

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.250183.

专题: 智算中心光网络算网融合关键技术

高展, 罗鸣, 孙红光, 等. 多芯光纤放大器技术发展现状及展望[J]. 光通信研究, 2026(4): 92-101.

Gao Z, Luo M, Sun H G, et al. Development Status and Prospect of Multi-Core Fiber Amplifier Technology[J]. Study on Optical Communications, 2026(4): 92-101.

# 多芯光纤放大器技术发展现状及展望

高 展<sup>1</sup>, 罗 鸣<sup>1</sup>, 孙红光<sup>1</sup>, 邱 英<sup>1</sup>, 付成鹏<sup>2</sup>

(1. 中国信息通信科技集团 光通信技术和网络国家重点实验室, 武汉 430032; 2. 光迅科技股份有限公司, 武汉 430205)

**摘要:** 多芯光纤放大器(MCFA)作为空分复用(SDM)系统的核心组件,在提升光通信传输容量和能量效率方面具有重要作用。文章综述了其关键技术,包括光纤设计和泵浦效率提升,分析了这些技术的优势。通过优化纤芯排布和折射率分布,可实现高带宽和低串扰;通过提升泵浦效率,可显著提高能量效率。针对当前面临的串扰抑制、热管理和成本挑战,文章展望了三维(3D)集成、机器学习辅助设计和量子点掺杂光纤等未来发展方向。这些技术有望突破现有限制,推动 MCFA 在高容量和低功耗光通信系统中的广泛应用。

**关键词:** 空分复用; 多芯光纤放大器; 掺铒光纤设计; 泵浦效率; 放大波段扩展

**中图分类号:** TN929 **文献标志码:** A

## Development Status and Prospect of Multi-Core Fiber Amplifier Technology

GAO Zhan<sup>1</sup>, LUO Ming<sup>1</sup>, SUN Hongguang<sup>1</sup>, QIU Ying<sup>1</sup>, FU Chengpeng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Optical Communication Technology and Network, China Information and Communication Technology Group Co., Ltd., Wuhan 430032, China; 2. Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

**Abstract:** Multi-Core Fiber Amplifier (MCFA), as the core components of Space-Division Multiplexing (SDM) systems, play a crucial role in enhancing the transmission capacity and energy efficiency of optical communications. This paper reviews its key technologies, including fiber design and pump efficiency enhancement, and analyzes the advantages of these approaches. By optimizing core arrangement and refractive index profiles, high bandwidth and low crosstalk can be achieved. The energy utilization can be significantly enhanced by improving the pump efficiency. Addressing current challenges in crosstalk suppression, thermal management, and cost reduction, the paper outlines future development directions such as Three-Dimensional (3D) integration, machine learning-assisted design, and quantum dot-doped fibers. These technologies are expected to overcome existing limitations and promote the widespread application of MCFA in high-capacity, low-power optical communication systems.

**Key words:** SDM; MCFA; erbium-doped fiber design; pump efficiency; amplification band extension

## 0 引 言

随着第五代移动通信技术(5th Generation Mobile Communication, 5G)、物联网和元宇宙等技术的普及,全球数据流量年增长率超过 30%,单模光纤(Single-Mode Fiber, SMF)的传输容量正逐渐接近其理论极限。传统的波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)和高阶调制技术虽然在一定程度上缓解了容量压力,但难以满足未来通信网络对更高带宽和更低能耗的需求。空分复用(Spatial Division Multiplexing, SDM)技术通过多芯光纤(Multi-Core Fiber, MCF)或少模光纤在空间维度扩展信道密度,成为提升传输容量的核心方案<sup>[1-4]</sup>。

近年来,基于 MCF 的 SDM 传输实验取得了显著进展,充分展示了其在长距离和大容量通信中的潜力。2023 年, Soma 等人<sup>[5]</sup>利用标准包层沟槽辅助剖面 4 芯光纤实现了 1 800 km 63.58 Tbit/s 的数据传输,并在空中区域和地下管道中进行了光缆的实际部署;与无耦合 MCF 相比,耦合 MCF 中引入的强耦合效应降低了非线性影响,2023 年, Nespola 等人<sup>[6]</sup>在欧洲激光与光电子会议(Conference on Lasers and Electro-Optics Europe - European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe - EQEC)上将耦合 MCF 与概率整形联合使用,进一步优化了频谱效率,在耦合 4 芯光纤上进行了概率整形信号的传输实验,实验结果表明,概率整

收稿日期:2025-05-19; 修回日期:2025-08-12; 纸质出版日期:2026-08-10

基金项目:湖北省技术创新计划资助项目(2023DJC171)

作者简介:高展(2000—),男,安徽安庆人。硕士,主要研究方向为新型光通信光纤和器件。

通信作者:邱英,正高级工程师。E-mail: yqiu@cict.com

付成鹏,正高级工程师。E-mail: 00167@accelink.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

形 32 正交振幅调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 信号在 30 GBaud 符号速率下实现了 800 Gbit/s 的净传输速率；2024 年, Hout<sup>[7]</sup> 等人在标准包层直径条件下, 利用所部署的 12 芯耦合光纤光缆, 进行了带宽为 4.65 THz 的 WDM/SDM 传输实验, 传输信号为 140 GBaud 的概率整形 QAM 信号, 在野外环境中实现了 0.455 Pbit/s 的耦合芯容量记录, 此外还展示了 0.389 Pbit/s 超 1 000 km 的空间多输入多输出信道传输, 每个波长的净比特率超过 12 Tbit/s。上述成果凸显了未来大容量传输系统中 MCF 传输的巨大潜力。

然而, MCF 在实际应用中面临的一个重要挑战是信号在传输过程中的光中继问题<sup>[8]</sup>。为了补偿信号损耗并确保长距离传输的可靠性, 多芯光纤放大器 (Multi-Core Fiber Amplifier, MCFA) 成为不可或缺的关键组件。MCFA 不仅需要满足高增益和低噪声的性能要求, 还需与 MCF 的结构

特性相匹配, 以实现多个纤芯信号的高效放大<sup>[9]</sup>。因此, 研究 MCFA 的实现技术及其与系统的兼容性, 对于推动 SDM 技术的实际应用具有重要意义。

MCFA 的发展不仅推动了光通信技术的进步, 也为未来第六代移动通信技术 (6th Generation Mobile Communication, 6G) 通信、数据中心互连和量子通信等新兴领域提供了技术支撑。本文将深入探讨 MCFA 的关键技术及其未来发展方向。

## 1 MCFA 关键技术

MCFA 作为新一代光通信技术的核心器件, 其关键技术的研究与突破对提升系统性能至关重要。MCFA 的主要性能指标包括: 工作带宽、增益和增益波动等, 为了更直观地了解器件性能水平, 本文将近年来 6~19 芯 MCFA 研究水平进行了总结, 如表 1 所示。

