

中心凹陷型少模掺铒光纤中的模场调控与增益均衡

徐文轩^{1,2}, 裴丽^{1,2*}, 王建帅^{1,2}, 李祉祺^{1,2}, 赵琦^{1,2}, 郑晶晶^{1,2}, 李晶^{1,2}, 宁提纲^{1,2}, 钟力³

¹北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044;

²北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044;

³长飞光纤光缆股份有限公司光纤光缆制备技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430073

摘要 中心折射率凹陷型少模掺铒光纤(FM-EDF)可以改变传输模式的数量和截止顺序,在模场调控和增益均衡方面具有良好的性能。利用等效折射率理论描述光纤模式截止特性,研究了由传统阶跃折射率光纤向环芯光纤转变过程中的模式变化。结果表明,当中心凹陷大于0.012时,光纤仅支持LP_{m1}模式传输,且使得LP₀₁模场能量向远离中心区域方向偏移。此外,当光纤用于信号放大领域中,且折射率凹陷数值大小与掺杂区域半径之间符合相应的线性关系时,模式增益差可保持在2 dB以下。采用自制的中心凹陷型FM-EDF对LP_{m1}模式的增益特性进行了实验测试。实验结果表明,各信号模式增益均大于18 dB,模式增益差为1.3 dB。

关键词 光通信; 光纤通信; 少模掺铒光纤; 中心凹陷; 模式增益均衡; 环芯光纤

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2106002

Mode Field Modulation and Gain Equalization with Central Depressed Few-Mode Erbium-Doped Fiber

Xu Wenxuan^{1,2}, Pei Li^{1,2*}, Wang Jianshuai^{1,2}, Li Zhiqi^{1,2}, Zhao Qi^{1,2}, Zheng Jingjing^{1,2},
Li Jing^{1,2}, Ning Tigang^{1,2}, Zhong Li³

¹Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

²Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

³State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Yangtze Optical Fiber and Cable Joint Stock Limited Company, Wuhan 430073, Hubei, China

Abstract A central refractive index depressed few-mode erbium-doped fiber (FM-EDF) can change the number and cut-off order of transmission modes, and has an excellent performance in terms of mode field modulation and gain equalization. In this paper, the equivalent refractive index theory is employed to describe the cut-off characteristics of optical fiber modes, and the changes of modes during the transition from the traditional step-index fibers to ring-core fibers are studied. The results show that when the central depression is larger than 0.012, the optical fiber only supports LP_{m1} mode transmission and makes the field energy of LP₀₁ mode shift away from the central areas. Additionally, when the optical fiber is used in signal amplification areas, and there is a corresponding linear relationship between the refractive index depression and the radius of the doped region, the differential modal gain can be kept below 2 dB. A homemade central depressed FM-EDF is used to test the gain characteristics of LP_{m1} mode. The experimental results show that the gain of all signal modes is higher than 18 dB, and the differential modal gain is 1.3 dB.

Key words optical communications; optical fiber communication; few-mode erbium-doped fiber; central depression; modal gain equalization; ring-core fiber

收稿日期: 2022-04-02; 修回日期: 2022-04-22; 录用日期: 2022-05-16

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801003)

通信作者: *lpei@bjtu.edu.cn

1 引言

随着时分复用、波分复用和偏振复用等技术的成熟应用,单模光纤(SMF)通信系统容量已经接近香农极限^[1-2],故通信升级扩容迫在眉睫。基于少模光纤(FMF)的模式复用(MDM)传输系统可在单个光纤芯子中传输多个模式,突破了单模光纤容量的限制,进而受到了广泛的关注^[1,3-5]。2011年,首个MDM系统利用三模光纤,实现了同一芯子中三个模式的共同传输^[6]。此后,研究者提出了多种FMF结构,并将其应用于MDM系统中,包括渐变折射率光纤^[7]、多包层光纤^[8]和纳米孔辅助FMF^[9]等。随着光纤制作技术的进步,MDM系统向着高复用因子、高模式稳定性和长距离传输^[10-18]方向不断发展。然而,由于FMF中的模式损耗和模式增益不同,故MDM系统在经过长距离传输时模式能量差异较大且随着传输距离的增加在不断累积^[19],进而会影响传输系统的性能。

