

多芯掺铒光纤的制备及其放大性能

辜之木, 褚应波, 李海清, 彭景刚, 戴能利, 李进延*

华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 空分复用技术被认为是未来实现光纤通信容量升级扩容的关键技术。传输距离是决定空分复用系统应用场景的关键,空分复用系统中信号的传输离不开放大器对损耗的补偿,因此,基于多芯掺铒光纤的空分复用光放大器是空分复用技术走向实用化的核心器件。本文基于改进的化学气相沉积技术结合打孔法制备了七芯掺铒光纤,并搭建了纤芯独立泵浦多芯光纤的放大系统,测试了七芯掺铒光纤的放大性能。在输入信号为 0 dBm,泵浦光功率为 350 mW 的条件下,测得七芯掺铒光纤纤芯在 C 波段(1526~1566 nm)的平均增益为 14 dB,平均噪声指数小于 6 dB,不同纤芯间的增益差小于 5 dB。

关键词 光纤光学; 掺铒光纤; 空分复用; 多芯光纤; 宽带放大

中图分类号 U285.16

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.0906003

1 引言

全球移动互联、短视频、物联网、云计算和 5G 技术的发展和普及,催生了数据通信的新一轮爆炸式增长。受限于光纤的非线性效应,现有单模光纤的传输容量已经接近香农极限^[1]。基于多芯光纤(MCF)的空分复用(SDM)技术被认为是未来实现光纤传输容量爆发式增长的关键技术之一^[2-4]。早在 1979 年,Inao 等^[5]就提出了多芯光纤的概念。空分复用就是从空间的维度来扩充光通信系统的数据承载/传输能力,如果将现有商用单模光纤比作是“单层道路”,那么基于多芯光纤的空分复用就相当于一次性铺下了“多层高架桥”,可以数倍增加空分复用信道数,满足数据传输容量的高速增长需求。

就通信系统的应用而言,传输容量并非唯一目标,传输距离也将直接决定应用场景。若要利用空分复用技术实现大容量、高速率、长距离传输,就得依靠放大器补偿传输过程中信号的损耗。因此,多芯掺铒光纤放大器(MC-EDFA)成为实现空分复用技术的核心器件,同时也是基于多芯光纤的空分复用通信走向实用化的关键^[6]。到目前为止,MC-

EDFA 已经历了 10 余年的发展。2011 年,OFS 公司提出了独立纤芯泵浦的结构,利用扇入/扇出器件将多芯掺铒光纤接入单芯掺铒光纤放大器系统中,获得了 25 dB 的净增益和小于 4 dB 的噪声系数^[7]。但该方案的系统复杂度较高,可以通过制备相应的多芯耦合器、隔离器、波分复用器使 MC-EDFA 系统的复杂度大大降低。采用自由空间透镜制备的多芯器件能够将泵浦光及信号光耦合进多芯掺铒光纤中,进而实现信号放大^[8]。相较于纤芯泵浦,包层泵浦方式利用多模泵浦激光器经包层耦合到纤芯中,成本及能耗更低^[9]。包层泵浦的劣势是泵浦效率较低。通过光纤结构设计,利用纤芯环形分布、内包层折射率凹陷的方案,可以在一定程度上提高泵浦效率^[10]。

目前,我国在空分复用技术领域还停留在多芯传输光纤层面。光纤巨头长飞光纤光缆股份有限公司和烽火通信科技股份有限公司已经制备出多芯传输光纤。2017 年,烽火通信科技股份有限公司利用七芯无源光纤实现了 560 Tb/s 的超大容量光传输实验,可以在一根光纤上实现 135 亿人同时通话。在弱耦合多芯串扰机理方面也有基于功率耦合理论

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-09-27; 录用日期: 2021-10-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61805093)

通信作者: *ljy@hust.edu.cn

的相关研究^[11]。为了抑制多芯光纤中的串扰,北京交通大学的刘畅等^[12]设计并提出了异质结构的低串扰多芯少模光纤,有效抑制了模间串扰。然而,国内几乎没有企业或科研院所进行多芯掺铒光纤的研究,从而严重制约了我国多芯光纤空分复用通信技术的发展。针对这一现状,本课题组采用改进的化学气相沉积(MCVD)工艺及液相掺杂法制备了掺铒预制棒,同时结合打孔法对套管进行加工,设计并拉制出结构均匀的七芯掺铒光纤。进一步,利用熔融拉锥光纤束型扇入/扇出器件实现了光在单芯光纤与多芯光纤间的耦合,并采用独立纤芯泵浦的方式搭建了七芯掺铒光纤放大器,探究了 7 根纤芯的放大性能和增益均衡特性。