表 1 近期 MCFA 实验进展

Table 1 Recent experimental progress of MCFA

| 年份   | 掺杂光纤类型     | 工作带宽/nm | 增益/dB | 增益波动/dB | 文献   |
|------|------------|---------|-------|---------|------|
| 2020 | 12 芯铒镱共掺光纤 | 30      | 20.0  | 2.5~4.0 | [10] |
| 2022 | 19 芯 EDF   | 35      | 16.2  | 1.5     | [11] |
| 2024 | 19 芯超模 EDF | 35      | 27.8  | 1.0     | [12] |
| 2024 | 4 芯 EDF    | 40      | 20.0  | 0.9     | [13] |

注: EDF 为掺铒光纤。

MCFA 的关键技术主要包括 EDF 设计和泵浦效率 (Pump Conversion Efficiency, PCE) 优化两个方面。本节将围绕这两个关键技术展开详细阐述, 并分析其对 MCFA 性能的影响。

### 1.1 EDF 设计

EDF 是 MCFA 的核心增益介质, 其设计需兼顾纤芯密度、串扰抑制与掺杂分布 3 大目标。近年来, 随着 SDM 技术的快速发展, MCFA 对 EDF 的性能提出了更高要求, 尤其是在纤芯几何设计、串扰抑制和掺杂浓度控制方面取得了显著进展。

#### 1.1.1 纤芯几何设计

光纤几何设计包括包层直径大小和纤芯的排列分布, 是 MCF 设计的核心问题之一, 直接影响纤芯密度和串扰水平<sup>[8]</sup>。目前大多数 MCF 的包层直径都大于 SMF 的包层直径 125  $\mu\text{m}$ 。然而, 根据传输光纤的要求, MCF 的包层直径被限制在小于某一值。一个限制因素是熔接损耗, 包层直径越大, 表明最外层核心的位置离包层中心较远。熔接损耗  $L_s$  可表示为<sup>[14]</sup>

$$L_s = -10 \log_e \left( \left( \frac{2w_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right)^2 \exp \left( -\frac{2d^2}{w_1^2 + w_2^2} \right) \right), \quad (1)$$

式中:  $2w_1$  和  $2w_2$  为两根被接光纤的模场直径;  $d$  为被接光纤纤芯的偏移量。若纤芯位于距离包层中心  $r$  处的光纤以角度误差  $\theta$  对齐, 则  $d$  可表示为

$$d = 2r \sin \left( \frac{\theta}{2} \right). \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知, 不同角度对准误差下, 可以用纤芯位置函数来估计熔接损耗。一般情况下,  $2w_1$  和  $2w_2$  均为 10  $\mu\text{m}$ 。随着距包层中心径向距离  $r$  的增加, 由于角度对准误差导致的额外熔接损耗也随之增加<sup>[15]</sup>, 对于一款具备光纤旋转和端面观察功能的商用熔接机, 其平均、最大和最小角度对准误差分别为 0.6°、0.9° 和 0.4°。较大的  $r$  需要较小的角度对准误差才能实现较小的熔接损耗。对于当前的熔接机, 要实现平均熔接损耗 < 0.1 dB,  $r$  将被限制在约 75  $\mu\text{m}$ 。由于对准精度的提高以及熔接光纤模场直径的增大, 这一限制可能会放宽。对于  $2w_1 = 2w_2 = 12 \mu\text{m}$  的光纤, 其有效面积 > 110  $\mu\text{m}^2$ , 要实现

熔接损耗 $<0.1$  dB,  $r$ 可增加到约  $85\text{ }\mu\text{m}$ 。然而,有效面积的增大并非理想选择。

4芯光纤通常采用方形或矩形排列,纤芯间距控制在  $40\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ ,以满足 C 和 L 波段的低串扰需求( $<-40$  dB/100 km)。然而,随着纤芯数量的增加,纤芯间距的缩小导致串扰显著增加,当纤芯数量从 4 增加到 8 芯时,串扰水平在 C 波段增加了约 15 dB,严重限制了系统容量。图 1 所示为 2~8 芯光纤常见排列分布。

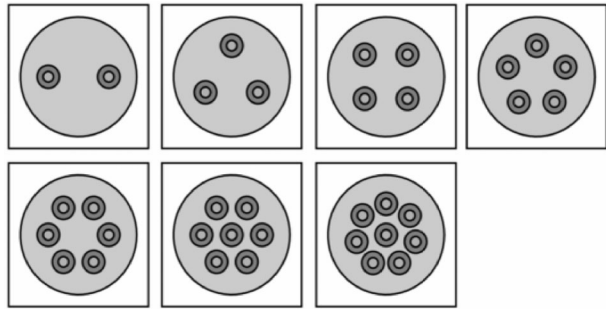


图 1 2~8 芯 MCF 常见排列<sup>[16]</sup>

Figure 1 Common arrangements of MCF ranging from 2 to 8 cores<sup>[16]</sup>

为应对这一挑战,研究人员提出了多种新型纤芯排列方案,2023 年,Zhao 等人<sup>[17]</sup>采用双环布局 and 双包层结构来改善光纤的串扰和临界弯曲半径。双包层结构通过在纤芯周围添加 1 层额外的包层(外包层)来减少纤芯间的光场耦合。外包层的折射率通常低于内包层,从而形成隔离层,阻止光场从一个纤芯泄漏到另一个纤芯。通过引入双包层结构,光纤的串扰显著降低。其中,6 芯光纤的串扰从单包层结构的 $-51.2$  dB/km 降低到双包层结构的 $-97.9$  dB/km,8 芯光纤的串扰从 $-35.5$  dB/km 降低到 $-60.4$  dB/km。这表明双包层结构在高纤芯密度下仍能有效抑制串扰。双包层结构使得纤芯与包层之间的距离可以进一步减小,从而增加了纤芯密度,同时保持低串扰。通过双环布局,纤芯被分为高折射率光纤和低折射率光纤。双环布局的设计使得纤芯间的有效折射率差异增大,从而减少了信号间的相互干扰<sup>[18]</sup>。

### 1.1.2 串扰抑制

沟槽辅助结构是一种有效的串扰抑制技术,通过在纤芯间引入低折射率沟槽,可显著降低纤芯间耦合损耗。Takenag 等人<sup>[19]</sup>首先提出了一种沟槽辅助多芯光纤(Trench Assisted-Multi-Core Fiber, TA-MCF),以实现高密度 MCF 设计,其制备的 TA-MCF 在  $1550\text{ nm}$  波长下传输 100 km 时,串扰

