

空分复用光纤的特性及其应用研究

裴 丽,王建帅,郑晶晶,宁提纲,解宇恒,何 倩,李 晶

(北京交通大学 光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室,北京 100044)

摘 要: 随着 5G、物联网以及大数据等业务的发展,光通信网作为数据传输的主干线,扩展其系统容量、提高传输稳定性以及网络智能化势在必行。空分复用技术主要以多芯光纤、少模光纤以及少模-多芯光纤作为实现载体,被认为是提升光通信网络系统容量、构建下一代光通信网络的关键。主要研究了空分复用光纤在光传输、高性能激光器、光纤传感等领域的应用,结合已报道的实验结果,充分说明空分复用光纤的研究是现代光纤通信系统的重要方向,也是未来光通信领域研究和关注的热点。

关键词: 多芯光纤; 少模光纤; 高功率光纤激光器; 光纤传感

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1002001

Research on specialty and application of space-division-multiplexing fiber

Pei Li, Wang Jianshuai, Zheng Jingjing, Ning Tigang, Xie Yuheng, He Qian, Li Jing

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of EMC,
Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the development of 5G, internet of things and big data, optical communication networks, as the backbone of data transmission, are imperative to expand their capacity, improve transmission stability and network intelligence. Space-division multiplexing technology, which is mainly based on multi-core fiber, few-mode fiber and few-mode-multi-core fiber, is considered to be the key to improve the capacity of optical communication network system and build next-generation optical communication networks. Based on the reported experimental results, the application of space-division multiplexed fiber was mainly studied in optical transmission, high-performance laser and fiber sensing. It is fully demonstrated that the space-division multiplexed fibers are important to the modern optical fiber communication system. It will be a hot spot and should be drawn much attention for the evolving optical communication.

Key words: multicore fiber; few mode fiber; high power fiber laser; fiber sensing

收稿日期:2018-08-12; 修订日期:2018-09-18

基金项目:国家自然科学基金(61525501,61827817)

作者简介:裴丽(1970-),女,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、特种光纤等方面的研究。Email:lipei@bjtu.edu.cn

0 引言

当今社会正在步入“工业 4.0”时代。“互联网+”“大数据”、“云计算”、“智慧城市”、“AR”和“深度计算”等技术快速发展,“IPTV”和“高清视频多媒体”等技术已经深入到人们生活的方方面面。所有这些信息技术的蓬勃发展和大规模应用都伴随着大量数据和信息的产生。并且,随着社会的发展,数据还在不断地成倍增长,可以说当今社会已经是数据时代。数据的不断增长,极大地提高了对通信容量的需求,而光纤通信作为通信主干线,其升级扩容势在必行。空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)技术作为一种新的复用技术,利用空间的分割实现光纤维度的复用,被认为是突破单模光纤传输容量极限,满足未来大容量高速率光纤系统需求的一个必然趋势。空分复用技术以多芯光纤(Multicore Fiber, MCF)、少模光纤(Few-Mode Fiber, FMF)以及少模-多芯光纤(Few-Mode-Multicore Fiber, FM-MCF)为主要的实现方式^[1-3],其可以在不增加光缆铺设面积的同时大大提高光纤通信的容量,成为解决目前普通单模光纤容量危机的重要手段。

空分复用光纤除了在传输领域扮演着重要角色以外,研究者们还发现,通过改变空分复用光纤芯子的大小、芯间距、折射率分布等参数,可以实现其在光纤激光以及光纤传感等领域的重要应用。并且,由于其结构特点,空分复用光纤可为大功率激光器、高灵敏度多维传感器提供良好的器件基础。空分复用光纤的研究将极大促进未来光纤通信系统的发展。

文中从空分复用光纤在光传输、激光器以及光纤传感三个方面简述其特性以及在现代光纤通信系统中的重要应用。

1 空分复用光纤在光传输中的重要应用

相比传统的单模光纤,空分复用光纤的传输系统略有不同,其输入/输出端通常需要借助光子灯笼等扇入-扇出设备实现多个芯子的全接入,使得光信号在不同的芯子中独立传输,如图 1(a)所示^[4]。而对于少模光纤传输系统,则需要在发射端和接收端增加模式复用器/解复用器,将信息加载到不同的模式,并将其传输到光通信系统中,如图 1(b)所示^[5]。

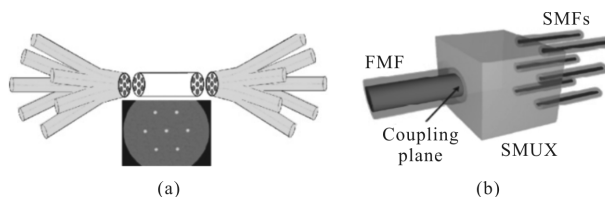


图 1 (a) 多芯光纤接入光纤通信系统^[4]; (b) 少模光纤接入光纤通信系统^[5]

Fig.1 Configuration of the optical fiber communication system of (a) multicore fiber^[4]; (b) few mode fiber^[5]

1.1 多芯光纤光传输

当多芯光纤的芯间距较大时,芯子间的耦合较弱,多芯光纤的多个芯子可用作相对独立的信道,传输不同的光信息,这种光纤称为弱耦合多芯光纤,多用于空分复用光传输系统。然而,该类型多芯光纤用于长距离传输时,芯间串扰不可避免地成为制约其传输效率的主要因素。当串扰较大时,光纤传输距离受限,而且在接收端信号损伤严重,难以恢复,影响通信质量。研究表明,只有当芯间串扰值低于-30 dB/100 km 时,才能满足大容量长距离光纤传输系统的要求^[6]。因此,如何降低芯间串扰成为传输型多芯光纤必须解决的重要问题。根据功率耦合理论,多芯光纤的芯间串扰定义为^[7]:

$$XT = \tanh(\bar{h}_{mn}L) \quad (1)$$

式中: \bar{h}_{mn} 为 m, n 两个芯子的平均功率耦合系数; L 为传输距离。当纤芯为同质结构时:

$$\bar{h}_{mn} = \frac{2\kappa_{mn}R}{\beta_n\Lambda} \quad (2)$$

式中: R 为弯曲半径; Λ 为芯间距; κ_{mn} 为两芯子的耦合常数; β_n 为芯子中模式的传输常数。由公式(2)可知,降低芯间串扰,需要增大芯间距和增加芯子之间的差异性来减小耦合系数。

除了抑制芯间串扰之外,多芯光纤的设计还要考虑其他参数,例如光纤模场面积(A_{eff})以及纤芯复用因子。研究表明,对于传输型光纤,模场面积的增加可以有效减小非线性效应,从而提升系统的光信噪比,具有大模场面积的多芯光纤有利于更长距离的传输且增加了传输系统基带的宽度。光纤模场面积的计算公式为^[8-9]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |E|^2 dx dy \right)}{\iint |E|^4 dx dy} \quad (3)$$

