

低功耗 MC-EDFA 的技术发展路线

迟荣华^{1,2}, 周燕萍², 李立亚², 王秀平²

(1.香港理工大学 电子及资讯工程学系,香港;2.无锡科技职业学院 物联网与软件技术学院,江苏 无锡 214062)

摘要:多芯掺铒光纤放大器(MC-EDFA)是实现空分复用(SDM)系统的关键器件,也是主要耗电器件,而放大器功耗主要由其泵浦技术和泵浦方式决定。以 MC-EDFA 泵浦技术为轴线阐述其低功耗技术发展路线,综述了 MC-EDFA 在降低功耗方面的研究进展。最后对低功耗 MC-EDFA 目前存在的问题和未来发展应用前景进行了探讨和展望。

关键词:空分复用;多芯掺铒光纤放大器;包层泵浦技术;铒镱共掺放大器;低功耗

中图分类号:TN365 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)10-0022-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.10.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Low power MC-EDFA technology development route

CHI Ronghua^{1,2}, ZHOU Yanping², LI Liya², WANG Xiuping²

(1. Department of Electronics & Information Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China;

2. School of Internet of things and software technology, Wuxi vocational college of science and technology, Wuxi Jiangsu 214062, China)

Abstract: Multi-core erbium-doped fiber amplifier (MC-EDFA) is a key component in the realization of space division multiplexing (SDM) system. And it is also the main power consumption device in SDM system. Power consumption of an amplifier is mostly determined by the pumping technology and pumping mode. Based on pump technology, the development routes of low-power MC-EDFA technology are described, and the research progress of MC-EDFA in reducing power consumption is summarized. Finally, the existing issues and the future development and application prospects of low power MC-EDFA are discussed.

Key words: SDM; multi-core erbium doped amplifier; cladding pump technology; Erbium-Ytterbium doped amplifier; low power consumption

0 引言

随着物联网、高清视频和云计算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。单模光纤(SMF)通信系统容量存在非线性香农极限^[1],限制了标准单模光纤传输容量的继续提升。而基于多芯光纤(MCF)、少模光纤(FMF)的空分复用(SDM)技术,能进一步提高单根光纤的传输容量,成为解决光传输网络带宽危机的一种有效途径^[2-5]。然而,SDM 传输系统

要实现大容量、高速率和长距离传输,必然离不开光放大器去补偿其传输损耗,所以 SDM 光纤放大器是 SDM 技术走向实用化的关键。

另一方面,未来网络扩容不仅面临传输容量瓶颈(香农极限),还同时面临功耗瓶颈,随着网络用户数量的激增和网络技术的飞速发展,通信网络的能耗正以每年 15%~20% 的速度增长,能耗问题日趋严重。提高能源的利用效率、减少通信网络的能源消耗已经成为各国政府、网络运营商和终端用户公认的必由之路。多芯掺铒光纤放大器(MC-EDFA)是 SDM 传输系统的关键器件,也是主要耗电部分,提高其泵浦转化效率,无疑会降低 EDFA 功耗,进而降低整个 SDM 传输系统的功耗。

随着多芯无源器件技术和泵浦技术的发展,MC-EDFA 的研究过程中先后出现过 2 种主要泵浦技术,即独立式芯区泵浦技术^[6-10]和包层泵浦技术^[11-15]。独立式芯区泵浦的优点是可以使用现有 EDFA 的泵浦光

收稿日期:2019-04-20。

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20141115)资助;2018 年度江苏省高校优秀青年教师和校长赴境外研修项目资助;2019 年江苏省“六大人才”高峰项目(XYDXX-169)资助。

作者简介:迟荣华(1973-),女,博士后,高级工程师,香港理工大学访问学者。主要研究方向为光纤激光器、光纤放大器及高速光传输系统。江苏省“双创”人才和省“333”工程人才,负责完成 3 项省部级项目。



源及其配套的光学器件,并且可对注入每根纤芯的泵浦功率单独控制;缺点是需要多个分离的泵浦激光器,降低了放大器集成度。包层泵浦技术结合了多芯铒纤和高功率多模激光器的优势,能量转化效率明显提高,但是需要开发与 MCF 及包层泵浦光源配套的新的泵浦耦合器及连接器等。

因为泵浦方式和泵浦技术对放大器功耗具有至关重要的作用,本文将以泵浦技术为主线阐述低功耗 MC-EDFA 的技术路线,综述近年来 MC-EDFA 在降低功耗方面的研究进展。

