

多芯光纤放大器研究现状及发展分析

迟荣华^{1,2*}, 周燕萍¹, 李立亚¹

¹无锡科技职业学院物联网与软件技术学院, 江苏 无锡 214028;

²香港理工大学电子及资讯工程学系, 香港

摘要 空分复用、高阶调制、数字相干接收和数字信号处理等关键技术研究是确保光纤传输系统实现超大容量、超高速率、超长距离传输的必要条件。其中,空分复用技术是实现拍比特传输的关键技术,是近年来的研究热点。系统综述了空分复用多芯放大器,包括多芯掺铒光纤放大器、多芯少模掺铒光纤放大器、多芯铈共掺光纤放大器、多芯拉曼放大器、多芯遥泵放大器及多芯混合放大器的研究进展,并对未来多芯放大器的技术发展进行展望。

关键词 光通信; 空分复用; 多芯放大器; 多芯掺铒光纤放大器; 多芯铈共掺光纤放大器; 混合多芯放大器

中图分类号 TN365

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.190005

Research Status and Development Analysis of Multicore Fiber Amplifier

Chi Ronghua^{1,2*}, Zhou Yanping¹, Li Liya¹

¹*School of Internet of Things and Software Technology, Wuxi Vocational College of Science and Technology, Wuxi, Jiangsu 214028, China;*

²*Department of Electronic and Information Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China*

Abstract Space division multiplexing (SDM), high order modulation, digital coherent detection, and digital signal process have become the necessary technologies for realizing a optical fiber transmission system with ultra-large capacity, ultra-high rate, and ultra-long distance. SDM technology has become the key part to realize Pbit/s transmission, and has become a research hotspot in resent years. A multicore fiber amplifier with SDM is analyzed systematically. In this paper, the research progress of multicore amplifiers, including multicore erbium-doped fiber amplifiers, multicore few-mode erbium-doped fiber amplifiers, multicore erbium-ytterbium co-doped fiber amplifiers, multicore Raman amplifiers, multicore remote pump amplifier, and hybrid multicore amplifiers, are reviewed. Finally, the future of multicore amplifier technologies is prospected.

Key words optical communications; space division multiplexing; multicore amplifiers; multicore erbium-doped fiber amplifier; multicore erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier; hybrid multicore amplifier

OCIS codes 060.2320; 060.2330; 060.2360; 060.4256

1 引言

目前,基于波分复用、偏振复用、多级调制等技术,单根光纤的传输容量已经达到 100 Tbit/s,单模光纤(SMF)的传输容量正在接近香农极限^[1]。单模-多芯光纤(SM-MCF)是通过一根光纤中包含的多个纤芯构建多个平行的空间信道,即通过空分复用(SDM)

实现多路传输,能够克服光纤传输的香农容量限制,达到扩大传输系统容量的目的。多芯光纤(MCF)能够提供多个空间并行通道,而且不需要复杂的多输入多输出(MIMO)解耦算法,是近期研究的最有可能实现商用的新型传输光纤,引起了研究者的广泛兴趣。近年来,基于 MCF 的 SDM 通信系统在骨干网^[2-3]、接入网^[4]和数据中心^[5-6]的应用研究逐渐增多。

收稿日期: 2019-04-22; 修回日期: 2019-05-24; 录用日期: 2019-06-03

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20141115)、2018 年江苏省高校优秀青年教师和校长赴境外研修项目、江苏省“六大人才高峰”项目(XYDXX-169)

* E-mail: ronghchi@connect.polyu.hk

SDM 传输系统要实现大容量、高速率、长距离传输,离不开光纤放大器对其传输损耗的补偿,因此 MCF 放大器成为 SDM 技术走向实用的关键。从模式上可将 MCF 分为单模多芯和多模多芯两类(如图 1 所示,其中 N 表示芯数, M 表示模式数)。其中,单模多芯光纤又分为两类。一类是弱耦合多芯光纤,每个芯信道独立,纤芯之间的距离通常设计为 $25\sim 45\ \mu\text{m}$,纤芯间的串扰一般低于 $-30\ \text{dB}$;另一类是强耦合多芯光纤,纤芯之间的距离一般为 $10\sim 20\ \mu\text{m}$,通过减小纤芯间距、增加纤芯数量和芯间串扰,并采用类似“超模”的传输模式,大幅降低模式相关时延,所以强耦合多芯传输也被认为是模分复用的一种特殊形式。与这两类单模 MCF 相匹配的多芯掺铒光纤放大器(MC-EDFA)一般也分成两种:弱耦合 MC-EDFA 和强耦合 MC-EDFA。从增益介质角度来看,除了 MC-EDFA,多芯放大器还包括多芯铒镱(Er/Yb)共掺光纤放大器(MC-EYDFA)、多芯拉曼放大器、多芯遥泵放大器、多芯

