2022年12月

文章编号:1000-7032(2022)12-1915-13

# 少模掺铒光纤及其放大器研究进展

赵新月,邱强,褚应波,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:基于少模和多芯光纤的空分复用技术被认为是未来大幅提高单根光纤数据传输容量最重要的技术之一。采用少模光纤的空分复用技术要实现长距离传输,少模掺铒光纤放大器(Few-mode erbium-doped fiber amplifier,FM-EDFA)是补偿光纤传输损耗的关键器件,而少模掺铒光纤决定了FM-EDFA的性能。相对于单模掺 铒光纤而言,少模掺铒光纤除了有增益、带宽、噪声等基本指标之外,还有一个独特的指标——差分模态增益。 高差分模态增益会导致系统中断概率的提升,因此在少模掺铒光纤放大器中最小化差分模态增益以保持信号 质量至关重要。本文系统阐述了差分模态增益的产生机理及改善策略,总结了少模掺铒光纤的不同设计,对 比了采用不同设计及基于不同泵浦方式的少模掺铒放大光纤的性能特点,并对少模掺铒光纤的放大性能研究 做出了展望。

**关 键 词:**少模掺铒光纤;少模掺铒光纤放大器;增益;差分模态增益;包层泵浦;纤芯泵浦 中图分类号:0436 **文献标识码:** A **DOI**: 10. 37188/CJL. 20220246

### **Research Progress on Few-mode Erbium-doped Fiber and Its Corresponding Amplifier**

ZHAO Xin-yue, QIU Qiang, CHU Ying-bo, DAI Neng-li, LI Jin-yan<sup>\*</sup> (Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China) \* Corresponding Author, E-mail: ljy@hust. edu. cn

**Abstract:** Space division multiplexing technology based on few-mode fiber (FMF) and multi-core fiber is considered to be one of the most important technologies to greatly improve the data transmission capacity of a single fiber in the future. If we want to employ FMF in space division multiplexing to realize a long-haul transmission system, few-mode erbium-doped fiber amplifiers (FM-EDFAs) will be a key block to compensate for the fiber transmission loss while its performance is determined by few-mode erbium-doped fiber (FM-EDF). In addition to fundamental indexes like gain, bandwidth and noise figure, few-mode erbium-doped fiber has a unique index—differential modal gain (DMG) compared with the single-mode erbium-doped fiber. Minimizing DMG to maintain signal quality is critical in FM-EDFAs as the high differential modal gain can improve the potential for system outage. In this paper, the generation mechanism and improvement strategies of differential modal gain are systematically described, the different designs of FM-EDF are summarized, the performance characteristics of FM-EDF based on different pumping methods and different designs are compared, and the research on the performance of FM-EDF is prospected.

Key words: few-mode erbium-doped fiber; few-mode erbium-doped fiber amplifier; gain; differential modal gain; cladding-pumped; core-pumped

收稿日期: 2022-06-23;修订日期: 2022-07-09

基金项目:国家自然科学基金(61805093)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61805093)

#### 1引言

随着下一代移动宽带技术的发展,人们对高数据速率(例如实时游戏,社交网络,云计算和大数据分析)的应用需求不断增加,但现有的单模光纤通信系统的传输容量已经趋近理论极限<sup>(1)</sup>(香农极限)。因此,人们迫切地需要开发新的信息传输维度,来满足日益增长的网络容量需求。在单模光纤的其他复用维度,如波分复用、时分复用、 正交频分复用、码分复用等已经被充分利用的基础上<sup>(2)</sup>,且基于其传输带宽有限、不能实现无限扩展的事实,扩展光纤的空间维度,即对光纤进行空分复用,在大容量光纤通信系统中得到了广泛关注并迅速发展。基于少模光纤的模分复用技术, 作为空分复用技术的一种,可进一步提高单根光 纤的传输容量<sup>(3-4)</sup>,自提出以来就广受研究者的青睐并得到了深入研究。

少模掺铒光纤主要采用改进的化学气相沉积 (Modified chemical vapor deposition, MCVD) 工艺 结合溶液掺杂技术<sup>51</sup>进行制备。通过对芯径、掺 杂和折射率剖面等调控,使其支持多个空间传输 模式。2011年,英国南安普顿大学66首次拉制出 支持两种模式的少模掺铒光纤,采用980 nm激光 进行后向泵浦,在1550~1560 nm 波段实现了20 dB以上的增益。此后,不同类型的少模掺铒光纤 开始出现,围绕少模掺铒放大光纤的制作工艺、传 输模式数量、工作波长、增益、差分模态增益、噪声 等方面展开。采用少模光纤作为传输线的空分复 用技术要实现长距离传输,少模掺铒光纤放大器 是补偿光纤传输损耗的关键器件<sup>17</sup>。然而,在少 模掺铒光纤放大器中, 高差分模态增益(Differential modal gain, DMG)会导致系统中断概率的提 高,影响信号质量<sup>[8]</sup>。

降低 DMG 可以从两个不同的方面来实现<sup>[9-10]</sup>:一是从少模掺铒放大光纤入手,对铒离子掺杂分布(如环形掺杂<sup>[11-21]</sup>、均匀掺杂<sup>[22-23]</sup>、大面积掺杂<sup>[24]</sup>等)及折射率的结构(如环形折射率<sup>[25-27]</sup>、折射率沟道<sup>[23,28]</sup>、阶跃折射率<sup>[29-33]</sup>等)进行设计;二是从放大器结构入手,采用不同的泵浦方式(如纤芯泵浦<sup>[25-27,29-33]</sup>、包层泵浦<sup>[22-24,28,34-37]</sup>)进行调控。2018年,天津大学李桂芳课题组<sup>[23]</sup>提出同时传输12个模群21个空间模式的具有折射率沟道辅助的双包层少模掺铒放大光纤,是目前可以实现的最大

模式数目。采用包层泵浦的方式在1530~1565 nm波段实现了15dB的平均增益,差分模态增益 低于3dB。未来,少模掺铒放大光纤将会传输越 来越多的信号模式,所需要的泵浦能量也会越来 越多。如何在实现更多模式的情况下增益更高、 差分模态增益更低、少模掺铒光纤放大器的体积 与能耗更低、少模掺铒放大光纤的制作工艺更简 单等问题仍亟待解决,深入探究少模掺铒光纤的 放大性能并更好地控制差分模态增益将对加速其 产业化应用具有重要意义。

