

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240222.

光电子器件技术

阮江冉,李妮,杜梅,等. 基于折射率分层的少模掺铒光纤放大器研究[J]. 光通信研究,2026(4):192-199.

Ruan J R, Li N, Du M, et al. Investigations of Few-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier Employing Layered-Distributed Refractive Index[J]. Study on Optical Communications,2026(4):192-199.

基于折射率分层的少模掺铒光纤放大器研究

阮江冉¹,李妮¹,杜梅¹,刘玉飞¹,杨顺兴²

(1. 中国电信研究院 评测中心,北京 102200; 2. 中国电信研究院 评测中心,广州 510660)

摘要:【目的】随着光通信系统容量提升的迫切需求和基于少模光纤空分复用技术的逐步推广,少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)作为中继放大器吸引了学术界及产业界的广泛关注,然而模间增益差(DMG)的存在制约了模分复用(MDM)系统传输距离的提升,直接影响了系统的鲁棒性。【方法】文章基于环形纤芯结构,提出了一种基于折射率分层的少模掺铒光纤(FM-EDF),通过调控分层宽度及折射率分布,并在纤芯和包层之间引入合适的低折射率沟槽,协同实现了支持4模(LP₀₁模、LP₁₁模、LP₂₁模、LP₃₁模)传输的FM-EDFA的模间增益均衡,在包层泵浦条件下具有高增益和低DMG。【结果】研究表明,在高折射率纤芯内引入折射率双层结构,4模式信号的DMG可降低至0.2 dB;同时,文章所提结构在1 530~1 565 nm范围内可实现超19 dB的放大增益、低于0.23 dB的DMG及小于5.96 dB的噪声系数,增益平坦度小于0.9 dB。最后基于文章所提FM-EDFA,对4模式信号经过中继距离分别为25、50、100和125 km的1 000 km传输后的特性进行了分析,当采用较优的50 km中继距离时,4模式信号经过1 000 km传输后的平均输出功率可超过20 dBm,DMG为4.05 dB。【结论】文章所提基于折射率分层的FM-EDF有效降低了各信号模式的DMG,实现了包层泵浦FM-EDFA的增益均衡和全光放大,其在长距离传输中较好的放大特性为MDM系统的容量扩容奠定了基础。

关键词:空分复用;模分复用;少模掺铒光纤放大器;模间增益差;增益均衡

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Investigations of Few-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier Employing Layered-Distributed Refractive Index

RUAN Jiangran¹, LI Ni¹, DU Mei¹, LIU Yufei¹, YANG Shunxing²

(1. Evaluation Center, China Telecom Research Institute, Beijing 102200, China; 2. Evaluation Center, China Telecom Research Institute, Guangzhou 510660, China)

Abstract:【Objective】With the requirements of increased capacity in optical communication systems and the developments of few-mode-fiber-based space-division-multiplexing systems, the Few-Mode Erbium-Doped Fiber amplifier (FM-EDFA) utilized as a repeater has attracted more attention. However, the Differential Modal Gain (DMG) limits the transmission distance of Mode Division Multiplexing (MDM) systems, and degrades the system robustness. 【Methods】To address these issues, this paper proposes a layered-distributed refractive index Few-Mode Erbium-Doped Fiber (FM-EDF) based on a ring-core structure. The fiber features optimized layer width and refractive index distribution, and incorporates a low-refractive-index groove. This design enables gain equalization with high gain and low DMG in a four-mode FM-EDFA (supporting LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁, and LP₃₁) under cladding-pumping conditions. 【Results】The results demonstrate that introducing a layered-distributed refractive index structure into the high-index ring-core enables a DMG of 0.2 dB. Additionally, over the wavelength range of 1 530~1 565 nm, the proposed design achieves a gain exceeding 19 dB, a DMG below 0.23 dB, a noise figure lower than 5.96 dB, and a gain flatness of less than 0.9 dB. Then, investigations on the transmission characteristics are executed employing 1 000 km transmission systems with the repeated distance of 25, 50, 100 and 125 km respectively. The results show that around 20 dBm output power and 4.05 dB DMG could be achieved over 1 000 km transmission with an optimal repeated distance of 50 km. 【Conclusion】The scheme that introducing layered-distributed refractive index when designing the FM-EDF could effectively decrease the DMG, contributing to gain equalizations and all-optical amplifying of cladding-pumped FM-EDFA. It can also enhance the capacity of mode division multiplexing system benefitting from superior gain characteristics in long-haul transmissions.

Key words: space division multiplexing; MDM; FM-EDFA; DMG; gain equalization

0 引 言

近年来,基于高阶调制^[1]、偏振复用^[2]和波段扩

展^[3]等方法实现的大容量单模光纤通信系统在应对超大容量业务领域时能力依然有限^[4],因此模分复用(Mode Division Multiplexing, MDM)成为容量扩

收稿日期:2024-10-29; 修回日期:2024-12-13; 纸质出版日期:2026-08-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFF0717605)

