技术新进展

由于基于少模光纤的空分复用技术需要在相干接收机采用极其复杂的DSP算法，且模式相关损耗会显著降低传输性能等本质特征（且这些特征随着传输距离的增加，模式复用数目的增加而急剧劣化），我们选择了应用前景更为明朗，更有利于在中短期解决现有光纤通信系统容量瓶颈的多芯光纤空分复

用技术。

长飞光纤光缆股份有限公司，通过与华中科技大学光通信与光网络工程研究团队合作，率先在国内拉制了同质型弱耦合7芯单模光纤。通过对7芯波导结构的仿真计算，拉制了两种同质型多芯光纤，即非低串扰与低串扰的7芯光纤，其电镜图如图3所示。通过对光纤衰减谱、截止波长、弯曲损耗、串扰、色散、PMD等性能参数的测试，不断优化工艺，最终实现低串扰、低损耗的7芯光纤。光纤在1550nm的为衰减0.20dB/km左右，串扰低于-40dB/100km，填补了国内在该特种光纤领域的技术空白，在产品性能上与国际领先的OFS、康宁、藤仓等众多光纤厂商接近。



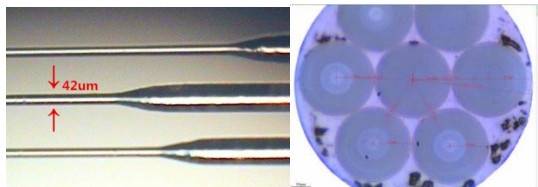
(a) (b)

图3 7芯光纤端面电镜图

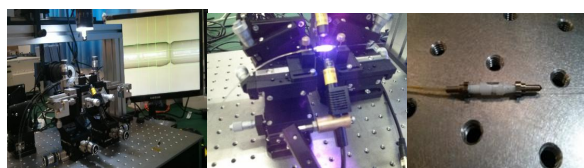
另一方面，适用于多芯光纤的空间复用/解复用器至关重要，因为在收发两端及网络节点，仍然是基于单模光纤的器件，因此有必要将多路单模光纤中的信号复用进多芯光纤，并将多芯光纤中的多路并行信号解复用到多路单模光纤中。针对多芯光纤复用/解复用器，在综合比较了国际上主流技术的利弊之后，结合自身条件，选择了光纤束冷接工艺的技术方法来实现复用/解复用器。

在复用/解复用器的制备上，主要通过光纤预处理→光纤束预组装→在线空间对准→封装等工艺步骤来实现。具体流程如图4所

示。经过不断的工艺优化，最终实现插入损耗 $<1.5\text{dB}$ ，串扰 $<-45\text{dB}$ ，回波反射 $<-50\text{dB}$ ，在综合性能指标上达到了国际先进水平。



(a)腐蚀光纤束显微照片 (b)光纤束端面显微照片



(c)六维对准平台 (d)紫外固化过程

(e)多芯光纤复用/解复用器实物图

图4 多芯光纤复用/解复用器制作流程

凭借高质量的多芯光纤复用/解复用器，一方面很快打开了国内国际市场，得到了客户的青睐，并受到了清华大学、暨南大学、北京科技大学、香港理工大学、瑞典查尔姆斯大学、以及美国 Chiral Photonics 公司等的一致好评。

#### 4. 多芯光纤的应用试验

基于上述多芯光纤及复用器件，我们在通信传输方面做了一些应用的试验工作。

首先，针对当前空分复用大容量接入网距离短、速率低、调制格式低级，普遍采用时分复用的研究现状，搭建了多芯光纤传输平台，由光频梳作为下行光源，调制高阶格式信号，经过6个外层芯传输到ONU端；在ONU端，上行采用可调激光器作为光源，调制OOK信号，同样经过6个外层芯传输。为

了降低成本，对上下行信号采用直调直检技术。为了兼容移动回传业务，在中间芯传输移动回传信号，并在OLT端进行相干接收，从而实现兼容移动业务的新型大容量波分/空分接入网架构（如图5所示）。初步实现在58公里多芯光纤下行传输容量300Gb/s，支持60个用户，每个用户5Gb/s。实验结果如图6、图7所示。

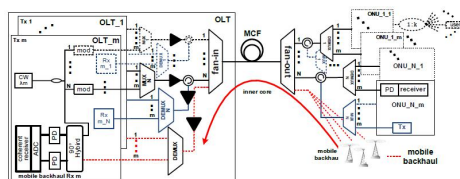


图5 新型波分/空分接入网架构

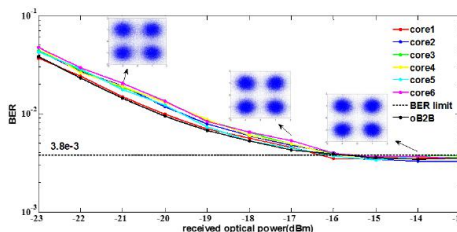
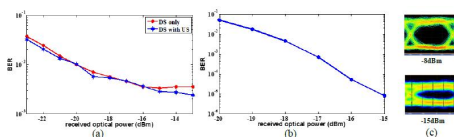