值可低至 $-35$  dB。

空气孔辅助结构是另一种有效的串扰抑制技术,通过在纤芯间引入空气孔,可显著增强纤芯间的隔离度。Mukasa 等人<sup>[20]</sup>通过实验和理论研究了 MCF 中芯间气孔对串扰抑制的影响,他们明确指出,串扰与气孔直径成反比,并对在两根光纤芯间设置 1 个空气孔的双芯少模光纤所提供的芯间串扰抑制情况进行了实验验证。实验仅通过设置 1 个空气孔并将纤芯间距减小至最大  $7\text{ }\mu\text{m}$ ,实现了 20 dB/100 km 的串扰抑制。通过考虑 6 边形芯排列模型发现,通过应用空气孔可以增大有效面积,从而提高光纤的模场容量,即光纤能够支持的模场数量。空气孔辅助结构通过减少纤芯间的耦合,使得每个纤芯能够独立支持更多的模场。

沟槽辅助和空气孔辅助结构均适用于对纤芯密度有极高要求的 MCF 设计。如图 2 所示,在放大器中采用沟槽辅助结构,能够在不影响串扰的前提下,减小 EDF 的包层和芯间距,进而提升纤芯密度。

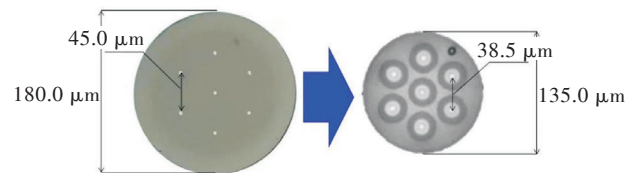


图 2 沟槽辅助 EDF 对比图<sup>[21]</sup>

Figure 2 Comparison chart of trench assisted EDF<sup>[21]</sup>

## 1.2 PCE 优化

PCE 是 MCFA 性能的关键指标之一,直接影响放大器的增益、噪声系数(Noise Figure, NF)和功耗。近年来,MCFA 的泵浦技术主要形成了 3 大主流研究方向:首先是包层端面泵浦技术,该技术通过光纤端面直接耦合高功率泵浦光进入包层区域;其次是侧面泵浦技术,采用侧向耦合方式优化泵浦光在光纤长度方向上的能量分布;最后是芯泵技术,通过特殊设计的 WDM 器件将泵浦光精准注入各个纤芯,实现纤芯级别的能量传递。此外,为了提升 PCE,研究人员还开发了多种新型泵浦技术,主要包括分布式泵浦技术和泵浦回收技术。下文将详细描述这些技术的原理及其在 MCFA 中的应用。

### 1.2.1 包层端面泵浦

包层端面泵浦是一种高效的 MCF 泵浦方式,其核心思想是将泵浦光从光纤端面注入包层,利用包层的大模场面积实现高功率耦合。该技术的优势在于结构简单、熔接损耗低,并能有效降低非线性效应。

包层端面泵浦有以下优势:①包层的大模场面

积(通常 $>100\text{ }\mu\text{m}$ )可承载千瓦级多模泵浦光,适合高功率放大器设计;②仅需单个多模泵浦激光器,无须多路单模泵浦源,大幅降低系统成本;③避免了复杂的多芯 WDM 合束器,减少了熔接点和插入损耗。在传统包层中,泵浦光分布在较大面积,而纤芯总截面积仅占极小比例,导致 PCE 低。

为此,2018 年,LaRoche 等人<sup>[22]</sup>提出了一种创新的环形包层结构(Annular Cladding),通过降低中心区域的折射率,将泵浦光限制在环形区域内,从而缩小了有效泵浦面积,提高了泵浦与纤芯的重叠因子。相比传统均匀包层,PCE 显著提升,同时通过增大纤芯直径(保持单模条件)和调整数值孔径(Numerical Aperture, NA)来增强泵浦吸收能力和减少放大器饱和效应。实测结果显示,环形包层设计在 15 W 泵浦功率下可实现 $>20\text{ dB}$ 增益和 $<6\text{ dB NF}$ ,且核心间增益波动小于 2 dB。其所设计的环形包层结构 MCF 如图 3 所示。

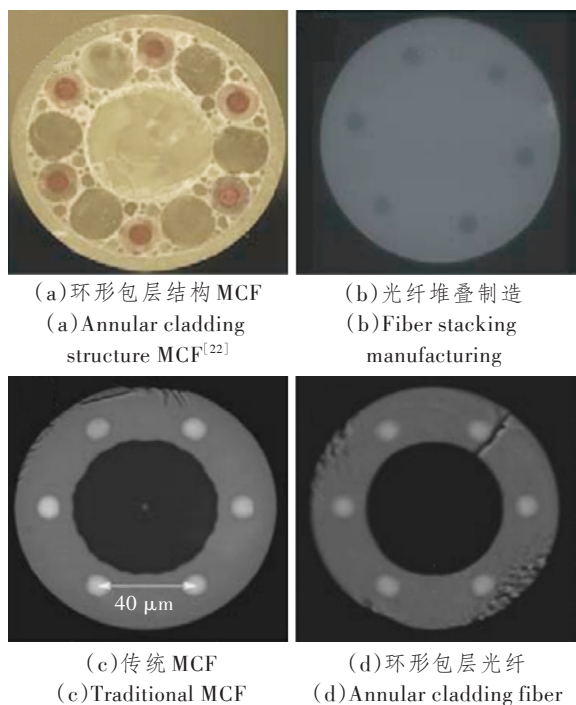


图 3 环形包层结构 MCF

Figure 3 Annular cladding structure MCF

### 1.2.2 侧向泵浦

侧向泵浦技术通过光纤侧面注入泵浦光,具备信号光纤不间断(维持模场直径(Mode Field Diameter, MFD)降低损耗)、多点泵浦高效能及高反向隔离(保护激光器)3 大优势。其发展涵盖 V 型槽法<sup>[23]</sup>(简易低效)、嵌入式镜面法<sup>[24]</sup>(高效工艺复杂)、衍射光栅法<sup>[25]</sup>(高效设计难)与锥形熔接法(倏逝场耦合实现 $>90\%$ 效率、 $<0.5\text{ dB}$ 损耗、 $>1\text{ kW}$ 耐