混合放大器等。本文综述了各种多芯放大器的技术研究现状和进展,并对未来多芯放大器技术的发展趋势进行了展望。

2 MC-EDFA

2.1 弱耦合 MC-EDFA

弱耦合 MC-EDFA 是目前研究最多的一类多芯放大器,它不需要复杂的 MIMO 解耦技术,成本较低,易于实现。2011 年,Abedin 等^[7]最先提出 7 芯掺铒光纤及其放大器;2014 年,Sakaguchi 等^[8]将多芯掺铒光纤的纤芯数提高到 19;2016 年,Jain 等^[9]报告了目前纤芯数目最多的多芯放大器——32 芯的 MC-EDFA。

2.1.1 独立芯区抽运

MC-EDFA 的抽运方式通常可分为两类:独立芯区抽运方式和包层抽运方式。独立芯区抽运是通过扇入扇出(fan in/ fan out)器件将 MCF 解复用至多个 SMF,利用现有的波分复用器(WDM)将信号光和抽运光合成在每一个纤芯内,使抽运光与信号光在纤芯内耦合,从而实现信号放大。Abedin 等^[7]提出的 7 芯掺铒光纤放大器(EDFA)应用的就是独立芯区抽运方式,图 2 展示了其放大器结构。利用独立芯区抽运方式对掺铒光纤的每根纤芯独立进行抽运,各个纤芯的增益均大于 $25\ \text{dB}$,噪声系数(NF)小于 $4\ \text{dB}$,饱和输出功率为 $10\ \text{dBm}$ 。通过这种方式很容易实现对各个纤芯抽运和增益的独立控制。然而,这种方法一般需要与纤芯数量相同的抽运激光器,这会导致其集成度较低,无法体现 SDM 的优势。

纤芯进行抽运光注入,通过内包层功率耦合实现对其余纤芯的信号抽运。2012 年,Mimura 等^[10]提出采用端面包层抽运的方式抽运 7 芯掺铒光纤,之后大多数多芯放大器都采用包层抽运方式。

多芯放大器的包层抽运技术虽然省去了独立芯区抽运所需要的扇入扇出器件,但是不能使用现有的技术成熟的抽运耦合器件,需要设计特殊的抽运耦合器件^[11-13]。图 3(a)所示的锥形纤维束耦合器(TFB)是一种端面抽运耦合器,其中间纤芯采用多模光纤,该多模光纤的数值孔径(NA)和芯径与抽运尾纤的完全匹配,利于抽运注入。图 3(b)所示为自由空间结构耦合器^[12],其利用二向色镜和两个透镜实现抽运光的注入及抽运光和信号光的耦合。图 3(c)所示的熔锥侧面耦合器^[13-14],是将多根裸光纤和剥去涂覆层的双包层光纤缠绕在一起,通过高温火焰中加热熔化、拉伸,使光纤熔融区成为锥形过



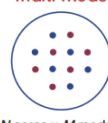



	Single-mode core		Multi-mode core
	I. Single-mode	II. Coupled-core	III. Multi-mode
A Multiple spatial channel groups	Multi-core  $N\ \text{cores}$	Coupled-core group  $N\ \text{cores} \times M\ \text{groups}$	Multi-core multi-mode  $N\ \text{cores} \times M\ \text{modes}$
B Single spatial channel group	Single-mode  $1\ \text{core}$	Coupled-core  $N\ \text{cores} \times 1\ \text{group}$	Multi-mode  $M\ \text{modes}$

图 1 多芯光纤分类^[6]

Fig. 1 Multi-core fiber^[6]

2.1.2 包层抽运

MC-EDFA 的包层抽运技术借鉴的是当前高功率激光器和高功率放大器广泛使用的双包层抽运技术。双包层抽运技术允许大功率抽运光直接耦合到直径为几十微米到几百微米的内包层,比传统光纤的耦合面积提高了 2 个数量级,因此入纤功率和耦合效率都大大提高。包层抽运方式只需要 1 个多模激光器进行抽运。商用的多模抽运激光器价格低廉、输出功率高,所以包层抽运方式具有低成本和高集成度的优势。根据抽运光输入方式的不同,MC-EDFA 包层抽运技术又可以分为侧面抽运和端面抽运两种。侧面抽运技术采用特殊设计的缠绕包层结构实现抽运光注入,通过外围包层的功率耦合对多芯光纤内的信号进行放大。端面抽运方式利用中间

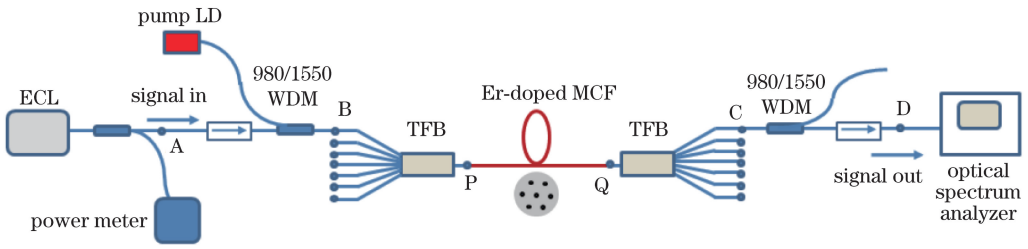


图 2 采用芯区抽运方式的 7 芯 MC-EDFA 结构^[7]