1 独立芯区泵浦

独立芯区泵浦方式是最普遍的泵浦方式。这种泵浦方式在早期文献中比较常见^[6-10]。芯区泵浦方式是通过扇入/扇出(Fan in/ Fan out)器件将 MCF 解复用至多个 SMF,使用波分复用器(WDM)将信号和泵浦合成进每一个纤芯内,泵浦与信号在纤芯内重叠。2011 年,OFS 公司首次提出 7 芯掺铒光纤和相应的 EDFA,采用独立芯区泵浦方式的 7 芯 MC-EDFA 原理结构如图 1 所示。它利用独立芯区泵浦的方式通过 7 个独立的 980/1550 nm WDM 耦合器将泵浦光注入到锥形光纤束(TFB)扇入器件的各个独立输入端,泵浦光通过扇入器件后依次对 7 芯掺铒光纤中的每个纤芯独立泵浦,每个纤芯的增益大于 25 dB,噪声小于 4 dB,饱和输出功率为 10 dBm 左右。然而,这种泵浦方法需要与纤芯数量相同的泵浦光源,集成度较低,无法体现多芯复用(MCM)的优势。

2 包层泵浦

MC-EDFA 包层泵浦技术借鉴高功率激光器和高功率放大器包层泵浦技术,它通过光纤包层功率耦合完成泵浦光在 MC-EDF 中对各个纤芯的信号同时放大。根据泵浦光功率输入方式的不同,又分为端面泵浦和侧面泵浦 2 种。端面泵浦是利用中间纤芯进行泵浦光注入,通过内包层功率耦合实现对其余纤芯的信

号泵浦。侧面泵浦是采用特殊设计的缠绕包层结构实现泵浦光注入,通过外围包层的功率耦合进 MCF 内的信号实现放大。包层泵浦方式通常只需一个多模泵浦光源,而且无需扇入/扇出器件,跟芯区泵浦方式相比,节省了泵浦成本且集成度高。缺点是包层泵浦可放大的纤芯数量有限,并且难以对各个纤芯进行精确增益控制。2012 年,在欧洲光通信会议(ECOC)上,日本古河公司的研究人员提出采用包层泵浦方式泵浦 7 芯掺铒光纤^[11],他们在多芯铒纤内增加了折射率较高的内包层,将泵浦光束束缚在内,同时采用输出尾纤为包层结构的多模激光器来泵浦多芯铒纤,不仅减少泵浦数量,而且可以解决独立芯间泵浦方式中多个泵浦源工作不均匀的情况。因为技术发展经常受制于器件水平,所以包层泵浦技术及降功耗技术是伴随着多芯耦合器件的成熟程度逐步发展起来的。本文简要介绍几种包层泵浦耦合器件及相应的包层泵浦技术。

2.1 基于自由空间的包层泵浦技术

S. Takasaka 等人^[12]提出的一种基于自由空间结构的多芯耦合器如图 2 所示。该耦合器包括物镜和二向色镜,物镜收集从准直器过来的各个 SMF 的光,二向色镜对信号光高透,对泵浦光高反,能够将多模泵浦光和信号光耦合进多芯掺铒光纤。该器件的插损达到 3.4 dB,所以效率不高。由其构成的 7 芯放大器在 8.8 W 泵浦情况下,增益大于 14 dB,噪声小于 9 dB,输出功率最大为 8.7 dBm。这种基于自由空间耦合器件的包层泵浦耦合器件插损过大,造成大量泵浦浪费,很难得到输出功率高于 20 dBm 的放大器。

2.2 基于锥形光纤束的包层泵浦技术

文献[13]使用了特殊设计的 TFB 耦合器,该 TFB 与上述独立芯间泵浦中作为扇入器件的 TFB 结构完全不同^[6]。用于包层泵浦的 TFB 由 1 根双包层光纤(纤芯直径为 105 μm ,内包层直径为 125 μm)与外围 6 根 SMF 通过熔锥的方法制作而成。其双包层光纤参数与 7 芯铒纤参数是匹配的,在 TFB 末端,随着锥区逐渐变细,泵浦区域的数值孔径逐渐增大,泵浦光开始向外

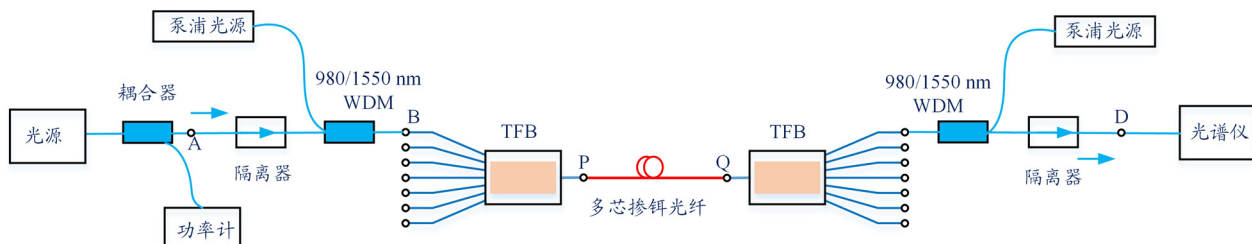


图 1 采用独立芯区泵浦方式的 7 芯 MC-EDFA 原理结构图^[6]