图6 下行传输结果



(a) 在上行传输存在的条件下的下行信号传输结果

(b) 上行信号传输结果 (c) -8dBm 和 -15dBm 接收

功率时的眼图

图7 上行传输结果

其次，在此架构基础上进行了优化改进，一方面通过在接收端采用RSOA实现低成本无色ONU，另一方面采用更高级调制格式以及自适应调制增加系统容量。在新的架构中，下行信号在调制后经过外层5个芯传输到ONU端，对于上行信号的载波，通过外层第六个芯单独进行传输到ONU端进行RSOA再

调制后，从中间芯进行传输。另外，对于移动回传信号，采用偏振复用以增加容量，速率达到 48Gb/s。该接入网架构如图 8 所示。实验示意图如图 9 所示。在实验中，由于 RSOA 带宽有限，采用注水算法对其进行自适应调制 OFDM 信号，使其在 1.25G 带宽下传输速率达到 3.12Gb/s。最终实现下行 50 个用户，单个用户接入速率 5Gb/s，系统容量达到 250Gb/s。上行速率达到 3.12Gb/s，且兼容移动回传业务，容量达到 48Gb/s。实验结果如图 10、图 11 所示。

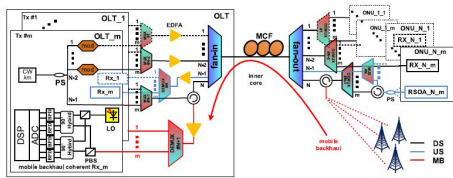


图 8 波分/空分接入网架构示意图

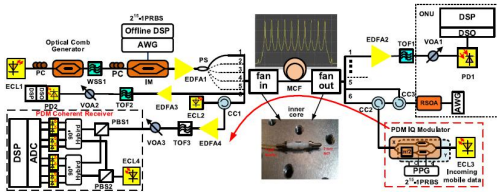


图 9 实验示意图

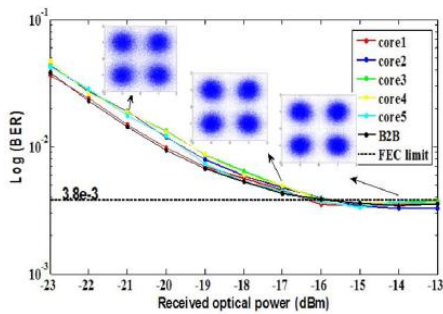


图 10 下行传输实验结果图

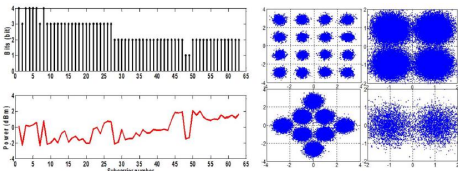


图 11 上行信号经过 RSOA 自适应调制结果示意图

## 5. 未来发展方向与展望

空分复用光纤通信技术成为业界主流的选择将是一个漫长的过程，期间既有运营商、系统供应商对现有单模光纤通信技术的潜能

### 长飞光纤光缆股份有限公司

Yangtze Optical Fibre and Cable Joint Stock Limited Company

地址：武汉市光谷大道9号（430073）

ADD: No.9 Optics Valley Avenue, Wuhan, Hubei, China(P.C.: 430073)

电话(Tel): +86 400-991-6698

邮箱(Email): marketing@yofc.com

www.yofc.com

继续挖掘，也会包括彼此之间的博弈，权衡取舍。

从空分复用技术自身角度来讲，一方面需要不断改善空分复用器件性能，尽快制定相关标准。目前基于多芯光纤的空分复用系统不断得到完善，日本住友公司已经拉制出超低损耗多芯光纤，藤仓公司也拉制出 22 芯、30 芯等更多数目的多芯光纤。复用/解复用器日益的集成化、小型化，多芯光纤熔接技术、连接器、放大器都日臻完善。另一方面，空分复用技术需要找到更适合自己的应用场景，譬如，多芯光纤的特点之一就是空间利用率高，性能近似于多根单模光纤的同时可以节省更多空间，那么这一特点就非常适用于对空间敏感的数据中心的应用。

随着云计算的风靡，互联网巨头规划建设了越来越多的大型数据中心，多芯光纤具有非常大的潜能，发挥用武之地。随着移动通信技术的发展，基于移动通信网络的丰富应用带动了移动数据业务的大幅度增长，为了在大幅度扩容时同时满足绿色和低成本的运营要求，5G 无线网络的频谱效率和能量效率都需要在 4G 标准上提高一个数量级。而未来 5G 通信中关键技术之一就是大规模阵列天线多输入多输出技术（Massive MIMO），假设阵列天线由 128 根天线组成，信号带宽 100MHz，采用 16bits 量化和 8b/10b 编码，则

其与基带池链路的数字复合速率将高达786Gbps。因此基于光纤的光载无线（RoF）传输技术将是未来移动通信传输的关键技术。目前国际上关于5G关键技术的研发开展的如火如荼，而空分复用技术将会丰富其技术方案的选择，甚至有潜力成为其中的关键技术。