

铒镱共掺光纤及其在光通信中的放大技术研究进展

郑晓丹, 何 乐, 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: 掺铒光纤放大器是光纤通信系统的关键组成器件之一, 其性能优化对于光纤通信系统升级和容量提升有着重要作用。铒镱共掺方案因镱离子的引入可以有效改善铒离子的局域配位环境, 并有效提升包层泵浦下光纤的泵浦效率, 为实现大带宽、高效率、长距离的光传输系统提供了有效技术途径。本文阐述了铒镱共掺体系中的能量传递机制, 讨论了掺杂组分对其光谱特性的影响。系统综述了铒镱共掺光纤及其放大器在纤芯泵浦光放、包层泵浦光放以及空分复用光放三大应用场景下的研究进展。在此基础上, 分析了铒镱共掺光纤及其放大器发展所涉及的关键问题与挑战, 并对未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 宽带放大; 包层泵浦; 铒镱共掺光纤; 能量传递; 空分复用

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260144

CSTR: 32170.14.CJL.20260144

Research Progress on Erbium-Ytterbium Co-doped Fiber and Its Amplification Technology for Optical Fiber Communications

ZHENG Xiaodan, HE Le, DAI Nengli, LI Jinyan*

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

* Corresponding Author, E-mail: lij@mail.hust.edu.cn

Abstract: Erbium-doped fiber amplifier serve as critical components in optical fiber communication systems. Investigating erbium-doped fiber and its amplification characteristics is of significant importance for the upgrading and capacity enhancement of these systems. Owing to the introduction of ytterbium ions, erbium-ytterbium co-doped fibers can effectively improve the local coordination environment of erbium ions and significantly enhance the pumping efficiency under cladding-pumped configurations. This provides an effective technical approach for achieving high-bandwidth, high-efficiency, and long-haul optical transmission systems. This paper elucidates the energy transfer mechanisms within the erbium-ytterbium co-doped system and discusses the influence of doping composition on its spectral characteristics. It presents a systematic review of the research progress regarding erbium-ytterbium co-doped fibers and its associated amplifiers across three major application scenarios: core-pumped optical amplification, cladding-pumped optical amplification, and space-division multiplexing optical amplification. Finally, the key issues and challenges associated with the development of erbium-ytterbium co-doped fibers and its amplifier are analyzed, and an outlook on their future development trends is provided.

Keywords: broadband amplification; cladding pumping; Erbium-Ytterbium co-doped fiber; energy transfer; space division Multiplexing

1 引 言

20世纪80年代,掺铒光纤放大器(EDFA)的

出现被视作光纤通信领域的关键性技术突破,使得大容量、长距离的光传输成为可能,并推动该领域的快速发展^[1]。随着5G/6G通信、云计算、人工

智能(AI)及物联网等新兴技术的出现,全球数据流量呈现指数级上升,光纤通信网络面临着前所未有的扩容压力^[2]。作为光纤通信系统的核心器件,光纤放大器的性能直接影响着系统的传输距离与容量,并且在很大程度上受其增益光纤的性能制约。拓展可用频谱资源成为突破现有传输容量的关键路径之一,这对光纤放大器提出了拓展增益带宽的需求。与此同时,面向未来高集成、低功耗运行的多样化应用场景,传统EDFA在功率转换效率方面也亟需提升。因此,进一步优化掺铒光纤(EDF)及其放大技术,实现更高效、更宽带的放大性能,是支撑下一代光纤通信系统持续升级的有效路径。

当前,C波段EDFA已经发展成熟并成功商用。然而在面对更高效率以及更宽带宽(L+波段)的应用需求时,传统EDF受限于其固有的能级结构及光谱特性,面临着显著的技术瓶颈。一方面,由于 Er^{3+} 在长波段信号吸收截面和发射截面相较C波段更小,当用于L波段放大时,往往需要使用更长的光纤。提升铒离子掺杂浓度可以促使掺铒光纤增益带宽向长波方向红移,缓解光纤使用长度较长导致的放大自发辐射(ASE)积累问题。但高浓度掺杂方案往往伴随着严重的团簇效应,导致部分 Er^{3+} 未能贡献于信号放大,泵浦效率下降^[3-4]。另一方面,信号激发态吸收效应(SESAs)限制了掺铒光纤增益带宽向扩展L波段及更长波段拓展。虽然SESA光谱的中心波长位于1690 nm附近,但其在短波方向可延伸至1580 nm,与发射光谱在L波段产生重叠,这严重制约了L波段的信号放大,抑制SESA成为拓展增益带宽的关键。研究表明,铒/镱共掺方案可以通过引入镱离子增加铒离子间距,有效缓解高浓度掺杂下铒离子的浓度猝灭问题。同时,现有研究表明,SESA光谱受 Er^{3+} 配位环境影响,优化掺杂组分是实现SESA抑制的重要途径^[5]。铒/镱共掺光纤放大器(EYDFA)通过共掺镱离子可以改变 Er^{3+} 的局域配位环境,抑制L波段长波方向的SESA效应,为实现扩展L波段放大提供了有效方案。

面向长距离传输和多信道放大等应用场景,为获得足够增益和输出功率,放大器通常需要消耗更高的泵浦功率。然而,目前商用的单模泵浦源输出功率有限且成本高昂,难以支持高功率放大需求。多模激光二极管泵浦源具有高输出功

率、高电光转换效率的显著优势,可应用于包层泵浦放大场景。然而,包层泵浦光重叠因子近似为纤芯-包层的面积比,泵浦重叠因子较小,泵浦效率较低。研究表明泵浦效率与泵浦光重叠因子 Γ_p 和泵浦光吸收截面 σ_p 息息相关^[6]。对于单掺铒光纤而言, Er^{3+} 自身的泵浦吸收截面并不足以补偿极低的泵浦重叠因子^[7]。 Yb^{3+} 具有较宽的9xx nm吸收带,能够显著增强光纤对9xx nm泵浦光的有效吸收能力。研究表明EYDFA可以利用镱离子在泵浦波长处的高吸收特性,通过铒/镱能量传递过程显著提升包层泵浦方案下的泵浦转换效率^[8-9]。

本文首先阐述了铒/镱共掺体系的能级结构、能量传递机理、玻璃基质与掺杂组分对于光纤发光特性的影响等;其次,重点梳理了在纤芯泵浦、包层泵浦及空分复用(SDM)等不同应用场景下铒/镱共掺光纤放大器的研究现状与性能突破;最后,结合当前光通信技术的发展趋势,展望了铒/镱共掺光纤(EYDF)及其放大器在面向超宽带放大方面的未来发展方向与挑战。

2 铒/镱共掺光纤的发光特性与能量传递过程

2.1 铒/镱离子能级结构与发光特性

铒离子的能级结构具有多个泵浦带,其中980 nm和1480 nm是EDFA最常用的泵浦波长。如图1所示,采用980 nm的波长进行泵浦时,铒离子可视为三能级系统,其发光过程主要涉及基态 $^4\text{I}_{15/2}$ 能级、亚稳态 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级和激发态 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级。其中,基态能级是 Er^{3+} 的能量最低态,电子在此能级处于稳定状态,常态下多数 Er^{3+} 处于该能级,不产生自发辐射;亚稳态能级寿命约为10 ms,有利于粒子积累形成显著的反转粒子数分布,这是实现受激辐射和光放大的重要前提条件;铒离子吸收980 nm泵浦光后跃迁至激发态能级,随后迅速跃迁至亚稳态能级。 Er^{3+} 的发光主要来自亚稳态 $^4\text{I}_{13/2}$ 到基态 $^4\text{I}_{15/2}$ 的辐射跃迁,所产生的辐射波长约为1.5 μm ,恰好位于石英光纤的低损耗窗口,这使得掺铒光纤成为光纤通信领域的核心增益介质。受到周围电场环境的影响,铒离子能级会发生Stark分裂,进而展宽为连续能带,导致其发射光谱具有一定宽度。与此同时,亚稳态能级上的一部分粒子也会以自发辐射的方式跃迁至基态能级,产生与信号波长一致,但方向随机的光

子,其中一部分光子由于传输方向正好在光纤的轴线上而被光纤捕获,在传输过程中同样也被放大,形成了放大的自发辐射^[10]。

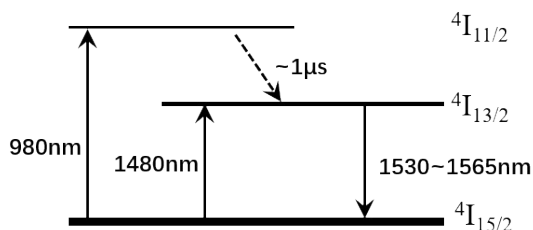


图1 Er^{3+} 的能级简图

Fig 1 Simplified energy level of Er^{3+}

Yb^{3+} 作为镧系元素中电子层接近填满的离子,其能级结构呈现出简单的准两能级结构:包含基态 $^2\text{F}_{7/2}$ 与激发态 $^2\text{F}_{5/2}$ 两个能级多重态。 Yb^{3+} 在玻璃基质中展现出的连续宽带吸收特性,是能级分裂与能带加宽共同作用的结果^[11]。当 Yb^{3+} 被高浓度掺入硅酸盐或磷酸盐玻璃基质中时,受局域配位电场场强非均匀分布的影响,其能级简并状态消失并产生显著的 Stark 分裂^[12]。这种能级分裂极大地拓展了电子跃迁的能级范围,是宽光谱形成的基础。在此基础上,能带加宽使得原本分立的各个 Stark 能级跃迁谱线大幅展宽,相邻子能级的吸收峰相互交叠并填充了能级间的空隙,最终形成了覆盖 800~1100 nm 范围的连续、宽带吸收谱^[11]。同时, Yb^{3+} 在硅酸盐基质中的溶解度很高,其掺杂浓度通常可达 Er^{3+} 的数十倍,这使得 Yb^{3+} 在 9xx nm 波段的泵浦吸收能力显著提升,为后续铒镱能量传递过程提供了有利条件。