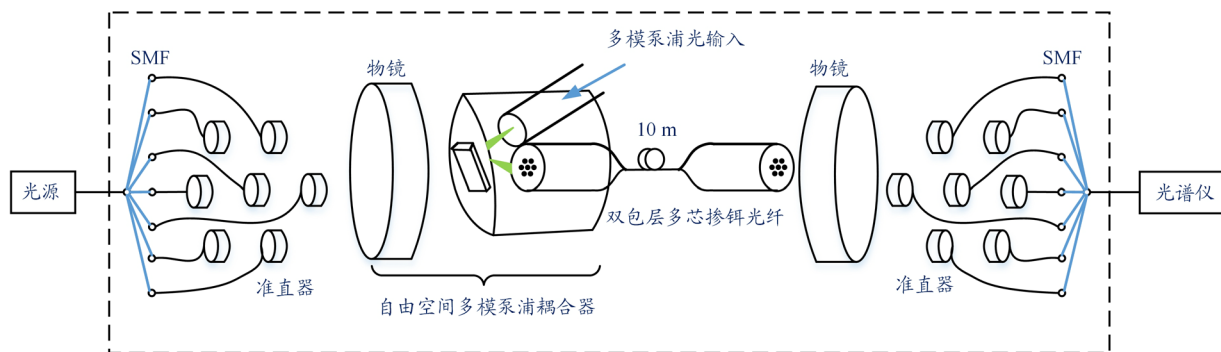


图2 基于自由空间耦合器的 MC-EDFA

泄漏,逐渐耦合进入周围的各个纤芯,基于锥形光纤束的包层泵浦方式原理结构如图3所示^[13]。这种设计中,7芯光纤中只有6芯被用来传输信号,而中间纤芯用于多模泵浦的注入。在10.9 W 泵浦的情况下,测试到有7.3 W 进入50 m 掺铒光纤,但是在铒纤末端只测试到6 W 的剩余泵浦光,需要用泵浦剥离器(Pump Stripper)将剩余泵浦光滤除。TFB 耦合器插损较大(2个 TFB 插损之和约为7 dB)加上铒纤实际吸收效率低(0.033 dB/m)导致放大器整体效率偏低。在1560 nm 处,虽然所有的6根纤芯内的信号平均增益大于20 dB,但最大输出功率只有12 dBm,泵浦转化效率有待提高。

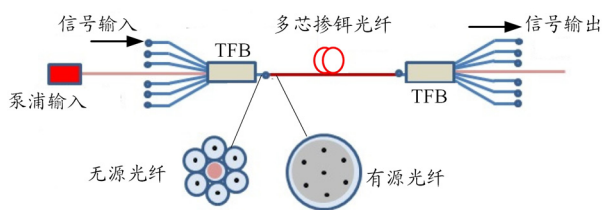


图3 基于锥形光纤束的包层泵浦方式原理结构图

2.3 基于侧面泵浦的包层泵浦技术

除了端面包层泵浦技术外,还可以采用光纤侧面耦合器进入内包层的侧面包层泵浦技术^[14,15]。熔锥结构的侧面泵浦耦合器将多根裸光纤与剥去外包层的双包层光纤缠绕在一起,在高温火焰中加热熔化,同时拉伸,使光纤熔融区成为锥形过渡区,使泵浦光由多模光纤经过双包层光纤侧面导入到内包层,再进入各个纤芯内。侧面耦合的一个显著优势是泵浦能量可以不间断地耦合进入纤芯区。侧面耦合方式能够得到比较高的泵浦耦合效率在单芯光纤中已经得到证实,例如采用V型槽侧面耦合方式^[16]、嵌入反射镜侧面耦合方式^[17]和熔锥侧面耦合方式^[18,19]等。2014年,OFS 的研究者^[15]报道了一种利用他们自制的侧面耦合器实现

的7芯EDFA,其耦合器及放大器结构如图4所示^[14]。耦合器制作是在多芯铒纤的输入端剥离了8 cm 长度的低折射率涂层,与已经熔融拉锥好的多模光纤(多模光纤缓慢改变直径从125 μm 到15 μm)通过互相缠绕的方法实现耦合。这种耦合器测得其耦合效率约为67%,通过其泵浦的7芯EDFA,在1560 nm 附近40 nm 带宽内,增益大于20 dB,噪声小于8 dB。但是由于仍然有高达85%的泵浦光未被吸收,导致放大器效率低,功耗大。