式中： E 为基模的电场强度。

此外，在实际应用中，研究者希望在一定的光缆铺设体积内，能容纳尽可能多的芯子以提升传输容量。因此在设计传输型多芯光纤时，不能单独为了降低芯间串扰而大幅度增加芯间距。纤芯复用因子 (CMF) 用于定义单位面积内光纤模场的大小，是衡量多芯光纤空间复用度的重要参数，其计算公式表示为^[10]：

$$CMF = \frac{NA_{eff}}{\pi(D/2)^2} \quad (4)$$

式中： N 为芯子的个数； D 为包层直径。

由上述分析可知，当各纤芯参数相同时，更小的芯间串扰与更大的纤芯复用因子往往是不可兼得的。因此，在设计传输型多芯光纤的过程中，需要在芯间串扰、模场面积以及纤芯复用因子三者间做相应的权衡，根据实际需要来设计并优化多芯光纤。

多芯光纤的研究由来已久，早在 1994 年 7 月，法国电信公司就提出了多芯单模光纤的概念，并与阿尔卡特公司进行了 4 芯单模光纤的设计研究和开发。该实验制造了 100 多千米的多芯光纤，光纤密集度得到了极大的提高^[11]。初步证实了提出的多芯单模光纤能够基本解决开发高密度大芯数光纤和降低光纤制造成本两大难题。但由于当时条件技术的限制，多芯光纤并未大量制作，实用化困难。

近年来，由于光纤制作条件、光纤切割、熔接等设备的完善以及大容量光通信的迫切需求，多芯光纤的研究发展迅速。以“降低芯间串扰、增大光纤模场面积、增大光纤空间复用度”为原则，多个研究机构对多芯光纤进行了研究。2010 年，美国 OFS 实验室设计并开发了 7 芯光纤用来传输 2.5 Gb/s 的信号，光纤的折射率分布为阶跃型，传输距离为 11.3 km^[12]。2011 年，美国贝尔实验室，利用 7 芯光纤实现了 1.12 Tb/s 的传输，传输距离为 76.8 km^[13]。同年，OFS 和贝尔实验室合作，利用 7 芯光纤结合密集波分复用技术，实现了传输容量为 112 Tb/s、传输距离为 76.8 km 的传输系统^[14]。在接下来的研究中，上述研究机构还提出了传输容量为 1.28 Tb/s，传输距离为 2 688 km 的系统等^[14]。除美国的多个研究机构外，日本住友、藤仓等公司一直致力于多芯光纤的研究。2011 年，为提高光纤传输距离，降低芯间串扰，日本住友公司提出了折射率沟槽辅助型多芯光纤，该光

纤在传输 10 000 km 后，芯间串扰仍保持在 -30 dB 以下，其折射率分布如图 2 所示^[15]。2013 年，该研究机构又提出了 110.9 Tb/s、传输距离为 6 370 km 的 7 芯光纤传输系统，突破了在一根多芯光纤上传输 100 Tbit/s 的物理极限，并大大增加了光纤的传输距离^[16]。

由于纤芯排列方式为正六边形的同质 7 芯光纤在实际生产环节相对容易制作，因此在前期的研究中，多芯光纤传输系统大多采用 7 芯光纤。当光纤直径一定时，为进一步提高传输容量，需要增大光纤的空间复用因子，于是 12 芯、32 芯等光纤相继出现。2013 年，日本的 NTT 公司设计了一种基于双环型 12 芯光纤的 2×344 Tb/s 的正反交错传输系统，传输距离为 1 500 km^[17]。同年，该公司利用 12 芯光纤又设计了 2×409 Tb/s 的双向传输系统，传输距离为 450 km^[18]。2016 年，美国提出了一种基于 12 芯的多芯光纤传输系统，通过改变芯子分布为环形排列方式，传输容量达到 105 Tb/s，传输距离高达 14 360 km^[19]。为进一步增大芯子复用度，2016~2017 年，日本 NTT 公司提出了一种 32 芯光纤，在保持高芯子复用度的同时，为降低芯间串扰，设计相邻的芯子具有不同的折射率分布，在传输 54 km 之后，其串扰值仍保持在 -34 dB 以下，该系统传输距离达到 1 644.8 km^[20]，其光纤的横截面图如图 3 所示，奇数与偶数芯子具有不同折射率分布。

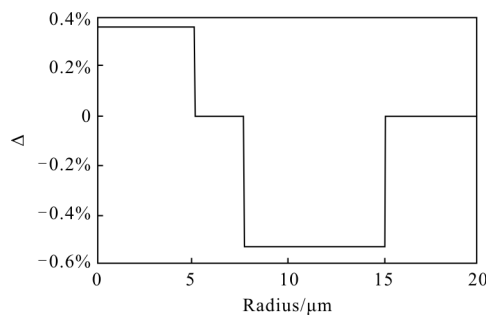


图 2 沟槽辅助型光纤的折射率分布^[15]

Fig.2 Refractive index profile of the fiber with a trench assisted^[15]

除上述国外研究机构外，国内的烽火科技和长飞光纤光缆等公司一直致力于多芯光纤的制造和实用化。2017 年初，烽火科技利用波分复用及空分复用结合实现了 560 Tb/s 超大容量的光传输系统实验，可实现一根光纤上 135 亿人同时通话，该成果标志着我国在“超大容量、超长距离、超高速率”光通信系统研究领域迈上了新的台阶。经过多年的研究，多

芯光纤已经被证明了突破单芯光纤通信容量的必然选择,在光纤传输领域有着极为重要的地位。

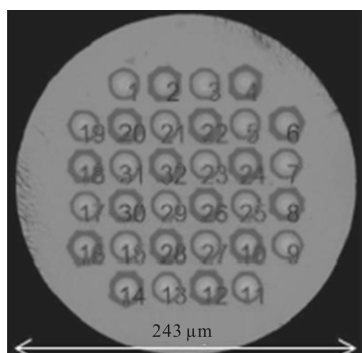


图 3 32 芯光纤的横截面图^[20]

Fig.3 Cross section of fiber with 32 cores^[20]

1.2 少模光纤光传输

少模光纤是空分复用技术的另一种有效实现方式。基于少模光纤的空分复用技术,即利用少模光纤中相互正交的模式作为独立信道来传递信息的技术,也被称为模分复用技术,在近几年受到了越来越多的关注。相比于单模光纤和多模光纤,支持少量模式传输的少模光纤既避免了模间色散对多模光纤的限制,又具有相对于单模光纤更大的非线性容限^[21]。另外,模分复用技术很好地解决了多进多出(MIMO)信号光传输的问题,在未来基于 MIMO 技术的 5G 移动通信网络无线信号分布中具有重要应用。因此,基于少模光纤的模分复用技术将成为大幅度提升长距离光通信系统传输容量的另一种有效解决方案。

少模光纤的光学参数主要包括模式有效面积、色散、损耗和差分模式延迟(DMGD)等。为了保证模分复用系统的传输性能,一般要求少模光纤有大模场有效面积、低色散、低损耗和小 DMGD 等性能^[22]。特别是越小的 DMGD 对少模光纤模分复用系统的传输性能影响越大,但随着少模光纤中导模数的增多,减小 DMGD 会变得越来越困难。自 2010 年模分复用技术的概念被提出之后,国内外各大科研机构迅速开展了相关研究工作。其中,国外阿尔卡特朗讯贝尔实验室、埃因霍温理工大学、日本 KDDI&R&D 实验室以及国内北京大学等科研机构在理论仿真、光纤制备、关键器件研发以及传输实验验证等方面取得了振奋人心的成果。