2.2 铒镱共掺体系的能量传递过程

当注入 915 nm 或 976 nm 等 9xx nm 泵浦源时,EYDF 中发生明显的能量传递过程。EYDF 凭借镱离子极高的掺杂浓度所带来的高泵浦吸收能力,通过铒镱能量传递过程,可以有效弥补 Er^{3+} 包层泵浦吸收不足的缺陷。图 2 展示了铒镱共掺体系的能级结构及能量传递过程。镱离子首先吸收泵浦光子从基态 $^2\text{F}_{7/2}$ 跃迁至激发态 $^2\text{F}_{5/2}$ 。由于 Yb^{3+} 的 $^2\text{F}_{7/2}$ 和 $^2\text{F}_{5/2}$ 发射跃迁与 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{15/2}$ 和 $^4\text{I}_{11/2}$ 吸收跃迁这两个过程的能级差很相近,被激发的 Yb^{3+} 能够通过交叉弛豫过程将能量高效传递给基态 Er^{3+} ,使其跃迁至 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级。随后,处于 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级的 Er^{3+} 由于极短的能级寿命迅速发生非辐射跃迁至亚稳态 $^4\text{I}_{13/2}$ 。因为亚稳态能级寿命较长, Er^{3+} 在此能级可以大量积累并形成粒子数反转分布,

最终产生 1.5 μm 的受激辐射。在该过程中, Yb^{3+} 充当敏化剂,极大地提升了泵浦转换效率。

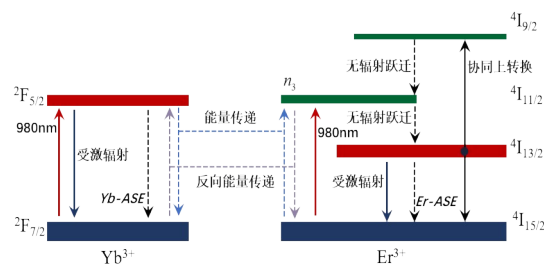


图2 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 系统能级结构

Fig. 2 Energy level structure of the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ system

2.3 玻璃基质与共掺离子的影响

玻璃基质决定了铒/镱离子的溶解度和光谱特性,是影响铒镱共掺体系放大特性的重要因素^[13-15]。在不同的基质组分中,铒镱共掺光纤可以展示出不同的特性^[16-17]。在铒镱协同作用过程中,除了要促进能量的正向传递之外,还需要抑制能量的逆向传递和协同上转换。选取合适的玻璃基质以提高 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级向亚稳态 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级的无辐射跃迁速率可有效抑制铒离子向镱离子的能量逆向传递。根据多声子弛豫理论,这一无辐射跃迁速率 W_{nr} 与基质材料的最高声子能量 E_p 呈指数关系^[18]。对于铒镱共掺体系,基质的声子能量对能量逆向传递的抑制起着重要作用。

在硅酸盐或锆硅酸盐玻璃中,基质最高声子能量较低(约为 $1100 \text{ cm}^{-1[19]}$), Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{11/2}$ 和 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级间隙需通过更多声子辅助才能完成跃迁,导致无辐射跃迁速率较慢。研究表明,在硅酸盐基质中, Yb^{3+} 向 Er^{3+} 的能量传递效率极低,仅约 5%,且极易引发 1 μm 波段 Yb^{3+} 自发辐射积累^[20]。相比之下,磷酸盐玻璃具有较高的声子能量(约为 $1320 \text{ cm}^{-1[19]}$),能够显著加速 Er^{3+} 的无辐射弛豫过程,有效抑制反向能量传递,其能量传递效率可高达 85% 以上^[19]。然而,纯磷酸盐玻璃存在化学稳定性差、机械强度低以及难以与现有硅酸盐玻璃光纤熔接、损耗大等问题。南安普顿大学 Vienne 等人证实,采用磷硅酸盐作为玻璃基质的铒镱共掺光纤,是实现高效率光纤激光器与放大器的关键技术路线^[21]。通过在硅酸盐基质中引入高浓度的 P,利用 P=O 键的高声子能量特性,可以在保留硅酸盐玻璃优良机械性能的同时,实现与磷酸盐玻璃相接近的能量传递速率,已成为目前制备高性能铒镱共掺光纤的主流基质方案。

在以磷硅酸盐为玻璃基质的铒镱共掺光纤中, P 不仅提供高声子能量, 还通过形成非桥氧键改善稀土离子的溶解度^[22]。在磷硅酸盐玻璃中, Yb^{3+} 和 Er^{3+} 被 $[\text{PO}_4]$ 四面体包围, 形成类似于磷酸盐的微观溶剂化壳层。这种结构可以有效将稀土离子隔离, 显著抑制了高浓度掺杂下的离子团簇现象及协同上转换效应, 从而允许更高的掺杂浓度以缩短光纤长度^[23]。然而在高磷掺杂的条件下, P 在高温制备过程中极易挥发, 造成折射率中心凹陷。研究表明, 引入 Al 有助于抑制光纤制备过程中 P 的挥发, 从而起到调控折射率剖面的作用^[24]。同时, 有助于提高玻璃网络的稳定性, 改善 Er^{3+} 的发射光谱, 使其更适用于宽带放大应用^[25]。除此之外, Al 的引入也能提高稀土离子的溶解度^[26]。

在离子共掺方案中, Yb^{3+} 和 Er^{3+} 的掺杂浓度及其比例 ($N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$) 是决定光纤放大器增益性能的重要参数。在不同泵浦方案下, Yb^{3+} 在铒镱共掺光纤中表现出不同的作用。当采用 9xx nm 泵浦时, Yb^{3+} 作为敏化离子向 Er^{3+} 传递泵浦能量, 为了充分利用 Yb^{3+} 在 9xx nm 波段的高吸收特性, 通常需要保持较高的 Yb^{3+} 浓度, 从而提升向 Er^{3+} 传递能量的几率。然而, 该掺杂比例存在一个最佳的阈值范围^[11]。如果 $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$ 比例过高 (即 Er^{3+} 相对含量过低), 处于激发态的过剩 Yb^{3+} 无法及时将能量转移, 将诱发大量 1 μm 波段的 Yb-ASE 积累, 甚至产生寄生振荡^[27]。这种寄生效应会竞争性地消耗泵浦能量, 使得 1.5 μm 信号光的泵浦转换效率恶化。因此, 优化 $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$ 比对于提升铒镱共掺光纤的放大性能至关重要^[28]。

当采用 1480 nm 或 15xx nm 泵浦时, 泵浦光能量直接被 Er^{3+} 吸收, 此时 Yb^{3+} 不直接参与泵浦能量的吸收与传递, 而是作为一种关键的共掺离子发挥作用。在硅基玻璃网络中, Yb^{3+} 的引入不仅能够抑制铒离子团簇引起的浓度猝灭, 而且会影响铒离子周围的局域配位场。晶体场的扰动会改变 Er^{3+} 的 4f 电子壳层 Stark 能级分裂间距, 导致 Er^{3+} 的吸收和发射截面发生变化。此时, Er^{3+} 的能带结构压缩, 使得原本在长波长处较强的 SESA 光谱发生红移与压缩, 有效抑制了 SESA 效应, 进而拓展了掺铒光纤的增益带宽^[29]。

此外, 研究表明钇 (Y) 和钡 (Ba) 等新型离子的引入同样展现出了独特的调控优势。一方面, Y 本身不参与 1.5 μm 波段的发射跃迁, 而是作为共掺

离子将 Er^{3+} 相互隔离, 从而达到抑制诱导猝灭的作用。相关研究表明, 在优化 P/Al 比例的铝磷硅酸盐基质中, Y^{3+} 可在不显著改变 Er^{3+} 长波段吸收和发射特性的情况下, 有效抑制铒离子团簇现象。另一方面, 与 Yb^{3+} 相比, Y 的一个重要优势在于其不吸收 980 nm 泵浦光, 因此不会与 Er^{3+} 竞争 980 nm 泵浦光, 有利于构建低噪声、低成本且温度稳定性较好的扩展 L 波段 EDFA^[30-34]。Ba 碱土金属离子的调控机理则主要体现在玻璃网络结构和制备工艺层面。BaO 作为网络修饰剂, 在硅酸盐网络会形成非桥氧, 从而提高稀土离子在硅基玻璃中的溶解度。此外, Ba 还具有较高的折射率 (~1.98), 且在高温气相沉积过程中挥发性极低。利用 Ba 作为共掺离子, 可以有效消除高磷掺杂导致的纤芯折射率中心凹陷问题, 制备出损耗极低且折射率分布平坦的光纤^[35-36]。同时, 实验证实 Ba 对 Er^{3+} 局域场的调控也会引起 SESA 光谱红移, 这种光谱整形效应直接将 L 波段的净增益窗口延伸至 1620 nm 以上, 为超宽带 L 波段放大器的设计提供了新的思路^[37]。