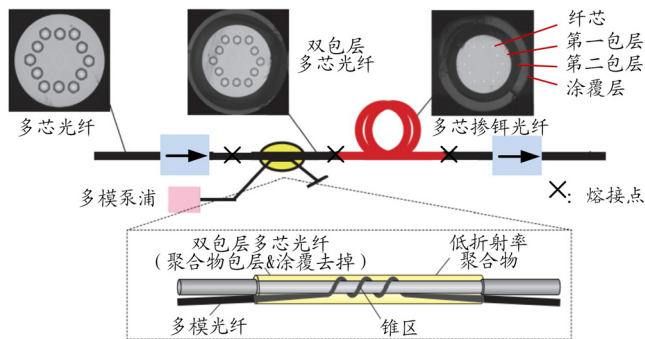


图4 基于侧面耦合器的包层泵浦方式原理结构图

2.4 改进的包层泵浦技术

早期包层泵浦 MC-EDFA 设计中,由于包层泵浦耦合器件的插损比较大,泵浦光到信号光的转化效率比较低,而且铒纤的实际吸收效率低,导致大量的泵浦光不能被铒纤吸收,造成功率浪费,功耗也难以降低。涡轮包层泵浦(TCP)技术^[20-22],其实就是一种对未被吸收的剩余泵浦光再利用的技术。在高功率激光器及放大器的常规制作中,对于剩余的泵浦功率通常采用泵浦剥离器将未被吸收的泵浦功率滤除,以避免多余的热量对光路中其它光学器件性能造成损害。日本的研究者采用TCP 技术获得了高的泵浦转化效率。改进的TCP 技术原理框如图5所示^[21],由基于自由空间的耦合器(虚线框所示)回收了多模包层泵浦未被铒纤

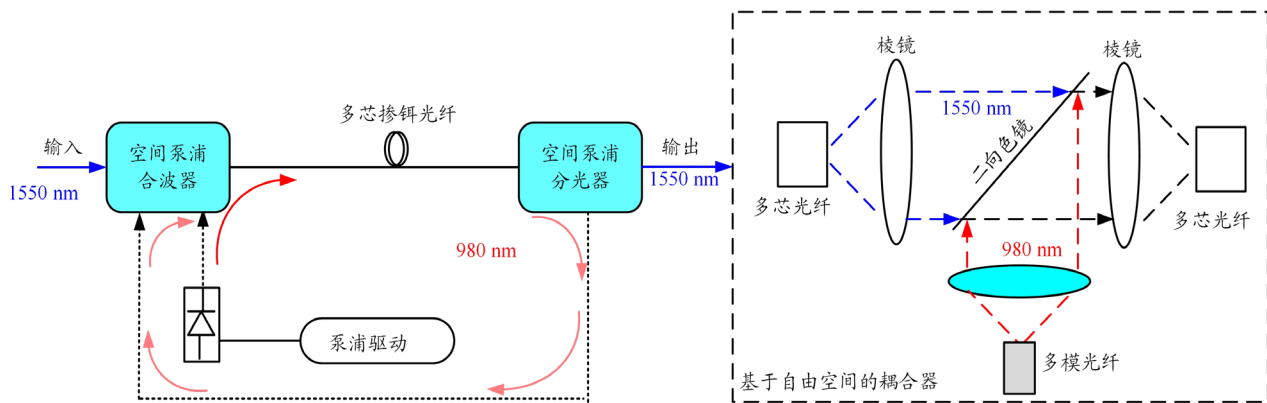


图5 改进的 TCP 技术原理框图

吸收的剩余能量,并注入到特制的具有 2 个输入端口的泵浦合波器内,然后泵浦能量被再次注入到多芯铒纤内。2018 年,在 ECOC 上,NEC 的研究者们^[20]提出的新型涡轮包层泵浦 MC-EDFA,就是基于泵浦光回收后再次注入多芯铒纤中的原理,将增益在原有基础上提高 2dB,采用这种方法与普通包层泵浦技术相比,功耗减少 32%。2019 年,在世界光通信大会上,该课题组采用组合配对的空间泵浦合波器和分离器,进一步提升泵浦回收效率,将剩余泵浦的回收率从 12%提高到 42%,泵浦回收效率的提升使放大器增益在原来提高 2dB 的基础上又进一步提高 1.2dB,达到 3.2dB^[21]。

3 混合包层泵浦技术

普通 EDFA 中,采用 1480 nm 激光器比 980 nm 激光器泵浦效率高,这一结论在 MC-EDFA 中也被证实^[23]。在 7 W 的包层泵浦功率下,分别采用 980 nm 和 1480 nm 激光器去泵浦同一段多芯掺铒光纤。实验结果显示:采用 1480 nm 激光器泵浦增益比 980 nm 的高 2.6 dB,或者说功耗节省 23.7%,但是相应的噪声系数劣化 1.03 dB。

混合包层泵浦技术^[24-28]实际就是将独立芯区泵浦方式和包层泵浦方式结合起来的泵浦技术,能够有效提高泵浦效率,降低功耗。日本 NEC 的研究者在混合泵浦研究方面做了很多实验工作。他们首先采用混合泵浦的方式,在多芯铒纤前端采用包层泵浦技术,泵浦光为多模的 980 nm 激光器;在多芯铒纤末端则采用芯区泵浦方式,注入 1480 nm 的单模泵浦光,采用混合泵浦方式使其功耗降低 10.4%。根据使用的纤芯数量控制混合泵浦的比例,功耗进一步降低 16.5%。通过使用分光比可调的分光器调整反向注入的泵浦光比例,进一步将泵浦功耗降低了 23%^[25]。混合泵浦方