2012 年,阿尔卡特朗讯贝尔实验室提出了基于

自由空间光学的模分复用实验系统,实现了 6 个空间模式和偏振模式 40 Gb/s QPSK 信号的 96 km 传输,并在接收端利用 6×6 MIMO 均衡算法对接收信号进行了数字信号处理^[23]。此外,在 2012 年 OSA 年会报告中,美国 NEC 实验室首次提出了“光子灯笼”型模分复用器的概念,并报道了基于“光子灯笼”型模分复用器的实验系统,实现了 MDM-PDM-WDM 结合的 40 Gb/s QPSK 信号的 130 km 传输,获得了 3.8 Tb/s 的传输容量^[24]。2014 年,埃因霍温理工大学 COBRA 研究中心分别在少模光纤和新型空心光子带隙光纤上实现了模分复用系统,传输容量 73.7 Tb/s,单波长信道容量高达 960 Gb/s,为当时的最高记录^[25]。

就国内而言,对于少模光纤模分复用技术的研究尚处于研究的初级阶段。其中,北京大学等高校以及烽火通信等研发团队都对模分复用技术进行了深入的研究。在模分复用传输实验方面,北京大学在 2016 年 OFC 会议上报道了 MDM-PON 的实验结构以及测试方案,如图 4 所示,实现了 3×10 Gb/s OOK 信号的 7.4 km 少模光纤的传输^[26]。

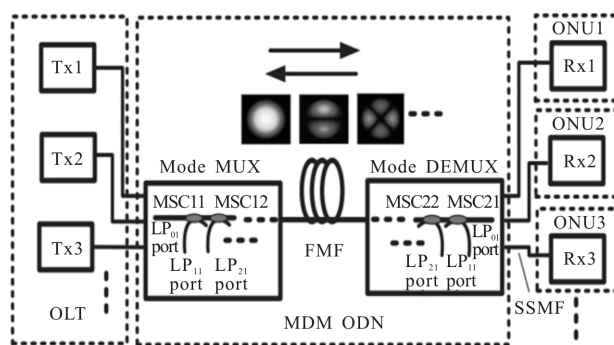


图 4 MDM-PON 实验结构示意图^[26]

Fig.4 Experimental configuration of MDM-PON^[26]

1.3 少模-多芯光纤光传输

对于传输型多芯光纤而言,为了抑制芯间串扰,必须在有限的包层空间内以一定的芯间距排列纤芯,但这种设计限制了纤芯数量的增加。而对于少模光纤,高阶模式的传输会导致弯曲损耗的急剧增大,并且使得接收端在解复用环节更加复杂。

为了解决上述问题,研究者们设计了少模-多芯光纤,它结合了多芯光纤与少模光纤各自的优点,能够进一步增加每根光纤的空间传输信道以达到更大

的传输容量。在少模-多芯光纤中,信道数量为纤芯数量 N 与单个纤芯中同时传输的模式数量 M 的乘积。为了减小接收端数字信号处理的复杂度,少模-多芯光纤中每个纤芯保持了足够小的模式差分群时延(DMD),从而可以使用 MIMO 系统来提升光通信系统的频谱效率。除了差分群延迟外,少模-多芯光纤的设计还需考虑空间信道数(SCC)、相对空间效率(RSE)等重要参数,其计算公式如下^[27]:

$$SCC=M \cdot N \quad (5)$$

$$RSE=\frac{M \cdot N}{D_c^2} \cdot 125^2 \quad (6)$$

式中: M 为单个纤芯中空间模式数; N 为纤芯数; D_c 为少模-多芯光纤包层直径。目前报道的少模-多芯光纤主要有 7 芯 3 模、19 芯 3 模、19 芯 6 模、21 芯 3 模和 36 芯 3 模等。对于少模-多芯光纤的传输实验,上述研究国外主要处于理论分析与实验阶段。2012 年, NEC、AT&T、CPEOL 等实验室的研究人员设计并制造了 7 芯 3 模光纤,达到了多模传输下的低芯间串扰预期目标,其中,每根光纤可以复用 21 种模式。2014 年,在 OFC 会议上,美国 IBM 研究中心设计了

一种少模-多芯光纤连接器。相对于普通单模光纤,少模-多芯光纤由于横向和旋转偏移量,需要更严格的计算公差。因此,少模-多芯光纤连接器需实现损耗小于 0.75 dB、偏移量在 $\pm 3 \mu\text{m}$ 的目标^[28]。2014 年,日本东北大学利用光学奈奎斯特调制方法对少模多芯光纤传输系统进行了设置,并完成了容量为 1 Pb/s 的传输实验,其传输系统装置如图 5 所示^[29]。2016 年,日本 KDDI&R&D 实验室利用 9.8 km 的 6 模 19 芯光纤实现了超高密度的空分复用传输实验,系统总容量达到 2.05 Pb/s,总频谱效率高达 456 bit/s/Hz,是目前空分复用总频谱效率的最高纪录^[30]。

近几年,国内一些高校和研究机构紧跟时代步伐,开展了对少模-多芯光纤的实验研究,但由于起步较晚,该方面的研究还处于初步的理论分析、软件仿真及小规模实验阶段。其中,复旦大学、北京邮电大学等已经开始了多芯空分复用、模分复用的基础研究。2011 年,复旦大学在 ACP 会议上发表了双模光纤中传输 20 Gbps 信号、距离为 80 km 的仿真结果,主要分析了模式激发及传输理论^[31]。2013 年,北京邮电大学搭建了基于双偏振模式复用仿真平台,完