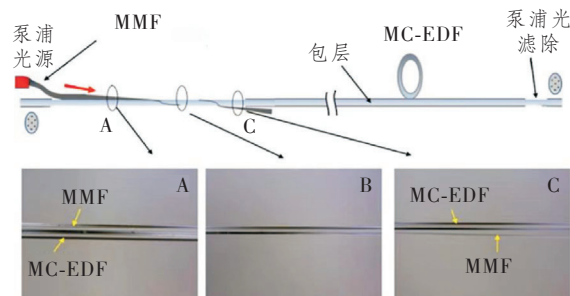
受性,因综合性能优越成为主流)。2021 年, Li 等人<sup>[26]</sup>研究了基于锥形熔接法侧向泵浦合束器的泵浦耦合效率,实验结果表明,熔接区域应尽量靠近锥形光纤的起始端,且锥形光纤的锥形部分应完全熔入信号光纤,锥形光纤的锥度比越大,泵浦耦合效率越高,泵浦光从锥形光纤末端泄漏的功率越少;锥形长度越长,泵浦耦合效率越高,但过长的锥形长度会增加泵浦光的反射次数,导致泵浦光传输角度减小,从而降低泵浦耦合效率。图 4 所示为泵浦光纤尾纤断点处合束器样品的显微镜图像。由图可知,最下方样品中的泵浦泄漏功率明显大于其上样本。因此,在侧泵合束器的制造过程中,为了实现较低的泄漏和较高的耦合效率,首选采用较小的锥形泵浦光纤腰径。



图 4 基于锥形泵浦合束器样品显微镜图<sup>[26]</sup>

Figure 4 Microscopic image of the sample based on the conical pump beam combiner<sup>[26]</sup>

接着通过优化锥形光纤的锥度比、熔接区域和锥形长度,成功将侧向泵浦合束器的泵浦耦合效率从 91.0% 提升到 97.3%,并将合束器的最高温度从 67 降低到 53 °C,显著改善了合束器的温度特性。优化后的侧向泵浦合束器能够承受 1 870 W 的泵浦功率,且温度上升仅 16.6 °C/kW,表明该合束器在光纤放大器中具有广泛的应用潜力。图 5 所示为多芯侧向泵浦原理图,下部为泵浦/信号合束部分的照片,图中 A 为下锥度区域;B 为等直径区域;C 为上锥度区域。



注: MC-EDF 为多芯掺铒光纤; MMF 为多模泵浦光纤。

图 5 多芯侧向泵浦原理图及泵浦/信号合束部分照片<sup>[27]</sup>

Figure 5 Schematic diagram of the multi-core lateral pump and photos of the pump/signal bundling section<sup>[27]</sup>

### 1.2.3 芯泵浦

芯泵技术通过 WDM 将泵浦光直接注入纤芯,利用掺杂离子(如  $\text{Er}^{3+}$ )吸收能量实现信号放大,其核心特征依赖高精度 WDM 耦合器与单模泵浦激光器,要求泵浦/信号光完全重叠。该技术具备超高效率( $>90\%$ )、低噪声特性(芯泵浦技术通过空间上的完全重叠、高效率泵浦吸收以及单模工作,最大程度地消除了额外噪声源,最低 NF 逼近 3 dB 量子极限)及优异增益均衡性(纤芯独立泵浦使增益波动最小化),但存在系统复杂度剧增(纤芯数量导致独立泵浦源与 WDM 器件需求指数上升)、成本高昂(单模泵浦激光器推高造价)及功率受限(单纤芯泵浦功率 $<500\text{ mW}$  限制高功率应用)3 大局限。

芯泵浦方案需要特殊的 WDM 组件,以在保持系统紧凑性和效率的同时,将泵浦光有效耦合到各个纤芯。传统基于光纤的 WDM 在多芯应用中面临重大挑战,主要源于对准复杂性和插入损耗累积。在此背景下,Sakaguchi 等人<sup>[28]</sup>使用自由空间 WDM 合束器作为 MCFA 的核心组件,采用创新的光学架构实现了高效泵浦耦合。该器件主要由输入/输出光纤阵列、准直透镜、二向色镜、泵浦激光合束模块和聚焦透镜构成,通过自由空间光路将 19 路 1550 nm 信号光与 980 nm 泵浦光进行波长选择性合束。其工作原理是:信号光经准直透镜转换为平行光束后透射二向色镜,而泵浦光则被反射镜面反射后与信号光共轴合并,最终由聚焦透镜耦合至输出光纤。该设计的核心技术突破体现在 3 个方面:首先,采用自由空间光路替代传统熔接结构,将插入损耗降至 0.2~0.4 dB,远低于熔接型 WDM 的 1 dB 以上;其次,通过抗反射镀层和 0/4°斜抛光技术,将端面反射抑制到 -50 dB 以下,显著改善了噪声性能;最后,模块化的光学设计实现了单器件处理 19 芯信号的能力,解决了多芯系统泵浦耦合的复杂度难题。

### 1.2.4 分布式泵浦

分布式泵浦技术的原理基于光的受激辐射放大机制和泵浦光的分布式注入。分布式泵浦技术可以避免在传统集中式泵浦中出现的泵浦光在光纤入口处能量过高,而在光纤末端能量过低的问题,使整个光纤长度上的增益分布更加均匀<sup>[29]</sup>。

多芯分布式拉曼放大器(Multi-Core Distributed Raman Amplifier, MCDRA)能够在链路中实现局部信号功率的降低,从而改善信号的信噪比。这意味着在相同的传输距离下,信号的质量可以得到提升。然而,在 MCDRA 中,各芯的串扰问题在很

大程度上影响了改善信号的信噪比特性。2013 年,日本岛根大学<sup>[30]</sup>提出了一种采用分布式拉曼放大器的新型多芯混合光纤传输系统,通过调节 7 芯里各芯是否采用分布式拉曼放大技术建立了中心芯和边缘芯的串扰模型,并验证了模型解析公式在系统功率总输入 $<15\text{ dBm}$  时的准确性,且说明芯的串扰随邻芯拉曼增益的增大而增大;2023 年,Sagae 等人<sup>[31]</sup>提出了具有分布式拉曼放大器的双向传输 MCF 链路模型,在双向传输中,信号的传播方向与邻近芯相反,这样的配置能够有效抑制串扰。通过考虑瑞利散射引起的噪声,MCDRA 能够在双向传输中更好地管理和降低串扰噪声,且串扰噪声与开关增益密切相关,MCDRA 的设计使得即使在净增益 $<0$  的情况下,也可以找到一个最小化串扰噪声的开关增益,这一特性在双向传输中尤为独特。最小串扰噪声对信号和泵浦波长的衰减系数相对敏感,这意味着在设计 MCDRA 系统时,可以通过调整衰减系数来进一步优化信号传输质量。

### 1.2.5 泵浦回收

泵浦回收技术是一种通过回收未完全吸收的泵浦光,将其重新注入光纤放大器中进行二次利用的技术。该技术旨在提高泵浦光的利用效率,从而提升光纤放大器的 PCE。

泵浦回收技术的实现通常依赖于以下几个关键组件和步骤:①泵浦光的分离与回收:在光纤放大器的输出端,使用空间泵浦分束器(Spatial Pump Splitter, SPS)将剩余的泵浦光从信号光中分离出来。分离后的泵浦光通过光纤泵浦耦合器(Fiber Pump Combiner, FPC)重新注入到光纤放大器中,用于二次泵浦;②泵浦光的重新注入:回收的泵浦光通过 FPC 重新注入到光纤放大器的输入端或另一个增益模块中,用于放大其他波段的信号光(如 L 波段信号),通过这种方式,泵浦光可以在多个增益模块中被多次利用,从而提高整体的 PCE;③泵浦回收效率的计算:将泵浦回收效率定义为回收的泵浦光功率与原始注入的泵浦光功率之比。通过优化泵浦光的分离和重新注入过程,泵浦回收效率可以显著提高。泵浦回收装置如图 6 所示。