案如图 6 所示^[26]。调制格式为 256 Gb/s PM-16QAM (正交振幅调制) 的信号在 110 km 的 MCF 链路上传输,通过混合包层泵浦多芯放大器放大,采用可调分光器对 1480 nm 泵浦比例及前、后向混合泵浦比例进行调控,系统功耗降低了 32%,而接收端信号质量并没有发生明显改变,这验证了该方案的稳定性^[24,25]。

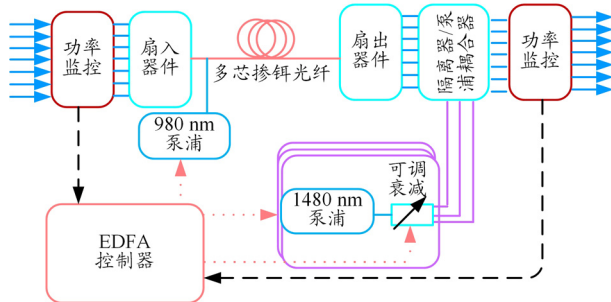


图6 混合包层泵浦方式技术原理框图

4 其它低功耗 MC-EDFA 技术路线

4.1 多芯铒镱共掺光纤放大器(MC-EYDFA)

为了降低 MC-EDFA 的功耗,除了在泵浦方式上做优化,在光纤介质上也可以做优化,例如采用多芯铒镱共掺双包层光纤做增益介质。铒镱共掺光纤由铒离子首先吸收泵浦光,然后通过敏化作用激发镱离子,形成铒波段粒子数反转,从而充分利用铒离子吸收带宽宽、泵浦吸收系数大和允许高功率多模泵浦的优点,同时提高了铒离子的掺杂浓度^[29]。多芯铒镱掺杂光纤与双包层泵浦技术的共同作用,为实现多芯放大器高功率输出提供了可能。2013 年,日本研究者在 ECOC 上报导了他们的 12 芯 EYDFA^[30]。12 芯铒镱光纤的内包层及外包层直径分别为 216 μm 和 284 μm ,芯间距为 37.2 μm 。在 5 m 长的光纤上,当泵浦注入功率为 1.9 W 时,从铒纤末端探测到泵浦功率只有

0.04 W,可见大部分泵浦光都被铒镱光纤吸收了。这表明采用铒镱光纤能够有效提高铒离子对泵浦的吸收效率,进而提高泵浦光的利用率,12根纤芯增益在13.4~18.3 dB之间,增益效率达到7.1~9.6 dB/W。而且他们使用改进的自由空间耦合器,各个纤芯的插损降低为0.4~1.8 dB^[30]。

2018年,JAIN S等人提出了一个改进版本的32芯的EYDFA^[31]。在1534~1561 nm (27 nm)波长范围内,其增益大于17 dB范围,平均噪声指数为6.5 dB,芯与芯之间的增益差异小于2 dB。该放大器还在不同调制格式信号的循环环路实验中进行了测试,使用正交相移键控(QPSK)信号成功地传输了超过1850 km的距离。此外,随着多芯掺铒光纤纤芯数目增加,放大器在降低功耗方面具有潜在优势。通过比较7芯和32芯的MC-EYDFA的效率,发现32芯MC-EYDFA效率更高^[31,33]。另一项研究^[32]中,对7芯和19芯EDFA泵浦效率做比较,发现19芯EDFA比7芯EDFA效率更高。据此,研究者猜测,泵浦效率随着芯数目增加而增加。

目前来看,在降低功耗方面,MC-EYDFA效果尤为明显。普通单芯EDFA、7芯EYDFA和32芯EYDFA的功耗比较如表1所示^[31]。7芯EYDFA所用的泵浦驱动功率为30 W,泵浦致冷功率为15 W,功耗降低因子1.89(功耗降低因子以1.0为参照标准),说明其功耗大于普通单芯EDFA。初始结构的32芯EYDFA的驱动功率为56 W,致冷功率为20 W,功耗因子为0.70,功耗结果比普通单芯EDFA要好,但是不够理想。进一步地,采用965 nm波长泵浦,所需致冷功率只有9 W,功耗因子降为0.6。如果不用基于空间耦合方式的合波器(耦合效率60%),而用效率更高的光纤型耦合器(预计耦合效率90%),那么驱动功率将会从56 W降低至36 W,由此计算的功耗降低因子只有0.41。相比普通单芯EDFA,功耗降低了59%。但是需要说明的是,目前多芯不掺杂镱离子的EDFA,其效率还比较低,尤其是在C波段,与普通单芯EDFA相比,并没有优势。