作者简介:阮江冉(1996—),女,北京人。工程师,硕士,主要研究方向为新型光通信光纤和器件。

通信作者:阮江冉,工程师。E-mail: ruanjr@chinatelecom.cn

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

容的新选择^[5]。而少模掺铒光纤放大器(Few-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier, FM-EDFA)作为MDM系统的重要中继器件,其模间增益差(Differential Modal Gain, DMG)限制了传输距离的提升^[6]。因此,学术界围绕具有低DMG和高增益的FM-EDFA进行了大量探索。2022年,北京交通大学提出了一种基于铒离子(Er^{3+})3层掺杂的阶跃少模掺铒光纤(Few-Mode Erbium-Doped Fiber, FM-EDF)实现了全C波段低于0.5 dB的DMG^[7]。同时,改变光纤折射率结构也能显著降低DMG。文献[8]中的中心抑制光纤通过优化折射率分布实现了高增益和低DMG;文献[9]提出了一种沟槽辅助的FM-EDFA,实现了5个信号模式全C波段DMG波动低于1 dB。研究发现,折射率结构的变化改变了信号模式的模场分布,从而实现了模场调控,在降低

DMG方面相较于传统阶跃FM-EDF更加具有优势,当信号模式较多,需要进一步降低DMG时,优化FM-EDF的折射率结构不失为一种选择。

本文提出了一种基于折射率分层的包层泵浦FM-EDFA,通过优化分层宽度和折射率分布,在低折射率沟槽辅助下,DMG可降低至0.2 dB,饱和输出功率约为14.8 dBm,并在C波段实现了超19 dB的放大增益和低于0.23 dB的DMG。同时,在经过中继距离为50 km的1 000 km传输后,平均输出功率可超过20 dBm。

1 基本原理

可通过粒子数方程和功率传播方程来实现FM-EDFA建模分析^[10-11]。当上下能级 Er^{3+} 达到动态平衡时,粒子数方程为

$$N_2(r, \varphi, z) = \frac{\frac{1}{h\nu_s} \sum_{j=1}^{m_s} (P_{s,j} + P_{\text{ASE},j}) \sigma_{\text{as},j} i_{s,j}(r, \varphi) + \frac{1}{h\nu_p} \sum_{k=1}^{m_p} P_{p,k} \sigma_{\text{ap},k} i_{p,k}(r, \varphi)}{\frac{1}{\tau} + \frac{1}{h\nu_s} \sum_{j=1}^{m_s} (P_{s,j} + P_{\text{ASE},j}) (\sigma_{\text{as},j} + \sigma_{\text{es},j}) i_{s,j}(r, \varphi) + \frac{1}{h\nu_p} \sum_{k=1}^{m_p} P_{p,k} \sigma_{\text{ap},k} i_{p,k}(r, \varphi)} N_0(r, \varphi, z), \quad (1)$$

$$N_1(r, \varphi, z) = N_0(r, \varphi, z) - N_2(r, \varphi, z), \quad (2)$$

式中: $N_0(r, \varphi, z)$ 、 $N_2(r, \varphi, z)$ 和 $N_1(r, \varphi, z)$ 分别为总的 Er^{3+} 浓度分布、上能级 Er^{3+} 浓度分布和下能级 Er^{3+} 浓度分布; r 为光纤径向距离; φ 为光纤方位角; z 为轴向距离; h 为普朗克常量; τ 为上能级弛豫时间; ν_s 和 ν_p 分别为信号光和泵浦光的工作频率; m_s 和 m_p 分别为信号光和泵浦光的总模式数; $P_{s,j}$ 和 $P_{p,k}$ 分别为信号光第 j 个模式和泵浦光第 k 个模式的功率; $P_{\text{ASE},j}$ 为信号光第 j 个模式的放大自发辐射

噪声(Amplified Spontaneous Emission, ASE)功率; $\sigma_{\text{as},j}$ 和 $\sigma_{\text{es},j}$ 分别为信号光第 j 个模式的吸收截面系数和发射截面系数; $\sigma_{\text{ap},k}$ 为泵浦光第 k 个模式的吸收截面系数; $i_{s,j}(r, \varphi)$ 和 $i_{p,k}(r, \varphi)$ 分别为信号光第 j 个模式和泵浦光第 k 个模式的归一化光强分布。

信号光、泵浦光和双向ASE噪声的功率传播方程为

$$\frac{dP_{s,j}}{dz} = P_{s,j} \int_0^{2\pi} \int_0^a i_{s,j}(r, \varphi) [N_2(r, \varphi, z) \sigma_{\text{es},j} - N_1(r, \varphi, z) \sigma_{\text{as},j}] r dr d\varphi, \quad (3)$$

$$\frac{dP_{p,k}}{dz} = -P_{p,k} \int_0^{2\pi} \int_0^a i_{p,k}(r, \varphi) N_1(r, \varphi, z) \sigma_{\text{ap},k} r dr d\varphi, \quad (4)$$

$$\pm \frac{dP_{\text{ASE},j}}{dz} = P_{\text{ASE},j} \int_0^{2\pi} \int_0^a i_{s,j}(r, \varphi) [N_2(r, \varphi, z) \sigma_{\text{es},j} - N_1(r, \varphi, z) \sigma_{\text{as},j}] r dr d\varphi + \int_0^{2\pi} \int_0^a 2h\nu_s \sigma_{\text{es},j} \Delta\nu i_{s,j}(r, \varphi) N_2(r, \varphi, z) r dr d\varphi, \quad (5)$$