Fig. 2 7-core MC-EDFA with core pumping^[7]

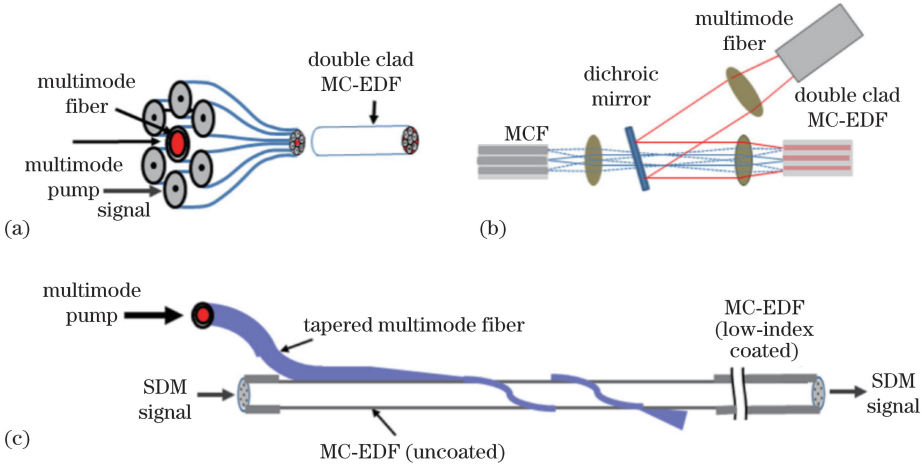


图 3 多芯放大器包层抽运采用的耦合器^[11]。(a) TFB; (b) 自由空间结构耦合器; (c) 熔锥侧面耦合器

Fig. 3 Couplers used in cladding pump of MC-EDFA^[11]. (a) TFB; (b) free space coupler; (c) taper side coupler

渡区,从而使抽运光由多模光纤经过双层包层光纤侧面导入到内包层,再进入各个纤芯。

表 1 中给出了近年来弱耦合 MC-EDFA 的研

究进展,同时列出了其抽运方式及抽运耦合器类型。没有标注抽运波长的放大器均采用 980 nm 激光器抽运。

表 1 弱耦合 MC-EDFA 研究进展

Table 1 Research progress of weak coupled MC-EDFA

Year	Core	Wavelength	Gain /dB	NF /dB	Length / m	Pumping scheme /combiner	Ref. No
2011	7	C-band	25	<4	15	Core/980 nm	[7]
2012	3	1540-1580	15	-	12	Core/1480 nm, bi-pump	[15]
2012	7	1580-1610	>15	<5.5	16	Cladding/free space combiner	[10]
2014	7	1535-1570	>25	<8	34	Cladding/side pump combiner	[13]
2014	19	1550	19.6-23.3	6-7	7	Cladding/free space combiner	[8]
2016	7	C-band	18	6.1	8	Cladding/side pump combiner	[16]
		L-band	13.1	5.8	50	Cladding/side pump combiner	
2017	19	1575-1605	15.7	5.8	50	Cladding/side pump combiner	[17]
2018	7	1530-1565	>16	<8.0	-	Cladding/pump recycle (cascaded)	[18]
2018	7	1535-1560	7	9.21	4.5	Cladding/ side pump combiner 1480 nm	[19]

2.2 强耦合 MC-EDFA

强耦合 MCF, 又称耦合芯传输光纤, 通过减小纤芯间距和引入芯间串扰, 产生超模传输, 其性能优于等效的 SMF。出现该现象的原因是纤芯之间的强随机混合减少了非线性作用的累积效应, 造成的线性损伤也相应减少。纤芯之间的混合能够确保每个输入信号几乎均匀地传播到所有的纤芯。研究表

明, 强耦合 MCF 中纤芯之间的模式相关损耗和差分群时延的增长与光纤长度的平方根成正比, 而不是与长度成正比^[20], 这使强耦合 MCF 的串扰性能优于弱耦合 MCF, 但代价是在接收端需要用 MIMO 技术进行解耦^[21]。

强耦合掺铒光纤比弱耦合掺铒光纤的包层面积小、纤芯间距小, 相比于少模掺铒光纤, 更容易将模

式相关增益差值降低到 1 dB 以下。强耦合 MC-EDFA 最近才开始被研究。2017 年,Fontaine 等^[20]提出、制作、测试了一个 4 芯的强耦合芯光放大器,强耦合掺铒光纤的纤芯间距只有 9.4 μm ,远小于弱耦合 MC-EDFA 40 μm 左右的芯间距。通过打乱所有纤芯的信号模式和将抽运更均匀地分配到所有纤芯,强耦合 MC-EDFA 有效降低了光放大器的模式相关增益(MDG)^[20]。强耦合 MCF 最引人注目的优点是其对非线性畸变的容忍度比较高^[21],这一点在 9900 km 的传输试验中已经得到证实^[22]。