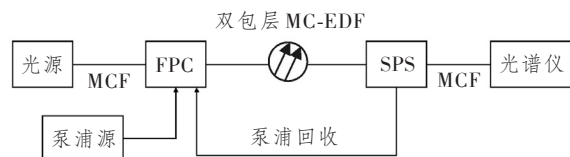


图 6 泵浦回收技术装置图

Figure 6 Diagram of the pump recovery technology

在 C+L 波段的 MCFA 中,泵浦回收技术可用于将 C 波段放大器中未吸收的泵浦光回收,并用于 L 波段信号的放大。日本 NEC 公司的实验利用 C 波段 4.6 THz 包层泵浦多芯 EDFA 的回收泵浦光,成功地放大了 L 波段 4.1 THz 7 芯信号。单泵浦激光二极管用于 C+L 波段包层泵浦的功率转换效率为 4.8%,是 C 波段的两倍。同时测量了泵浦回收效率,发现在 14.9 W 的泵浦功率下,泵浦回收效率达到 29%,表明回收的泵浦光可以有效地用于二次泵浦<sup>[33]</sup>。

同时,可以通过以下方法提升泵浦回收技术的效率:①增加芯-包比:通过增加芯-包比(即芯区面积与光纤横截面积的比值),可以提高泵浦光的吸收效率。随机耦合 MCF 由于其无串扰要求,可以实现更小的芯间距,从而显著提高芯-包比,进而增强泵浦光的回收效率;②非圆形包层设计:通过采用非圆形包层设计或非均匀包层折射率设计,可以增加泵浦光在 EDF 中的吸收效率,从而减少泵浦光的损耗并提高回收效率;③增加芯半径和芯数:增加芯半径和芯数可以提高空间通道密度,从而提升泵浦光的利用率和回收效率;④锥形光纤设计:为了解决小包层直径设计中的泵浦光耦合效率问题,在光纤和 EDF 之间插入锥形光纤,将包层直径从 125 逐渐减小到 90  $\mu\text{m}$ ,从而提高了泵浦光的耦合效率,并进一步优化了泵浦光的回收效果。

### 1.2.6 新型泵浦实验突破

近年来,在新型 MCFA PCE 优化领域,通过系统性实验研究取得了显著突破。这些突破的核心进展主要聚焦于分布式泵浦和泵浦回收等技术方向。

分布式泵浦实验:日本 NICT 团队<sup>[33]</sup>通过创新性分布式泵浦架构成功实现了无中继 403 km 10.3 Tbit/s 信号传输,创造了容量距离积 4 Pbit/s·km 的新纪录。该突破性成果的核心在于双向拉曼放大与非相干泵浦的协同优化:采用宽谱泵浦源(3 dB 带宽  $\geq 5$  nm)抑制相对强度噪声(Relative Intensity Noise, RIN)传递,实验测得 RIN 传递函数衰减斜率为 -12 dB/oct,使 403 km 传输的  $Q^2$  因子提升了 1.8 dB;同时通过双向泵浦光路设计平衡光纤轴向增益分布,结合分布式功率配置补偿信号衰减斜率。该方案免除远程光泵放大(Remote Optically Pumped Amplifier, ROPA)需求,在降低了 40% 系统复杂度的同时提升了 35% 运维成本效益,特别适用于跨洋岛屿间通信和极地科考站等传统中继系统难以部署的场景。实验验证表明,该技术在 C+L 波

段 128 通道 WDM 系统中保持  $< -140$  dB/Hz 的相位噪声抑制水平,为海底通信网络提供了革命性解决方案。未来通过扩展至 MCF SDM 架构,有望在同等距离下实现单纤 100 Tbit/s 级传输,为 6G 全球海底骨干网奠定了物理层基础。

泵浦回收模块实验突破:日本 NTT 团队<sup>[34]</sup>在耦合 12 芯 EDFA 中实现了泵浦回收技术的重大突破,其创新性反射式回收架构结合锥形光纤适配设计显著提升了 PCE。实验采用 90  $\mu\text{m}$  小包层直径光纤(芯径 5.5  $\mu\text{m}$ ,芯间距 15.5  $\mu\text{m}$ ),通过尾纤反射镜单次回收残余泵浦光。关键技术突破在于:包层直径失配补偿:在被动光纤与增益光纤间熔接锥形过渡光纤(包层直径 125 $\rightarrow$ 90  $\mu\text{m}$ ),解决因包层尺寸差异导致的泵浦耦合损耗,使熔接损耗降至  $< 0.2$  dB;反射式回收优化:基于吸收率特性分析,耦合 MCF 因较高单向吸收率( $> 40\%$ )更适合反射式回收(非循环式),实测回收效率达 0.8;能效显著提升:在仅 4 W 总泵浦功率(0.33 W/芯)条件下,C 波段增益  $> 20$  dB, NF  $< 5$  dB。泵浦回收使 PCE 从 13.7% 提升至 14.5%,贡献 0.8% 绝对效率增益,相当于单位纤芯功耗降低了 5.8%。该方案通过包层直径最小(较传统 125  $\mu\text{m}$  降低 28%)与反射式单次回收的协同设计,为高密度多芯系统提供了低功耗放大解决方案。