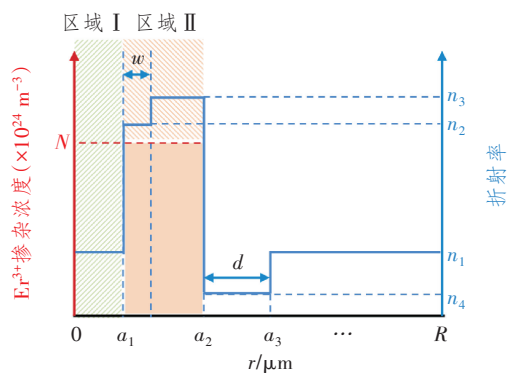
式中: a 为纤芯半径; $\Delta\nu$ 为等效噪声带宽。

2 增益光纤设计

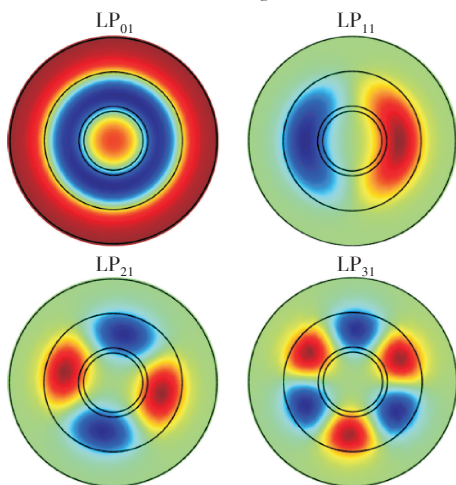
为了设计高增益低噪声系数(Noise Figure, NF)的FM-EDFA,并实现模式增益均衡,本文在环芯光纤基础上优化得到图1(a)所示的折射率分层光纤结构。在该结构中,纤芯由区域I和区域II构成,纤芯内的高折射率环芯(区域II)采用折射率

分层设计,折射率分别为 n_2 和 n_3 ,数值分别为1.459和1.465;分层宽度 $w=0.5 \mu\text{m}$,高折射环芯半径 $a_2=7 \mu\text{m}$,纤芯中心凹陷区(区域I)半径为 $a_1=3 \mu\text{m}$,折射率 $n_1=1.444$,与包层折射率相同;同时在纤芯和包层中间引入一个低折射率沟槽,外边界半径为 a_3 ,其宽度 $d=3.5 \mu\text{m}$,折射率 $n_4=1.4382$,这可以有效抑制各模式之间的模式串扰^[9];光纤包层半径 $R=62.5 \mu\text{m}$ 。为了降低掺杂复杂度,在纤

芯内的高折射率环芯内(区域Ⅱ)采用均匀掺杂方式, Er^{3+} 掺杂浓度 $N=8 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 。



(a) 本文所提 FM-EDF 的结构
(a) The schematic diagram of FM-EDF



(b) 模场分布
(b) The mode field distribution

图 1 折射率分层的 FM-EDF 结构示意图及 4 模式信号模场分布

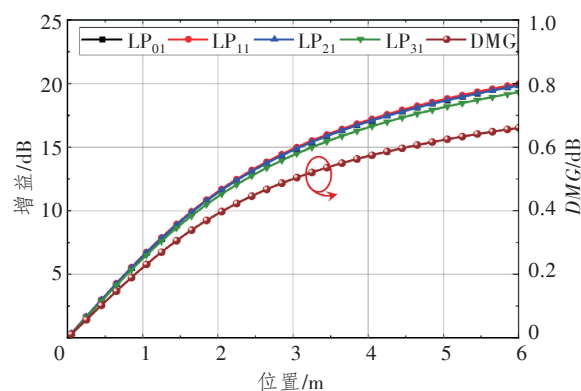
Figure 1 The schematic diagram of FM-EDF employing layered-distributed refractive index and the mode field distribution of four-mode signals

经过 COMSOL 数值仿真, 本文所提 FM-EDF 结构可支持 4 模式共同传输, 图 1(b) 所示为 4 个模式信号的光强沿光纤径向的模场分布。通过降低折射率实现纤芯中心凹陷, 从而改变光纤传输模式的激发顺序^[10], 因此 4 模式信号分别为 LP_{01} 模、 LP_{11} 模、 LP_{21} 模和 LP_{31} 模; 此外, 高折射率环芯分层的设计进一步调控了 4 模式信号的模场分布。

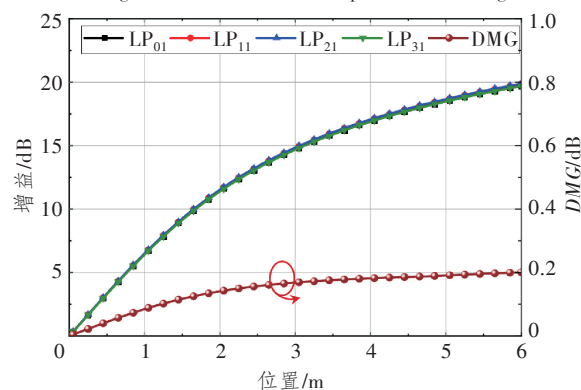
3 结果分析

考虑到引入低折射率沟槽可以有效降低 DMG, 图 2 所示为有无沟槽情况下各信号模式增益和 DMG 随增益光纤位置的变化情况。此时, 基于图 1(a) 所示结构分析, 即 $w=0.5 \mu\text{m}$, $n_2=1.459$, 增

益光纤长度为 6 m, 采用包层泵浦方式, 泵浦波长为 980 nm, 泵浦功率为 3 W。



(a) 无沟槽时各模式增益和 DMG 随位置的变化
(a) The gain and DMG versus the position without groove