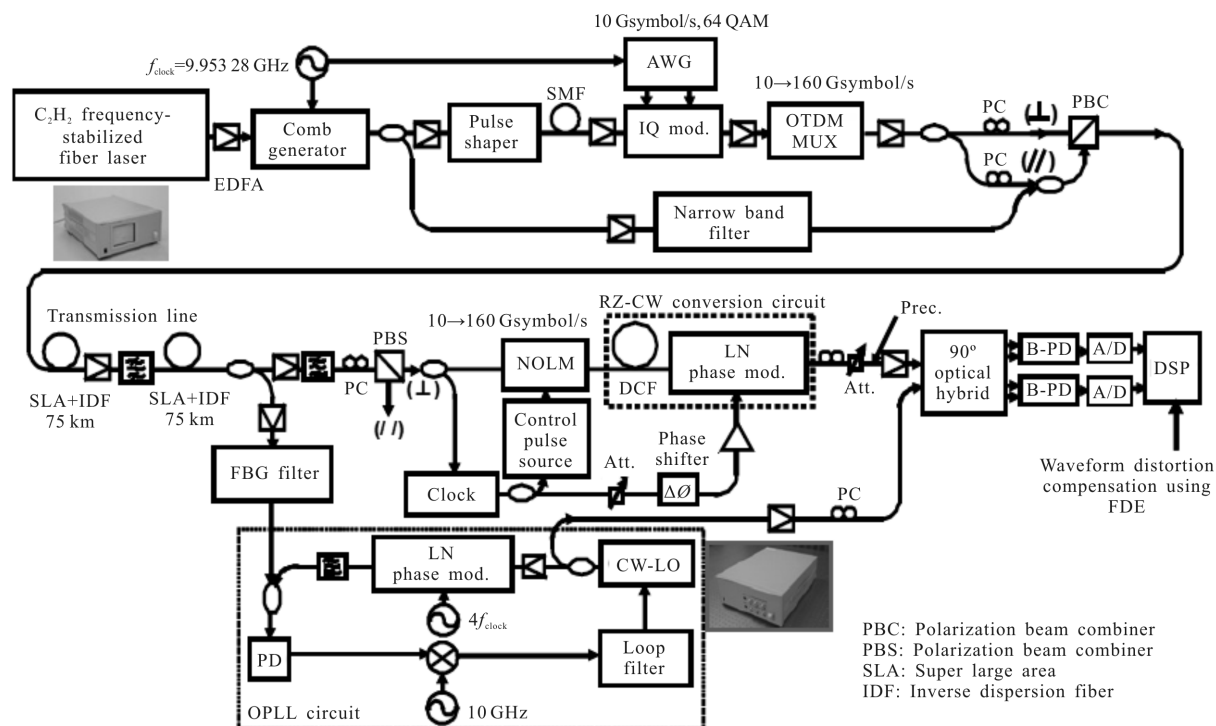


图 5 64-QAM Nyquist OTDM 光传输系统装置图^[29]

Fig.5 Experimental transition system configuration of the 64-QAM Nyquist OTDM^[29]

成了多模信号传输 70 km 的仿真实验^[32]。

相比于国外,国内关于少模-多芯光纤的一些基础理论尚需深入和细化,基于少模-多芯光纤的传输研究具有很大的发展空间,在下一代通信网络技术研究中,会吸引越来越多学者的注目。表 1 列出了近年来报道的几种典型少模-多芯光纤的光学特性,可以看到,研究者们不断通过优化光纤的结构参数,力求同时获得最大的传输容量和最长的传输距离。

表 1 近年来报道的少模-多芯光纤特性汇总

Tab.1 Characteristics of the FMF-MCF reported in recent years

Reference	SCC	Refractive index profile	Capacity	Distance/km
[33]	7×3	Trench-assisted	109 Tb/s	-
[22]	19×3	Air hole-assisted	305 Tb/s	-
[34]	7×3	Trench-assisted	6.28 Tb/s	29.0
[35]	36×3	Trench-assisted	512 Tb/s	>5.5
[36]	19×6	Trench-assisted	2.05 Pb/s	9.8

2 空分复用光纤在高性能激光器中的重要应用

近年来,光纤激光器向着高功率、高峰值功率以及高重复频率的方向飞速发展。然而,单模光纤的芯子直径一般为 8~9 μm,芯径注入光纤的信号功率极其有限。一旦纤芯中的能量密度过大,输出信号会由于非线性效应而产生畸变,甚至有可能让光纤烧毁。增加模场面积是抑制光学非线性效应的一个有效方法。此外,光纤激光器中模式不稳定现象损害激光器的光束质量。因此,抑制高阶模式、保持单模运行是进一步提高光纤激光器和放大器性能的重要方式。具有多个空间信道的空分复用光纤可以有效克服此缺陷,提高激光器的性能。其实现方式主要有两种:第一,扩大纤芯的直径,增大光纤的模场面积,从而提高输入功率;第二,采用多通道输入,在输出端再采用相干光合束的方案,进而提高激光器的功率与性能。因此,空分复用光纤成为制作高性能激光器的重要选择。

重要选择。

空分复用光纤中,少模光纤通常以“单模-少模-单模”级联的方式作为激光器的梳状滤波使用^[37]。2016 年,北京交通大学提出了以少模光纤作为滤波器的光纤激光器,实现了稳定的单波长、双波长与三波长的激光激射。结合偏芯光纤熔接结构提出并优化了增益与滤波同时进行的掺铒少模光纤梳状滤波器,在室温下采用单向泵浦结构、双向泵浦结构与非线性偏振旋转效应抑制模式竞争技术研究了不同的多波长激射特性^[38]。2018 年,北京交通大学又对少模与单模光纤的接入耦合进行优化,得到滤波器消光比高于 15 dB 并将其用于激光器的梳状滤波^[39]。然而,由于少模光纤中的模式竞争,使得光纤中模式不稳定,在高性能激光器中的应用遭遇瓶颈。

多芯光纤由于其芯子排列结构多样性,能够极大提高输入光功率:当多芯光纤的芯子距离较近时,多个芯子之间发生耦合,在芯子分布的区域共同形成超模在光纤中传输,有效模场面积大大增加;当多芯光纤的芯子较远时,可以对多个芯子同时泵浦,在输出端进行合束,可以大大增加激光器的输出功率。因此,将多芯光纤用于激光器中,能够有效提高受激拉曼散射和受激布里渊散射等非线性效应的阈值功率,极大地增加了激光器的输出功率,从而提高激光器的光束质量因子。多芯光纤已经在高性能激光器领域扮演了越来越重要的角色。

美国、英国以及俄罗斯等多家研究机构对基于多芯光纤的激光器进行了广泛的研究。2001 年,美国 PC Photonics 公司详细报道了 7 芯光纤激光锁相输出,输出的激光具有高亮度,输出总功率超过 5 W,斜率效率为 65.2%^[40]。2005 年,英国的 QinetiQ 公司利用六芯光子晶体光纤实现了激光锁相输出,输出功率为 44 W,斜率效率为 64%,合成光束远场发散角小于衍射极限的 1.1 倍左右^[41]。2006 年,该公司又提出了 7 芯和 18 芯光子晶体光纤,在几十纳秒时间内,功率峰值高达 80 kW,并预言激光能量可高达 10 mJ^[42]。2013 年,意大利 DEE 研究中心对比了掺镱 7 芯和 19 芯光纤激光器,研究结果得到,采用 19 芯掺镱光纤,输出激光功率可达 400 W,光束质量因子达 1.05^[43]。2015 年,法国鲁昂大学提出了一种带状的掺杂镱稀土离子的多芯光纤激光器,通过对不同的芯子进行不同波段的放大,实现了可调谐双波长的

皮秒脉冲激光输出^[44]。2018 年,新加坡南阳理工大学提出了一种基于 6 芯光纤的激光器,每个芯子的直径为 19 μm,输出功率达 115 W,斜率效率为 71%,光束质量因子为 1.43^[45]。