3 铒镱共掺光纤放大器发展现状

3.1 纤芯泵浦方案下铒镱共掺光纤及其放大器发展现状

纤芯泵浦方案将单模激光直接耦合进入光纤纤芯, 是光纤放大器最常见的泵浦方式。由于泵浦光被限制在纤芯内传输, 该方案具有泵浦光与纤芯掺杂区域重叠度高、泵浦效率高等优势。1991 年, S. Grubb 等人就率先验证了纤芯泵浦下铒镱共掺光纤在 C 波段的放大能力。针对当时单掺铒光纤在常规波段泵浦效率受限的问题, 该团队利用二极管泵浦的 Nd:YAG 激光器产生的 1064 nm 激光作为泵浦源。得益于磷硅酸盐玻璃基质中 Yb^{3+} 对 1064 nm 泵浦光的高效吸收及向 Er^{3+} 的快速能量传递, 该放大器实现了优异的性能突破: 小信号增益高达 42 dB, 饱和输出功率达到 14.5 dBm, 同时噪声指数仅为 3.5 dB^[25]。这项开创性工作不仅验证了铒镱共掺体系在能量传递方面的巨大潜力, 也证明了在纤芯泵浦下, EYDF 能够有效克服传统 EDF 的泵浦吸收瓶颈。

2008 年, 马来亚大学 Dimyati^[38] 等人提出了一种前向泵浦双程结构的紧凑型 EYDFA。因为双程结构在提升增益的同时也会引入更强的后向 ASE, 从而降低输入端的粒子数反转, 导致噪声系数增加。针对这个现象, 2012 年, Mueh-Yassin 等

人进一步设计了一种如图3所示的包含带通滤波器(BPF)的双级部分双程结构。实验结果表明,在-50 dBm的小信号输入下,该放大器在1530~1560 nm范围内增益均高于20 dB,同时噪声水平

低于5.6 dB^[39]。该研究说明,通过“前级低噪声预放大+后级高效双程放大+ASE滤波控制”的结构设计,可以在C波段纤芯泵浦EYDFA中同时实现高增益和较低噪声。

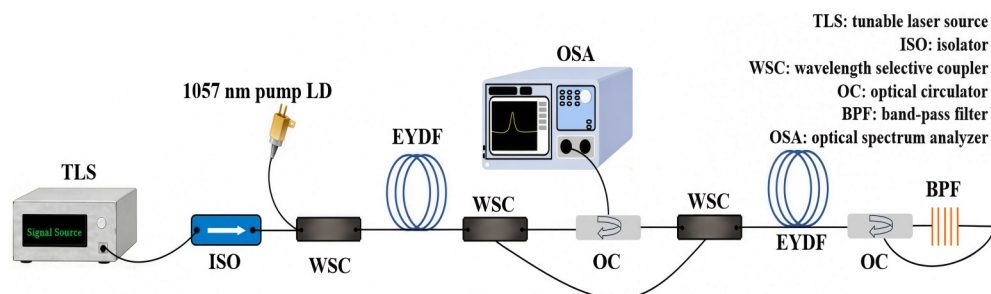


图3 基于BPF滤除ASE的双级部分双程结构示意图^[39]

Fig. 3 Schematic diagram of a dual-stage partial double-pass structure with BPF-based ASE filtering^[39]

对于L波段的信号放大,Er³⁺固有的信号激发态吸收效应导致其增益在1610 nm后急剧下降^[40]。针对该挑战,2021年,华中科技大学李进延等人提出了一种用于扩展L波段放大的铒镱共掺光纤方案。该工作制备了一种新型Er/Yb/P共掺磷酸盐光纤,其核心创新在于利用镱离子的引入来调控铒离子的配位环境。实验采用1480 nm半导体激光器进行纤芯泵浦。研究发现,Yb³⁺的加入压缩了Er³⁺的电子云,导致SESA光谱发生红移和窄化。截面计算结果表明,该Er/Yb/P共掺磷酸盐光纤成功将SESA截面与受激发射截面的交点红移至1637 nm。基于此突破,该光纤在1480 nm泵浦功率为720 mW的条件下,成功将20 dB的增益带宽扩展至1623 nm,并且在1623 nm处的噪声指数低至6.01 dB,饱和输出功率达到23 dBm^[29]。该工作充分展示了纤芯泵浦方案下铒镱共掺光纤突破L波段增益极限的潜力。

为了进一步挖掘铒镱共掺光纤在L波段放大的潜力,2023年,英国南安普顿大学Zhai Ziwei等人深入研究了铒镱掺杂浓度对放大性能的影响,并分析了光纤的温度特性。该团队通过MCVD工艺制备了一系列不同Yb/Er比例的磷铝硅酸盐光纤,并搭建了1480 nm双向纤芯泵浦测试系统。研究指出,提高Yb/Er比(从1.4提高至3.5)可以有效抑制SESA效应并提升L波段增益系数。实验结果显示,当Yb/Er比例为3.5时,光纤在1625 nm处实现了15.5 dB的高增益,显著优于其他比例的光纤。同时,通过分析温度特性,发现降低温度可以进一步减小长波信号的重吸收效应并压缩SESA光谱。当光纤温度降低至-60 °C时,1625 nm

处的增益系数由室温下的0.025 dB/mW显著提升至0.051 dB/mW^[41]。这一研究不仅从组分设计角度验证了提高Yb/Er比例在L波段纤芯泵浦放大器中的可行性,也为极端环境下的超宽带放大器设计提供了新思路。

除了从光纤优化层面改善纤芯泵浦L波段EYDFA的性能,广东工业大学董新永^[42]等人从系统层面也开展了相关研究。2024年,该团队报道了一种反向ASE辅助泵浦的放大方案,如图4所示,该工作利用1480 nm正向泵浦EYDF时产生的反向C波段ASE光,通过C/L波分复用器和法拉第旋镜重新引入放大光路,从而解决了长波长处增益不足的问题。实验表明,该结构可在1570~1610 nm波段内实现高于20 dB的增益且噪声系数低于6 dB^[43]。

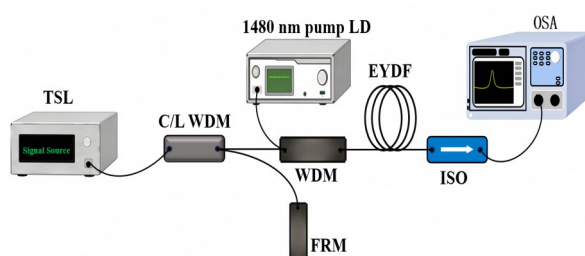


图4 ASE辅助泵浦的单级EYDFA^[43]

Fig. 4 Schematic of the ASE co-pumped single-stage EYDFA^[43]

表1给出了基于纤芯泵浦方案的铒镱共掺光纤及其放大器的实验研究进展。总的来说,纤芯泵浦方案始终是构建高增益、低噪声铒镱共掺光纤放大器的核心途径。尽管纤芯泵浦EYDFA已经成功突破了传统掺铒光纤的带宽限制,在1620

nm以上波段展现出优异的增益与噪声性能,但是单模泵浦源固有的物理功率上限以及高功率下极其昂贵的成本,使其难以支撑未来超大容量通信

所需的超高功率输出。如何进一步挖掘更长波段处的增益潜力,并实现泵浦成本与放大性能的平衡,仍是纤芯泵浦方案的重要研究内容。

表1 基于纤芯泵浦方案的铒镱共掺光纤及其放大器的实验研究进展

Tab. 1 Review of erbium-ytterbium co-doped fiber and its corresponding amplifier based on core-pumped scheme

年份	泵浦方式	泵浦功率/mW	系统结构	工作波长/nm	增益/dB	噪声/dB	参考文献
2008	1058 nm 前向泵浦	20	双程结构	1524~1564	37.2 dB @1536 nm	~5.5 dB	[38]
2012	1057 nm 前向泵浦	140	双级放大 双程结构	1530~1560	>20	≤5.6 dB	[39]
2021	1480 nm 双向泵浦	380+340	单程结构	1565~1623	>20	≥4.4	[29]
2023	1480 nm 双向泵浦	-	单程结构	1570~1625	≥15.5	-	[41]
2023	1480 nm 双向泵浦	300+50	双程双级放大	1556~1621	>20	-	[42]
2024	1480 nm 前向泵浦	550	双级放大+ASE辅助泵浦	1570~1610	>20	<6 dB	[43]

3.2 包层泵浦方案下铒镱共掺光纤及其放大器发展现状

早在上世纪80年代后期,美国Polaroid公司Snitzer团队就提出了双包层光纤包层泵浦技术,为高功率光纤放大器的发展奠定了基础^[44]。包层泵浦技术利用大尺寸的内包层作为泵浦光传输通道,引入高功率、低成本的多模激光二极管作为泵浦源,缓解了纤芯泵浦只能采用单模激光二极管所面临的成本高昂,且输出功率有限难以支持高功率应用的难题,为实现高功率、高效率的光纤放大器提供了关键技术路径^[45]。然而包层泵浦方案也存在泵浦转换效率偏低的固有缺陷。为此,铒镱共掺光纤充分利用了Yb³⁺在9xx nm波段的高吸收截面特性,通过能量传递机制极大地提升了Er³⁺的泵浦效率,成为实现高功率、宽带光纤放大器的方案之一。

1999年,意大利Pirelli公司Di Pasquale等人率先验证了传统的双包层结构EYDF在L波段的放大性能。研究人员通过设计了一种预放大为纤芯泵浦掺铒光纤,功率放大级为包层泵浦铒镱共掺光纤的两级放大结构,利用920 nm多模泵浦源,在1575~1605 nm波段实现了高达23 dBm的饱和输出功率,证明了包层泵浦技术的可行性^[46]。