2 光纤的制备及测试

2.1 单芯掺铒光纤

制备七芯掺铒光纤需要成熟的掺铒光纤预制棒制备工艺。在采用 MCVD 工艺制备预制棒过程中,往往需要在液相或气相掺杂时引入其他共掺离子来改变铒离子(Er^{3+})的配位环境,以调控其发光特性。例如,共掺铝离子可以增加铒离子在硅酸盐中的溶解度,实现光纤中铒离子的低团簇高浓度掺杂。另外,氧化铝的高掺杂有利于改善掺铒光纤增益平坦的特性,特别是对 1550 nm 附近的增益波动有着明显的抑制作用。图 1 所示为经高掺铝工艺制备得到的预制棒的折射率剖面,折射率呈高斯分布,预制棒的数值孔径为 0.25。

对上述光纤预制棒进行高温拉丝得到了单芯掺铒光纤,然后搭建单级前向泵浦放大测试结构,通过此结构探究单芯掺铒光纤放大器性能与光纤长度、

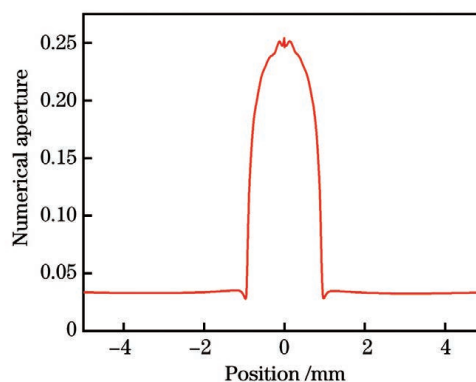


图 1 掺铒光纤预制棒的折射率剖面

Fig. 1 Refractive index of erbium-doped preform

泵浦光功率之间的关系,结果如图 2 所示。C 波段掺铒光纤的增益谱在 1530 nm 和 1558 nm 附近有两个峰值,在固定泵浦功率为 300 mW 的条件下,通过调整光纤长度,得到了图 2(a)所示的变化曲线。当光纤长度过短时,放大器达到了充分泵浦状态,短波附近的信号具有增益优势,增益峰值高,而长波处的增益峰值低;当光纤达到最佳增益长度时,前后两个增益峰值持平,光纤增益谱最为平坦;当光纤长度过长时,输出端泵浦水平过低,对光纤短波附近的放大信号产生了较大吸收,增益峰表现为前低后高。由图 2(a)可以看出 6.8 m 是该光纤的最佳增益长度。在光纤长度固定后,通过调整泵浦功率,得到了如图 2(b)所示的变化曲线。泵浦反转度对掺铒光纤放大器增益性能的影响较大。由于波长越短,实现增益要求的反转度越高,所以放大器的两个增益峰值随着泵浦功率的增大表现为在短波峰值处的增幅大于在长波峰值处的增幅。

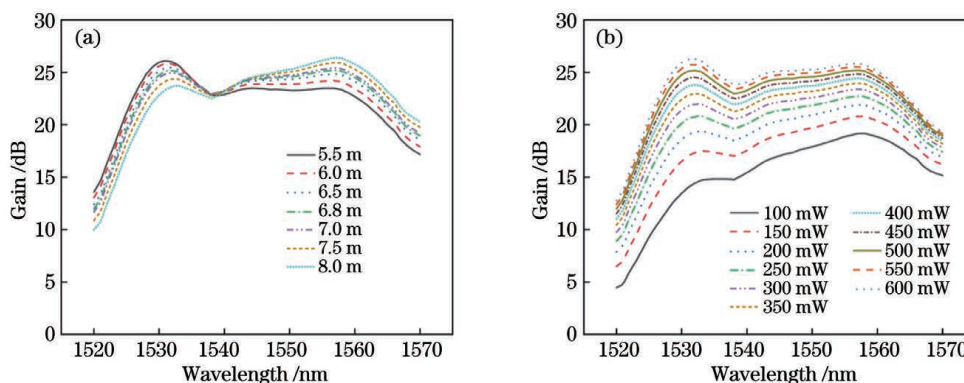


图 2 增益谱变化曲线。(a)增益谱随光纤长度的变化曲线;(b)增益谱随泵浦功率的变化曲线

Fig. 2 Gain spectrum change curves. (a) Gain spectrum change with fiber length; (b) gain spectrum change with pump power