(b) 有沟槽时各模式增益和 DMG 随位置的变化
(b) The gain and DMG versus the position with groove

图 2 光纤不同位置处各信号模式增益特性和 DMG

Figure 2 The gain and DMG versus different locations for various mode signals

无沟槽时各信号模式和 DMG 随光纤位置的变化如图 2(a) 所示, 各信号模式在光纤长度为 6 m 处的增益分别为 19.90 dB@ LP_{01} 、19.99 dB@ LP_{11} 、19.85 dB@ LP_{21} 和 19.33 dB@ LP_{31} , 此时 LP_{31} 模具有较低的模式增益, DMG 为 0.66 dB; 由图 2(b) 可知, 由于低折射率沟槽 (宽度 $d=3.5 \mu\text{m}$) 的引入, 各信号模式在光纤长度为 6 m 处的增益分别为 19.69 dB@ LP_{01} 、19.86 dB@ LP_{11} 、19.89 dB@ LP_{21} 和 19.70 dB@ LP_{31} , 此时 DMG 为 0.20 dB, 相较于图 2(a) 无沟槽情况 DMG 降低了 0.46 dB。图 2 所示结果表明, 引入低折射率沟槽可有效降低 FM-EDFA 的 DMG。因此, 在本文后续分析中低折射率沟槽始终存在, 且 d 保持不变, 为 $3.5 \mu\text{m}$ 。

折射率分层设计可以有效调控各信号模式场分布, 降低 DMG。基于此, 本文对高折射率环芯(区域Ⅱ)中折射率分层与不分层情况进行了对比分析,

研究了分层宽度 w 和折射率 n_2 对 FM-EDFA 性能的影响。图 3(a)所示为区域 II 折射率分层结构,其中分层宽度 $w=0.5\ \mu\text{m}$, 折射率 $n_2=1.459$, $n_3=1.465$;图 3(b)中区域 II 折射率不分层,此时 $w=0$, 折射率 $n_2=n_3=1.465$;图 3(c)所示为区域 II 折射率不分层的第 2 种情况,此时 $w=a_2-a_1=3.5\ \mu\text{m}$, 折射率 $n_2=n_3=1.459$ 。本文分别用结构 I、结构 II 和结构 III 表示图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)所示的 3 种增益光纤结构。