为了改善L波段光谱特性,2003年,英国南安普顿大学Codemard等人进一步从基质材料角度优化,提出磷硅酸盐玻璃基质铒镱共掺光纤。实验结果表明该磷硅酸盐铒镱共掺光纤在双通放大

结构下,仅需使用5 m长度,可以在1553~1620 nm范围内实现超过20 dB的小信号增益,同时饱和输出功率达23 dBm^[47]。

在面向长距离、大容量光通信的扩展L波段放大应用中,如何提升扩展L波段放大性能是研究的重点。2022年,华为加拿大研究中心Wang等人提出一种基于单模与多模混合泵浦的超L波段放大器结构。该方案前三级均通过976 nm单模激光器泵浦EDF以保证低噪声系数,而功率放大级采用915 nm多模包层泵浦EYDF以降低成本。实验结果表明,该混合泵浦放大器在1575~1626 nm范围内实现了16~21 dB的增益,且噪声系数与纯单模泵浦方案相当(约6.5~7.9 dB)^[48]。

若能从光纤优化层面进一步提升扩展L波段的放大性能,将大大降低系统复杂度。基于此,2024年,华中科技大学李进延等人提出了一种新型的铝磷硅酸盐铒镱共掺光纤。该光纤采用改进的MCVD工艺制备,P在光纤制备过程中极易挥发造成折射率剖面中心凹陷,而Al的引入有效抑制了P的挥发并改善了Er³⁺的溶解度。实验结果显示,在0.8 W的915 nm包层泵浦下,该铝磷硅酸盐铒镱共掺光纤可将20 dB增益带宽显著延伸至1625 nm,且1625 nm处的噪声指数仅为6.9 dB,有效实现了高效的扩展L波段放大^[49]。

2025年,Rabbani等人针对超L波段EYDFA,比较了前向915 nm包层泵浦、后向1480 nm纤芯泵浦以及纤芯/包层混合泵浦方案(实验结构如图

5所示)。结果表明,在保持相近增益的前提下,混合泵浦不仅相较纯纤芯泵浦具有更低的噪声系数,而且相较纯包层泵浦显著降低了系统电功耗。该团队进一步引入神经网络模型进行优化,优化

结果表明该混合泵浦放大器能在 1575~1626 nm 范围内实现最低增益大于 12 dB 且最高噪声系数低于 7 dB,同时系统所需总电功率进一步降低至 4.5 W 以下^[50]。

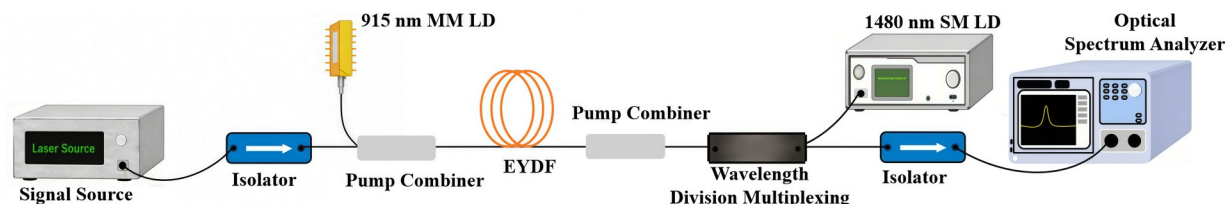


图 5 915 nm 前向包层泵浦和 1480 nm 后向纤芯泵浦的混合泵浦 EYDFA^[50]

Fig. 5 Hybrid-pumped EYDFA with forward cladding pumping at 915 nm and backward core pumping at 1480 nm^[50]

随着密集波分复用系统(DWDM)信道数的增加,包层泵浦 EYDFA 在复杂信号环境下的性能表现成为研究热点。拉脱维亚里加技术大学的研究人员对此进行了系统性探索。2021年,Andis Supe 等人结合仿真与实验,深入研究了 EYDFA 在 40 信道 DWDM 系统的表现。研究人员构建了基于商用双包层 EYDF 的仿真模型,指出 7 m 长的光纤配合 3 W 的 975 nm 同向泵浦是 C 波段(1530~1565 nm)的最佳工作点,能够在保证 19.7~28.3 dB 增益的同时,将噪声指数控制在 3.7~4.2 dB 之间。该工作还量化了包层泵浦 EYDFA 引入的功率代价(Power Penalty),在放大 40×10 Gbps 信号时,其误码率对应的功率代价低于 0.1 dB,充分验证了其在城域光网络中的实用性^[51]。次年,Zakis 等人进一步将研究扩展至 48 信道系统,并探讨了增益谱部分平坦化的实验方案。实验结果表明,在 2 W 泵浦功率和 5 m 光纤长度的配置下,放大器在 1534~1565 nm 波段范围内可实现每信道增益大于 21 dB,增益波动为 12 dB。同时研究发现适当增加光纤长度可以有效提升 C 波段长波长处(1544~1565 nm)的增益,为多信道放大器的工程设计提供了参考价值^[52]。

除了传统的双包层结构,微结构光纤(Microstructured Fiber, MOF)的设计也为单信道增益光纤的研究探索提供了新思路。2024年,华南师范大学 Fang Ziwei 等人提出了一种环形气孔辅助的铒镱磷共掺单芯微结构光纤。具体而言,该光纤在内包层周围引入了一圈空气孔,利用空气孔与内包层的高折射率差有效地将泵浦光限制在内包层中,实现了高效的泵浦耦合与长距离传输。此时,由于采用单纤芯设计,信号光被局限在唯一的掺杂纤芯内进行单信道传输。利用 P 共掺对 SE-

SA 的抑制作用,该光纤在 8 m 长度下实现了覆盖 C+L 波段(1535~1607 nm)的宽带放大,平均增益达到 21.6 dB,在 1607 nm 处的增益仍超过 10 dB,展示了微结构光纤在宽带放大领域的潜在优势^[53]。

在高泵浦注入情况下, Yb³⁺ 在 1 μm 波段的放大自发辐射极易积累并形成寄生振荡。2014年,波兰弗罗茨瓦夫理工大学 Sobon 等人创新性地提出了一种“Yb-ASE 反馈控制”技术。他们在放大器结构中引入了针对 1060 nm 波段的光纤布拉格光栅(FBG)和环形谐振腔,强制 Yb-ASE 形成受控的激光振荡,进而被 Yb³⁺ 重新吸收并作为二次泵浦源传递给 Er³⁺。该方案不仅消除了寄生振荡现象,还将 1565 nm 信号的输出功率提升至 10.4 W^[54]。

2020年,中国科学技术大学 Wei Shanshan 等人则针对更敏感的 kHz 线宽单频激光放大场景,提出了一种双波长(1030 nm 与 1040 nm)辅助信号注入方案。实验结果表明,辅助信号有效消耗了过剩的 Yb³⁺ 反转粒子数,缓解了增益竞争,成功将 1560 nm 单频信号的输出功率提升至 13.8 W,同时保持了极高的光束质量^[55]。

表 2 给出了基于包层泵浦方案的铒镱共掺光纤及其放大器的实验研究进展。包层泵浦 EYDFA 从根本上打破了单模纤芯泵浦的功率局限,广泛适用于 WDM 系统的功率放大及长距离扩展 L 波段传输场景。然而,在向更高功率和更宽波段演进时,该方案仍受限于镱离子与铒离子之间的能量传递瓶颈,这不仅导致了严重的 1 μm 波段 ASE 寄生振荡,也使得系统难以兼顾高能效与低噪声的平衡。未来发展需围绕光纤结构设计、泵浦配置和 ASE 抑制等方向展开,以实现更高效率、更宽带宽和更低功耗的通信用 EYDFA。

表 2 基于包层泵浦方案的铒镱共掺光纤及其放大器的实验研究进展

Tab. 2 Review of erbium-ytterbium co-doped fiber and its corresponding amplifier based on cladding-pumped scheme

年份	泵浦方式	泵浦功率/ mW	系统结构	工作波长/nm	增益/dB	噪声/dB	参考 文献
1999	920 nm 双向泵浦	400+400	双级放大	1575~1605	-	-	[46]
2003	915 nm 前向泵浦	1250	双程结构	1553~1620	>20	-	[47]
2021	975 nm 前向泵浦	3000	单级放大	1530~1565	19.7~28.3	3.7~4.2	[51]
2022	975 nm 前向泵浦	2000	单级放大	1534~1565	>21	-	[52]
2022	915 nm 双向泵浦	-	EDF+EDF+EDF +EYDF	1575~1626	16~21	6.5~7.9	[48]
2024	915 nm 后向泵浦	800	单级放大	1575~1625	>20	6.9 dB @1625 nm	[49]
2024	940 nm 前向泵浦	3000	单级放大	1565~1625	>20	5.2 dB @1625 nm	[56]
2024	976 nm 双向泵浦	-	单级放大	1535~1607	平均 21.6 dB	-	[53]
2025	915 nm前向泵浦 + 1480 nm后向泵浦	700+400	单级放大	1575~1626	>12	<7	[50]