放大器是激光器的重要组成部分,其直接决定了激光器的能量输出、光束质量等。基于多芯光纤的放大器也得到了国内外多家研究机构的广泛研究。2004 年,美国 PC Photonics 研究了一种 19 芯掺铒光纤放大器,脉冲能量增益达到 20 dB,输出的激光功率超过 100 W,远场光束质量因子为 1.5,接近光束质量理论值^[46]。2010 年,天津大学提出了一种基于多芯光子晶体光纤的激光放大系统,该放大系统抗非线性能力高,平均功率达到 24 W,脉冲宽度为 110 fs^[47]。2017 年,英国南阿普顿大学光电子研究中心提出了 32 芯光纤放大器,最小增益大于 17 dB,并与普通 32 个单芯光纤放大器的能耗进行对比,能耗较小,将其用于传输系统进行验证,传输距离达到 1 850 km^[48]。2017 年,法国 Aerospace 实验室提出了一种掺铒 7 芯

光纤放大器,在 1 545 nm 处实现了 80 ns 的脉冲,并提出了一种新的无透镜技术来测量发射器之间的相移,该激光发射的光对人眼无害,且实验装置对于高功率激光器的制作有重要的指导意义^[49]。2018 年,德国 Abbe 光子中心研究了基于 16 芯的激光放大系统,合成效率为 80%,在 40 ps 内平均功率达到 70 W^[50]。

由上述分析可知,多芯光纤已经成为制造高性能激光器的发展趋势之一。其工作方式主要有两种:第一,当非耦合型多芯光纤应用于激光器时,在输入端需用分束器将多芯光纤的芯子共同接入系统,对其进行泵浦,在输出端利用合束器对多条通道的泵浦光进行合束,从而大大提高激光器的性能;第二,当耦合型多芯光纤应用于激光器时,多芯光纤的多个芯子共同传输形成超模,光纤的模场面积急剧增加,大大提高了光纤的抗非线性能力,从而改善激光器性能。图 6 例举了一种具有代表性的以耦合型和非耦合型多芯光纤制造高性能激光器的实验装置图。

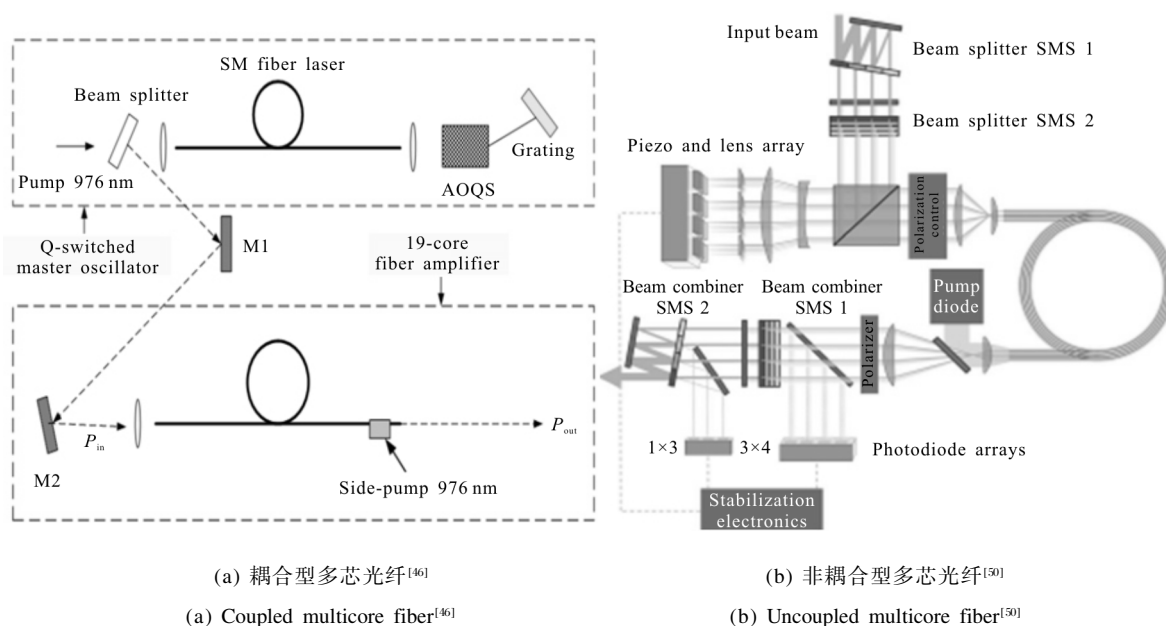


图 6 高性能激光器实验装置

Fig.6 Experimental setup of high performance laser system

3 空分复用光纤在光纤传感中的重要应用

传感技术是实现网络智能化、环境智能监测、系统自动控制的必要手段。光纤传感由于体积小、抗电磁干扰、结构灵活、应用范围广等成为传感领域的最

重要成员之一。光纤传感器结构多种多样,包括光纤光栅、法布里-帕罗腔、锥形光纤、微纳光纤等。但随着光纤传感的应用日益广泛,传感器的灵敏性急需提升且交叉敏感问题亟待解决。空分复用光纤由于存在多个传输通道,可提高传感器灵敏度并有效排

除交叉敏感问题,已在温度、应力、曲率、形状以及分布式测量等光纤传感技术方面有了重要的应用。

3.1 多芯光纤传感器

大容量通信的需求在推动多芯光纤通信技术发展的同时,也促进了多芯光纤传感技术的研究。2016年,华中科技大学提出了一种基于多芯光纤布里渊散射的分布式曲率传感器^[51]。实验使用六边形排布的 7 芯光纤,通过实验验证该曲率传感器在分布式测量领域应用的可能。同年,华中科技大学在此基础上,提出了基于 7 芯光纤的三维形状测量与重构技术^[52]。该技术最大的优势是不需要对多芯光纤做任何处理,而且传感距离可以大大延长。实验结果表明,该传感器可以实现 1 km 多芯光纤的形状重构分布式传感。2017 年,美国 OFS 实验室研究了多芯光纤光栅阵列在分布式传感中的应用,在多芯光纤制造的过程中,用紫外光在每个纤芯中刻写连续光栅同时扭转纤芯,制成六边形排布的 7 芯扭转光纤,基于该 7 芯扭转光纤实现了曲率与形状传感。实验表明,该传感器可以实现长 20 cm 7 芯扭转光纤的形状重构^[53]。

上述几种传感器使用的多芯光纤都是基于弱耦合的多芯光纤。强耦合多芯光纤芯间距小,各个纤芯模式之间存在较强的模式耦合,导致模式重新分配产生超模。利用超模干涉可以实现高灵敏度的温度、应力传感^[54-57]。2017 年,西班牙巴克斯大学提出了基于强耦合多芯光纤的干涉型振动传感器。该传感器在 MCF 两端中心对准各熔接一段单模光纤,形成一个低损耗的干涉仪。在干涉仪中,只有两个非简并且能量集中在中心纤芯的超模发生干涉。实验表明,该传感器对外界应力的灵敏度高达 $-4\ 225\ \text{pm}/\text{N}$ ^[58]。与传统的干涉型振动传感器相比,该传感器结构简单,成本低,且实验使用的 7 芯光纤与标准的单模光纤模式匹配。