基于 DMG 的产生机理,本文将从降低 DMG 的方式入手,分析少模掺铒光纤的不同结构设计, 并对采用不同设计及基于不同泵浦方式的少模掺 铒放大光纤的放大性能进行综述总结,最后对少 模掺铒放大光纤的未来研究方向及发展趋势做出 总结展望。

#### 2 差分模态增益

在光纤波导中,电磁波在纵向(轴向)以"行 波"的形式存在,在横向以"驻波"的形式存在。场 分布沿轴向的变化只体现在相位上,场的强度不 随轴向传播距离而变化。因此,可以对光纤中的 光场进行纵横分离<sup>[38]</sup>。对于三维模式光场,根据 模场有无纵向分量,可以把光纤中的模式分为3 类:(1)横电磁模(TEM),模式只有横向分量,而无 纵向分量;(2)横电模(TE)或横磁模(TM),模式只 有一个纵向分量;(3)混杂模(HE或EH),模式的 两个纵向分量都不为0<sup>[39]</sup>。一般光纤的相对折射 率差值约为10<sup>-2</sup>,此时,光纤纤芯的折射率近似等 于包层的折射率,光纤对电磁波的约束和引导作 用大为减弱,通常将这种近似称为"弱导近似"。 在弱导近似下,具有相同色散方程的矢量模合并, 又被称为线性偏振(Linear polarized,LP)模<sup>[40]</sup>。

从本质上来说,光纤中的横模是光波电磁场 在光纤横截面上的一种空间分布形式,或者说是 光纤横截面上的一种能量分布形式<sup>[41]</sup>。模分复用 作为空分复用的一种,是利用光纤中相互正交的 传输模式作为独立的信道进行信号的并行传输, 基于少模光纤的模分复用传输系统一般支持有限 数目的线偏振模式。对于少模掺铒光纤放大器而 言,除了放大器增益、噪声指数、工作波长、输出功 率等常规放大器需要关注的特征参数之外,还有 一个少模掺铒光纤放大器所特有的重要参数—— 差分模态增益。 差分模态增益的产生机理及改善策略:定义 信号模式 *l* 在少模掺铒光纤放大器中传输的增 益为<sup>[42]</sup>:

$$G_{l}(\mathrm{dB}) = 10 \mathrm{lg}_{10} \left( \frac{P_{l-\mathrm{out}}}{P_{l-\mathrm{in}}} \right), \qquad (1)$$

其中,P<sub>Lout</sub>为第l个信号模式经过少模掺铒光纤放 大器后输出的功率,P<sub>Lin</sub>为第l个信号模式输入到 少模掺铒光纤放大器的功率。

要实现少模掺铒光纤放大器的信号模式增益 均衡,就要实现在同一信号波长下,信号模式*m*和 *n*的增益一致或相近,须有如下公式成立<sup>[2]</sup>:

$$\frac{\mathrm{d}P^{n}(z)}{\mathrm{d}z} = \frac{\mathrm{d}P^{n}(z)}{\mathrm{d}z},\tag{2}$$

定义交叠积分因子[43-44]为:

$$n_{p}^{s} = \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{a} i_{s}^{i}(r,\varphi) i_{p}(r,\varphi) n_{0}(r,\varphi) r dr d\varphi, \quad (3)$$

其中,a为纤芯半径, $i_p(r,\varphi)$ 代表泵浦模式的归一 化光强分布, $i_s^l(r,\varphi)$ 代表信号模式l的归一化光强 分布, $n_0(r,\varphi)$ 为铒离子在光纤横截面上的分布。

假设所有的信号模式在输入端z=0处具有相同的光强,而单一泵浦模式的光强远大于信号模式,若要公式(2)成立,需满足<sup>[2]</sup>:

$$\int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{a} i_{s}^{m}(r,\varphi) i_{p}(r,\varphi) n_{0}(r,\varphi) r dr d\varphi =$$
$$\int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{a} i_{s}^{n}(r,\varphi) i_{p}(r,\varphi) n_{0}(r,\varphi) r dr d\varphi, \qquad (4)$$

由此可见,相近的模场分布会具有更大的交叠 积分因子 n<sup>\*</sup><sub>p</sub>,即信号模式、泵浦模式和铒离子分 布的交叠程度更大,则信号获得的增益更大。 在少模掺铒光纤放大器中,DMG是由于放大过 程中,每个信号模式光场、泵浦光场以及铒离子 分布三者在光纤横截面的重叠不一致,导致不 同模式在少模光纤中的放大所获得的增益不相同。

因此,可以通过设计少模掺铒光纤的折射率 剖面和铒离子浓度分布、调控泵浦模式配比来优 化重叠因子,使每个信号模式的重叠积分尽可能 相等,从而实现少模掺铒光纤放大器(Few-mode erbium-doped fiber amplifier,FM-EDFA)中不同模 式之间的增益均衡。

#### 3 少模掺铒光纤设计

对少模掺铒光纤的折射率剖面进行设计,可 以调整光纤中传输的信号模式的模场分布,进而 降低光纤中各模式交叠积分因子之间的差值,从 而实现增益均衡。而对稀土掺杂离子的分布进行 调控,可以通过调整铒离子的掺杂位置及浓度,使 得各信号模式之间的重叠积分因子差异降低,从 而实现DMG的降低。

2011年,英国南安普顿大学<sup>[6]</sup>通过实验验证 了采用光纤设计结合泵浦模场的控制来降低 DMG,提出了两种折射率分布不同的少模掺铒放 大光纤,分别用 Fiber#1和 Fiber#2表示。Fiber#1 的纤芯中心折射率较高,Fiber#2的纤芯中心折射 率较低,折射率分布分别如图1(a)、(b)所示,铒 离子掺杂剖面与光纤的折射率分布相似。在相同 的实验条件下分别对 Fiber#1和 Fiber#2进行实 验,采用偏置泵浦后向发射的方式,Fiber#2光纤 中传输的 LP<sub>01</sub>和 LP<sub>11</sub>模式的平均增益为 22 dB, DMG 可以降到1 dB。实验结果表明,通过对少模 掺铒光纤的纤芯中心折射率分布进行设计,结合 对泵浦模场分布的控制,可以较好地实现 FM-ED-FA 的增益均衡。