3.3 空分复用场景下铒镱共掺光纤及其放大器发展现状

随着全球数据流量的指数级增长,基于单模光纤的光通信系统正逐渐逼近香农极限。为了应对这一挑战,学术界将目光投向了光纤的另一个维度——空间维度,即利用空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)技术,通过在单一光纤中引入多个空间通道(多芯或少模)实现通信容量的成倍增长,SDM成为提升传输容量的关键路径^[57-58]。具体而言,多芯光纤的包层内包含多个相互独立的纤芯,每个纤芯可作为一个独立空间信道,光信号在各纤芯中并行传输且互不干扰;少模光纤则支持有限数量的正交模式(如LP₀₁、LP₁₁等)稳定传输,其利用不同传输模式间的模式正交性,将每个正交模式作为一个独立空间信道。研究指出,相比于传统的单模EDFA,采用包层泵浦的SDM铒镱共掺光纤放大器能够利用高功率多模二极管同时泵浦所有空间通道,不仅大幅降低了单位比特的泵浦功耗(功耗降低因子可达0.36~0.6),还显著提升了系统的集成度,为搭建超大容量、超长距离、高集成度的光纤通信系统奠定了坚实的基础^[59-60]。基于此优势,近年来研究人员围绕多单元、多芯及少模光纤的EYDFA研究取得了突破性进展。

2014年,南安普顿大学Jain等人采用包含4根单模信号光纤和1根多模泵浦光纤的多单元光纤(MEF),通过将信号光纤级联,构建了一种覆盖C+L波段(1536~1615 nm)的宽带放大器。MEF实际上是将多根完整的单芯光纤拉制在同一聚合物涂层内,利用相互独立的单元作为纤芯,信号在每个纤芯中独立传输。实验显示,在6.4 W的泵浦功率下,单根信号光纤在C波段可获得37 dB的最高增益;而通过级联结构,放大器在L波段也实现了大于17 dB的增益,证明了MEF结构在宽带放大方面的可行性^[61]。

随着多芯光纤制备工艺的成熟,更高密度的多芯MC-EYDFA被开发出来。2017年,Jain等人通过改进的侧面泵浦技术,成功制备了与传输光纤几何匹配的32芯EYDF。实验测得所有32个纤芯在1534~1561 nm的增益均大于17 dB,噪声指数平均为6.5 dB,且芯间一致性优异(芯间增益差<2 dB)。该放大器成功支持了111.6 km的32芯光纤传输实验,证明了其在超大容量系统中的实用性^[62]。

为了进一步挖掘SDM系统的传输潜力,2022年,香港理工大学Lebreton等人针对海底通信长距离传输需求,设计了12芯C+L波段EYDFA。实验利用粒子群优化算法(PSO)对光纤长度和Yb/Er掺杂比例进行了优化设计,在保证低噪声

(NF<8.2 dB)的前提下,通过增益平坦滤波器(GFF)补偿,在1535~1585 nm范围内实现了约13.5 dB的平坦增益,为海底SDM系统提供了宽带放大方案^[63]。

围绕泵浦方案优化的问题,2023年,华中科技大学李进延等人提出了一种基于1018 nm泵浦的4芯EYDFA方案。相比于传统的9xx nm泵浦方案,1018 nm泵浦光能有效抑制1 μm波段的寄生ASE并改善沿光纤的粒子数反转分布。实验结果表明,在4 W的1018 nm泵浦下,该放大器在1575~1625 nm范围内实现了平均22 dB的增益,且最大芯间增益差仅为1.7 dB,显著优于940 nm和976 nm泵浦方案^[64]。

在多芯光纤中,引入气孔微结构可以有效增强泵浦光约束能力。2024年,华南师范大学

Zhang等人将微结构设计应用于多芯光纤中,提出了一种13芯微结构EYDF。如图6(a)所示,研究团队将内包层周围的气孔压缩为椭圆形状,并且在椭圆孔之间引入更小气孔,最终在内包层周围设计出“花生形”空气孔结构(Design C)。该“花生形”空气孔结构不仅提高了内包层的数值孔径,将泵浦光高效束缚在内包层中传输,还兼顾了光纤的机械柔韧性。图6(b)显示当弯曲直径从17 cm逐渐减小到2 cm时,该13芯“花生形”空气孔结构光纤的传输光谱几乎保持一致,展现出其优异的抗外界干扰能力。在双向泵浦条件下,该光纤在1529~1565 nm波段内实现了平均23.8 dB的增益和4.6 dB的低噪声,芯间增益差控制在2 dB以内,展示了微结构光纤在SDM放大器设计中的灵活性^[65]。

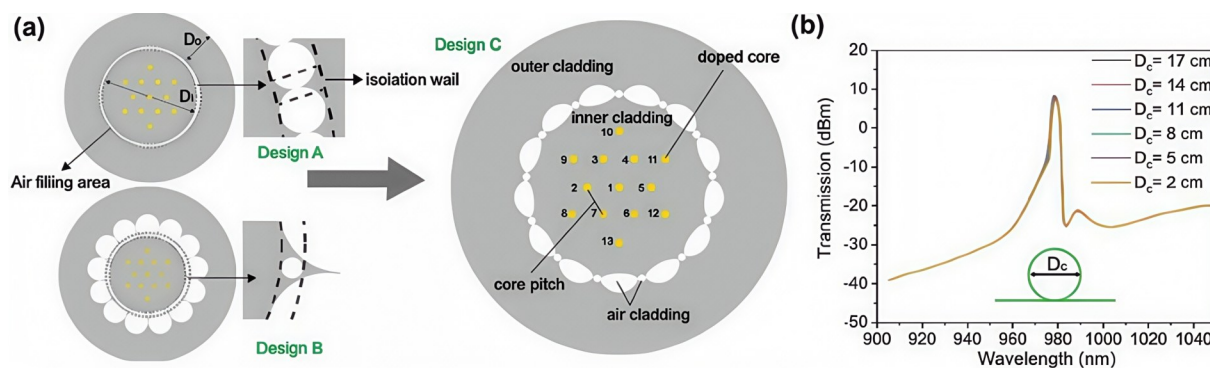


图6 具有“花生形”空气孔包层结构的13芯铒镱共掺光纤的设计与传输光谱特性。(a)不同空气孔包层结构的13芯铒镱共掺光纤横截面示意图 (b)不同弯曲率下“花生形”空气孔包层13芯铒镱共掺光纤内包层传输光谱特性测试结果^[65]

Fig. 6 Design and Transmission spectra of the 13-core erbium-ytterbium co-doped fiber with the peanut-shaped air-hole cladding structure. (a) Cross-sectional schematic of the 13-core erbium-ytterbium co-doped fiber with different air holes cladding structures. (b) Measured results of the inner-cladding transmission spectral characteristics for the 13-core erbium-ytterbium co-doped fiber with the peanut-shaped air-hole cladding structure at different bending rates.^[65]

在少模光纤放大器领域,华中科技大学李进延等人开展了一系列创新性研究。针对C波段的高效放大,该团队于2022年研制了一种M型折射率剖面的磷酸盐铒镱共掺少模光纤。该光纤在纤芯中心形成了一定的折射率凹陷,使得不同信号模式与掺杂离子的重叠因子相近,从而实现模间增益均衡。结果表明,在940 nm包层泵浦下,该放大器在1535~1565 nm的波长范围内,对LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁和LP₀₂四个模式组实现了最大增益超过28 dB的高增益,且平均差分模式增益(DMG)被成功控制在1.5 dB以内。图7显示了LP₀₁、LP_{11a}、LP_{21a}和LP₀₂四个模式通道在信号波长为1535 nm、功率为4.1 dBm时,总信号输出功率及泵浦转换效率随泵浦功率的变化关系。当泵浦

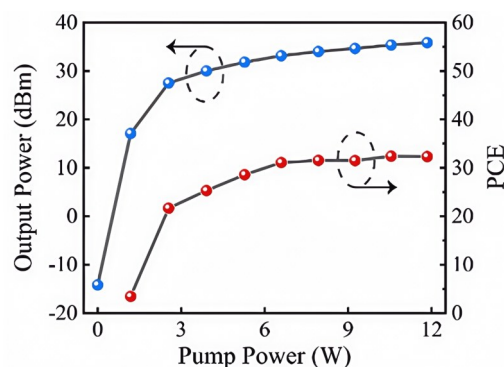


图7 信号波长为1535 nm、功率为4.1 dBm时,总信号输出功率及PCE随泵浦功率的变化^[66]

Fig. 7 Variation of total signal output power and PCE as a function of pump power for 1535 nm signal with input power of 4.1 dBm.^[66]

功率超过 11 W 时,该放大器的饱和输出功率超过了 35 dBm,泵浦转换效率高达 31%,验证了 M 型光纤结构在提升少模钕共掺光纤放大器效率与均衡性方面的显著优势^[66]。

在此基础上,为了进一步拓展通信容量,该团队随后提出了面向扩展 L 波段的少模放大方案。如图 8 所示,研究提出了一种“包层泵浦伪两级(Pseudo-two-stage)”结构的少模 EYDFA,该结构巧妙利用了光纤中产生的 C 波段前向 ASE 作为二次泵浦源,在光纤后段对 L 波段信号进行再放大。实验结果显示,在 940 nm 包层泵浦下,该放大器在 1570~1620 nm 范围内实现了 LP₀₁和 LP₁₁两个模式组的均衡放大,平均增益达 25 dB,且 DMG 被成功降低至 1 dB 以内^[67]。这一系列工作不仅解决了少模 EYDFA 在 C 波段的高效均衡放大问题,也为实现 L 波段的宽带模分复用传输提供了切实可行的技术路径。