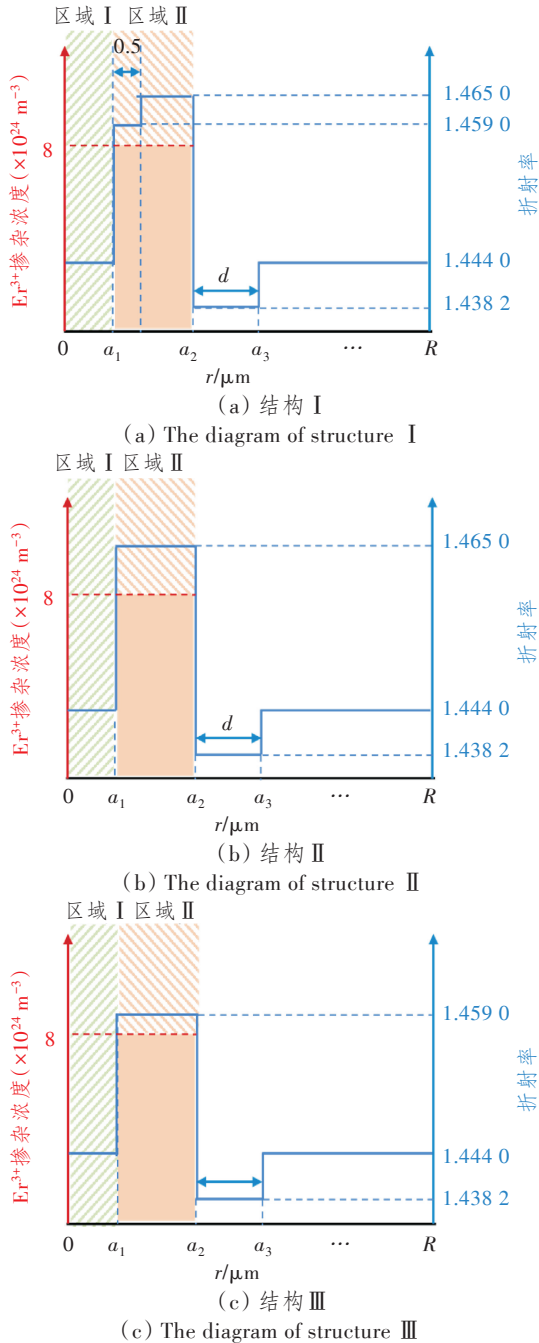


图 3 3 种不同折射率分布的 FM-EDF 结构

Figure 3 FM-EDF based on different refractive index distribution

FM-EDFA 各信号模式增益受泵浦光功率的影响。图 4 所示为不同泵浦方向下,基于 3 种增益光纤的 FM-EDFA 各信号模式增益和 DMG 随泵浦光功率变化的情况。其中双向泵浦功率比为 1:1。在前向泵浦条件下,当采用结构 I 时,如图 4(a)所示,各信号模式增益在泵浦功率为 3 W 时分别为 19.69 dB@LP₀₁、19.86 dB@LP₁₁、19.89 dB@LP₂₁和 19.70 dB@LP₃₁,DMG 为 0.20 dB;在泵浦功率为 8 W 时,各信号模式平均增益为 24.89 dB,此时 DMG 为 0.25 dB;如图 4(b)所示,当采用结构 II 时,各信号模式平均增益在泵浦功率 8 W 处为 24.87 dB,DMG 为 0.44 dB,较图 4(a)增加了 0.19 dB;对于结构 III,如图 4(c)所示,各信号模式平均增益在前向泵浦功率 8 W 处为 24.81 dB,DMG 为 0.71 dB,较图 4(a)增加了 0.46 dB。由图 4 可知,不同泵浦方向情况下结构 I 的 DMG 均优于结构 II 和结构 III。综上,在高折射率环芯(区域 II)中引入折射率分层设计,可以在保证各信号模式增益的同时有效降低 DMG。

图 4 同时分析了泵浦方向对 FM-EDFA 的影响。如图 4(d)所示,当基于结构 I 采用反向泵浦时,在泵浦功率 8 W 处各信号模式平均增益为 24.89 dB,DMG 为 0.25 dB;如图 4(g)所示,当采用双向泵浦及结构 I 时,泵浦功率为 8 W 处的 DMG 为 0.25 dB。同时,当采用结构 II 或结构 III 时,不同泵浦方向下的各信号模式增益和 DMG 较为接近。因此,泵浦方向对各信号模式增益和 DMG 的影响可忽略,本文将基于前向泵浦对 FM-EDFA 进行后续分析。

图 5 所示为 3 种增益光纤结构下 FM-EDFA 性能随光纤长度的变化情况,此时前向泵浦功率为 3 W。随着光纤长度的增加,各信号模式增益逐渐增大;当采用结构 I 时,在增益光纤长度 10 m 处,各信号模式增益为 22.63 dB@LP₀₁、22.81 dB@LP₁₁、22.85 dB@LP₂₁和 22.66 dB@LP₃₁,DMG 为 0.22 dB;当采用结构 II 时,在增益光纤长度 10 m 处,各信号模式平均增益为 22.72 dB,DMG 为 0.42 dB;当采用结构 III 时,在增益光纤长度 10 m 处,各信号模式平均增益为 22.68 dB,DMG 为 0.66 dB。在 3 种增益光纤结构下,FM-EDFA 均能实现超 20 dB 的增益;同时,由图 5 可知,在相同光纤长度处,结构 I 始终具有较低的 DMG,且随着光纤长度的变化,基于结构 I 的 FM-EDFA 的 DMG 变化较小,对增益光纤长度的敏感