而在纤芯的边缘引入一个折射率沟道,可 以将模式都限制在纤芯内,从而使得每个模式 的重叠积分因子尽可能相等,进而实现模式间 增益均衡。2018年,印度理工学院仿真设计了 一种沟道辅助型的折射率分布<sup>[45]</sup>,光纤的折射 率分布及掺杂分布如图 2(a)所示。通过在少 模掺铒光纤的纤芯折射率边缘添加沟道,结合 环形铒离子掺杂分布,即在纤芯的外围掺杂铒 离子、而纤芯的中心不掺杂铒离子,可以较好地 实现 C 波段 FM-EDFA 的增益均衡。对该少模 掺铒光纤进行仿真模拟,采用LP<sub>01</sub>模式进行泵 浦,通过调整沟道的宽度及折射率,可以实现5 个模群(LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>、LP<sub>31</sub>、LP<sub>41</sub>)的均衡放 大,各模群的增益均达到20dB以上,差分模态 增益为0.45dB左右。信号模式及泵浦模式的 模斑图如图2(b)所示。



Fig.2 (a)Trench-assisted refractive index profile. (b)Mode profiles of signal and pump mode groups<sup>[45]</sup>.

对少模掺铒光纤铒离子掺杂剖面的设计除了 环形掺杂分布之外,还有超过纤芯范围的大面积 掺杂。由于不同模式的模场半径不同,有的模式 的模场半径可能会超过纤芯,而超过纤芯范围的 大面积掺杂可以覆盖到所有的模式,降低模式间 重叠积分因子的差异,从而实现增益均衡。2016 年,日本KDDI电信公司<sup>[24]</sup>的研究人员提出了超过 纤芯范围的大面积铒掺杂少模放大光纤,纤芯直 径为12.5 μm,而铒离子掺杂区域直径为25 μm, 如图3(a)~(b)所示。通过增加铒离子的掺杂范 围,使得不同信号模式在铒离子掺杂区域内的重 叠积分因子的差别变小,使用前向包层泵浦时能 有效地实现模态均衡。对该少模掺铒光纤进行 实验,该光纤可以在C波段实现四模群24 dB的 平均增益,差分模态增益小于3.3 dB,如图3(c) 所示。



图 3 (a)小面积掺杂(左)和大面积掺杂(右)情况下的模场和增益介质之间的重叠;(b)大面积掺杂少模掺铒放大光纤铒 离子浓度及相对折射率分布;(c)不同信号模式的增益随波长变化<sup>[24]</sup>。

Fig.3 (a)Overlaps between mode fields and gain media in a small doped area(left) and a large doped area(right). (b)Profile of a fabricated double-cladding fiber with a large erbium-doped area. (c)Gain spectra for every mode as a function of wavelength<sup>[24]</sup>.

由于采用MCVD工艺拉制出的少模掺铒放大 光纤达不到设计的折射率及掺杂结构的理想结 果,而使用多根折射率和掺杂分布不同的预制棒 进行组合之后再拉制,可以实现复杂的设计结构。 2013年,法国里尔第一大学提出了采用空气或二 氧化硅光子晶体光纤来制作少模掺铒光纤<sup>[46]</sup>,将 纯二氧化硅棒与不同浓度的铒掺杂二氧化硅棒共 19根进行组合,再拉制成纤芯,包层为空气孔二 氧化硅材料,如图4(a)所示,实现了纤芯内铒离 子浓度的突变。通过仿真验证,最终实现四模群 21 dB的平均增益,差分模态增益小于2 dB,如图 4(b)所示。



图4 (a)光子晶体光纤中的微结构铒掺杂分布;(b)不同信号模式的增益随波长变化<sup>[46]</sup>。

Fig.4 (a) Micro-structured erbium-doped profile in the photonic crystal fiber. (b) Gain spectra for every mode as a function of wavelength<sup>[46]</sup>.

4 纤芯泵浦少模掺铒光纤及其放

大器

当少模掺铒光纤采用纤芯泵浦时,不同的信

号空间模式在纤芯中与泵浦强度分布及铒离子分 布的重叠不同,导致少模掺铒放大光纤的增益不 均衡。表1给出了基于纤芯泵浦的少模掺铒光纤 及其放大器的实验研究进展。

表1	基于纤芯泵浦的少模掺铒光纤及其放大器的实验研究进展
----	---------------------------

Tab. 1 Review of few-mode erbium-doped fiber and its corresponding amplifier based on core-pumped

年份	支持	掺杂结构	折射率	光纤尺寸/	泵浦方式	工作波长/	光纤长	Gain/	DMG/	NF/	参考
	模式		结构	$\mu m$		nm	度/m	$^{\rm dB}$	dB	$\mathrm{dB}$	文献
2013	$\mathrm{LP}_{01}\mathrm{LP}_{11}$	环形掺杂	阶跃折射率	10.4/—	LP <sub>01</sub> 前向泵浦	1 530~1 565	4	>15	2.5	<5.5	[29]
2014	$\begin{array}{l} \mathrm{LP}_{01}\mathrm{LP}_{11}\\ \mathrm{LP}_{21}\mathrm{LP}_{02}\end{array}$	环形掺杂	阶跃折射率	18. 7/163	LP <sub>21</sub> 双向泵浦	1 535~1 560	5	>20	3	_	[30]
2015	$\mathrm{LP}_{01}\mathrm{LP}_{11}$	环形掺杂	环形折射率	8.8/124.8	LP11前向泵浦	1 530~1 560	3	17	<0.8	<5	[26]
2015	$\mathrm{LP}_{01}\mathrm{LP}_{11}$	环形掺杂	环形折射率	18/—	LP <sub>11</sub> 双向泵浦	1 570~1 600	—	18	<1	—	[27]
2016	$\begin{array}{l} \mathrm{LP}_{01}\mathrm{LP}_{11}\\ \mathrm{LP}_{21}\mathrm{LP}_{02}\end{array}$	均匀掺杂	阶跃折射率	13/163	LP <sub>21</sub> 前向泵浦	1 535~1 565	5	>10	5	_	[31]
2017	LP <sub>01</sub> LP <sub>11</sub> LP <sub>21</sub>	环形掺杂	环形折射率	18/—	LP <sub>01</sub> 前向泵浦	1 570~1 605	48	21	4.5	<8.2	[25]
2019	$\begin{array}{l} \mathrm{LP}_{01}\mathrm{LP}_{11}\\ \mathrm{LP}_{21}\mathrm{LP}_{02}\end{array}$	双环掺杂	阶跃折射率	20/	LP <sub>01</sub> 前向泵浦	1 530~1 565	1.85	15	4	<9	[32]
2020	$LP_{01}LP_{11}$	均匀掺杂	阶跃折射率	—/—	LP <sub>01</sub> 前向泵浦	1 530~1 570	21	23	1	—	[33]