2018 年,Wada 等^[23]报道了一种包层抽运结构的具有低模式相关增益的随机耦合的 12 芯 EDFA,纤芯半径为 5.5 μm ,纤芯间距为 15.5 μm ,在 C 波段获得的增益大于 17 dB,NF 小于 6.2 dB,MDG 小于 1 dB。2019 年,Wada 等^[24]用 60 m 长的 12 芯强耦合掺铒光纤和侧面包层抽运技术,在 1570 ~ 1605 nm 波段内得到平均增益为 15.7 dB、NF 为 6.7 dB、波长 MDG 小于 1.2 dB 的结果。

3 多芯少模 EDFA

理论上,受限于光纤直径,光纤的纤芯数目不能大幅增加;受限于模式串扰,少模光纤的模式数量不能大幅增加。于是,多芯少模的概念被提出,即在 MCF 中引入模分复用技术^[25]。假设在一根光纤内有 N 个纤芯,每个纤芯支持 M 个模式,则其 SDM 维度为 $N \times M$ 。同理,相应的多芯少模光放大器相当于由 $N \times M$ 个独立的光放大器构成的阵列,不仅节省了空间,而且大大降低了成本和功耗。

表 2 多芯少模光纤放大器研究进展

Table 2 Research progress of few mode multi-core fiber amplifier

Year	Core number	Mode number	Wavelength /nm	Gain /dB	NF /dB	DMG /dB	Ref. No.
2012	6	3	1530-1560	>20	6-9	<3	[26]
2018	6	3	C-band	18	6.5	<4	[28]
			L-band	15	<7.5	<5	[28]
2019	6	7	C-band	>17	<7	5-6	[29]

4 MC-EYDFA

对于传统的 EDFA,受到纤芯直径和掺杂离子浓度的限制,单个 EDFA 的饱和输出功率较低。一般情况下,当要求饱和输出功率低于 27 dBm 时,推荐使用技术成熟的普通 EDFA 技术。但当要求饱和输出功率高于 27 dBm 时,传统的 EDFA 技术难以胜任,需要 Er/Yb 共掺光纤放大器(EYDFA)。这是由于单独掺杂铒的增益光纤受到浓度淬灭效应

的影响,无法满足高功率运行的要求。基于双包层光纤、包层抽运的 Er/Yb 共掺双包层光纤中铒离子的浓度远大于铒离子,使得一个铒离子被多个铒离子包围,避免了铒离子的簇聚,同时提高了铒离子的掺杂浓度^[31]。在这种掺杂光纤中,铒离子先吸收抽运光,然后通过敏化作用激发铒离子,形成铒波段粒子数反转,充分利用了铒离子吸收带很宽、抽运吸收系数大和允许高功率多模抽运的优点。

2012 年,Mukasa 等^[26]设计制造了 7 芯和 19 芯两种 LP 模式的多芯少模光纤。2015 年,Jin 等^[27]研制出环形包层结构的多芯少模掺铒光纤,制作的 6 芯 3 模环形 EDFA 支持 LP₀₁、LP₁₁ 模式,通过多模侧面包层抽运方式,18 个空分信道的光信号均得到放大,增益超过 20 dB,差分模式增益小于 3 dB。2018 年,Wada 等^[28]开发了 6 芯 3 模的掺铒光纤及其放大器,其在 C 波段的平均增益为 18 dB,NF 小于 6.5 dB,差分模式增益小于 4 dB;在 L 波段的平均增益为 15 dB,NF 小于 7.5 dB,差分模式增益小于 5 dB。2019 年,Jung 等^[29]介绍了最新的 6 模 7 芯的 EDFA,通过采用包层抽运方式在 L 波段得到增益大于 17 dB、NF 小于 7 dB 的结果。该放大器相当于 42 个分立的 EDFA 或者 EDFA 阵列,大大提高了系统的集成度,是目前综合 SDM、模分复用方式实现的最高空间维度的光放大器。其实,早在 2016 年,Igarashi 等^[30]就报道了 19 芯 6 模的光纤传输系统,通过采用 360 波 15 Gbit/s 波特率的双二进制 DP-QPSK 编码信号,并在接收端使用滤波器抽头数为 10000 的 12 × 12 规模的 MIMO 均衡处理,实现了空间通道数为 114(19 × 6)、系统容量为 2.05 Pbit/s、频谱效率为 456 bit/(s · Hz)的结果,但由于没有相应维度的光放大器,因此该系统的传输距离只有 9.8 km。相信未来多芯少模光纤放大器会继续发挥其高集成度、高密度的优势,支持 SDM 多芯少模系统实现更大容量、更高速率和更远传输距离。表 2 列举了近年来多芯少模放大器的研究进展。

多芯 Er/Yb 共掺双包层光纤和多芯包层抽运技

术的出现,为研制高饱和输出功率的多芯光放大器提供了可能性。近年来,随着高饱和输出功率和低功耗系统要求的出现,关于MC-EYDFA的研究越来越多。表3列出了近年来MC-EYDFA的研究进展。

2013年,Ono等^[12]报道了一个12芯的

表3 MC-EYDFA研究进展

Table 3 Research progress of MC-EYDFA

Year	Core	Wavelength/nm	Gain /dB	NF /dB	Gain diff /dB	Length /m	Pump	Ref. No
2013	12	1534-1561.4	13.4-18.3	<7.8	4.9	5	Cladding/free space	[12]
2017	7	1542-1564	>18	—	1.3	7	Cladding/side	[32]
2017	32	1534-1561	>17(20)	6.5	2	3+4	Cladding/side	[33]