4.2 强耦合 MC-EDFA

强耦合MCF通过有意减小纤芯之间的距离,增加芯间串扰,产生超模传输效应。通过纤芯之间的强随机混合使非线性相

互作用的积累效应降低,线性损伤也随之减少。强随机混合确保每个输入信号几乎均匀地传播到所有的纤芯,所以强耦合传输光纤(coupled core fiber)的性能优于等效的SMF。目前,有关强耦合MC-EDFA的研究开展得并不多。在2017 OFC上,美国贝尔实验室首次提出强耦合4芯掺铒光纤及其光放大器,纤芯间距只有9.5 μm ,远小于弱耦合多芯掺铒光纤30~40 μm 的芯间距。2018年,日本电报电话公司接入网实验室研究人员提出强耦合12芯包层泵浦放大器^[35],强耦合掺铒光纤的12根纤芯横竖排列,纤芯间距16.4 μm ,制作的光放大器在C波段增益超过17 dB,平均噪声指数为6.2 dB,模式相关增益小于1 dB。

强耦合EDFA被看作未来具有低功耗潜力的多芯放大器,其泵浦方式依然是芯间泵浦和包层泵浦2种。对于包层泵浦,功率效率主要取决于纤芯密度。即使是芯数在12~19之间中等芯数的MC-EDFA,其芯的能量密度可达到非耦合MC-EDFA的3倍,使其具有更高的功率效率^[36,40]。对于芯间泵浦,泵浦光也在各个纤芯之间耦合,这就很自然地可以利用泵浦共享的方法。考虑到这种情况,在低泵浦功率时,泵浦共享可以有效抵消独立芯间泵浦时各个泵浦激光器的阈值,降低泵浦总功耗。然而,由于激光器的非线性效应及饱和特性,在较高泵浦功率情况下,这种方法由于非线性会受到一定限制。所以耦合纤芯泵浦情况下,要从系统层面综合考虑,比如利用一定算法设计WDM信道数目或者SDM的维度。虽然目前还没有功耗方面的报导,但是从设计理念上仍然属于一种极具潜力的低功耗MC-EDFA方案^[37]。

5 基于算法的低功耗 MC-EDFA

通过前文所述,可以看出通过改进泵浦耦合器件的插损或者对剩余泵浦光再利用的方法可以提高泵浦光转化效率,降低MC-EDFA的功耗。从系统层面通过对波长进行分配或采用一定的路由算法对MC-ED-

表1 传统单芯EDFA与多芯铒镱共掺放大器功耗比较

放大器类型	驱动功耗(W)	致冷功耗(W)	总功耗(W)	等效功率(W)	功耗降低因子
传统单芯EDFA	1.6	1.8	3.4	—	1.0
7芯EYDFA	30	15	45	23.8(=7×3.4)	1.89
初始32芯EYDFA	56	20	76	108.8(=32×3.4)	0.70
泵浦优化后32芯EYDFA	56	9	65	108.8	0.6
耦合器优化后32芯EYDFA	36	9	45	108	0.41

FA 及 SDM 系统做优化可以降低总功耗^[38-40]。NEC 的研究者对采用 MC-EDFA 的 WDM/SDM 复合系统从系统层面做了功耗优化仿真设计^[38]。Hitoshi 等人^[39]通过使用纯空间超信道放大的方法将 MC-EDFA 放大器功耗降低 39%。在此基础上,他们又提出了在 MC-EDFA 中减少使用空间复用光载波数量的路由和空间分配算法(即损伤感知最小波长带宽路由算法),进一步将 MC-EDFA 系统功耗降低 45%。

6 结束语

本文从泵浦效率及功耗角度综述了近年来 MC-EDFA 的技术路线。从现有研究成果来看,目前 C 波段 MC-EDFA 泵浦效率仍然不够理想,原因是缺乏高效率的泵浦耦合器,铒纤实际吸收率低等。通过改进的包层泵浦方式和混合泵浦方式,可使泵浦转化效率得到一定程度提高,但是与单芯 EDFA 相比,泵浦效率优势不大,而且 C 波段输出功率偏低。未来需要改进多芯铒纤的设计和制造工艺,加强泵浦耦合器的工艺制造水平,提高耦合效率,实现 C 波段高功率、宽带宽的 MC-EDFA。

研究者们发现,随着多芯掺铒光纤纤芯数目的增加,功耗有降低的趋势。同时纤芯数目增加,系统容量也会增加,随着未来多芯掺铒光纤和多芯耦合器件设计制造和工艺技术的发展,SDM 技术有望突破目前光传输中遇到的容量危机和功耗危机,实现双赢的局面。由于海底的特殊环境,泵浦激光器不需要制冷,采用多模激光器泵浦的包层泵浦 MC-EDFA 功耗优势更为突出,预测未来 MC-EDFA 在需要低功耗的海缆通信系统中会获得一定应用。此外,随着强耦合多芯掺铒光纤技术的发展,未来强耦合 MC-EDFA 在低功耗方面或许会取得一定突破。

参考文献:

- [1] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [2] 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.
- [3] RYF R, FONTAINE N K, CHEN H, et al. Mode-multiplexed transmission over conventional graded-index multimode fibers [J]. Optics Express, 2015, 23(1): 235-246.
- [4] PUTTNAM B J, LU S 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, 2015:

1-3.