2013年,美国NEC实验室的研究人员<sup>[29]</sup>提出 了具有阶跃折射率分布的环形少模掺铒放大光 纤,结合980 nm 泵浦光源、以LP<sub>01</sub>模式为泵浦模 式对少模掺铒放大光纤进行纤芯泵浦,将LP<sub>01</sub>模 式和LP<sub>11</sub>模式之间的差分模态增益降到了2.5 dB 以下。2014年,英国南安普顿大学光电子研究中 心<sup>[30]</sup>采用LP<sub>21</sub>模式作为泵浦模式,对具有环形掺 杂的少模掺铒放大光纤进行泵浦。少模掺铒光纤 的掺杂结构如图5(a)所示,折射率剖面及掺杂离 子浓度分布如图5(b)所示<sup>[47]</sup>,实现了波长在 1535~1560 nm 范围内4个模式20 dB以上的增 益,差分模态增益小于3dB。

2015年,日本电报电话公司同样提出具有阶 跃折射率的环形掺铒光纤,结合LP<sub>11</sub>模式的泵浦 优化,在1530~1560 nm 波段<sup>[26]</sup>和1570~1600 nm 波段<sup>[27]</sup>均实现了1dB以下的差分模态增益。2016 年,美国中佛罗里达大学<sup>[31]</sup>使用自制少模掺铒放 大光纤,结合模式选择光子灯笼来控制泵浦模式 含量,选择LP<sub>21</sub>模式作为泵浦模式,在1535~ 1565 nm 波段实现了4个模群的同时放大,增益 大于10dB,差分模态增益小于5dB。

2017年,日本电报电话公司[25]为了减小少模



图 5 环形铒掺杂少模光纤。(a)铒离子径向分布<sup>[47]</sup>;(b)折射率剖面及掺杂离子浓度分布<sup>[47]</sup>;(c)不同信号模式的增益 随波长变化<sup>[30]</sup>。



掺铒放大光纤与具有渐变折射率结构的传输光 纤之间的模场不匹配情况,对比设计了两种不 同折射率结构的环形少模掺铒放大光纤:一种 是具有环形剖面的阶跃折射率结构,如图6(a) 所示;图6(b)是根据图6(a)的设计拉制出来的 光纤的实际铒离子掺杂及相对折射率分布,选 择 LP<sub>01</sub>模式进行纤芯前向泵浦,可以在1570~ 1 605 nm 波段实现 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub> 三个模群 15 dB 以上的增益,差分模态增益低于 6 dB,噪声 指数低于 10 dB,如图 6(c)所示。另一种是中 心凹陷的阶跃折射率结构,如图 7(a)所示;图 7(b)是根据图 7(a)的设计拉制出来的光纤的 实际铒离子掺杂及相对折射率分布,同样选择 LP<sub>01</sub>模式进行纤芯前向泵浦,可以在 1 570~





Fig.6 (a) Relative index and erbium concentration profile(filled region) of ring-shaped core profile for both erbium concentration and refractive index. (b) Refractive index profiles and erbium concentration profiles. (c) Gain and NF spectra for every mode as a function of wavelength across the C-band<sup>[25]</sup>.



图 7 (a)中心凹陷的相对折射率及铒离子掺杂分布设计图;(b)中心凹陷的相对折射率及铒离子掺杂分布实际图;(c)不同信号模式的增益及噪声随波长变化<sup>[25]</sup>。

Fig.7 (a) Relative index and erbium concentration profile(filled region) of center depressed core profile for erbium concentration and refractive index. (b) Refractive index profiles and erbium concentration profiles. (c) Gain and NF spectra for every mode as a function of wavelength across the C-band<sup>[25]</sup>.

2018年,法国里尔第一大学再次提出使用微结构纤芯组合再拉制的方法制作少模掺铒放大光纤<sup>(48]</sup>, 实现微结构少模掺铒放大光纤的过程示意图如图 8(a)所示。纤芯区域支持由19根铒离子均匀掺杂的 纤芯间的光耦合产生的超模,这些超模在19根铒离 子掺杂的纤芯中呈现极大值,从而增加了信号光模 式、泵浦光模式与铒离子掺杂之间的重叠积分。通过 仿真,结合LP<sub>31a</sub>、LP<sub>12</sub>、LP<sub>22a</sub>模式进行泵浦,该微结构 少模掺铒放大光纤可以实现6个模群19dB的平均增 益,差分模态增益小于1.1dB,如图8(b)所示。



图 8 (a)微结构少模掺铒放大光纤的实现过程示意图;(b)不同信号模式的增益及 DMG 随波长变化<sup>[48]</sup>。

Fig.8 (a) Schematic description of the process used to realize a few-mode amplified fiber with micro structure. (b) Gain and DMG spectra for every mode as a function of wavelength across the C-band<sup>[48]</sup>.