2017年,Jain等^[33]报道了一个32芯的EYDFA。因为有32个纤芯,所以铒离子被快速吸收掉。为此,特意设计了如图4所示的两级级联的光学结构,将有源光纤分成3m和4m两段,通过侧面包层抽运的方式,在-5 dBm的输入情况下,得到的平均增益大于22 dB,每芯饱和输出功率大于17 dBm,每个抽运激光器的功率都是8 W。同以往的研究^[32,34-35]相比,该实验结果更接近实际情况。如果普通单芯EDFA的驱动和制冷功率之和为3.4 W、功耗降低因子记作标准系数1.0,则采

EYDFA,采用空间合波器包层抽运的形式,在5 m长的Er/Yb共掺光纤中获得的增益为13.4 dB~18.3 dB,NF小于7.8 dB,抽运功率为1.9 W,增益系数为7.1~9.6 dB/W,抽运转化效率仍有待提高。

用975 nm抽运的32芯EYDFA(其驱动功耗为56 W、制冷功耗为20 W,所以功耗降低因子为0.7)进一步改变抽运激光器波长(965 nm),选择耦合效率更高的光纤型端面的抽运合波器(耦合效率从60%提高到90%),其驱动功耗可从56 W降低为36 W,制冷功耗可降低为10 W,那么功耗降低因子能达到0.41,说明采用32芯EYDFA比传统EDFA可节省59%的功耗。由此可知,采用大芯数的EYDFA是实现大饱和输出功率和低功耗的一种有效途径。

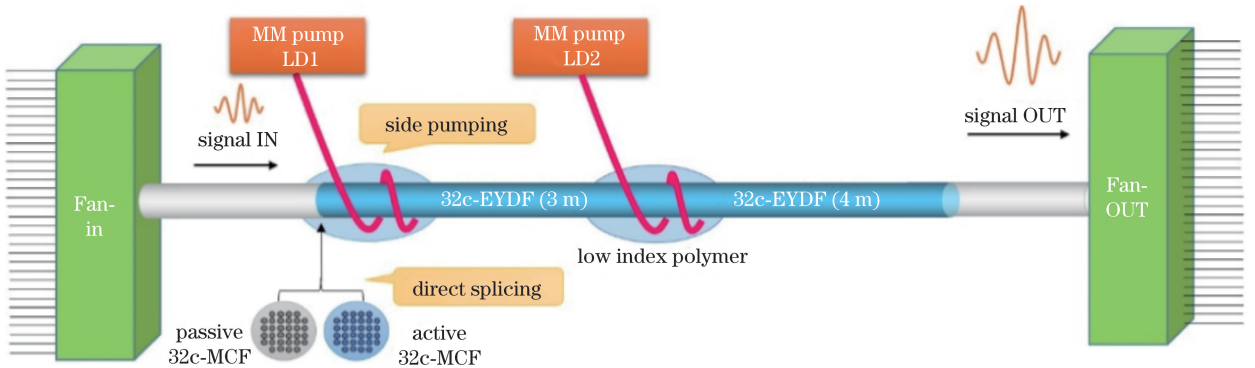


图4 32芯EYDFA实验装置图^[33]

Fig. 4 Experimental setup of 32-core EYDFA^[33]

5 多芯拉曼放大器及多芯混合放大器

近年来,随着SDM技术的发展,SDM拉曼放大器的相关研究也不断出现。在拉曼放大器中,传输光纤即为增益光纤,不需要特殊的掺杂光纤作为增益介质。早在2012年,Takara等^[36]就运用6.5 W的抽运光,采用纤芯抽运的方式反向抽运传输光纤的7个纤芯,在每个纤芯中获得9 dB~12 dB的拉曼增益,NF小于1 dB,还运用多芯拉曼放大器放大了10个传输速率为96 Gbit/s的16进制正交幅度调制信号(PDM-16QAM),环路实验中信号传输了1000 km。

Masuda等^[37]对多芯遥泵放大器进行了研究,

其结构如图5所示,其中,DCF为色散补偿光纤,OSA为光谱仪,Rx为接收机,MCF为多芯光纤,MC-EDF为多芯掺铒光纤,RP-EDFA为遥泵EDFA。7芯光纤MCF-1与MCF-2的长度分别为75 km和46 km,在两段多芯光纤之间熔接一段7芯掺铒光纤(MC-EDF),在扇出器件之后通过纤芯抽运的方式对MCF-2进行拉曼抽运,拉曼抽运激光器的波长分别为1424 nm和1452 nm,剩余的拉曼抽运光在MCF-2与MC-EDF接合处进入MC-EDF,这样抽运激光器与MC-EDF共同构成遥泵放大器,信号在铒纤中获得较高增益。通过利用拉曼激光器逐次抽运多芯无源光纤和MC-EDF的