## 2 讨论与展望

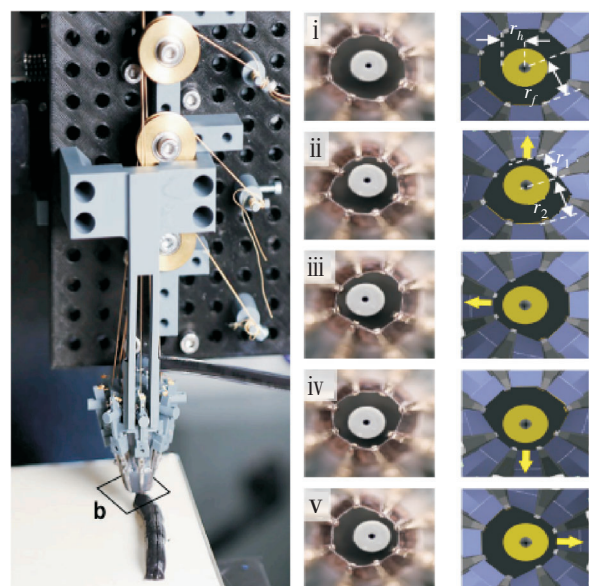
本文第 1 节介绍了近年来在光纤通信领域得到了广泛关注的光纤放大器的 3 大核心技术,为了满足不同应用场景的需求,MCFA 的设计和优化主要集中在 EDF 设计、PCE 提升以及放大波段扩展等方面。这些技术并非孤立存在,而是相辅相成,通过结合不同的技术方案,可以满足多样化的应用场景需求。如在高密度数据中心互连场景中,光纤的芯数需求较高,且对带宽和串扰的要求极为严格。通过采用小包层直径和高芯数的光纤设计,可以显著提高泵浦光的利用率。同时,结合沟槽辅助结构或空气孔辅助结构,可以有效抑制芯间串扰,确保信号在高速传输中的稳定性。这种结合方案能够满足数据中心对高带宽、低串扰的需求,同时保持较高的能量效率;在长距离海底光缆传输系统中,能量效率是关键指标之一。通过采用小包层直径和高芯数的光纤设计,可以显著提高泵浦光的吸收效率。同时,结合反射式泵浦回收技术,能够回收未被完全吸收的泵浦光,进一步提升 PCE。这种结合方案能够在长距离传输中显著降低中继器的功耗,延长系统

的传输距离,同时保持较高的信号增益;同时,结合分布式泵浦技术,可以结合分布式泵浦在光纤的多个位置注入泵浦光,确保泵浦功率的均匀分布,从而在扩展波段的同时保持较高的 PCE。这种结合方案能够满足多波段通信系统对带宽和高能量效率的需求。

尽管 MCFA 在光纤通信领域取得了显著进展,但仍面临串扰抑制极限、热管理难题与成本过高 3 大挑战。为了克服这些挑战并进一步推动 MCFA 的发展,未来的研究方向可能集中在以下几个方面。

① 三维 (3 Dimensional, 3D) 集成技术有望通过利用 3D 打印制造高密度纤芯阵列<sup>[35]</sup>,突破传统平面排列的物理限制,从而实现更高密度的纤芯排布和更低的串扰。2024 年, Kang 等人<sup>[37]</sup>实现了自适应核壳(纤芯和包层组合结构)3D 打印光纤,通过八边形金属针尖+柔性硅胶膜结构,如图 7 所示,实现实时调节纤维壁厚不对称性( $r_1$  和  $r_2$  差值可控,  $r_1$  和  $r_2$  分别为针尖偏心后,厚侧与薄侧各自的实际壁厚)。挤出过程中通过线缆联动微执行器动态调整针尖位置,单步完成壁厚梯度控。刚性核心(半径  $r_h$ )与锥形入口设计结合气孔通道,抑制负压导致的纤维塌陷,确保薄壁区结构的完整性。单根纤维集成固定段( $r_1$  恒定,  $r_1$  为纤维在固定段的壳层厚度)与变形段( $r_1$  和  $r_2$  可变),支持复杂 3D 变形序列。3D 打印光纤的未来发展趋势为多材料与多功能集成:引入水溶性牺牲材料作为内芯,提升复杂 3D 堆叠能力(如螺旋结构),解决当前垂直堆叠限制;驱动与能源革新:探索介电弹性体 (Dielectric Elastomer Actuator, DEA) 与电池驱动集成,替代笨重气泵系统,提升可穿戴设备便携性,开发多芯系,实现扭转+弯曲+伸缩等多模态运动,超越当前单自由度限制。

② 机器学习 (Machine Learning, ML) 辅助设计可以通过神经网络优化纤芯参数与泵浦分布<sup>[37]</sup>,大幅缩短研发周期,并实现更高效的放大器设计。2024 年,朱福喜团队<sup>[12]</sup>针对 19 芯超模光纤放大器,通过粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法优化各纤芯掺铒浓度分布,将模式增益差 (Differential Mode Gain, DMG) 从 1.33 降至 0.20 dB, C 波段增益平坦度 < 1 dB。蒙特卡洛仿真验证了该设计对掺杂浓度波动的强鲁棒性。多芯超模 EDF 结构如图 8 所示。该光纤中含有 19 个纤芯,分别为中心纤芯(1)和第 1 层纤芯(2~7)以及第 2 层纤芯



(a) 自适应核壳喷嘴打印头的照片  
(b) 自适应喷嘴底部视图照片及用于挤出固定部分相应目标出口模式的示意图  
(a) A photo of the adaptive core-shell nozzle print head  
(b) A photo of the bottom view of the adaptive nozzle and a schematic diagram of the corresponding target outlet mode used for extruding the fixed part

图 7 3D 打印自适应核壳喷嘴打印头的照片<sup>[36]</sup>

Figure 7 A photo of the 3D printed adaptive core-shell nozzle print head<sup>[36]</sup>

(8~19), 19 个纤芯呈正六边形均匀分布。图中,  $d$  为芯间距,  $r$  为光纤半径,  $R$  为包层半径,  $n_1$  和  $n_2$  分别为纤芯和包层折射率。多个纤芯分布在同一包层中,共同形成等效纤芯区域,其模场被限制在等效纤芯区域内,进而实现模场调控。所提多芯超模光纤支持 10 模式同时传输,在 1550 nm 信号波长处 10 模式沿光纤截面的归一化光强分布如图 8(b) 所示。由图可知,多芯超模光纤相较于普通单芯少模光纤,信号光 10 种超模分布于光纤的等效纤芯区域中,拥有超大的有效模场面积,使得非线性效应的影响显著降低。

ML 在 MCFA 领域已从“辅助工具”升级为“核心驱动技术”。PSO、强化学习和物理嵌入神经网络等成果标志着第一代智能放大器的成熟。然而,现有研究仍高度依赖仿真环境,工业级应用需突破热管理和封装工艺等瓶颈。未来技术的发展呈现出多维联合优化的显著趋势。一方面,通过结合多芯拉曼放大器的波段灵活与掺铒放大器增益稳定性,并借助 ML 技术,能够实现 C + L 波段全谱放大。另一方面,在新材料探索领域,量子强化学习发挥着重要作用,利用量子优化算法设计新型铒/铥共掺超晶