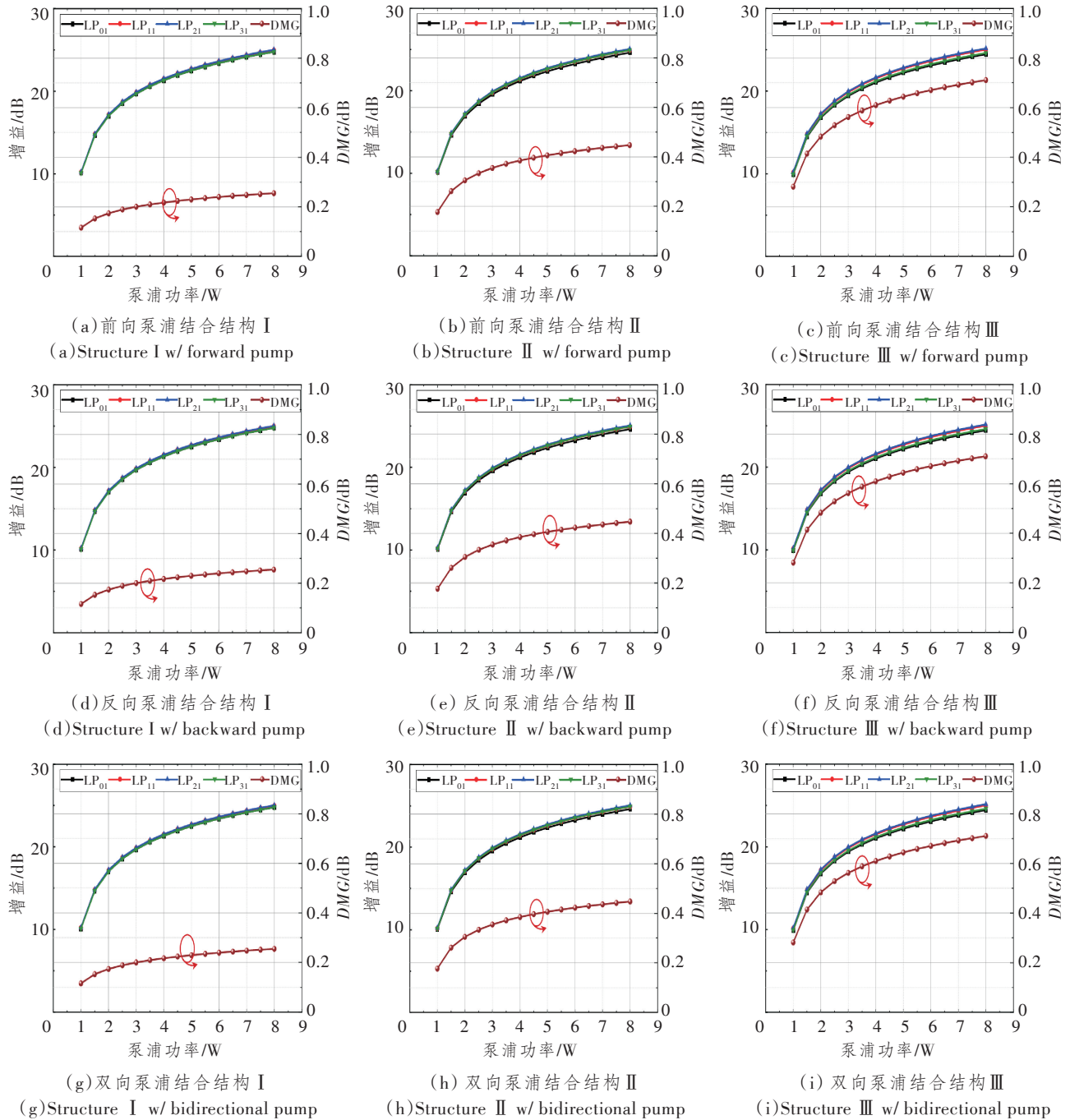


图4 不同泵浦方向下基于不同增益光纤结构的FM-EDFA各信号模式增益和DMG随泵浦功率的变化
Figure 4 The gain and DMG versus the pump power with various gain fiber based FM-EDFA employing different pump directions respectively

性更低,性能更加稳定。综上,本文所提基于结构I的FM-EDFA具有明显的DMG优势。

饱和增益特性也是衡量FM-EDFA能力的关键指标。本文基于结构I分析了不同输入信号功率下的增益情况,结果如图6所示。由图可知,随着信号输入功率的增加,增益在小范围内微小变化,当信号输入功率约为 -16 dBm时,本文所提FM-EDFA出现增益饱和,此时各信号模式的平均饱和输

出功率约为 14.8 dBm。

图7所示为FM-EDFA在C波段内的光谱特性,此时各信号模式输入功率为 0.1 mW,泵浦功率为 3 W,增益光纤长度为 6 m。由图7(a)可知,在 $1530\sim 1565$ nm波长范围内,各信号模式均可实现超 19 dB的放大增益。增益整体波动较小,在C波段内先一定程度降低再逐渐增大,增益平坦度小于 0.9 dB。此外随着波长的增大,DMG

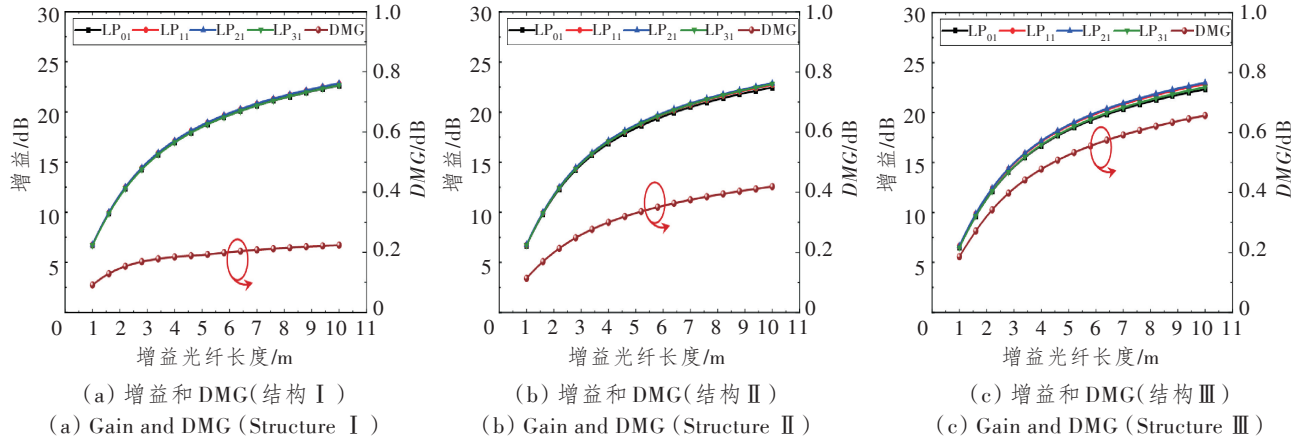


图5 基于不同增益光纤结构的FM-EDFA各信号模式增益和DMG随光纤长度的变化

Figure 5 The gain and DMG versus the fiber length with different gain fiber based FM-EDFA respectively

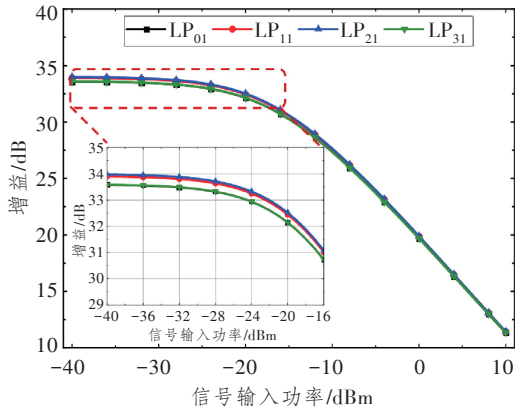
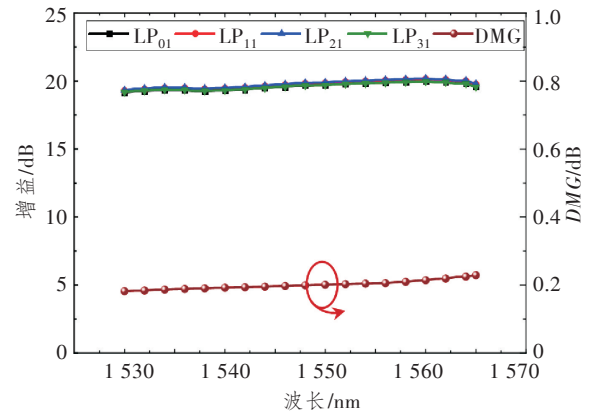