- [5] IGARASHI K, SOUMA D, WAKAYAMA Y, et al. 114 space-division-multiplexed transmission over 9.8km 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, 2015.
- [6] ABEDIN K S, TAUNAY T F, FISHTEYN M, et al. Amplification and noise properties of an erbium-doped multicore fiber amplifier[J]. Opt. Exp. 2011, 19(17): 16715-16721.
- [7] TSUCHIDA Y, MAEDA K, WATANABE K, et al. Simultaneous 7-Core Pumped Amplification in Multicore EDF through Fibre Based Fan-In/Out[C]//38th European Conference and Exhibition on Optical Communication, Sept. 16-20, 2012, Amsterdam, Netherlands. Amsterdam: IEEE, 2014.
- [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]. Opt. Express, 2014, 22(1): 90-95.
- [9] WATANABE K, SAITO T, TSUCHIDA Y, et al. Fiber Bundle Type Fan-out for multi core Er Doped Fiber Amplifier [C]//18th OptoElectronics and Communications Conference held jointly with 2013 International Conference on Photonics in Switching (OECC/PS), June 30-July 4, 2013, Kyoto, Japan. Kyoto: IEEE, 2013.
- [10] TSUCHIDA Y, MAEDA K, MIURA J, et al. Multicore Erbium Doped Fiber Amplifier with 5THz Bandwidth, High-gain and Low NF [C]//IEEE Summer Topical Meeting 2013, July 8-10, 2013, Waikoloa, USA. Waikoloa: IEEE, 2013.
- [11] MIMURA Y, TSUCHIDA Y, MAEDA K, et al. Batch multicore amplification with cladding-pumped multicore EDF [C]// 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications, Sept. 16-20, 2012, Amsterdam, Netherlands. Amsterdam: IEEE, 2012.
- [12] TAKASAKA S, MATSUURA H, KUMAGAI W, et al. Cladding-pumped seven-core EDFA using a multimode pump light coupler[C]//39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), Sept. 22-26, 2013, London, UK. London: IEEE, 2013.
- [13] ABEDIN K S. Cladding-pumped erbium-doped multicore fiber amplification[J]. Optics Express, 2012, 20(18): 20191-20200.
- [14] HIROTAKA O. Optical Amplification Technologies for Space Division Multiplexing[J]. NTT Technical Review, 2017, 15(6): 1-6.
- [15] ABEDIN K S, FINI J M. Seven-core erbium-doped double-clad fiber amplifier pumped simultaneously by side-coupled multimode fiber [J]. Optic Letters, 2014, 39(4): 993-996.
- [16] RIPIN K S, GOLDBERG L. High efficiency side-coupling of light into optical fibres using imbedded v-grooves [J]. Electron. Lett., 1995, 31(25): 2204-2205.
- [17] KOPLOW J P, MOORE J, KLINER D A V. A new method for side pumping of double-clad fiber sources [J]. IEEE J. Quantum Electron, 2003, 39(4): 529-540.
- [18] GAPONTSEV V P, SAMARTSEV I. Coupling arrangement between a multi-mode light source and an optical fiber through an intermediate optical fiber length: USA, 5999673[P]. 1999-12-07.
- [19] THEEG T, SAYINC H, NEUMANN J. Pump and signal combiner for

bi-directional pumping of all-fiber lasers and amplifiers [J]. Opt. Express, 2012, 20(27): 28125–28141.

[20] HITOSHI T, KEIICHI M, EMMANUEL L T G. Transmission of 200Gbps PM-16QAM Signal Through 7-Core MCF and MC-EDFA Using Novel Turbo Cladding Pumping Scheme for Improved Efficiency of the Optical Amplification [C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), Sept. 23–27, 2018, Rome, Italy. Rome: IEEE, 2018.

[21] TAKESHITA H, MATSUMOTO K, YANAGIMACHI S, et al. Improvement of the Pump Recycling Ratio of Turbo Cladding Pumped MC-EDFA with Paired Spatial Pump Combiner and Splitter [C]//Optical Fiber Communication Conference 2019, March 3–7, 2019, San Diego, US-A. San Diego: IEEE, 2018.

[22] TAKESHITA H, MATSUMOTO K, HASEGAWA H. Improved Optical Amplification Efficiency by using Turbo Cladding Pumping Scheme for Multicore Fiber Optical Networks [J]. IEICE Transactions on Communications, 2019, E102B(6): 50–53

[23] MATSUMOTO K, TAKESHITA H, MAEDA K, et al. Experimental Demonstration of 1480nm Cladding Pumped Multicore EDFA [C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), Sept. 23–27, 2018, Rome, Italy. Rome: IEEE, 2018.