2024 年吉林大学胡贵军等人从系统结构方面进一步提高少模 EYDFA 的性能。该团队通过

自主研发的少模泵浦合束器与少模隔离器,搭建了两级级联少模钕共掺光纤放大器,在 1535~1565 nm 波段范围内,成功实现了对 6 个空间模式(LP₀₁、LP_{11a}、LP_{11b}、LP_{21a}、LP_{21b} 和 LP₀₂)的同时放大,不仅获得了大于 40 dB 的平均模式增益和平均 5.5 dB 的噪声水平,同时 DMG 也控制在了 3 dB 以内^[68]。该工作通过搭建全光纤化的系统结构,证明了多级级联在综合提升少模 EYDFA 放大性能方面的巨大潜力。

为了进一步提升空间通道密度,可以将多芯结构与少模技术相结合,同时利用空间与模式两个维度,实现光纤通信系统传输容量的倍数级提升。基于此技术路径,2014 年南安普顿大学 Jain 等人针对多芯少模光纤进行了研究。研究人员在多单元光纤的基础上引入了少模技术,设计了一种包含 4 根钕共掺少模信号纤芯(每芯支持 3 个空间模式)和 1 根中心多模泵浦纤芯的“3 模 4 芯”MEF 放大器,实现了 12 个空间通道(4 芯×3 模)的并行放大。实验结果表明,在 7.6 W 的泵浦功率下,该放大器在 1542~1560 nm 范围内获得了 18.3 dB 的平均增益,且差分模态增益仅为 1.1 dB^[69]。这一工作成功验证了模分复用与多芯空分复用结合的可行性,为提升光纤空间密度提供了新的思路。

表 3 给出了基于空分复用技术的钕共掺光

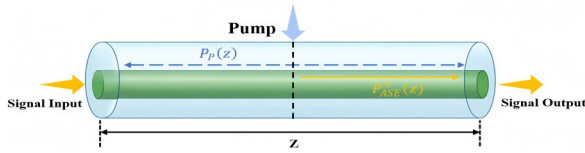


图 8 包层泵浦伪二级结构示意图^[67]

Fig. 8 Schematic of the cladding-pumped pseudo-two-stage^[67]

表 3 基于空分复用技术的钕共掺光纤及其放大器的实验研究进展

Tab. 3 Review of erbium-ytterbium co-doped fiber and its corresponding amplifier based on space-division multiplexing technology

年份	泵浦方式	泵浦功率/mW	空间通道	工作波长/nm	增益/dB	噪声/dB	参考文献
2014	960 nm 前向泵浦	6400	4 根单模信号单元	1536~1615	>17	-	[61]
2014	976 nm 前向泵浦	7600	3 模× 4 单元	1542~1560	平均 18.3 dB	-	[69]
2017	965 nm 侧面泵浦	16000	32 芯	1534~1561	>17	平均 6.5 dB	[62]
2022	双向泵浦	前向 2400 后向 7200	12 芯	1535~1585	~13.5	<8.2	[63]
2022	940 nm 后向泵浦	6600	LP ₀₁ LP ₁₁ LP ₂₁ LP ₀₂	1535~1565	平均 26.4 dB	-	[66]
2022	940 nm 后向泵浦	8800	LP ₀₁ LP ₁₁	1570~1620	>20	-	[67]
2023	1018 nm 前向泵浦	4000	4 芯	1575~1625	平均 22 dB	-	[64]
2024	976 nm 双向泵浦	前向 14000 后向 12000	13 芯	1529~1565	平均 23.8 dB	平均 4.6 dB	[65]
2024	915 nm 两级泵浦	前级 800 +后级 8000	LP ₀₁ LP _{11a} LP _{11b} LP _{21a} LP _{21b} LP ₀₂	1535~1565	平均模式 增益>40 dB	平均 5.5 dB	[68]

纤及其放大器的实验研究进展。在空分复用场景下,多芯/少模 EYDF 通过利用高功率多模泵浦源同时激励多个空间通道,有效降低了系统的单位比特功耗。然而,空分复用铒镱共掺光纤放大器要真正走向工程化仍面临挑战。一方面,在高增益和高输出功率条件下,多空间通道之间的增益均衡、噪声抑制和泵浦效率难以同时优化;另一方面,高可靠性的多芯/少模泵浦合束器、隔离器、扇入扇出器等配套无源器件仍制约系统集成。未来研究需进一步面向工程应用,研发高性能的全光纤器件、优化多芯及少模光纤的结构设计,以满足大容量、长距离空分复用通信系统的实际部署需求。

4 技术挑战与发展趋势

尽管铒镱共掺光纤在扩展 L 波段及高功率应用中已展现出显著优势,但在迈向下一代超宽带光通信系统的进程中,仍存在一些问题。

在磷硅酸盐铒镱共掺光纤中,虽然 P 的引入有效抑制了 Er^{3+} 向 Yb^{3+} 的能量逆向传递,但同时也会导致 Er^{3+} 的发射光谱变窄,使得增益带宽变窄。通过引入共掺离子(如 Al、La 等),利用不同离子对 Er^{3+} 局域配位场的协同修饰作用,有望在保持高能量传递效率的同时,有效展宽 Er^{3+} 的发射与吸收截面,缓解 P 引起的光谱窄化问题,从而获得宽带增益谱^[70-71]。但是不同共掺离子对吸收发射截面、SESA 效应以及光纤制备稳定性的影响程度并不相同。因此,未来 EYDF 需要从单一组分优化转向多组分协同调控。

在 9xx nm 包层泵浦 EYDFA 方案中,铒镱能量传递过程在提升泵浦效率的同时也极大促进了铒离子跃迁至激发态,导致铒离子在 C 波段产生大量 ASE,引起噪声恶化。未来发展仍需要在高效泵浦吸收和 ASE 噪声抑制两方面开展研究。一方面,可以通过合理调控 $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$ 比例,在保证高效的能量传递下,尽可能减少处于激发态的过剩粒子数,从而避免积累大量的放大自发辐射,造成系统噪声恶化;另一方面,也可以通过优化内包层几何结构、引入气孔辅助微结构等方式提高泵浦光约束能力。

空分复用技术通过引入多个空间通道大大提升了光纤通信系统的传输容量,但各个空间通道之间的均衡放大和系统集成仍是限制其面向工程应用的重要因素。对于多芯 EYDFA 而言,多个纤芯共用一个包层可以降低单位空间信道的泵浦功

耗,但泵浦光在不同纤芯之间的分布均匀性、芯间增益差以及芯间串扰仍需进一步控制。对于少模 EYDFA 而言,不同模式与掺杂区域的重叠因子不同,容易导致差分模态增益较大,影响模分复用系统的传输性能。此外,高可靠性的少模/多芯泵浦合束器、隔离器、扇入扇出器等配套无源器件仍不成熟,低损耗熔接和长期稳定运行也仍是工程化应用中的关键限制^[72-73]。未来空分复用 EYDFA 需从单根增益光纤优化,进一步走向增益光纤、无源器件与全光纤放大系统的协同设计。

传统 C 波段与 L 波段已逐渐逼近传输容量的香农极限,开发更长波长的 U 波段(1625~1675 nm)成为下一代超宽带光通信系统的有效手段^[74]。面向未来超大容量传输需求,EYDFA 将向更宽的 C+L+U 全波段演进。然而, Er^{3+} 的固有能级结构导致其难以提供除 C/L 波段之外的增益特性。通过在传统的磷硅酸盐玻璃中引入铋(Bi)、铥(Tm)等活性离子,构建多发光中心协同作用的增益介质,可以补充其他波段的增益,进而支持跨波段超宽带放大^[75]。例如,掺铋光纤(BDF)已在 1615~1795 nm 范围内展现出优异的增益特性^[76],若能在 EYDFA 的系统结构中借助 Bi 离子的近红外发光中心来填补 Er^{3+} 在 U 波段的增益短板,则有望实现覆盖 C+L+U 波段的超宽带放大。此外,将优化后的宽带 EYDF(C+L 波段)与掺铋光纤(U 波段)进行级联,通过发挥不同增益介质在特定波段的优势,有望构建出低噪声、高平坦度且覆盖多个通信波段的超宽带光纤放大系统。

5 总结与展望

在铒镱共掺光纤中,镱离子的引入一方面可有效缓解高浓度铒掺杂引起的离子团簇问题;另一方面也通过调控铒离子周围的局域配位场,有效抑制了 SESA,成功将增益带宽扩展至 1625 nm,为超短增益光纤及更长波段的光放大研究提供了探索方向。而针对包层泵浦方案中泵浦光吸收效率偏低的固有局限,EYDF 也凭借铒镱共掺体系中的能量传递机制,有效增加光纤的泵浦吸收,获得了高效率的泵浦能量转换,有助于实现高功率、低成本的宽带放大^[77]。此外,基于空分复用技术的多芯与少模 EYDF 也在实验室环境下完成性能验证,成功实现多信道并行信号放大,充分证明了 EYDF 在下一代大容量光通信系统中应用的可行性。

展望未来,对铒镱共掺光纤及其放大技术的研究还有很大的探索空间:进一步优化其噪声性能与增益平坦度;深入解决基于多芯少模光纤的空分复用技术在铒镱共掺体系中的应用难点,如不同信道之间的增益均衡等问题。随着 WDM/SDM 系统中信道数、空间通道数和泵浦配置复杂度的不断提高,铒镱共掺光纤放大器的多参数优

化也可进一步结合物理模型和优化算法,对泵浦功率、光纤长度、通道功率分布、芯间/模间增益差等参数进行协同优化,从而提升放大器在复杂光通信网络中的适配能力。总体而言,随着新型玻璃基质与共掺体系、泵浦配置、全光纤化器件和系统级优化方法的发展,铒镱共掺光纤及其放大器有望为下一代光通信系统发展带来新的可能。