2019年,天津大学李小英课题组<sup>[32]</sup>提出了一 种具有双环形掺杂结构的少模掺铒放大光纤,双 环少模掺铒放大光纤的截面图如图9(a)所示。 在拉制的过程中,由于离子的扩散效应以及其他 缺陷,导致铒离子的分布与最初的设计相异,呈现 "蝙蝠侠"状,如图9(b)所示。光纤具有简单的双 环形结构,其中,外环的铒离子浓度高于内环的铒 离子浓度。在LP<sub>01</sub>模式进行纤芯前向泵浦的情况 下,可以在1530~1565 nm 波段实现四模群 15 dB 以上的增益,差分模态增益小于4 dB,如图 9(c) 所示;噪声指数低于9 dB,如图 9(d)所示。采用 双环形铒离子掺杂分布,且两个环的铒离子浓度 不同,仅调控铒离子的浓度及分布,最终实现四模 群的增益均衡。



图9 双环形少模掺铒放大光纤。(a)铒离子分布截面图;(b)相对折射率及铒离子浓度分布;(c)不同信号模式的增益随 波长变化;(d)不同信号模式的噪声指数随波长变化<sup>[32]</sup>。

Fig.9 FM-EDFA with two-layer erbium-doped structure. (a) Cross section of the erbium ions. (b) The profile of the relative refractive index and erbium ion concentration. (c) Gain spectra for every mode as a function of wavelength across the Cband. (d)NF spectra for every mode as a function of wavelength across the C-band<sup>[32]</sup>.

2020年,日本电报电话公司<sup>[33]</sup>提出采用飞秒 激光技术在少模掺铒光纤的纤芯中刻蚀空隙来 减少差分模态增益,基于激光刻蚀技术的概念图 如图 10(a)所示。图 10(a)也显示了在1550 nm 处计算的 LP<sub>01</sub>和 LP<sub>11</sub>模式的电场分布,从图中可 以看出,当空隙的直径为5 μm时,LP<sub>01</sub>模式的电 场受到了较大的影响,纤芯中心的场强极大地降低;而空隙对 LP<sub>11</sub>模式的电场影响有限,表明激 光刻蚀的空隙可以选择性地衰减少模掺铒光纤 的 LP<sub>01</sub>模式。通过研究空隙直径对 LP<sub>01</sub>和 LP<sub>11</sub> 两个模式的衰减情况,最终使用直径为 6.8 μm 的空隙进行实验,采用纤芯泵浦的泵浦方式,实

 $\Delta G_{01-11}/\mathrm{dB}$ 

验结果如图 10(b)所示。在 1 530~1 570 nm 范围 内实现了 23 dB 的平均增益,差分模态增益在





图 10 (a)基于激光刻蚀降低 DMG 技术概念图;(b)不同信号模式的增益和 DMG 随波长变化<sup>[33]</sup>。 Fig.10 (a)Conceptual diagram of laser inscription based DMG reduction technique. (b)Gain and DMG spectra for every mode

as a function of wavelength across the C-band<sup>[33]</sup>.

对于基于纤芯泵浦的少模掺铒放大光纤而 言,从模式数量角度来分析,随着光纤传输的空间 模式增加到10个以上或者更多,单模泵浦很难满 足泵浦功率的要求。若使用多个单模泵浦并行来 满足泵浦要求,原理上可行,但造价极其昂贵且体 积较大,不利于FM-EDFA投入使用。此外,基于 纤芯泵浦的少模掺铒放大光纤需要特殊结构的少 模掺铒光纤以使得不同模式的信号光场、泵浦光 场及铒离子分布之间的重叠差异最小,从而降低 差分模态增益。随着模式数量的增多,为了实现 模态均衡,会对光纤的设计、制备以及泵浦模态的 调控提出更高的要求,从而限制了可用模式通道的数量。

## 5 包层泵浦少模掺铒光纤及其放 大器

当少模掺铒放大光纤采用包层泵浦时,100 多种空间泵浦模式在少模掺铒光纤的包层中传 输<sup>[49]</sup>,泵浦功率近似均匀分布于光纤的横截面上。 此时,泵浦模场的影响可以忽略,FM-EDFA的差 分模态增益仅由信号模式强度和铒离子分布的重 叠决定。表2给出了基于包层泵浦的少模掺铒光

表2 基于包层泵浦的少模掺铒光纤及其放大器的实验研究进展

Tab. 2 Review of few-mode erbium-doped fiber and its corresponding amplifier based on cladding-pumped											
年份	支持模式	掺杂	折射率	光纤尺寸/	石油十十	工作波长/	光纤	Gain/	DMG/	NF/	参考
		结构	结构	$\mu m$	来佃力式	nm	长度/m	$^{\mathrm{dB}}$	dB	$^{\rm dB}$	文献
2011	$\mathrm{LP}_{01}\mathrm{LP}_{11a}$	均匀掺杂	类阶跃折射率	20/—	后向泵浦	1 535~1 565	5	23	1	—	[6]
2014	$LP_{01}LP_{11}$	均匀掺杂	阶跃折射率	8/80	前向泵浦	1 535~1 560	3.25	20	3	<13	[34]
2014	$\begin{array}{c} \mathrm{LP}_{01}\mathrm{LP}_{11}\\ \mathrm{LP}_{21}\mathrm{LP}_{02}\end{array}$	均匀掺杂	沟道辅助	26/97	后向泵浦	1 534~1 565	3.5	23	3	<8	[28]
2016	$LP_{01}LP_{11}$ $LP_{21}LP_{02}$	均匀掺杂	阶跃折射率	12.5/62.5	前向泵浦	1 535~1 563	10	24	3.3	_	[24]
2016	$\begin{array}{c} {\rm LP}_{_{01}}{\rm LP}_{_{11}}{\rm LP}_{_{21}}\\ {\rm LP}_{_{31}}{\rm LP}_{_{41}}{\rm LP}_{_{51}}\\ {\rm LP}_{_{61}}\end{array}$	均匀掺杂	_	24/73	前向泵浦	1 530~1 560	1.2	17	2	_	[35]
2017	$\begin{array}{c} {\rm LP}_{_{01}}{\rm LP}_{_{11}}{\rm LP}_{_{21}}\\ {\rm LP}_{_{31}}{\rm LP}_{_{41}}{\rm LP}_{_{51}}\\ {\rm LP}_{_{61}}{\rm LP}_{_{71}}\end{array}$	均匀掺杂	_	24/73	前向泵浦	1 530~1 565	1.5	16	0.2		[22]
2018	$\begin{split} LP_{01}LP_{11}LP_{21} \\ LP_{02}LP_{31}LP_{12} \\ LP_{41}LP_{22}LP_{03} \\ LP_{51}LP_{61}LP_{71} \end{split}$	均匀掺杂	阶跃折射率 沟道辅助	21. 6/87. 16	前向泵浦	1 530~1 565	2.2	15	3	_	[23]
2022	$LP_{01}LP_{11}$	均匀掺杂	阶跃折射率	20/125	后向包层+前向纤芯	1 570~1 624	20.5	25	<1	—	[37]