在信号光总功率为 0 dBm、980 nm 泵浦光功率为 300 mW 的条件下,得到了如图 3 所示的该光纤在 C 波

段的最佳放大特性曲线。该光纤的 20 dB 增益带宽为 1526~1566 nm,增益波动范围小于 4 dB,噪声系数

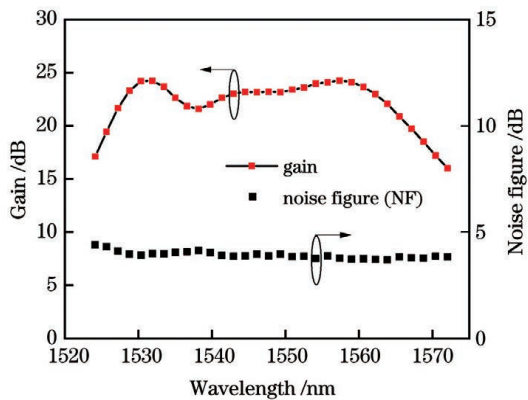


图 3 掺铒光纤放大特性曲线

Fig. 3 Amplification characteristic of erbium-doped fiber (NF) 小于 4 dB, 且在长波长处噪声系数呈下降趋势。总体来说, 该光纤的性能与商用铒纤基本持平。

2.2 七芯掺铒光纤的制备

目前, 国内外主流的多芯光纤的制备方法包括堆叠法、磨棒拼接法和打孔法^[13]。堆叠法: 将光纤预制棒拉制成毛细棒, 接着对毛细棒及毛细石英玻璃棒进行堆叠, 形成特定的纤芯排列, 然后用夹具固定并套管拉丝。磨棒拼接法: 采用平面打磨的方式将预制棒的接触面磨成平面, 以减少拼接过程中的

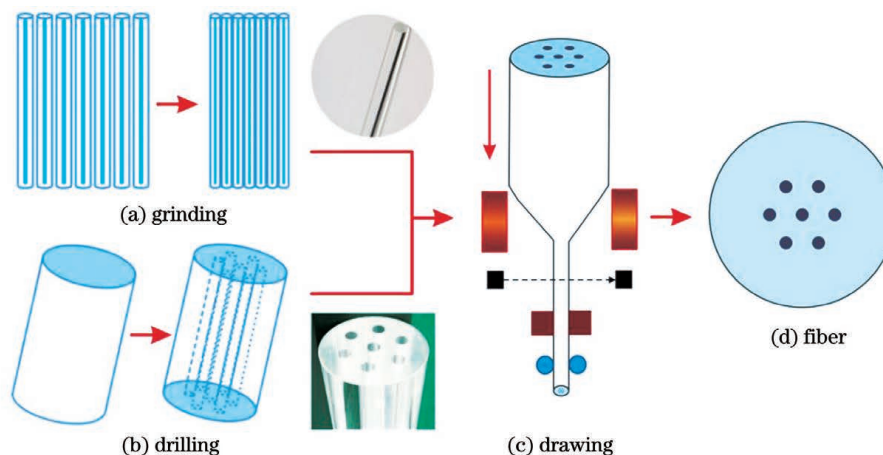


图 4 七芯掺铒光纤的制备流程图

Fig. 4 Manufacturing process of 7-core erbium-doped fiber

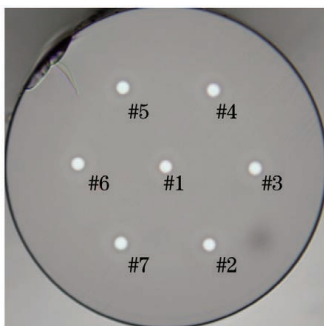


图 5 七芯掺铒光纤的截面图

Fig. 5 Cross section of 7-core erbium-doped fiber

空隙, 接着用夹具固定预制棒, 并在套管过程中将剩余的空隙用毛细玻璃棒填充, 最后拉丝成纤。前者可以灵活地控制纤芯的位置分布, 光纤结构设计自由度高; 后者的加工方式简单, 制备成本低, 效率高。但这两种方法存在共同的缺陷, 即: 无法高精度地控制纤芯的位置分布, 制备过程中引入的几何误差较大。