除此之外,北京交通大学也提出了多种基于多芯光纤的传感器。2016 年,提出了基于多芯光纤模式干涉仪,将干涉仪分别应用于应变、曲率等待测参数的测量,干涉仪对以上待测参数展示了较好的线性特性,应变灵敏度为 $-1.78\ \text{pm}/\mu\epsilon$,曲率灵敏度为 $20.18\ \text{nm}/\text{m}^{-1}$,温度灵敏度为 $209\ \text{pm}/\text{C}$ ^[59]。2017 年,又提出了将多芯光纤与布拉格光栅串联的结构,并将其用于折射率、应变及温度的三参量传感,通过求

解耦合方程,实现了多参量的无交叉敏感传感器的设计。该传感器最大折射率、温度、应变灵敏度分别为 $106.16\ \text{nm}/\text{RIU}$ 、 $194.57\ \text{pm}/\text{C}$ 、 $-1.75\ \text{pm}/\mu\epsilon$,传感器的折射率分辨率为 $4\times 10^{-4}\ \text{RIU}$,应变分辨率为 $11.06\ \mu\epsilon$,温度分辨率为 $0.17\ \text{C}$ ^[60]。其传感装置如图 7 所示,该类型干涉仪具有高消光比、制作简单的优点。

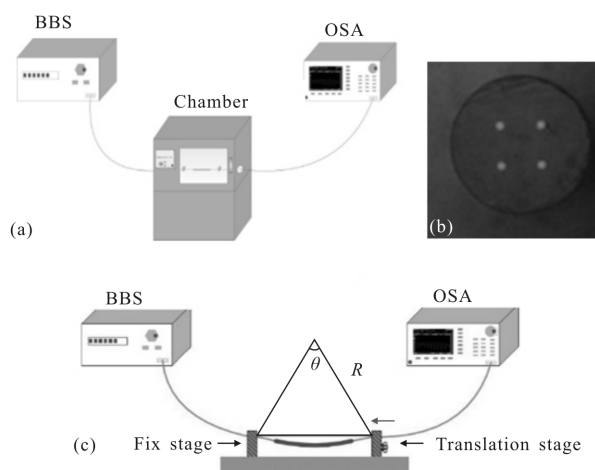


图 7 4 芯光纤传感器装置图。(a) 温度传感器;(b) 4 芯光纤横截面;(c) 曲率传感器

Fig.7 Sensor based on four-core fiber. (a) Temperature sensor; (b) the cross section of the four-core fiber; (c) curvature sensor

3.2 少模光纤传感器

基于少模光纤的传感器大多利用模式干涉实现传感。这类传感器常使用 SFS(SMF-FMF-SMF)结构构成干涉仪,通过监测波长漂移或功率变化实现参数的测量。

基于少模光纤的传感器由来已久。2001 年,印度理工学院研究了基于支持 LP_{01} 和 LP_{02} 的少模光纤的应力传感器,从理论和实验两方面验证了少模光纤可应用于应力传感,并对少模光纤进行优化,当光纤 $V=4.82$ 时,传感器灵敏度最大^[61]。随着光纤制造技术的成熟,近年来基于少模光纤传感器的研究层出不穷。2015 年,澳大利亚墨尔本大学报道了基于少模光纤的温度、应力分布式传感器,对其工作方式及原理进行了详细的介绍,分析了少模光纤较短和较长两种情况下传感器的性能及应用,将线偏振模式的光注入系统,通过监测模式布里渊频谱的漂移来测量温度和应力,其精度分别为 $1.2\ \text{C}$ 和 $21.9\ \mu\epsilon$ ^[62-63]。同年,美国 NEC 实验室提出了一种基于单端 FMF 的

分布式传感系统, 通过布里渊光时域反射(BOTDR)和外差检测实现了温度和应变的双测量, 该系统提升了检测精度且更节约成本^[64]。

由于少模光纤在传感方面表现出了单模光纤所无法比拟的特性, 国内多家研究机构也对其传感特性进行了研究, 研究达到国际先进水平。2015 年, 西北大学研究了在腐蚀过包层的少模光纤中写入光纤光栅, 并将其用于折射率温度的双传感, 折射率和温度的分辨率分别为 $\pm 8 \times 10^{-4}$ RIU 和 ± 1 °C^[65]。2018 年, 南京邮电大学提出了一种基于锥形双模光纤的干涉型高灵敏度的低温磁场传感器。实验所使用的双模光纤, 其中间部分拉制了一个锥形结构并在两端各熔接一段单模光纤。双模光纤中只激励了 LP₀₁ 模与 LP₁₁ 模, 两个模式在传输过程中发生干涉, 干涉图样随着外界磁场发生漂移。实验表明, 在磁场强度为 0~140 Oe 范围内, 该传感器的灵敏度为 98.2 pm/Oe^[66]。2018 年, 厦门大学提出了一种基于少模光纤应变和温度双参量传感器。少模光纤中只激励 LP₀₁ 模和 LP₀₂ 模, 由于光栅存在, 出现两个反射峰, 随着外界温度和应变的变化, 两个峰值波长向不同方向漂移。因此, 通过测量两个峰值波长的漂移, 可以同时测量温度和应变^[67]。与传统实现多参量测量的方法相比, 该传感器具有结构简单、高灵敏度、容易解调的优点。基于少模光纤同时测量温度和应力的传感器结构及实验装置如图 8 所示。

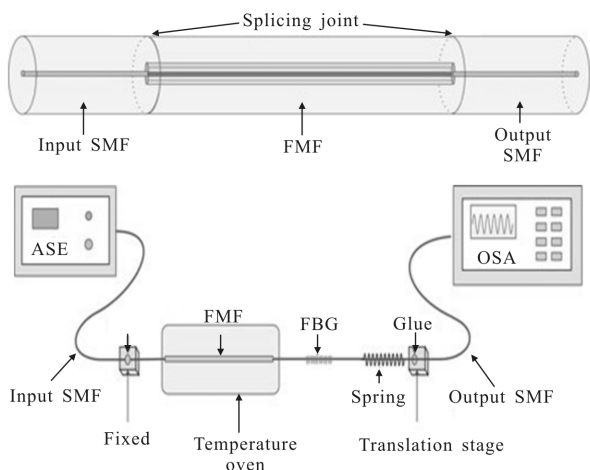


图 8 基于少模光纤测量温度和应力双参量传感器的结构及实验装置图^[67]

Fig.8 Structure and set diagram of dual-parameter sensor for temperature and strain based on FMF^[67]

综上所述, 基于多芯光纤的传感器与单芯光纤相比, 多个纤芯共用一个包层使得多芯光纤能很好地解决基于单模光纤传感器测量遇到的交叉敏感问题。同时, 将单模光纤与少模光纤结合形成干涉仪, 可以实现高精度的温度、应力及磁场等多种待测参量的传感器。基于空分复用光纤的传感器灵敏度和精度高且结构简单, 成为实现环境监测、工程控制、网络智能化等技术的有力工具。