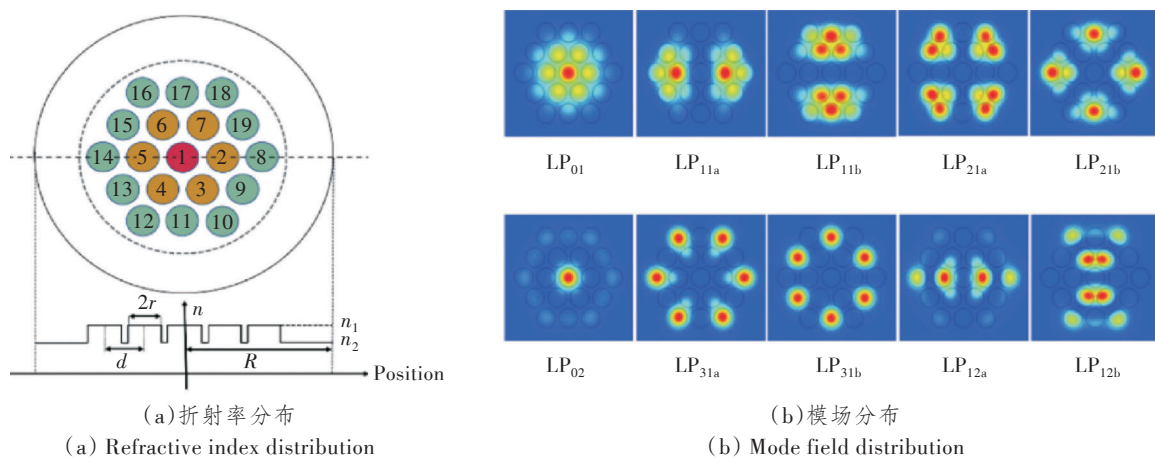


图 8 19 芯超模光纤的折射率分布(1~19 为纤芯编号)以及模场分布<sup>[12]</sup>

Figure 8 Refractive index distribution (cores numbered 1–19) and mode field distribution of the 19-core supermode fiber<sup>[12]</sup>

格光纤,有望突破现有掺杂浓度理论极。此外,边缘计算赋能的分布式控制也成为一大亮点,在光纤节点部署如 NeuRRAM 存算一体芯片等微型 ML 芯片,可实现放大器群的自主协同增益管理,且响应时间 $<100\ \mu\text{s}$ ,这些不同维度的技术发展相互配合、共同推进,为相关领域带来更高效、更先进的解决方案。

(3)量子点(Quantum Dot, QD)掺杂光纤凭借其独特的能带可设计性,在宽带光放大、非线性抑制及功能集成领域展现出显著优势。通过尺寸效应(如 PbS/PbSe QD 覆盖 450~2 500 nm 波段)和组分梯度调控,可精准定制发光波长与激子局域化特性,实现超宽带增益( $>20\ \text{dB}$ )<sup>[38]</sup>。采用堆垛法制备的 CsPbBr<sub>3</sub> QD 微晶玻璃光纤(发射波长 520 nm),以及原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)技术制备的多尺寸 PbS/PbSe 复合光纤(荧光谱宽 2 100 nm),突破了传统稀土光纤的带宽限制。然而,短波长损耗( $>3\ \text{dB/km}$ )和高温拉丝导致的 QD 分解(效率仅 60%)仍是规模化应用的瓶颈<sup>[39]</sup>。QD 光纤的核心竞争力在于带宽灵活性与功能可编程性,但其产业化受限于损耗-稳定性-成本三角悖论。未来需发展石墨烯包覆 QD 以同步提升导热性与化学稳定性,并开发飞秒激光直写等低成本制备工艺替代 ALD 技术(成本为 MCVD 的 3 倍)。

### 3 结束语

MCFA 作为 SDM 系统的核心组件,打破了 SMF 在传输容量和能量效率上的限制,并在数据中心互连、长距离海底光缆传输以及多波段通信系统中展现出极高的灵活性和应用潜力。本文回顾并分析了 MCFA 的关键技术,包括 EDF 设计和 PCE 提升,探讨了这些技术在不同应用场景中的优势与

挑战。通过结合光纤几何设计与串扰抑制技术,可以在高密度纤芯排布下实现高带宽和低串扰;通过优化 PCE,能够在长距离传输和多波段通信中显著提升能量效率。同时针对当前 MCFA 面临的串扰抑制极限、热管理难题与成本过高等挑战,本文展望了未来的发展方向,包括 3D 集成技术、ML 辅助设计和 QD 掺杂光纤等新兴技术。这些技术有望突破现有物理限制,进一步扩展放大波段、提升能量效率并降低成本,为未来光通信系统的高容量和低功耗需求提供强有力的支持。随着这些技术的不断成熟,MCFA 将在 5G 前传、数据中心、海底光缆以及多波段通信等领域发挥更加重要的作用,推动光通信系统向更高性能、更广应用的方向发展。

### 参考文献:

- [1] Chen B, Lei Y, Hu J, et al. Crosstalk-Sensitive Core and Spectrum Assignment in MCF-based SDM-EONs [J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(12): 7133–7148.
- [2] 赵新月. 少模掺铒光纤及其放大性能的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.  
Zhao X Y. Research on Few-Mode Erbium-Doped Fiber and Its Amplified Performance[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [3] 秦玉文,王悦,张聪,等. 少模掺铒光纤放大器的增益性能调控研究进展[J]. 光学学报(网络版), 2024, 1(2): 0203001.  
Qin Y W, Wang Y, Zhang C, et al. Gain Performance Regulation of Few-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier [J]. Acta Optica Sinica (Online), 2024, 1(2): 0203001.
- [4] 张泽霖,周慧,秦钰,等. 弱耦合多芯少模光纤的声波