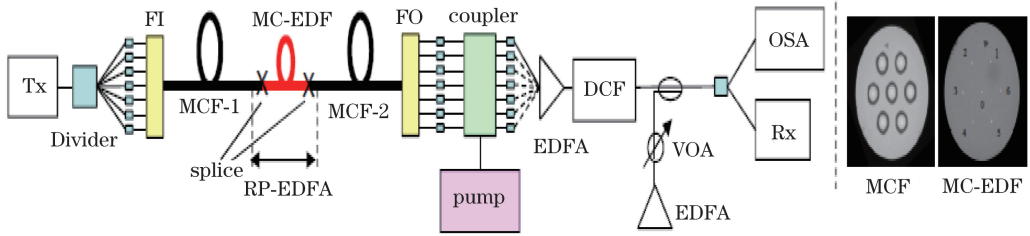


图 5 远程抽运多芯掺铒放大器^[37]

Fig. 5 Remotely pumped MC-EDFA^[37]

方式,在实际线路中得到拉曼放大与远程 EDFA 混合放大的效果。实验测得,输出端信噪比(OSNR)随着抽运功率的增加而增加。在 570 mW 的抽运功率下,采用遥泵方式与只使用拉曼放大器的方式相比,OSNR 平均提高 7 dB,而且每个纤芯的 OSNR 都得到了不同程度的提高。

2017 年以来,Mizuno 等^[38-39]提出一种利用 7 芯拉曼放大器和 7 芯 EDFA 构成的多芯拉曼/EDFA 混合放大器,其结构如图 6 所示。反向抽运的 7 芯拉曼放大器采用纤芯抽运的方法,每个纤芯的拉曼增益都可以被单独控制,用于补偿 7 个纤芯中信号损耗不一致的情况。该系统采用了 7 芯耦合器、7 芯衰减器和 7 芯隔离器等多芯器件,标志着多

芯无源器件技术实现了产品化。用这种 7 芯混合放大器开展传输系统实验,100 GHz 间隔的 46 个信号在 PDM-16QAM 调制码型下传输了 1100 km,系统品质因子 Q 值余量超过 20%。

2019 年,Puttnam 等^[40]提出了 C 波段与 L 波段混合的宽带多芯 EDFA 方案,通过运用 8 m 和 55 m 的 19 芯掺铒光纤,分别实现了 C-band 与 L-band 放大,放大器带宽超过 73 nm,增益大于 12.8 dB,NF 小于 7.6 dB。采用上述放大器及在 C+L 波段的 345 个信道,在 PDM-16QAM 调制格式下实现的传输容量为 0.715 Pbit/s,传输距离为 2009.6 km。图 7 展示了该研究所使用的 19 芯掺铒光纤结构图及 C+L 波段混合放大器示意图。

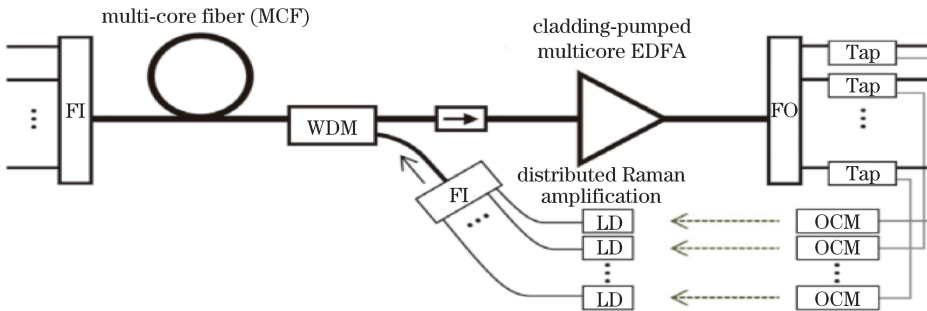


图 6 多芯 EDFA/Raman 混合放大器结构^[39]

Fig. 6 Multi-core EDFA/Raman hybrid amplifier^[39]

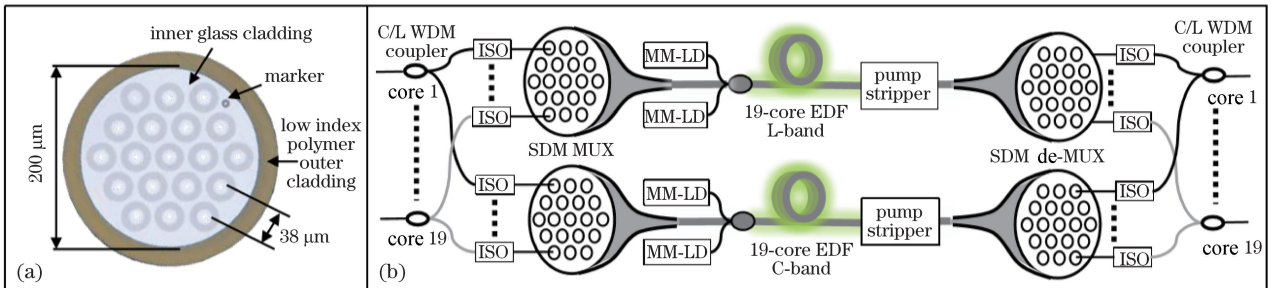


图 7 19 芯 C+L 波段混合多芯放大器结构示意图^[40]。(a) 19 芯掺铒光纤;(b) 放大器

Fig. 7 Structural diagram of C+L band hybrid multi-core amplifier with 19-core^[40]. (a) 19-core EDF; (b) amplifier