参 考 文 献:

- [1] Chen Y W, Yi S Y, Ling G, *et al.* Real-time 400G CFP2-DCO using 69 GBaud/DP-16QAM- PS over 1000 km 75 GHz-spaced DWDM systems [C]. *Optical Fiber Communication Conference (OFC), Washington, DC, 2021*:Tu6D. 3.
- [2] 谈仲纬,吕超. 光纤通信技术发展现状与展望 [J]. *中国工程科学*, 2020,22(03):100-107.
TAN Z W, LU C. Optical fiber communication technology: present status and prospect [J]. *Strategic Study of CAE.*, 2020,22(03):100-107. (in Chinese)
- [3] MINELLY J D, GALVANAUSKAS A, FERMAN M E, *et al.* Femtosecond pulse amplification in cladding-pumped fibers. [J]. *Optics Letters.*, 1995,20(17),1797-1799.
- [4] EVEN P, PUREUR D. High-power double-clad fiber lasers: a review [C]. *Proceedings of Optical Devices for Fiber Communication III. San Jose, CA, USA, 2002*,4638:1-12
- [5] MEI Q S, BANSAL A, JAYAKUMAR M K G, *et al.* Manipulating energy migration within single lanthanide activator for switchable upconversion emissions towards bidirectional photoactivation [J]. *Nature. Communications.*, 2019, 10: 4416.
- [6] GILES C R, DESURVIRE E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology.*, 1991, 9(2):271-283.
- [7] AUDDO K, DAMIENS L, LAURENT A, *et al.* High power Yb-free Er-doped cladding pumped fiber amplifier for L-band operation [C] *Proceedings of Eighth International Workshop on Specialty Optical Fibers and Their Applications (WSOF 2025), Prague, Czech Republic, 2025*:13522
- [8] SHEN D Y, SAHU J K, CLARKSON W A. Highly efficient Er, Yb-doped fiber laser with 188W free-running and >100W tunable output power [J]. *Optics Express*, 2005, 13(13):4916-4921.
- [9] PASCHOTTA R, MILSSON J, TROPPER A C, *et al.* Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(7):1049-1056.
- [10] 李嘉强. C和L波段掺铒光纤放大器的研究 [D]. 天津:天津大学,2005
LI J Q. *Study on C-and L-band Erbium-doped fiber amplifiers* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005 (in Chinese)
- [11] 张盼盼. 铒/镱共掺双包层光纤放大器的性能优化 [D]. 西安:西安电子科技大学,2012
ZHANG P P. *Performance Optimization of Er³⁺/Yb³⁺ Co-doped Double-cladding Optical Fiber* [D]. Xi'an: Xidian University, 2012 (in Chinese)
- [12] PASK H M, CARMAN R J, HANNA D C, *et al.* Ytterbium-doped silica fiber lasers: versatile sources for the 1-1.2 μm region [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995,1(1):2-13.
- [13] DIANOV E M, FIRSTOV S V, MELKUMOV M A. Bismuth-doped optical fibers: advances and new developments [C] *Proceedings of The Workshop on Specialty Optical Fibers and their Applications, Hong Kong, China, 2015*:WT1A. 4.
- [14] DA N, YANG L Y, PENG M Y, *et al.* Preparation and spectroscopic properties of Er³⁺-doped high silica glass fabricated by sintering nanoporous glass [J]. *Materials Letters.*, 2006, 60(16):1987-1989.
- [15] REDDY A A, BABU S S, PRADEESH K, *et al.* Optical properties of highly Er³⁺-doped sodium-aluminium-phosphate glasses for broadband 1.5 μm emission [J]. *Journal of Alloys and Compounds.*, 2011, 509(9):4047-4052.
- [16] 宋昭远,邵秋峰,冯伟健,等. 掺铒镱铝硅酸盐玻璃的 Judd-Ofelt 理论分析与光谱特性 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2):0220001-1-6.
SONG Z Y, SHAO Q F, FENG W J, *et al.* Judd-ofelt theory analysis and spectroscopic properties of Er³⁺-doped cadmium aluminium silicate glass [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2017, 46(2): 0220001-1-6. (in Chinese)

- [17] KASAMATSU T, YANO Y, ONO T. Gain-shifted dual-wavelength-pumped thulium-doped fiber amplifier for WDM signals in the 1.48-1.51 μm wavelength region [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2001, 13(1):31-33.
- [18] VAN DIJK J M F, SCHUURMANS M F H. On the nonradiative and radiative decay rates and a modified exponential energy gap law for 4f-4f transitions in rare-earth ions [J]. *The Journal of Chemical Physics.*, 1983, 78(9):5317-5323.
- [19] REISFELD R, JORGENSEN C K. *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths* [M]. Amsterdam: Elsevier Science & Technology, 1987, 57(4):295-300.
- [20] GRUBB S G, CANNON R S, WINDHORN T W, *et al.* High-power sensitized erbium optical fiber amplifier [C] *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. San Diego, USA*, 1991:PD7.
- [21] VIENNE G G, CAPLEN J E, LIANG D, *et al.* Fabrication and characterization of $\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}$ phosphosilicate fibers for lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(11):1990-2001.
- [22] BOETTI N G, PUGLIESE D, CECI-GINISTRELLI E, *et al.* Highly doped phosphate glass fibers for compact lasers and amplifiers: a review [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(12):1295
- [23] TOWNSEND J E, POOLE S B, PAYNE D N. Solution-doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibres [J]. *Electronics Letters.*, 1987, 23(7):329-331.
- [24] AINSLIE B J. A review of the fabrication and properties of erbium-doped fibers for optical amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology.*, 1991, 9(2): 220-227.
- [25] TOWNSEND J E, BARNES W L, JEDRZEJEWSKI K P, *et al.* Yb^{3+} sensitised Er^{3+} doped silica optical fibre with ultra-high transfer efficiency and gain [J]. *Electronics Letters.*, 1991, 27(21):1958-1959.
- [26] WANG B S, PUB G, OSNATO R, *et al.* Characterization of gain spectral variation of erbium-doped fibers codoped with aluminum [C] *Asia-Pacific Optical and Wireless Communications, Wuhan China*, 2004, 5280:161-166.
- [27] JEONG Y, YOO S, CODEMARD C A, *et al.* Erbium: Ytterbium codoped large-core fiber laser with 297-W continuous-wave output power [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3):573-579.
- [28] DEISS Y J G, MCINTOSH C M, WILLIAMS G M, *et al.* Gain flatness of a 30 dBm tandem $\text{Er}^{3+}\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ double-clad fiber amplifier for WDM transmission [C] *Proceedings of Optical Fiber Communications Conference, Anaheim, California United States*, 2002:WJ6.
- [29] CHEN Y, LOU Y, GU Z M, *et al.* Extending the L-band amplification to 1623 nm using Er/Yb/P co-doped phosphosilicate fiber [J]. *Optics Letters.*, 2021, 46(23):5834-5837.
- [30] ZHAI Z, HALDER A, NUNEZ-VELAZQUEZ M, *et al.* Temperature-dependent study on L-band EDFA characteristics pumped at 980 nm and 1480 nm in phosphorus and aluminum-rich erbium-doped silica fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology.*, 2022, 40(14):4819-4824.
- [31] CHUNG H S, LEE M S, LEE D, *et al.* Low noise, high efficiency L-band EDFA with 980 nm pumping [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(13):1099-1100.
- [32] JALILPIRAN S, LEFEBVRE J, GRÉGOIRE N, *et al.* Improving extended L-band fiber amplifiers using $\text{Er}^{3+}:\text{Y}^{3+}$ co-doped silicate with optimized alumino-phospho-silicate glass matrix [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(10):3835-3843.
- [33] JALILPIRAN S, LEFEBVRE J, MESSADDEQ Y, *et al.* Rare-earth co-doping for improved power efficiency in extended L-band erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2025, 95:104443.
- [34] ZHAI Z W, SAHU J K. Progress in Er-doped fibers for extended L-band operation of amplifiers [J] *Optics Communications*, 2025, 578:131510.
- [35] LAW P, CROTEAU A, DRAGIC P. Acoustic coefficients of P_2O_5 -doped silica fiber: The strain-optic and strain-acoustic coefficients [J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(4):391-404.
- [36] SAMSONOV G V. *The Oxide Handbook* [M]. New York: Springer, 1973.
- [37] JALILPIRAN S, FUERTES V, LEFEBVRE J, *et al.* Baria-silica erbium-doped fibers for extended L-band amplification [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(14): 4806-4814.
- [38] DIMYATI K, HARUN S W. Compact and efficient Er-Yb-doped fiber amplifier [J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2008, 17(2): 193-198.
- [39] MUHD-YASSIN S Z, ANUAR M S K, ZULKIFII M I, *et al.* 56 dB Gain EYDFA with improved noise figure with dual-stage partial double pass configuration [J]. *Optik*, 2012, 123: 1884-1887.
- [40] BOLSHTYANSKY M, MANDELBAUM I, PAN F. Signal excited-state absorption in the L-band EDFA: simulation and