- 导布里渊散射特性[J]. 光通信研究, 2023(2): 23–28.
- Zhang Z L, Zhou H, Qin Y, et al. Characteristics of Guided Acoustic Wave Brillouin Scattering in Uncoupled Seven-Core Few-Mode Fiber[J]. *Study on Optical Communications*, 2023(2): 23–28.
- [5] Soma D, Beppu S, Miyagawa Y, et al. 114 Pbit/s·km Transmission Using Three Vendor - Installed 60 - km Standard Cladding Multi-Core Fiber Spans with Multiple Fusion Splicing[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2023. San Diego, California, USA: Optica Publishing Group, 2023: Tu2C.5.
- [6] Nespola A, Amirabadi M A, Ryf R, et al. Rate Optimized Probabilistic Shaping - based Transmission over Field Deployed Coupled-Core 4-Core-Fiber[C]//2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe - EQEC). Munich, Germany: IEEE, 2023: 10231619.
- [7] van den Hout M, Di Sciullo G, Luís R S, et al. Transmission of 273.6 Tb/s over 1 001 km of 15 - Mode Multi-Mode Fiber Using C-Band Only 16-QAM Signals[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(3): 1136–1142.
- [8] Tandon P, Zakharian A. Impact of Multicore Fiber (MCF) Opticals, Cross - Talk, Radiative Leakage Loss, Splice Loss and Propagation Configuration on the System Transmission Performance[J]. *Optics Communications*, 2023, 539: 129483.
- [9] Zhao X, Bo T, Tan Z, et al. On the Performance Stability of MCF-based SDM System Affected by Inter-Core Crosstalk Fluctuation[J]. *Optics Express*, 2023, 31(12): 19065.
- [10] Mélin G, Keraampran R, Monteville A, et al. Power Efficient All - Fiberized 12 - Core Erbium/Ytterbium Doped Optical Amplifier[C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2020: 9083195.
- [11] Takasaka S, Maeda K, Sugizaki R, et al. L-Band 19-Core Erbium Doped Fibre Amplifier with Power Consumption of 1.2 W/Core for 20 dBm/Core Output[C]//2022 European Conference on Optical Communication (ECOC). Basel, Switzerland: IEEE, 2022: 9979208.
- [12] 朱福喜, 裴丽, 王建帅, 等. 多芯超模光纤放大器增益均衡设计(内封底文章)[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(1): 211–220.
- Zhu F X, Pei L, Wang J S, et al. Design of Gain Equalization for Multi-Core Supermode Fiber Amplifier (Inside back Cover Paper)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(1): 211–220.
- [13] 辜之木. 弱耦合多芯掺铒光纤的制备及其放大性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- Gu Z M. Study on the Preparation of Weakly-Coupled Multicore Erbium - Doped Fiber and Its Amplification Characteristic[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [14] Marcuse D. Loss Analysis of Single - Mode Fiber Splices[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1977, 56(5): 703–718.
- [15] Amma Y, Takahashi A, Takenaga K, et al. Accuracy of Core Alignment with End-View Function for Multi-core Fiber[C]//2014 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2014: 6903042.
- [16] Luis R S, Rademacher G, Puttnam B J, et al. Optimizing the Capacity of Standard Cladding Diameter Multi-Core Fiber Systems Using S, C, and L Bands[C]//2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe - EQEC). Munich, Germany: IEEE, 2023: 10231653.
- [17] Zhao Z, Sato T, Fujisawa T, et al. Investigation of Double - Cladding Heterogeneous Step - Index 2LP - Mode Multicore Fiber with a Two - Ring Layout[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2023, 40(10): 2511.
- [18] Zhao Z, Sato T, Fujisawa T, et al. Design of Heterogeneous 4LP - Mode Multicore Fiber with Two - Ring Layout[C]//2023 Asia Communications and Photonics Conference/2023 International Photonics and Optoelectronics Meetings (ACP/POEM). Wuhan, China: IEEE, 2024: 10368850.
- [19] Takenaga K, Arakawa Y, Tanigawa S, et al. Reduction of Crosstalk by Trench-Assisted Multi-Core Fiber[C]//2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2011: 5875695.
- [20] Mukasa K. MCF Manufacturing[C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: 10116314.
- [21] Tsuchida Y, Maeda K, Watanabe K, et al. Cladding Pumped Seven-Core EDFA Using an Absorption-Enhanced Erbium Doped Fibre[C]//ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication. Dus-

- seldorf, Germany: VDE, 2016: 7766213.
- [22] LaRoche S, Jin C, Matte-Breton C, et al. Cladding Pumped Multi-Core Fiber Amplifiers for Space Division Multiplexing[C]//2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE). Quebec, QC, Canada: IEEE, 2018: 8447740.
- [23] Li C, Shen D, Song J, et al. Analysis of High-Power Double-Clad Fiber Lasers Side-Pumped by Multiple Diode-Lasers in V-Groove Configuration[C]//Technical Digest. CLEO/Pacific Rim '99. Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics. Seoul, Korea: IEEE, 2002: 817843.
- [24] Liu Y Q, He Z, Liang J, et al. Compact Quasi-Continuous Pumped Nd:YAG Q-Switched Solid Laser[J]. Chinese Optics, 2019, 12(2): 413–424.
- [25] Herda R, Liem A, Schnabel B, et al. Efficient Side-Pumping of Fibre Lasers Using Binary Gold Diffraction Gratings[J]. Electronics Letters, 2003, 39(3): 276–277.
- [26] Li Z, Min F, Xin T, et al. Investigation of the Pump Coupling Efficiency of a Side-Pumping Combiner based on Tapered-Fused Method[J]. Optics Express, 2021, 29(12): 17784–17794.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Dutta A, Akasaka Y, Hui R. System Performance Analysis of Distributed Raman Amplification with Dual-Order Forward Pumping [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(8): 2799–2808.
- [30] Kitamura K, Tayama K, Masuda H. Cross-Talk Characteristics of a Hybrid Multi-Core Fiber Transmission System Using Distributed Raman Amplification [C]//2013 18th Optoelectronics and Communications Conference Held Jointly with 2013 International Conference on Photonics in Switching (OECC/PS). Kyoto, Japan: IEEE, 2013: 6597382.
- [31] Sagae Y, Iwaya T, Mori T, et al. Crosstalk Noise in Bi-Directional Transmission on Multi-Core Fiber Link with Distributed Raman Amplifier[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(5): 1519–1525.
- [32] Takeshita H, Shimomura Y, Hosokawa K. Demonstration of C+L 8.7 - THz 7 - Core Multicore EDFA with a Single Pump Laser Diode Using Pump Recycling Technology [J]. IET Conference Proceedings, 2023, 2023(34): 246–249.
- [33] Luis R S, Shaji D A, Orsuti D, et al. 403 km, 10.3 Tb/s, Unrepeated Link Using Incoherent Raman Amplification without ROPA[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2025. San Francisco, California: Optica Publishing Group, 2025: M1B. 2.
- [34] Sakamoto T, Wada M, Imada R, et al. Energy-Efficient Cladding-Pumped Amplifier for Coupled Multi-Core Fiber Transmission[C]//2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2024: 10526910.
- [35] Xiong C, Wang C, Qin Y, et al. 3D-Printed Ultra-compact Multicore Fiber-Tip Probes for Simultaneous Measurement of Nanoforce and Temperature[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(23): 30443–30452.
- [36] Kang S W, Mueller J. Adaptive Core-Shell 3D Printing of Hollow Fiber Actuators[J]. Device, 2025, 3(8): 100799.
- [37] Petale S, Erbayat E, Subramaniam S. ULTRA: Machine Learning Optimized TRA for Enhanced Resource Allocation in MCF-based SDM-EONs [C]//2023 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). Jaipur, India: IEEE, 2024: 10469199.
- [38] 郭恒菲, 韦绘梅, 陈娜, 等. 基于PbSe量子点掺杂环形芯光纤的涡旋模式放大[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(9): 0906001.
- Guo H F, Wei H M, Chen N, et al. Vortex Mode Amplification based on Ring-Core Fiber Doped with PbSe Quantum Dots[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(9): 0906001.
- [39] Zhu Z, Sun S, Chai X, et al. Quantum Dot-Doped Optical Fibers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2024, 18(9): 2301388.