6 结束语

综述了包括弱耦合 MC-EDFA、强耦合 MC-EDFA、多芯少模 EDFA、MC-EYDFA、多芯拉曼放大器及多芯混合放大器的研究进展。目前虽然已经有空间维度达到 114(19 芯 \times 6 模)^[30]、108(36 芯 \times 3 模)^[41] 的 SDM 传输系统,且系统容量都已达到 Pbit/s 级,但是尚缺乏与之相匹配的高维度的多芯光纤放大器。在本研究范围内,少模放大器的最大支持模式数为 15 个^[42],多芯放大器的最大支持纤芯数为 32 个,多芯少模放大器支持的最大空间维数为 42 个(6 模 7 芯)^[29]。未来还需要开发具有更高空间维度的多芯放大器或多芯少模放大器,配合空分/时分复用技术、高阶调制模式实现更大容量、更高速率、更远距离的 SDM 传输系统。

SDM 系统是未来光纤通信和光传输网络容量扩展和升级演进的重要方向。多芯光纤放大器是实现 SDM 通信系统的关键技术。从目前研究来看,受限多芯掺铒光纤的拉制工艺及多芯无源器件水平,C 波段多芯 EDFA 饱和输出功率还不理想。未来随着多芯掺铒光纤技术、高效率多芯耦合器件及多模抽运激光器技术的发展成熟^[43-44],多芯放大器的性能和功耗比将进一步提升,多芯放大器将在光通信网络中获得越来越广泛的应用。强耦合多芯放大器在功耗上具有天然优势,MIMO 技术有望成为绿色超低功耗光放大器的首选方案。此外,包层抽运的多芯 EDFA 采用非制冷的多模抽运激光器抽运,与海洋环境非常契合,是未来低功耗海缆通信的理想放大器方案。

参 考 文 献

[1] Essiambre R, Mecozzi A. Capacity limits in single mode fiber and scaling for spatial multiplexing[C]// Optical Fiber Communication Conference, March 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2012: 12760867.

[2] Igarashi K, Tsuritani T, Morita I, *et al.* Ultra-long-haul high-capacity super-Nyquist-WDM transmission experiment using multi-core fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(5): 1027-1036.

[3] Kobayashi T, Hiraga K, Yamada M, *et al.* 2 \times 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 Communication (ECOC 2013), September 22-26, 2013, London, UK. New York: IEEE, 2013: 13842252.

- [4] 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.
- [5] Zhu B Y. SDM fibers for data center applications[C]// 2019 Optical Fiber Communication Conference (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2019: 18632757.
- [6] Mizuno T, Shibahara K, Lee D, *et al.* Dense space division multiplexing (DSDM) long distance optical fiber transmission technology [J]. NTT Technical Review, 2017, 15(6): 1-7.
- [7] Abedin K S, Taunay T F, Fishteyn M, *et al.* Amplification and noise properties of an erbium-doped multicore fiber amplifier[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16715-16721.
- [8] Sakaguchi J, Klaus W, Puttnam B J, *et al.* 19-core MCF transmission system using EDFA with shared core pumping coupled via free-space optics[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 90-95.
- [9] Jain S, Mizuno T, Jung Y, *et al.* 32-core inline multicore fiber amplifier for dense space division multiplexed transmission systems [C]// 42nd European Conference on Optical Communication, September 17-21, 2016, Dusseldorf, Germany. New York: IEEE, 2016: 1-3.
- [10] Mimura Y, Tsuchida Y, Maeda K, *et al.* Batch multicore amplification with cladding-pumped multicore EDF [C]// European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 16-20, 2012, Amsterdam, Netherlands. Washington, D.C.: OSA, 2012: Tu.4.F.1.
- [11] Abedin K S, Yan M F, Taunay T F, *et al.* State-of-the-art multicore fiber amplifiers for space division multiplexing[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 35: 64-71.
- [12] Ono H, Ichii K, Masuda H, *et al.* 12-core double-clad Er/Yb-doped fiber amplifier employing free-space coupling pump/signal combiner module[C]// 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), September 22-26, 2013, London, UK. New York: IEEE, 2013: 13842030.
- [13] Abedin K S, Fini J M, Thierry T F, *et al.* Seven-core erbium-doped double-clad fiber amplifier pumped