本课题组采用打孔法制得了七芯掺铒光纤, 具体制备流程如图 4 所示。相比较而言, 打孔法的优势在于可以精确控制纤芯的位置。纤芯位置分布不均匀或纤芯变形都会导致模场畸变, 使得熔接损耗增大, 从而影响放大性能。打孔法以其高水平的定位精度可以避免由制备过程产生的与预先设计结构不匹配而造成的放大性能劣化。打孔法主要包括以下三个步骤: 第一步, 基于 MCVD 工艺及液相掺杂技术, 制备出 7 根完全相同的掺铒预制棒, 并对其进行处理; 第二步, 对高纯石英套管按照预设的纤芯分布进行打孔, 以精确控制纤芯排列, 保证拉制出的多芯光纤的芯间距均匀; 第三步, 将 7 根加工后的掺铒预制棒插入七孔套管中, 然后架到拉丝塔上进行高温拉丝, 最终得到七芯掺铒光纤。利用打孔法制备的七芯掺铒光纤的截面如图 5 所示。外

圈的 6 根纤芯呈正六边形分布, 从中心到外圈纤芯编号依次为 1~7; 包层处的阴影为引入的标记, 以区分不同的纤芯。包层直径为 $150 \mu\text{m}$, 芯间距为 $41 \mu\text{m}$ 。该七芯光纤的主要几何参数如表 1 所示。

2.3 实验装置

为测试七芯掺铒光纤的放大性能, 本课题组搭建了七芯掺铒光纤放大系统, 实验装置如图 6 所示。信号源采用 31 独立通道的密集型波分复用 (DWDM) 信号, 波长覆盖 $1524 \sim 1572 \text{ nm}$ 。利用扇

表 1 七芯掺铒光纤的几何参数

Table 1 Geometric parameter of 7-core erbium-doped fiber

Item	Value
Core arrangement	Hexagon
Cladding radius / μm	150.0 ± 1.0
Core radius / μm	5.0 ± 0.5
Core pitch / μm	41.5 ± 1.0
Mode field diameter / μm	5.5 ± 1.0

入/扇出器件实现独立纤芯泵浦,以获得较高的泵浦

效率。本实验使用的扇入/扇出器件由 7 根标准单模光纤合束熔融拉锥得到,其纤芯排列方式及芯间距与多芯掺铒光纤完全相同。在本结构中,980 nm 泵浦光与信号光通过波分复用器(WDM)耦合进扇入器件的输入臂,实现单芯光纤到多芯光纤的耦合。信号光在泵浦光的作用下,经七芯掺铒光纤的单根纤芯独立放大后,由扇出器件的输出臂注入到光谱仪中。为了抑制反向放大的自发辐射(ASE)噪声,在掺铒光纤的注入端和输出端均接入了隔离器。关键实验仪器型号及参数如表 2 所示。

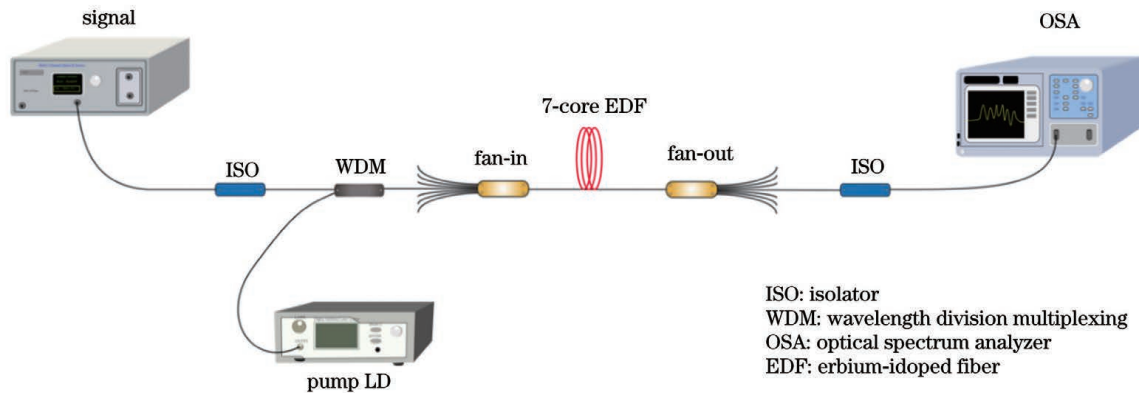


图 6 七芯掺铒光纤放大性能测试实验装置

Fig. 6 Configuration of 7-core erbium-doped fiber amplification characteristics measurement