- measurements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(9): 2796-2799.
- [41] ZHAI Z W, SAHU J K. 1480 nm diode-pumped Er³⁺:Yb³⁺ co-doped phospho-alumino-silicate fiber for extending the L-band gain up to 1625 nm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(11): 3432-3437.
- [42] 阮继宇, 劳浩贤, 林漫冰, 等. 高增益二级双程L波段扩展掺铒光纤放大器[J]. *光学学报*, 2023, 43(22):2206006-1-6.
- RUAN J Y, LAO H X, LIN M B, *et al.* Extended L-band erbium-doped fiber amplifier with high gain using two-stage double-pass configuration [J]. *Acta Optica Sinica.*, 2023, 43(22):2206006-1-6. (in Chinese)
- [43] 林漫冰, 阮继宇, 劳浩贤, 等. 放大自发辐射辅助泵浦的L波段扩展掺铒光纤放大器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(13):1306007-1-6.
- LIN M B, RUAN J Y, LAO H X, *et al.* L-band extended EDFA co-pumped by backward ASE [J]. *Laser & Optoelectronics Progress.*, 2024, 61(13):1306007-1-6. (in Chinese)
- [44] SNITZER E, PO H, HAKIMI F, *et al.* Double clad, offset core Nd fiber laser [C] *Proceedings of The Optical Fiber Sensors, New Orleans, Louisiana United States*, 1988:PD5.
- [45] MATNIYAZ T, KONG F T, KALICHEVSKY-DONG M T, *et al.* 302 W single-mode power from an Er/Yb fiber MOPA [J]. *Optics Letters.*, 2020, 45(10):2910-2913.
- [46] DI PASQUALE F, GRASSO G, MELI F, *et al.* 23 dBm output power Er/Yb co-doped fiber amplifier for WDM signals in the 1575-1605 nm wavelength region [C] *Proceedings of The Optical Fiber Communication Conference and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, San Diego, California United States*, 1999:WA2.
- [47] CODEMARD C, SOH D B S, YLÄ-JARKKO K, *et al.* Cladding-pumped L-band phosphosilicate erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier [C] *Proceedings of The Optical Amplifiers and Their Applications, Otaru Japan*, 2003:TuC2.
- [48] WANG L X, SHARMA M, MAES F, *et al.* Low cost solution for super L-band fiber amplifier based on single-mode and multi-mode hybrid pumping scheme [C] *Proceedings of The Optical Fiber Communication Conference, San Diego, California United States*, 2022:W3J. 4.
- [49] HE L, CHEN Y, YIN X K, *et al.* High-efficiency cladding-pumped Er/Yb co-doped alumino-phosphosilicate fiber for an extended L-band amplification [J]. *Optics Letters.*, 2024, 49(1):61-64.
- [50] RABBANI H, JALILPIRAN S, LEFEBVRE J, *et al.* Hybrid pumping for optimized electrical power usage in cladding-pumped L-band amplifiers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2025, 37(2):69-72
- [51] SUPE A, OLONKINS S, UDALCOVS A, *et al.* Cladding-pumped erbium/ytterbium co-doped fiber amplifier for C-band operation in optical networks [J]. *Applied Sciences.*, 2021, 11(4): 1702.
- [52] ZAKIS K, OLONKINS S, UDALCOVS A, *et al.* Cladding-pumped Er/Yb-Co-doped fiber amplifier for multi-channel operation [J]. *Photonics*, 2022, 9(7):457.
- [53] FANG Z W, ZHAO Y F, JIANG X L, *et al.* Research on the amplification performance of Er/Yb/P Co-doped microstructured fiber in C+L band [C] *Fifteenth International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP 2024), Xi'an, China*, 2024, 13418:217-220.
- [54] SOBON G, SLIWINSKA D, ABRAMSKI K M, *et al.* 10 W single-mode Er/Yb co-doped all-fiber amplifier with suppressed Yb-ASE [J]. *Laser Physics Letters.*, 2014, 11(2):025103.
- [55] WEI S S, YAO B, CHEN Y J, *et al.* Cladding-pumped Erbium-Ytterbium co doped fiber amplifier with dual-wavelength auxiliary signal injection of 1030 and 1040 nm [J]. *IEEE Photonics Journal.*, 2020, 12(2):1501509
- [56] 何乐, 殷晓科, 陈阳, 等. 铒镱共掺光纤及其L波段放大性能研究[J]. *中国激光*, 2024, 51(13):1306003-1-7.
- HE L, YIN X K, CHEN Y, *et al.* Erbium-Ytterbium co-doped fiber and its amplification characteristics in L-band [J]. *Chinese Journal of Lasers.*, 2024, 51(13):1306003-1-7. (in Chinese)
- [57] DU J B, SHEN W H, LIU J C, *et al.* Mode division multiplexing: from photonic integration to optical fiber transmission [J]. *Chinese Optics Letters.*, 2021, 19(9):091301-1-24
- [58] 赵清华. 少模掺铒光纤放大器增益均衡的研究 [D]. 天津:天津大学, 2015
- ZHAO Q H. *Research in Gain Equalization of Few Mode Erbium Doped Fiber Amplifier* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015 (in Chinese)
- [59] JAIN S, SAKAMOTO T, JUNG Y, *et al.* High spatial channel count multicore SDM amplifiers [C] *Optical Fiber Communication Conference. Washington, DC United States*, 2021:M3D. 2.
- [60] LI G F, BAI N, ZHAO N B, *et al.* Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication [J]. *Advances*

- In Optics Photonics*, 2014, 6(4):413-487.
- [61] JAIN S, THIPPARAPU N K, BARUA P, *et al.* Cladding-pumped Er/Yb-doped multi-element fiber amplifier for wide-band applications [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 27(4):356-358.
- [62] 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.
- [63] LEBRETON A, JAOUËN Y, ANTONA J C, *et al.* Multi-core Erbium/Ytterbium doped fiber amplifier with extended bandwidth for submarine applications [C] *2022 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC)*, Toyama, Japan, 2022:TuC1-3.
- [64] HE L, QIU Q, YIN X K, *et al.* Extended L-band 4-Core Er/Yb co-doped fiber amplifier based on 1018 nm cladding pump [J]. *Optics Express*, 2023, 31(16):25557-25570.
- [65] ZHANG Y F, ZHAO Y F, FANG Z W, *et al.* A novel multicore Er/Yb co-doped microstructured optical fiber amplifier with peanut-shaped air holes cladding [J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(6):891-899.
- [66] QIU Q, GU Z M, HE L, *et al.* High power-efficiency, low DMG cladding-pumped few-mode Er/Yb/P co-doped fiber amplifier for mode division multiplexing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(22):7421-7430.
- [67] QIU Q, HE L, GU Z M, *et al.* Extended L-band few-mode Er/Yb Co-doped fiber amplifier with a cladding-pumped pseudo-two-stage configuration [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(12):2963-2966.
- [68] CHENG Y, MA W Q, HU G J. High-power, low noise, high gain few-mode fiber amplifier [J]. *Optics and Laser Technology*, 2024, 169:110008
- [69] JAIN S, JUNG Y, MAY-SMITH T C, *et al.* Few-mode multi-element fiber amplifier for mode division multiplexing [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23):29031-29036.
- [70] GUAN B O, TAM H Y, LIU S Y, *et al.* Ultrawide-band La-codoped Bi₂O₃-based EDFA for L-band DWDM systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(11):1525-1527.
- [71] ZENG L Z, WEN J X, WU Y, *et al.* Exceeding 25 dB gain broad-spectrum amplification in L-band based on a Bi/Er/La co-doped silica fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(18):990-993.
- [72] 褚应波, 李进延. 宽带放大光纤研究进展及发展趋势 [J]. *发光学报*, 2022, 43(11):1678-1689.
CHU Y B, LI J Y. Research progress and development trend of broadband amplified optical fiber [J]. *Chinese Journal of Luminescence.*, 2022, 43(11):1678-1689. (in Chinese)
- [73] 赵新月, 邱强, 褚应波, 等. 少模掺铒光纤及其放大器研究进展 [J]. *发光学报*, 2022, 43(12):1915-1927.
ZHAO X Y, QIU Q, CHU Y B, *et al.* Research progress on few-mode erbium-doped fiber and its corresponding amplifier [J]. *Chinese Journal of Luminescence.*, 2022, 43(12):1915-1927. (in Chinese)
- [74] 文建湘, 庞拂飞, 杨媛媛, 等. 超宽带光纤放大器研究进展与发展瓶颈(特邀) [J]. *光学学报*, 2025, 45(13):226-241.
WEN J X, PANG F F, YANG Y Y, *et al.* Research progress and development bottleneck of ultra-wideband fiber amplifiers (Invited) [J]. *Acta Optica Sinica.*, 2025, 45(13):226-241. (in Chinese)
- [75] ZINAT M S, ZHANG J Z, LUO Y H, *et al.* Improving broadband emission within Bi/Er doped silicate fibres with Yb codoping [J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(10):2096-2105.
- [76] FIRSTOV S V, ALYSHEV S V, RIUMKIN K E, *et al.* A 23-dB bismuth-doped optical fiber amplifier for a 1700-nm band [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:28939.
- [77] SAKAMOTO T, IMADA R, NAKAJIMA K. Wavelength dependence of optimum core-to-cladding ratio for power efficient cladding-pumped coupled multi-core EDFA [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(12):3860-3865.



郑晓丹(2002-),女,广东汕头人,硕士研究生,2024年于深圳大学获得学士学位,主要从事铒镨共掺光纤及其放大技术的研究。

E-mail: zxd0316@hust.edu.cn



李进延(1972-),男,青海西宁人,博士,教授,2001年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事掺稀土光纤、光子晶体光纤等特种光纤、光纤激光器和光纤传感器等领域的研究。

E-mail: lji@mail.hust.edu.cn