图6 基于结构 I 的饱和增益特性分析

Figure 6 Investigations on the saturated gain characteristic employing the structure I

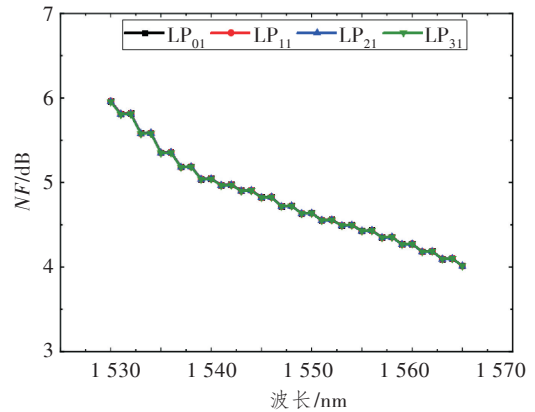
略有增加,在 1 550 nm 波长处,各信号模式增益分别为 19.69 dB@LP₀₁、19.86 dB@LP₁₁、19.89 dB@LP₂₁和 19.70 dB@LP₃₁,DMG 为 0.2 dB;在 1 565 nm 波长处,各信号模式增益分别为 19.58 dB@LP₀₁、19.76 dB@LP₁₁、19.79 dB@LP₂₁和 19.56 dB@LP₃₁,DMG 为 0.23 dB,这表明本文所提 FM-EDFA 在较宽的波长范围内具有超 19 dB 的增益,并具有较低 DMG 特性。图 7(b)所示为各信号模式 NF 随波长的变化趋势。由图可知,随着波长的增大,各信号模式的 NF 逐渐降低。在 1 530 nm 波长处NF最大,分别为 5.96 dB@LP₀₁、5.96 dB@LP₁₁、5.96 dB@LP₂₁和 5.95 dB@LP₃₁。

最后,本文分析了基于结构 I 的 FM-EDFA 经不同中继距离传输后的特性,如图 8 所示。各信号模式的发射功率为 5 dBm,中继距离分别为 25、50、100 和 125 km,总传输距离 1 000 km,各信号模式衰减为 0.207 dB/km@LP₀₁、0.206 dB/km@LP₁₁、0.208 dB/km@LP₂₁和 0.21 dB/km@LP₃₁。当中继



(a)C 波段范围内的增益和DMG

(a)The gain and DMG regarding the C-band



(b)C 波段范围内的 NF

(b)The NF regarding the C-band

图7 FM-EDFA 的光谱特性

Figure 7 The spectral properties of FM-EDFA

距离为 25 和 50 km 时,各信号模式传输后的平均输出功率超 20 dBm,分别为 21.55 和 21.21 dBm,DMG 分别为 3.33 和 4.05 dB。当中继距离增加至 100 和 125 km 时,各信号模式传输后的平均输出功率分别为 19.05 和 17.58 dBm,DMG 分别为 5.24 和 5.59 dB。因此,25 和 50 km 中继距离可以在保