4 结 论

空分复用技术是提升光网络系统容量以及构建下一代光通信网络的关键技术, 作为空分复用技术的主要载体, 多芯光纤、少模光纤以及少模-多芯光纤将是未来高速率大容量光通信网络系统发展的重要方向。空分复用光纤不仅在实现高速率大容量的光传输方面发挥着重要作用, 还由于其特殊的结构特征以及显著的性能优势被广泛应用于高性能激光器以及高精度的多维光纤传感等领域。空分复用光纤是未来通信产业发展必不可少的一员, 必将为 5 G、物联网、大数据、人工智能等的发展作出贡献。

参考文献:

- [1] Gao Song, Liu Yan, Chen Runqiu, et al. Study on mode multiplexing used in space-division multiplexing [J]. *Laser and Infrared*, 2014, 44(4): 424-428. (in Chinese)
- [2] Takenaga Katsuhiko, Tanigawa Shoji, Guan Ning, et al. Reduction of crosstalk by quasi-homogeneous solid multi-core fiber [C]//Optical Fiber Communication Conference, 2010: OWK7.
- [3] Chen Wei, Yuan Jian, He Zuowei, et al. The research progress of high-end optical fiber technologies for large capacity communication[J]. *Study on Optical Communications*, 2017, 44(1): 27-29. (in Chinese)
- [4] Chandrasekhar S, Gnauck A H, Liu Xiang, et al. WDM/SDM transmission of 10x128-Gb/s PDM-QPSK over 2688-km 7-core fiber with a per-fiber net aggregate spectral-efficiency distance product of 40, 320 km·b/s/Hz[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 706-711.
- [5] Chen H, Van Uden R, Okonkwo C, et al. Compact spatial multiplexers for mode division multiplexing [J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 31582-31594.
- [6] Takenaga Katsuhiko. Reduction of crosstalk by trench-assisted

- multi-core fiber[C]//Optical Fiber Communication Conference, 2011: OWJ4.
- [7] Saitoh Kunimasa, Matsuo Shoichiro. Multicore fiber technology [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(1): 55–66.
- [8] Zheng Siwen, Lin Zhen, Ren Guobin, et al. Design and analysis of novel multi-core dual-mode large-mode-area optical fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 044224. (in Chinese)
郑斯文, 林桢, 任国斌, 等. 一种新型多芯-双模-大模场面积光纤的设计和分折 [J]. 物理学报, 2013, 62(4): 044224.
- [9] Lin Zhen, Zheng Siwen, Ren Guobin, et al. Characterization and comparison of 7-core and 19-core large-mode-area few-mode fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(6): 064214. (in Chinese)
林桢, 郑斯文, 任国斌, 等. 七芯及十九芯大模场少模光纤的特性研究和对比分析 [J]. 物理学报, 2013, 62(6): 064214.
- [10] Takenaga Katsuhiro, Arakawa Yoko, Sasaki Yusuke, et al. A large effective area multi-core fiber with an optimized cladding thickness[J]. *Optics Express*, 2011, 19(26): B543–B550.
- [11] Le Noane G, Boscher D, Grosso P, et al. Ultra high density cables using a new concept of bunched multicore monomode fibers: A key for the future FTTH networks[C]//Proceedings of the 43rd International Wire & Cable Symposium (IWCS), 1994: 203–210.
- [12] Zhu B, Taunay T F, Yan M F, et al. Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network [J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11117–11122.
- [13] Liu Xiang, Chandrasekhar S, Chen X, et al. 1.12-Tb/s 32-QAM-OFDM superchannel with 8.6-b/s/Hz intrachannel spectral efficiency and space-division multiplexed transmission with 60-b/s/Hz aggregate spectral efficiency. [J]. *Optics Express*, 2011, 19(26): B958–B964.
- [14] Zhu B, Taunay T F, Fishteyn M, et al. 112-Tb/s space-division multiplexed DWDM transmission with 14-b/s/Hz aggregate spectral efficiency over a 76.8-km seven-core fiber[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16665–16671.
- [15] Hayashi Tetsuya, Taru Toshiki, Shimakawa Osamu, et al. Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber [J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16576–16592.
- [16] Igarashi Koji, Takeshima Koki, Tsuritani Takehiro, 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.
- [17] Kobayashi T, Takara H, Sano A, et al. 2×344 Tb/s propagation-direction interleaved transmission over 1500-km MCF enhanced by multicarrier full electric-field digital back-propagation[C]//39th European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC 2013), 2013: PD3E4.
- [18] Sano Akihito, Takara Hidehiko, Kobayashi Takayuki, et al. 409-Tb/s+409-Tb/s crosstalk suppressed bidirectional MCF transmission over 450 km using propagation-direction interleaving[J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 16777–16783.
- [19] Turukhin A, Sinkin O V, Batshon H G, et al. 105.1 Tb/s power-efficient transmission over 14350 km using a 12-core fiber [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2016: Th4C.1.
- [20] Mizuno T, Shibahara K, Ono H, et al. 32-core dense SDM unidirectional transmission of PDM-16QAM signals over 1600 km using crosstalk-managed single-mode heterogeneous multicore transmission line[C]//Optical Fiber Communications Conference Postdeadline Papers, 2016: Th5C.3.
- [21] Chen Heming, Zhuang Yuyang. Research progress on key technologies in mode division multiplexing system [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition)*, 2018, 38(1): 37–44. (in Chinese)
陈鹤鸣, 庄煜阳. 模分复用系统关键技术研究进展 [J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2018, 38(1): 37–44.
- [22] Sakaguchi J, Awaji Y, Imamura K, et al. 19-core fiber transmission of 19×100×172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305 Tb/s[C]//National Fiber Optic Engineers Conference, 2011: PDPC2.
- [23] Ryf Roland, Randel Sebastian, Gnauck Alan H, et al. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 521–531.
- [24] Ryf Roland, Fontaine Nicolas K, Mestre Miquel A, et al. 12×12 MIMO transmission over 130-km few-mode fiber[J]. *Frontier in Optics*, 2012: FW6C.4.
- [25] Sleiffer Vincent A, Leoni Paolo, Jung Yongmin, et al. Ultra-high capacity transmission with few-mode silica and hollow-core photonic bandgap fibers [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2014: Tu2J.3.
- [26] Ren Fang, Yu Jinyi, Li Juhao, et al. Experimental demonstration of 3-mode MDM-PON transmission over