纤及其放大器的实验研究进展。

2014年,英国南安普顿大学<sup>[34]</sup>拉制出 Er/Yb 共掺双包层少模光纤,使用包层泵浦的方式对 LP<sub>01</sub>和 LP<sub>11</sub>模式进行放大,在1535~1560 nm 波段 实现 20 dB 的平均增益,差分模态增益小于3 dB。 同年,该校使用包层泵浦的方式对具有折射率沟 道的少模掺铒放大光纤进行泵浦<sup>[28]</sup>,在1534~ 1565 nm 波段实现了 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>、LP<sub>02</sub>四模群 23 dB 的平均增益,差分模态增益低于3 dB,噪声 指数最大为8 dB。 为了简化光纤的制作工艺,同时最小化差分 模态增益,2016年,美国贝尔实验室<sup>[35]</sup>提出扩大光 纤的芯径(24 μm)以支持更多的模式,如图11(a) 所示。同时,结合前向包层泵浦的实验方式,对 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>、LP<sub>31</sub>、LP<sub>41</sub>、LP<sub>51</sub>、LP<sub>61</sub>七个模群同 时进行放大,在C波段实现了17 dB的增益,如图 11(b)所示,差分模态增益低于2 dB。2017年,美 国中佛罗里达大学<sup>[22]</sup>提出支持8个模群的大芯径 光纤,在C波段实现了16 dB的增益,差分模态增 益降到0.2 dB。



图 11 (a) 大芯径少模掺铒放大光纤截面图及传输模群的模斑图; (b) 增益随频率变化<sup>[35]</sup>。

Fig.11 (a) Erbium-doped fiber facet image and modal patterns from each mode group. (b) Gain spectrum as a function of frequency across the C-band<sup>[35]</sup>.

2018年,天津大学李桂芳课题组<sup>[23]</sup>提出同时 传输12个模群21个空间模式的具有折射率沟道 辅助的双包层少模掺铒放大光纤,其光纤截面如 图12(a)所示,相对折射率分布如图12(b)所示, 铒离子掺杂浓度如图12(c)所示。使用多模980 nm 泵 浦光源对其进行前向包层泵 浦放大,在 1530~1565 nm 波段实现了15 dB的平均增益,差 分模态增益低于3 dB,如图12 (d)所示。折射率 沟道的存在将信号模式的模场分布很好地束缚在 纤芯中,优化了各模式的重叠积分因子,从而实现



图 12 双包层少模掺铒放大光纤。(a)截面图;(b)相对折射率分布;(c)铒离子浓度分布;(d)不同信号模群的增益随波 长变化<sup>[23]</sup>。

Fig. 12 Double cladding erbium-doped fiber. (a)Cross section. (b)Refractive index profile. (c)Erbium distribution along the fiber radius position. (d)Gain spectra for every mode as a function of wavelength across the C-band<sup>[23]</sup>.

了少模掺铒放大光纤的增益均衡。

2022年,华中科技大学李进延课题组<sup>[37]</sup>提出 了一种新型的包层泵浦伪两级结构,通过在Er/ Yb共掺双包层少模放大光纤的中间注入泵浦光, 对少模光纤进行放大。Er/Yb共掺双包层少模放 大光纤的截面图及折射率分布如图13(a)所示, 有源光纤的前半段主要由后向传输的泵浦光和C 波段的后向放大自发辐射(Amplified spontaneous emission, ASE)进行放大;而后,前半段输出的C 波段多模正向 ASE 作为纤芯泵浦源对后半段有 源光纤进行放大,如图 13 (b)所示,有效利用 C波 段的 ASE 作为 L波段的泵浦。使用 940 nm 泵浦 光源,通过调节前后两段有源光纤的长度,最终 实现了 1 570~1 620 nm 范围内 25 dB 的平均增 益,差分模态增益小于 1 dB,如图 13 (c)所示。 该结构创新性地在少模掺铒放大光纤中同时采 用纤芯泵浦与包层泵浦,充分利用 ASE,有效地 降低了 DMG。



图 13 (a)铒镱共掺少模掺铒放大光纤的相对折射率分布及截面图;(b)包层泵浦伪二级结构图解;(c)不同信号模式的 增益随波长变化<sup>[37]</sup>。

Fig. 13 (a)Refractive index profile and the cross section image of the few-mode Er/Yb co-doped fiber. (b)Schematic of the cladding-pumped pseudo-two-stage. (c)Gain spectra for every mode as a function of wavelength across the L-band<sup>[37]</sup>.

采用包层泵浦的泵浦方式时,使用多模泵浦 激光器不需要特定的泵浦状态,相比纤芯泵浦的 泵浦方式而言,多模泵浦激光器的泵浦功率更高, 且成本较低;随着空间模式数量的增多,驱动和控 制单个多模泵浦激光器所需要的电力通常低于驱 动多个单模泵浦激光器所需要的电力。因此,采 用包层泵浦的泵浦方式更方便,更经济环保,更可 持续发展<sup>(49)</sup>。

基于包层泵浦的FM-EDFA,差分模态增益仅 由信号模式强度和铒离子分布的重叠决定。因此,采用包层泵浦可以实现更高的饱和输出功率、 更小的差分模态增益。

### 6 总结与展望

基于少模光纤的空分复用技术有望大幅提 高单根光纤内的数据传输容量,是未来大容量光 通信技术发展的重要技术之一。近年来,研究人 员对少模掺铒放大光纤进行了深入研究,支持的 空间模式从3个扩展到21个不等。当光纤中包 含的模式数目开始增多、不同的模式在光纤中同 时传输放大时,上下能级的铒离子将产生竞争效 应,使得光纤中上下能级的铒离子重新分配,此 时上下能级的铒离子分布将受到泵浦光场、信号 光场等的共同作用<sup>[39]</sup>。少模掺铒放大光纤掺杂剖 面及折射率分布的设计和泵浦方式的选择为降 低DMG提供了解决办法。采用纤芯泵浦的少模 掺铒放大光纤模式扩展困难,需要特殊结构的掺 铒光纤或泵浦状态来减小差分模态增益,限制因 素过多,难以搭建多级系统从而实现高增益。而 采用包层泵浦的少模掺铒放大光纤,泵浦功率高 且近乎均匀分布于纤芯上,饱和输出功率大,差 分模态增益小,限制条件少,更容易实现多级放 大,成本更低。