表 2 关键实验仪器及参数

Table 2 Key experimental instrument and parameters

Item	Model	Parameter
Signal	Zewada	$\Delta\lambda = 1.6 \text{ nm}$; wavelength: 1524.10–1572.05 nm
Fan in/out	YOFC FAN-7-42	Max loss: $< 2 \text{ dB}$; core pitch: 43 μm
OSA	Yokogawa 6370D	Resolution: 0.02 nm

七芯光纤之间的熔接需要纤芯对准,以确保七

芯掺铒光纤与无源七芯光纤的模场适配,因而实验中采用了具有高旋转精度的 Fujikura 100P+型熔接机。该熔接机可在熔接前实时监测光纤端面,保证纤芯对准。

3 分析与讨论

为了得到 7 根纤芯的吸收截面,本课题组搭建了小信号吸收测试结构,用于测量纤芯的吸收。此外,结合 MC-Cumber 理论模拟了七芯掺铒光纤的放大特性,模拟结果如图 7 所示。

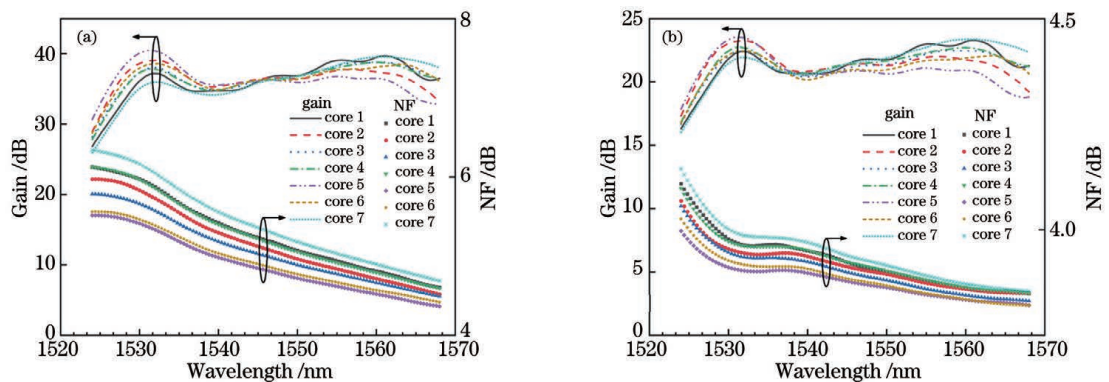


图 7 放大性能模拟结果。(a) -20 dBm 小信号;(b) 0 dBm 大信号

Fig. 7 Simulation results of amplification characteristic. (a) -20 dBm signal; (b) 0 dBm signal

根据图 6 所示装置图,在信号光总功率为 0 dBm、泵浦光功率为 350 mW 的条件下,得到图 8 所示的增益及噪声曲线。本结构使用了 5.5 m 七芯掺铒光纤,其在 1526~1566 nm 波段的最高增益达到了 17 dB,平均增益为 14 dB。此处的增益值为系统输出端对输入端信号的总增益,其包含隔离器、扇入/扇出器件以及多芯光纤熔点的损耗。这些无源器件引入的损耗会对 MC-EDFA 的放大特性产生不利影响。尽管现有商用通信系统中无源器件的损耗较小,但由于本课题组缺乏成熟的多芯光纤相关器件的制备经验,本系统中无源器件引入的损耗不可忽视,且不同通道之间的损耗相差较大。在 1550 nm 工作波长下,扇入/扇出不同通道的损耗在 1.2~3.5 dB 之间不等。另外,多芯光纤间的熔点也会造成信号光功率的衰减,七芯掺铒光纤模场直径在 5.6~5.9 μm 之间,无源多芯光纤的模场直径约为 9.6 μm ,模场面积大小的失配也引入了较大的熔接损耗。与泵浦光功率相比,信号光的总功率过大,增益光纤中反转粒子的消耗过快,信号得不到足够的增益。总的来说,去除系统中无源器件带来的损耗后,即只考虑增益光纤输出端对输入端的净增益,该七芯光纤在 C 波段的增益大于 21 dB。