- simultaneously by side-coupled multimode fiber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 993-996.
- [14] Theeg T, Sayinc H, Neumann J. Pump and signal combiner for bi-directional pumping of all-fiber lasers and amplifiers [J]. *Optic Express*, 2012, 20(27): 28125-28141.
- [15] Tsuchida Y, Maeda K, Mimura Y, *et al.* Amplification characteristics of a multi-core erbium-doped fiber amplifier [C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2012: 13359822.
- [16] Tsuchida Y, Maeda K, Watanabe K, *et al.* Cladding pumped seven-core EDFA using an absorption-enhanced erbium doped fibre [C] // *42nd European Conference on Optical Communication*, September 18-22, 2016, Dusseldorf, Germany. New York: IEEE, 2016: 1-3.
- [17] Takasaka S, Maeda K, Kawasaki K, *et al.* Increase of cladding pump power efficiency by a 19-core erbium doped fibre amplifier [C] // *2017 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE, 2017: 17733485.
- [18] Takasaka S, Maeda K, Kawasaki K, *et al.* Cladding pump recycling in 7-core EDFA [C] // *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE, 2018: 18265371.
- [19] Matsumoto K, Takeshita H, Maeda K, *et al.* Experimental demonstration of 1480 nm cladding pumped multicore EDFA [C] // *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE, 2018: 18265230.
- [20] Fontaine N K, Lopez J E A, Chen H S, *et al.* Coupled-core optical amplifier [C] // *2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE: 16929827.
- [21] Antonelli C, Golani O, Shtaif M, *et al.* Nonlinear interference noise in space-division multiplexed transmission through optical fibers [J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13055-13078.
- [22] Ryf R, Fontaine N K, Chang S H, *et al.* Long-haul transmission over multi-core fibers with coupled cores [C] // *2017 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE, 2017: 17733644.
- [23] Wada M, Sakamoto T, Yamamoto T, *et al.* Cladding pumped randomly coupled 12-core erbium-doped fiber amplifier with low mode-dependent gain [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(5): 1220-1225.
- [24] Wada M, Sakamoto T, Aozasa S, *et al.* L-band randomly-coupled 12 core erbium doped fiber amplifier [C] // *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019*, March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2019: 18618713.
- [25] Bigot L, Trinel J B, Bouwmans G, *et al.* few-mode and multicore fiber amplifiers technology for SDM [C] // *Optical Fiber Communications Conference 2018*, March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. Washington, D.C.: OSA, 2018: Tu3B.2
- [26] Mukasa K, Imamura K, Sugizaki R. Multi-core few-mode optical fibers with large aeff [C] // *38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*, September 16-20, 2012, Amsterdam, Netherlands. New York: IEEE, 2012: 14029037.
- [27] Jin C, Huang B, Shang K P, *et al.* Efficient annular cladding amplifier with six, three-mode cores [C] // *2015 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, September 27-October 1, 2015, Valencia, Spain. New York: IEEE, 2015: 15636193.
- [28] Wada M, Sakamoto T, Aozasa S, *et al.* Two-LP-mode six-core cladding pumped EDFA with high pump power density [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 331-335.
- [29] Jung Y, Wada M, Sakamoto T, *et al.* High spatial density 6-mode 7-core multicore L-band fiber amplifier [C] // *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019*, March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2019: 18618486.
- [30] 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): 10213-10231.
- [31] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [32] Castro C, Jain S, Jung Y, *et al.* 200 Gbit/s 16QAM

- WDM transmission over a fully integrated cladding pumped 7-core MCF system[C] // 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2017: 16930104.
- [33] Jain S, Castro C, Jung Y, *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.
- [34] Maeda K, Takasaka S, Sugizaki R, *et al.* Cladding pumped amplifier using seven-core EDF [J]. *Furukawa Electric Review*, 2017(48): 42-47.
- [35] Castro C, Jain S, de Man E, *et al.* 15×200 Gbit/s 16-QAM SDM transmission over an integrated 7-core cladding-pumped repeatered multicore link in a recirculating loop [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 349-354.
- [36] 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.
- [37] Masuda H, Ono H, Takara H, *et al.* Remotely pumped multicore erbium-doped fiber amplifier system with high pumping efficiency[C] // 2013 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, July 8-10, 2013, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE, 2013: 131-132.
- [38] Mizuno T, Isoda A, Shibahara K, *et al.* Hybrid cladding-pumped EDFA/Raman for SDM transmission systems using core-by-core gain control scheme[C] // 2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE, 2017: 17749184.
- [39] Mizuno T, Isoda A, Shibahara K, *et al.* Hybrid cladding-pumped multicore EDFA/Raman amplification for space division multiplexing transmission systems[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13639-13646.
- [40] Puttnam B J, Rademacher G, Luis R S, *et al.* 0.715 Pb/s transmission over 2009.6 km in 19-core cladding pumped EDFA amplified MCF link [C] // Optical Fiber Communication Conference, March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2019: 18618348.
- [41] Sakaguchi J, Klaus W, Mendinueta J M D, *et al.* Large spatial channel (36-core × 3 mode) heterogeneous few-mode multicore fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(1): 93-103.
- [42] Trinel J B, Le Cocq G, Andresen E R, *et al.* Latest results and future perspectives on few-mode erbium doped fiber amplifiers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 35: 56-63.
- [43] 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): 0106005.
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): 0106005.
- [44] Liu Y H, Li J Y. Mode properties and progress of multi-core fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 050005.
刘业辉, 李进延. 多芯光纤激光器选模特性及其研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 050005.