展望未来,对少模掺铒放大光纤的研究还有 很大的探索空间:增加信号传输的模式数量、优化 少模掺铒放大光纤的结构、实现复杂掺杂分布及 折射率分布的工艺优化、能够批量生产、与少模掺 铒光纤放大器中的其他器件(如隔离器、偏振控制 器、合束器等)完美匹配等。我们期待少模掺铒光 纤的放大性能有更进一步的提升,使其在市场应 用中发挥作用并带来重大突破,最终开拓出模分 复用更深层次的应用。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/ CJL.20220246.

#### 参考文献:

- [1] ESSIAMBRE R J, MECOZZI A. Capacity limits in single-mode fiber and scaling for spatial multiplexing [C]. 2012 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, CA, USA, 2012: 1-3.
- [2] 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, 2016.
  ZHAO Q H. Research in Gain Equalization of Few Mode Erbium Doped Fiber Amplifier [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [3] LI G F, BAI N, ZHAO N B, et al. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication [J]. Adv. Opt. Photonics, 2014, 6(4): 413-487.
- [4] DU J B, SHEN W H, LIU J C, et al. Mode division multiplexing: from photonic integration to optical fiber transmission [Invited] [J]. Chin. Opt. Lett., 2021, 19(9): 091301-1-24.
- [5] 衣永青,田海生,宁鼎. MCVD工艺沉积温度对有源光纤掺杂浓度的影响研究 [J]. 光通信技术,2007(1):60-61.
  YI Y Q, TIAN H S, NING D. Study of the influence of the deposition temperature by using the MCVD technique on the rare earth ion concentration of active fiber [J]. Opt. Commun. Technol., 2007(1):60-61. (in Chinese)
- [ 6 ] JUNG Y, ALAM S, LI Z, et al. First demonstration and detailed characterization of a multimode amplifier for space division multiplexed transmission systems [J]. Opt. Express, 2011, 19(26): B952-B957.
- [7] IP E, LI M J, GU R Y, et al. Components for future optical networks based on few-mode fiber [C]. Asia Communications and Photonics Conference 2013, Beijing, China, 2013: AW3G. 3.
- [8] HO K P, KAHN J M. Mode-dependent loss and gain: statistics and effect on mode-division multiplexing [J]. Opt. Express, 2011, 19(17): 16612-16635.
- [9]余哲,徐祖应,付松年.空分复用传输用掺铒光纤研究进展[J]. 邮电设计技术,2018(6):77-82.
  YUZ, XUZY, FUSN. Review of erbium-doped fiber for space-division multiplexing transmisison [J]. Des. Techn. Posts Telecommun., 2018(6):77-82. (in Chinese)
- [10] 裴丽, 李祉祺, 王建帅, 等. 空分复用光纤放大器增益均衡技术研究进展 [J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106001-1-11.

PEI L, LI Z Q, WANG J S, *et al.* Review on gain equalization technology of fiber amplifier using space division multiplexing [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2021, 41(1): 0106001-1-11. (in Chinese)

- [11] SALSI M, RYF R, LE COCQ G, et al. A six-mode erbium-doped fiber amplifier [C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication 2012, Amsterdam, Netherlands, 2012: Th. 3. A. 6.
- [12] LE COCQ G, BIGOT L, LE ROUGE A, et al. Design and characterization of a multimode EDFA supporting 4 transverse mode groups for modal division multiplexed transmissions [C]. Proceedings of the 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications, Amsterdam, Netherlands, 2012: Tu. 3. F. 4.
- [ 13 ] MATTE-BRETON C, CHEN H, FONTAINE N K, et al. Demonstration of an erbium-doped fiber with annular doping for low gain compression in cladding-pumped amplifiers [J]. Opt. Express, 2018, 26(20): 26633-26645.
- [14] SALSI M, VUONG J, KOEBELE C, et al. In-line few-mode optical amplifier with erbium profile tuned to support LP01, LP11, and LP21 mode groups [C]. Proceedings of the 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications, Amsterdam, Netherlands, 2012: Tu. 3. F1.
- [15] KANG Q Y, LIM E L, JUNG Y, et al. Accurate modal gain control in a multimode erbium doped fiber amplifier incorpo-

rating ring doping and a simple LP<sub>01</sub> pump configuration [J]. Opt. Express, 2012, 20(19): 20835-20843.