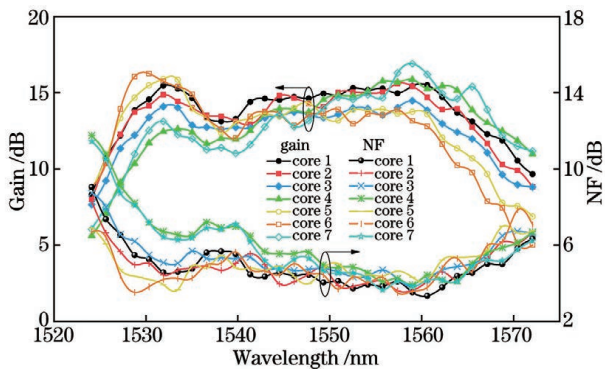


图 8 七芯掺铒光纤放大特性的测试结果

Fig. 8 Measured amplification characteristics of 7-core erbium-doped fiber

该系统的平均噪声指数小于 6 dB,1560 nm 处的平均噪声指数小于 4 dB。随着波长向短波靠近,噪声性能恶化,在 1524 nm 处噪声指数大于 10 dB。由于存在芯间串扰,泵浦光会耦合进相邻的纤芯从而引入附加的 ASE 噪声,这使得 MC-EDFA 的噪声性能比传统单芯放大器差。不同纤芯表现出来的放大性能不同,增益差值在 1550 nm 附近小于 3 dB,在 1530 nm 处的增益差约为 5 dB,这是由系统不同信道的整体损耗差值导致的。尽管泵浦光的功率相同,但由于不同信道的损耗不等,其粒子数反

转水平存在差异,因此表现出来的增益及噪声会有较大差异。从本文的结果看来,在排除本文所述多芯放大系统整体无源器件的损耗(约 6 dB)后,自制七芯掺铒光纤对于 C 波段总功率为 0 dBm 的信号增益约为 21 dB。在同样采用纤芯泵浦的相似工作中,文献[7]所报道的七芯光纤放大器对总功率为 -15 dBm 的小信号的最大增益约为 27 dB,补偿系统损耗后,掺铒光纤的净增益约为 32 dB;文献[14]报道的七芯放大器在扣除无源器件的插入损耗后,对 0 dBm 信号的净增益约为 20 dB。上述提及的放大器不同纤芯的增益差值均大于 5 dB,与本文的研究结果处于同等水平。所查资料显示,目前国内暂无多芯掺铒光纤放大器的相关实验报道,本文是首例。总的来说,本文七芯掺铒光纤及放大器基本可以满足通信系统信号功率放大的要求,且在不同纤芯的均匀性上存在提升空间。

空分复用掺铒光纤放大器的泵浦方式主要有三种,即纤芯泵浦、包层泵浦和混合泵浦。纤芯泵浦的放大器往往通过 WDM 器件将信号光和泵浦光耦合到纤芯中,再经由扇入器件注入到多芯掺铒光纤中实现信号放大。这种方式的优点在于泵浦光直接注入纤芯,泵浦效率高,而且可以通过调节不同信道的注入功率独立地控制不同信道的增益性能;但是由于需要与纤芯数量相等的泵浦光源以及 WDM 器件,放大系统会变得复杂,发挥不了空分复用光纤高集成度的优势。包层泵浦放大器往往采用双包层增益光纤,通过端面注入或侧面注入的方式将泵浦光耦合到光纤内包层中,泵浦光源采用的是低成本、无需冷却系统的多模泵浦源。据粗略估算,单模泵浦源与多模泵浦源的价格分别约为 1000 \$/W 与 10 \$/W,包层泵浦结构大大降低了空分复用放大器泵浦光源的成本。此外,同一包层下的纤芯共享一个泵浦源,充分发挥了空分复用光纤高集成度的优势。然而,包层泵浦的缺点也很明显:不同信道的增益水平无法独立控制。另外,纤芯与包层面积之比决定了包层泵浦结构中泵浦光的转换效率,因而这种方式下的泵浦转换效率往往不会太高,如何更高效地提升包层泵浦结构下的能量转换效率是空分复用放大器亟待解决的问题。组合泵浦结合了包层泵浦和纤芯泵浦的优点,在包层泵浦结构下通过辅助纤芯泵浦独立地调控不同信道的增益,这种结构表现出的增益性能已经可以同传统单芯放大器性能相比拟;其主要优势在于可以独立控制不同信道的增益特性,但与包层泵浦方案一样存在泵浦效率过