- 7.4 -km low-mode-crosstalk FMF [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2016: W2A.58.
- [27] Matsuo Shoichiro, Takenaga Katsuhiko, Sasaki Yusuke, et al. High-spatial-multiplicity multicore fibers for future dense space-division-multiplexing systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(6): 1464–1475.
- [28] Pepeljugoski P, Doany F, Kuchta D M, et al. Connector performance analysis for D-shaped multi-core multi mode fiber [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2014: Th4J.4.
- [29] Nakazawa M. Ultrahigh spectral efficiency systems-pushing the limits of multi-level modulation, multi-core fiber, and multi-mode control [C]//Optical Fibre Technology, OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on, 2014: 597–599.
- [30] Igarashi Koji, Igarashi Koji, Igarashi Koji. Ultra-high capacity transmission based on ultra-dense SDM/WDM techniques [C]//Asia Communications and Photonics Conference, 2016: AF1D.3.
- [31] Chi Nan, Zhang Junwen, Shao Yufeng. Theoretical and simulation analysis of a novel multiple-input multiple-output scheme over multimode fiber links with dual restricted launch techniques [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 5002.
- [32] Tsuchida Y, Maeda K, Sugizaki R. Multicore EDFA for space division multiplexing [C]//Photonics Conference, 2014: 269–270.
- [33] Kanno Atsushi, Sakaguchi Jun, Watanabe Masayuki, et al. Space division multiplexed transmission of 109-Tb/s data signals using homogeneous seven-core fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 658–665.
- [34] Takara H, Ono H, Abe Y, et al. 1000-km 7-core fiber transmission of 10×96-Gb/s PDM-16QAM using Raman amplification with 6.5 W per fiber[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 10100–10105.
- [35] Sakaguchi J, Klaus W, Mendinueta J D, et al. Realizing a 36-core, 3-mode fiber with 108 spatial channels [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2015: Th5C.2.
- [36] Soma D, Igarashi K, Wakayama Y, et al. 2.05 Peta-bit/s super-Nyquist-WDM SDM transmission using 9.8-km 6-mode 19-core fiber in full C band [C]//European Conference on Optical Communication (ECOC), 2015: 7341686.
- [37] Qi Yanhui, Sun Jiang, Kang Zexin, et al. Low-threshold wavelength-switchable fiber laser based on few-mode fiber Bragg grating[J]. *Optical Fiber Technology*, 2016, 29: 70–73.
- [38] Qi Yanhui, Kang Zexin, Sun Jiang, et al. Wavelength-switchable fiber laser based on few-mode fiber filter with core-offset structure [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 81: 26–32.
- [39] Zheng Jingjing, Pei Li, Ning Tigang, et al. Matching optimization for SFS-structured interferometers with step-index fibers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 9182–9193.
- [40] Cheo P K, Liu A, King G G. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(5): 439–441.
- [41] Michaille L, Bennett C R, Taylor D M, et al. Phase locking and supermode selection in multicore photonic crystal fiber lasers with a large doped area [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(13): 1668–1670.
- [42] Michaille L, Bennett C R, Taylor D M, et al. Multicore photonic crystal fiber lasers for high power/energy applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 328–336.
- [43] Prudenzano F, Mescia L, Di Tommaso A, et al. Design and refinement of rare earth doped multicore fiber lasers [J]. *Optical Materials*, 2013, 35(11): 1941–1946.
- [44] Rigaud P, Kermene V, Simos C, et al. Dual-wavelength synchronous ultrashort pulses from a mode-locked Yb-doped multicore fiber laser with spatially dispersed gain [J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 25308–25315.
- [45] Ji Junhua, Raghuraman Sidharthan, Huang Xiaosheng, et al. 115 W large-mode-area multi-core fiber laser with all solid structure [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2018: STu3K.5.
- [46] Huo Yanming, Cheo Peter K, King George G. Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6230–6239.
- [47] Fang Xiaohui, Hu Minglie, Liu Bowen, et al. Hundreds of megawatts peak power multi-core photonic crystal fiber laser amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2366–2370. (in Chinese)
方晓惠, 胡明列, 刘博文, 等. 百兆瓦峰值功率的多芯光子晶体光纤飞秒激光放大系统 [J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2366–2370.
- [48] Jain Saurabh, Castro Carlos, Jung Yongmin, et al. 32-core erbium/ytterbium-doped multicore fiber amplifier for next generation space-division multiplexed transmission system[J].

- Optics Express*, 2017, 25(26): 32887–32896.
- [49] Prevost F, Lombard L, Primot J, et al. Coherent beam combining of a narrow-linewidth long-pulse Er^{3+} -doped multicore fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 9528–9534.
- [50] Klenke A, Müller M, Stark H, et al. Coherently combined 16-channel multicore fiber laser system [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1519–1522.
- [51] Zhao Zhiyong, Soto Marcelo A, Tang Ming, et al. Curvature and shape distributed sensing using Brillouin scattering in multi-core fibers[C]//Advanced Photonics, 2016: SeM4D.4.
- [52] Zhao Z, Soto M A, Tang M, et al. Distributed shape sensing using Brillouin scattering in multi-core fibers [J]. *Opt Express*, 2016, 24(22): 25211–25223.
- [53] Westbrook Paul S, Kremp Tristan, Feder Kenneth S, et al. Continuous multicore optical fiber grating arrays for distributed sensing applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(6): 1248–1252.
- [54] Schülzgen Axel, Van Newkirk Amy, Antonio-Lopez Jose Enrique, et al. Fiber optic sensors based on strongly coupled multicore fiber[C]//Advanced Photonics, 2017: SeW1E.1.
- [55] Van Newkirk Amy, Sanjabi Eznaveh Zeinab, Antonio-Lopez Enrique, et al. High temperature sensor based on supermode interference in multicore fiber[C]//CLEO, 2014: SM2N.7.
- [56] Zhang Hailiang, Wu Zhifang, Shum Perry Ping, et al. Highly sensitive strain sensor based on helical structure in multicore fiber [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2016: SM2P.3.
- [57] Van Newkirk Amy, Antonio-Lopez Enrique, Salceda-Delgado Guillermo, et al. Optimization of multicore fiber for high-temperature sensing[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(16): 4812–4815.
- [58] Villatoro Joel, Antoniolopez Enrique, Zubia Joseba, et al. Interferometer based on strongly coupled multi-core optical fiber for accurate vibration sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25734.
- [59] Li Chao, Ning Tigang, Zhang Chan, et al. All-fiber multipath Mach-Zehnder interferometer based on a four-core fiber for sensing applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 248: 148–154.
- [60] Li Chao, Ning Tigang, Li Jing, et al. Simultaneous measurement of refractive index, strain, and temperature based on a four-core fiber combined with a fiber Bragg grating.[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 90: 179–184.
- [61] Kumar Arun, Goel Nitin K, Varshney R K. Studies on a few-mode fiber-optic strain sensor based on LP_{01} - LP_{12} mode interference [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(3): 358.
- [62] Li An, Wang Yifei, Hu Qian, et al. Few-mode fiber based optical sensors[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1139–1150.
- [63] Li An, Wang Yifei, Fang Jian, et al. Few-mode fiber multi-parameter sensor with distributed temperature and strain discrimination.[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1488–1491.
- [64] Weng Yi, Ip Ezra, Pan Zhongqi, et al. Single-end simultaneous temperature and strain sensing techniques based on Brillouin optical time domain reflectometry in few-mode fibers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 9024–9039.
- [65] Yang Hangzhou, Ali M M, Islam M R, et al. Cladless few mode fiber grating sensor for simultaneous refractive index and temperature measurement [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 228: 62–68.
- [66] Sun B, Fang F, Zhang Z, et al. High-sensitivity and low-temperature magnetic field sensor based on tapered two-mode fiber interference[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1311–1314.
- [67] Lu Chenxu, Su Juan, Dong Xiaopeng, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature with a few-mode fibre-based sensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(13): 2796–2802.