- [ 16 ] LE COCQ G, BIGOT L, LE ROUGE A, et al. Modeling and characterization of a few-mode EDFA supporting four mode groups for mode division multiplexing [J]. Opt. Express, 2012, 20(24): 27051-27061.
- [17] KANG Q Y, LIM E, JUNG Y, et al. Design of four-mode erbium doped fiber amplifier with low differential modal gain for modal division multiplexed transmissions [C]. 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Anaheim, CA, USA, 2013: 1-3.
- [18] YOUSSEF H A, EL-SAHN Z A, EL-ZOGHABI A A. Performance of few-mode EDFAs in optical space-division multiplexed communication systems [C]. 2014 Asia Communications and Photonics Conference, Shanghai, China, 2014: ATh3A. 81.
- [19] SALSI M. Challenges of few mode amplifiers [C]. Optical Fiber Communication Conference 2014, San Francisco, CA, USA, 2014: Tu2D. 2.
- [20] ANWAR N M, YOUSSEF H A, EL-SAHN Z A, et al. On the performance of few-mode EDFAs with bidirectional pumping [C]. 2016 Asia Communications and Photonics Conference, Wuhan, China, 2016: 1-3.
- [21] ZHANG Z Z, MO Q, GUO C, et al. Gain equalized four mode groups erbium doped fiber amplifier with LP<sub>01</sub> pump [C]. Asia Communications and Photonics Conference 2016, Wuhan, China, 2016: ATh3B. 5.
- [ 22 ] EZNAVEH Z S, FONTAINE N K, CHEN H, et al. Ultra-low DMG multimode EDFA [C]. Optical Fiber Communication Conference 2017, Los Angeles, California, United States, 2017: Th4A. 4.
- [ 23 ] ZHANG Z Z, GUO C, CUI L, et al. 21 spatial mode erbium-doped fiber amplifier for mode division multiplexing transmission [J]. Opt. Lett., 2018, 43(7): 1550-1553.
- [24] WAKAYAMA Y, IGARASHI K, SOMA D, et al. Novel 6-mode fibre amplifier with large erbium-doped area for differential modal gain minimization [C]. Proceedings of the 42nd European Conference on Optical Communication, Dusseldorf, Germany, 2016: 1-3.
- [25] WADA M, SAKAMOTO T, AOZASA S, et al. Differential modal gain reduction of L-band 5-mode EDFA using EDF with center depressed core index [J]. J. Lightw. Technol., 2017, 35(4): 762-767.
- [26] ONO H, HOSOKAWA T, ICHII K, et al. 2-LP mode few-mode fiber amplifier employing ring-core erbium-doped fiber
  [J]. Opt. Express, 2015, 23 (21): 27405-27418.
- [27] WADA M, SAKAMOTO T, AOZASA S, et al. L-band 2-LP mode EDFA with low modal dependent gain [C]. Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, California, United States, 2015: Tu3C. 3.
- [28] JUNG Y, LIM E L, KANG Q, et al. Cladding pumped few-mode EDFA for mode division multiplexed transmission [J]. Opt. Express, 2014, 22(23): 29008-29013.
- [29] IP E, LI M J, BENNETT K, et al. Experimental characterization of a ring-profile few-mode erbium-doped fiber amplifier enabling gain equalization [C]. 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Anaheim, California, United States, 2013: JTh2A. 18.
- [ 30 ] JUNG Y M, KANG Q Y, SAHU J K, et al. Reconfigurable modal gain control of a few-mode EDFA supporting six spatial modes [J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2014, 26(11): 1100-1103.
- [31] LOPEZ-GALMICHE G, EZNAVEH Z S, ANTONIO-LOPEZ J E, et al. Few-mode erbium-doped fiber amplifier with photonic lantern for pump spatial mode control [J]. Opt. Lett., 2016, 41(11): 2588-2591.
- [ 32 ] ZHANG Z Z, GUO C, CUI L, et al. All-fiber few-mode erbium-doped fiber amplifier supporting six spatial modes [J]. Chin. Opt. Lett., 2019, 17(10): 100604-1-5.
- [33] YAMASHITA Y, MATSUI T, WADA M, et al. Differential modal gain reduction using a void inscribed in a two-mode-erbium doped fiber [C]. 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, San Diego, CA, USA, 2020: 1-3.
- [34] JAIN S, JUNG Y, MAY-SMITH T C, et al. Few-mode multi-element fiber amplifier for mode division multiplexing [J]. Opt. Express, 2014, 22(23): 29031-29036.
- [ 35 ] FONTAINE N K, HUANG B, EZNAVEH Z S, et al. Multi-mode optical fiber amplifier supporting over 10 spatial modes
  [ C]. Optical Fiber Communication Conference 2016, Anaheim, California, United States, 2016: Th5A. 4.
- [36] ZHANG Z Z, ZHAO Q H, ZHAO N B, et al. Gain equalization of few mode amplifiers using Er<sup>3+</sup>-doped fibers designed with a refraction index trench [C]. Asia Communications and Photonics Conference 2015, Hong Kong, China, 2015: ASu2A. 53.

- [ 37 ] 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]. Opt. Lett., 2022, 47(12): 2963-2966.
- [38] 刘德明,孙军强,鲁平,等.光纤光学 [M]. 第3版.北京:科学出版社,2016.
  LIU D M, SUN J Q, LU P, et al. Fiber Optics [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [39] 张振振. 少模掺铒光纤放大器的仿真研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015. ZHANG Z Z. The Simulation Research of Few-mode Erbium Doped Fiber Amplifier [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese)
- [40] 蔡善勇. 空分复用光纤通信系统中模式转换关键技术研究 [D]. 北京:北京邮电大学, 2017.
  CAISY. Research on Mode Conversion for Space Division Multiplexing System [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017. (in Chinese)
- [41] LIM E L, KANG Q Y, GECEVICIUS M, et al. Vector mode effects in few moded erbium doped fiber amplifiers [C]. Optical Fiber Communication Conference 2013, Anaheim, California, United States, 2013: OTu3G. 2.
- [42] 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. LIJQ. Study on C- and L-band Erbium-doped Fiber Amplifiers [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [43] GONG M L, YUAN Y Y, LI C, et al. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers [J]. Opt. Express, 2007, 15(6): 3236-3246.
- [44] GILES C R, DESURVIRE E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. J. Lightw. Technol., 1991, 9(2): 271-283.
- [45] GAUR A, RASTOGI V. Modal gain equalization of 18 modes using a single-trench ring-core EDFA [J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2018, 35(9): 2211-2216.
- [46] LE COCQ G, QUIQUEMPOIS Y, LE ROUGE A, et al. Few-mode Er<sup>3+</sup>-doped fiber with micro-structured core for mode division multiplexing in the C-band [J]. Opt. Express, 2013, 21(25): 31646-31659.
- [47] JUNG Y, KANG Q, SLEIFFER V A J M, et al. Three mode Er<sup>3+</sup> ring-doped fiber amplifier for mode-division multiplexed transmission [J]. Opt. Express, 2013, 21(8): 10383-10392.
- [48] BIGOT L, TRINEL J B, BOUWMANS G, et al. Few-mode and multicore fiber amplifiers technology for SDM [C]. Optical Fiber Communication Conference 2018, San Diego, California, United States, 2018: Tu3B. 2.
- [49] JUNG Y M, ALAM S U, et al. Handbook of Optical Fibers [M]. Singapore: Springer, 2018.



赵新月(1998-),女,湖北枣阳人,硕士 研究生,2020于湖南科技大学获得学 士学位,主要从事少模掺铒放大光纤 的研究。

E-mail: zxy\_27@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 等领域的研究。

E-mail: ljy@hust. edu. cn