[24] PILIPETSKII A, SINKIN O, TURUKHIN A, et al. The Role of SDM in Future Transoceanic Transmission Systems [C]//2017 European Conference on Optical Communication, Sept. 17–21, 2017, Gothenburg, Sweden. Gothenburg: IEEE, 2017.

[25] EMMANUEL L T G, KEIICHI M, SADA O F, et al. Transmission of 256Gb/s PM16QAM Signal through Hybrid Cladding and Core Pumping Scheme MC-EDFA Controlled for Reduced Power Consumption [C]// The Optical Fiber Communication Conference, March 19–23, 2017, Los Angeles, USA. Los Angeles: IEEE, 2017.

[26] SHIGEHITO T, KOICHI M, KOHEI K, et al. Cladding Pump Recycling in 7-Core EDFA [C]// 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), Sept. 23–27, 2018, Rome, Italy. Rome: IEEE, 2018.

[27] EMMANUEL L T G, Keiichi M, Hitoshi T, et al. Advances in Power-Efficient SDM Transmission Technologies [C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Oct. 26–29, 2018, Hangzhou, China. Hangzhou: IEEE, 2018.

[28] HITOSHI T, KEIICHI M, EMMANUEL L T G. Transmission of 200Gbps PM-16QAM Signal through 7-core MCF and MC-EDFA using Novel Turbo Cladding Pumping Scheme for Improved Efficiency of the Optical Amplification [C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), Sept. 23–27, 2018, Rome, Italy. Rome: IEEE, 2018.

[29] RICHARDSON D J, NILSSON, CLARKSON W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. Journal Opt. Soc. Am. B, 2010, 27(3): 63–92.

[30] ONO H, TAKENAGA K, ICHII K, et al. Yamada, 12-core double-clad Er/Yb-doped fiber amplifier employing free-space coupling pump/signal combiner module [C]//39th European Conf. Exhibition Optical Communication, Sep. 22–26, 2013, London, UK. London: IEEE, 2013.

[31] JAIN S, CASTRO C, JUNG Y. 32-core erbium/ytterbium-doped multi-core fiber amplifier for next generation space-division multiplexed transmission system [J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32887–32895.

[32] TAKASAKA S, MAEDA K, KAWASAKI K, et al. Increase of Cladding Pump Power Efficiency by a 19-Core Erbium Doped Fiber Amplifier [C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), Sept. 17–21, 2017, Gothenburg, Sweden. Gothenburg: IEEE, 2017.

[33] CAST C, JAIN S, MAN E D. 15 × 200 Gbit/s 16-QAM SDM Transmission Over an Integrated 7-Core cladding- Pumped Repeated Multicore Link in a Recirculating Loop [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 349–354.

[34] NICOLAS K F, SCHULZGEN A, NEILSON D T, et al. Coupled-Core Optical Amplifier [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 19–23, 2017, Los Angeles, USA. Los Angeles: IEEE, 2017.

[35] 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): 220–225.

[36] ESSIAMBRE R J, RYF R, RADEMACHER G. System Benefits of coupled-core multi-core fibers with different coupling length [C]// 2018 Science and Innovations, May 13–18, 2018, San Jose, USA. San Jose: IEEE, 2018.

[37] WADA M, SAKSMOTO T, AOZASA S, et al. L-band randomly-coupled 12 core erbium doped fiber amplifier [C]// 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 3–7, 2019, San Diego, USA. San Diego: IEEE, 2019.

[38] NOORUZZAMAN M, JAIN S, JUNG Y, et al. Power consumption in multi-core fibre networks [C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), Sept. 17–21, 2017, Gothenburg, Sweden. Gothenburg: IEEE, 2017.

[39] TAKESHITA H, MATSUMOTO K, GABORY E. Reduction of the Power Consumption in a WDM/SDM Network by using Cladding Pump Scheme MC-EDFA with Impairment Aware Least Wavelength Bandwidth Routing [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. March 11–15, 2018, San Diego, USA. San Diego: IEEE, 2018.

[40] GABORY E, TAKESHITA H, MATSUMOTO K, et al. Reduction in Power Consumption in Multi-Core Amplifier [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 3–7, 2019, San Diego, USA. San Diego: IEEE, 2019.

首届年度优秀论文评选活动公告

为了活跃光通信学术氛围,提升《光通信技术》杂志所刊登文章的科技含量和实用性,《光通信技术》编辑部决定从 2019 年起,每年举办一次年度优秀论文评选活动,评选出本年度 6~10 篇已正式刊登(纸质版)的优秀论文,对获优秀论文奖的第一署名作者颁发荣誉证书和现金奖励(500 元/篇),获奖名单将在 2019 年第 12 期《光通信技术》杂志和网站公布。敬请广大作者积极支持我们的工作,踊跃佳作!