低的问题。

本文在能达到的实验条件下,利用扇入/扇出器件搭建了纤芯独立泵浦结构,实现了七芯掺铒光纤在 C 波段的放大,泵浦效率高,而且可以独立控制不同纤芯的增益水平;但其集成度差,难以发挥空分复用的优势。在以后的工作中,拟通过光纤结构设计与放大器结构优化,实现高泵浦效率、高集成度、不同信道增益性能可独立控制的空分复用放大器。

4 结 论

本文基于 MCVD 工艺并结合打孔技术,在国内首次制备出了七芯掺铒光纤,并利用扇入/扇出器件搭建了纤芯独立泵浦的七芯掺铒光纤放大器。采用 31 通道 C 波段 DWDM 信号源(总功率为 0 dBm),在功率为 500 mW 的 980 nm 泵浦光作用下,测得七芯掺铒光纤纤芯的平均增益为 14 dB,平均噪声指数小于 6 dB,不同纤芯的增益差小于 5 dB。

参 考 文 献

- [1] Winzer P J, Neilson D T, Chraplyvy A R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years [Invited] [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 24190-24239.
- [2] Ryf R, Nicolas K. Space-division multiplexing and MIMO processing [M]. Singapore: John Wiley & Sons Inc, 2016.
- [3] 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.
- [4] 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述 [J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0106003.
Tu J J, Li Z H. Review of space division multiplexing fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106003.
- [5] Inao S, Sato T, Sentsui S, et al. Multicore optical fiber [C] // *Optical Fiber Communication Conference 1979*, March 6, 1979, Washington, D. C., USA. Washington, D.C.: OSA, 1979: WB1.
- [6] Hayashi T, Tamura Y, Hasegawa T, et al. 125- μm -cladding coupled multi-core fiber with ultra-low loss of 0.158 dB/km and record-low spatial mode dispersion of 6.1 ps/km [C] // *2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, March 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 16226969.
- [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*, 2013, 22(1): 90-95.
- [9] Abedin K S, Taunay T F, Fishteyn M, et al. Cladding-pumped erbium-doped multicore fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20191-20200.
- [10] Chen H, Jin C, Huang B, et al. Integrated cladding-pumped multicore few-mode erbium-doped fibre amplifier for space-division-multiplexed communications [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(8): 529-533.
- [11] 汪文杰, 全科, 向练. 弱耦合多芯光纤芯间串扰分布特性研究 [J]. *光学学报*, 2022, 42(2): 0206002.
Wang W J, Tong K, Xiang L. Investigation of inter-core crosstalk in weakly coupled multicore fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 0206002.
- [12] 刘畅, 裴丽, 解宇恒, 等. 异质结构的低串扰少模多芯光纤设计 [J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1106004.
Liu C, Pei L, Xie Y H, et al. Design of low crosstalk few mode multi-core fiber based on heterogeneous structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106004.
- [13] Ishida I, Akamatsu T, Wang Z, et al. Possibility of stack and draw process as fabrication technology for multi-core fiber [C] // *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013*, March 17-21, 2013, Anaheim, California, USA. Washington, D. C.: OSA, 2013: OTu2G.1.
- [14] Tsuchida Y, Maeda K, Watanabe K, et al. Simultaneous 7-core pumped amplification in multicore EDF through fibre based fan-in/out [C] // *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, September 16-20, 2012, Amsterdam, Netherlands. Washington, D. C.: OSA, 2012: Tu.4.F.