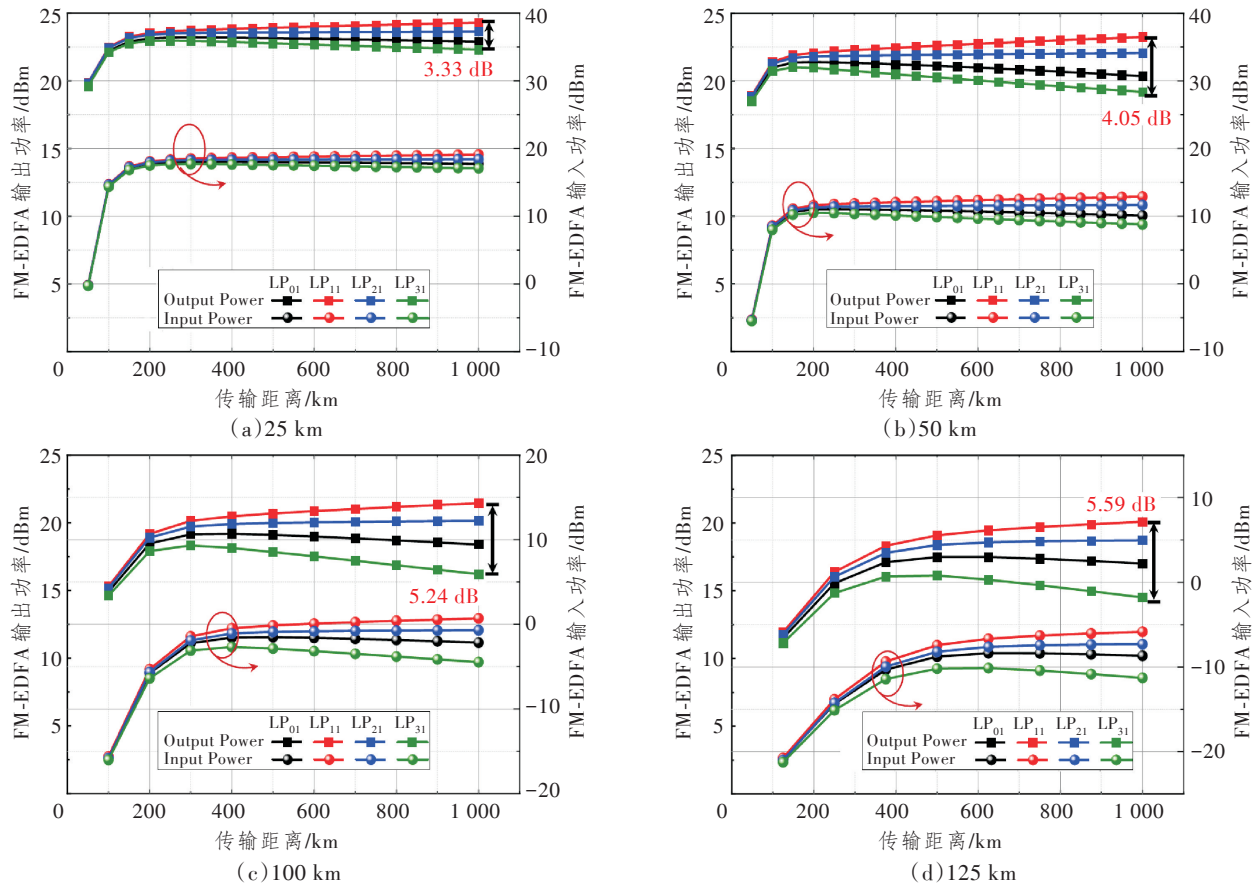


图8 不同中继距离下的传输特性

Figure 8 The transmission characteristic with different repeated distances

证超 20 dBm 的平均输出功率下具有较小的传输后 DMG;考虑到 25 km 中继系统所需 FM-EDFA 数量是 50 km 中继系统的两倍,综合考虑系统成本及传输性能,50 km 可被视为较优中继距离方案。

4 结束语

本文提出了一种支持 4 模式信号传输的折射率分层 FM-EDF,在低折射率沟槽辅助下,通过对环芯中折射率进行分层优化设计,实现了具有低 DMG 的包层泵浦 FM-EDFA。基于高折射率环芯中折射率分层与不分层的 3 种光纤结构,对比分析了泵浦方向、功率及增益光纤长度对 FM-EDFA 的影响。研究表明,引入折射率分层设计,在保证放大增益的同时可显著降低 DMG,在 1 550 nm 波长处 DMG 达到 0.2 dB。最后基于本文所提折射率分层 FM-EDF 分析了 FM-EDFA 的饱和增益特性、光谱特性及传输特性。结果表明,各信号模式的平均饱和输出功率约为 14.8 dBm,其在 C 波段内可实现超 19 dB 的放大增益,DMG 低于 0.23 dB, NF 低于 5.96 dB,经中继距离为 50 km 的 1 000 km

传输后,各信号模式的平均输出功率超过 20 dBm, DMG 为 4.05 dB。本文所提包层泵浦 FM-EDFA 可实现 MDM 系统的全光放大,为 MDM 系统的长距离传输提供了可能。

参考文献:

- [1] Luo M, Yang C, Zhang H, et al. Experimental Demonstration of Long-Haul Transmission Using Silicon-based IC-TROSA[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(16): 862–865.
- [2] Saitoh K. Multi-Core Fiber Technology for SDM: Coupling Mechanisms and Design[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(5): 1527–1543.
- [3] Deng N, Zong L, Jiang H, et al. Challenges and Enabling Technologies for Multi-Band WDM Optical Networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(11): 3385–3394.
- [4] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, et al. Capacity Limits of Optical Fiber Networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 662–701.
- [5] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-Division Multiplexing in Optical Fibres[J]. Nature Photonics,

- 2013, 7(5): 354–362.
- [6] Li Z, Pei L, Wang J, et al. A Uniform Ion Doping Air-Hole - Assisted FM - EDF for Low Differential Modal Gain [J]. Optical Fiber Technology, 2023, 75: 103196.
- [7] Zhao Q, Pei L, Tang J, et al. Design of Few - Mode Erbium - Doped Fiber with a Low Differential Modal Gain and Weak Coupling based on Layered Doping[J]. Applied Optics, 2023, 62(6): 1567–1574.
- [8] Guo H, Li T, Yan F, et al. Few - Mode Erbium - Doped Fiber Amplifier with High Gain and Low Differential Modal Gain for Mode - Division - Multiplexed Systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(21): 6657–6663.
- [9] Gaur A, Rastogi V. Modal Gain Equalization of 18 Modes Using a Single-Trench Ring-Core EDFA[J]. Josa B, 2018, 35(9): 2211–2216.
- [10] 阮江冉, 裴丽, 郑晶晶, 等. 基于包层泵浦的4模掺铒光纤放大器的增益均衡[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0406001.
- Ruan J R, Pei L, Zheng J J, et al. Gain Equalization of 4-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier based on Cladding Pump [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42 (4) : 0406001.
- [11] Xu W, Pei L, Wang J, et al. Gain Characteristics of Few-Mode EDFA with Different Pump[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(5): 1–7.