Fabrication and Amplification Characteristics of Multicore Erbium-Doped Fiber

Gu Zhimu, Chu Yingbo, Li Haiqing, Peng Jinggang, Dai Nengli, Li Jinyan*

Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract

Objective With the development of the global mobile internet, short video, internet of things, cloud computing, and 5G technology, there is a rising interest and growth in data communication. The transmission capacity of optical transmission networks in different areas such as in division multiplexing, polarisation mode multiplexing, time-division multiplexing, and multi-level modulation has now reached 100 TB/s via wavelength technology. However, there are still challenges in the transmission capacity of the existing single-mode optical fibre communication system due to the nonlinear effect in the fibre. Multicore fibre space division multiplexing technology is one of the pivotal technologies required to realise exponential growth in fibre transmission capacity. As early as 1979, the concept of multicore fibre was introduced. However, due to the popularisation of erbium-doped fibre amplifier and dense wavelength division multiplexing, the space division multiplexing technology did not receive much attention. Space division multiplexing technology expands the data-carrying capacity of the optical communication system using space. If the existing commercial single-mode fibre is compared to a single-layer road, then the space division multiplexing based on multicore fibre would be equivalent to laying a multilayer viaduct at a time. In this case, space channels increase several times, meeting the data transmission capacity demand for high-speed growth.

Methods The seven-core erbium-doped fibre was prepared by the drilling method. Firstly, seven identical erbium-doped preforms were prepared based on the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and liquid phase doping technology, and then draw and polish them. Secondly, the high purity wave quartz fibre sock was drilled according to designed parameters. This step can accurately control the core arrangement to ensure uniform core spacing of the multicore fiber (MCF) in the drawing process. In the final step, seven prefabricated erbium-doped rods were inserted into the seven-hole casing and placed on the drawing tower for high-temperature drawing, during the preparation of the seven-core erbium-doped fibre. A seven-core erbium-doped fibre amplifier with core pumping was obtained via the fan in/out devices, which couples light between single-core fibre and multi-core fibre and was fabricated by a tapering fibre bundle. However, the insertion loss among each channel of the fan in/out coupler differs sharply, which causes the nonuniformity of the amplification curves of each core.

Results and Discussions We successfully fabricate a seven-core erbium-doped fibre with a uniform structure by the drilling method. The cladding diameter and core pitch of the fibre are 150 μm and 41 μm , respectively. At a total signal power of 0 dBm and a pump power of 350 mW, the gain and noise properties versus wavelength are obtained as shown in Fig. 4. A 5.5 m seven-core erbium-doped fibre is used in the system. The maximum gain and average gain in the C band (1526–1566 nm) were 17 dB and 14 dB, with the gain difference between different cores less than 5 dB, and the average noise index is less than 6 dB. This erbium-doped fibre meets the requirements for a communication system for amplifier performance. In addition, the gain contains the loss of all passive components, which means the gross gain at both ends of the gain fibre is more than 21 dB. More so, we obtain a small power signal absorption curve at the C band of each core using the amplified spontaneous emission (ASE) source. The gain and noise characteristics are simulated according to the MC-Cumber theory, which shows a good match in comparison with experimental results. For better performance of the multicore erbium-doped fibre amplifier, more work needs to be carried out, such as a clad-pumping scheme with double-cladding fibre, broadband, and high-power erbium-doped fibre with novel doping component and low insertion space division multiplexing (SDM) passive device.

Conclusions In this paper, a seven-core erbium-doped fibre, to the best of our knowledge is fabricated for the first time with a China-based MCVD technology combined with drilling. A seven-core erbium-doped fibre amplifier is constructed with core pumping using fan in/out devices. For the signal, a 31 channel C-band DWDM light is used, with a total power of 0 dBm. The gain fibre is pumped by a 980 nm light source with a power of 350 mW. The

maximum gain of 17 dB, average noise index of less than 6 dB, and the gain difference between individual fibre cores of less than 5 dB are obtained. Seven channels of signals are amplified simultaneously. After compensating for the passive loss of the whole system, the gain as high as 21 dB is able to meet the commercial application of erbium-doped fiber amplifier (EDFA). The disadvantage lies in the high complexity of the amplification structure system of the core pumping, and thus, the cladding pumping scheme is an effective way to reduce the structural complexity and improve the energy utilisation rate of the future MC-EDFA system.

Key words fiber optics; erbium-doped fibre; space division multiplexing; multicore fibre; broadband amplification