模式相关损耗和增益均衡决定了信号通道之间的功率平衡,少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)被认为是解决功率不平衡问题的关键器件之一^[20]。定义模间增益差(DMG)来评估信号功率的差异。若DMG过大将影响信号传输的稳定性甚至导致通信中断^[4]。因此,DMG是衡量FM-EDFA放大性能优劣的关键参数。在阶跃折射率少模掺铒光纤(FM-EDF)中,由于较集中的类高斯LP₀₁和发散的LP_m(切向模数 $m \geq 1$,径向模数 $n > 1$)之间的模式强度分布明显不同,故会产生较大的DMG。在这种情况下,在FM-EDF的光纤中心处引入凹陷可以平衡模式增益^[21]。Yung等^[22]首次提出了一种具有中心凹陷的FM-EDF,使得DMG比均匀掺杂的普通阶跃折射率光纤(SIF)降低了2 dB。Kang等^[23]于2012年研究了LP₀₁泵浦下中心凹陷程度对DMG的影响,并通过仿真实现了大约2 dB的DMG。设计折射率剖面和多层铒离子掺杂剖面可以实现低DMG,但精确控制多层掺杂离子分布会使得光纤制作的难度增加,而光纤折射率设计是实现增益均衡的一种经济有效的方法。因此,研究者提出了具有多层芯的FM-EDF,其基本特征为存在中心折射率凹陷。例如,Yamashita等^[24]于2020年设计了带有中心凹陷的多层芯结构,实现了放大两个模式时的DMG大约为1.2 dB。

环芯光纤(RCF)在中心区域处存在折射率下陷,并且中心区域的折射率与包层相同。在RCF中,高折射率的环芯夹在两个低折射率区域之间。由于RCF具有独特的折射率剖面,故其模式特性与典型的阶跃折射率光纤有很大的不同,并对模式截止顺序进行了重新排序。对RCF参数进行优化后,所有支持的模式都可被限制在高折射率的环芯中,并对LP_{0n}($n > 1$)模式截止,只传输线偏振LP_{m1}模式。RCF抑制LP₀₁模式能量向中心聚集,从而实现了模式分布调控和对应掺杂光纤的信号光模式增益均衡。2015年,日本研究者提出了一种两模环芯掺铒光纤,实现了约1 dB的

DMG^[25]。为了增加光纤所支持的模数,研究者提出了一种DMG约为1 dB的五模环芯掺铒光纤放大器,但增益较低(10 dB)^[26]。2021年,广东工业大学研究者提出了一种两模式环芯掺铒光纤^[27],实现了0.22 dB的DMG。2022年,北京交通大学阮江冉等^[28]在包层泵浦下设计了一种环芯掺铒光纤,在仿真下实现增益大于22 dB的同时,保持了DMG小于0.5 dB。到目前为止,由于RCF具有相同的模式限制区域和相似的模式分布,故已被证实可为所传导的信号模式提供增益均衡^[29]。然而,从阶跃折射率光纤到RCF的变化过程和模式调控机理目前尚不明确。中心折射率凹陷数值大小对模式截止顺序的影响机制仍需进一步研究,这将为揭示模场变化机理与增益均衡动态调控提供理论与技术支持。

首先,本文讨论了随着中心凹陷的不断加深,阶跃折射率光纤变为RCF过程中模场分布和模式增益的变化特性。然后,详细分析了模式截止和模式分布在中心凹陷过程中的变化规律。最后,讨论了中心凹陷加深时,均匀掺杂条件下掺杂半径对增益和增益均衡特性的影响。结果发现,当掺杂半径与折射率凹陷存在一定线性关系时,DMG可保持在较低值。在实验中,利用自制的中心凹陷型FM-EDF对模式增益进行了测试,DMG为1.3 dB。

2 引入中心凹陷的影响

2.1 模式截止

随着中心凹陷的引入,可以从图1中看出从阶跃折射率光纤到RCF的变化过程。图1(a)展示了具有单层芯和包层的阶跃折射率光纤,其中 n_1 和 n_2 分别表示包层和纤芯的折射率,且 $n_2 - n_1 = 0.015$,纤芯半径为 $r_2 = 7.5 \mu\text{m}$ 。中心凹陷型光纤可通过降低阶跃折射率型光纤中心的折射率获得,凹陷部分的折射率被记为 n_3 。不断加深凹陷,当 n_3 等于包层的折射率时,阶跃折射率光纤转变成RCF,如图1(c)所示。在折射率凹陷过程中, n_4 表示中心凹陷部分和高折射率部分之间的折射率差值,即 $n_4 = n_2 - n_3$ 。中心凹陷区域半径为 $r_1 = 4 \mu\text{m}$, $r_1 \sim r_2$ 范围内为高折射率区域。

当中心折射率存在下陷时,模场分布可由三层光纤理论推导得出。纤芯由中心凹陷区和高折射率区组成。为讨论中心下陷带来的影响,将多层纤芯的折射率等效为单层结构的折射率。光纤归一化频率的表达式^[30]为

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_e^2 - n_1^2}, \quad (1)$$

式中: n_e 为纤芯的等效折射率; λ 为光波波长; a 为光纤纤芯半径。根据等效面积, n_e 的表达式^[31]为

$$n_e = \sqrt{n_2^2 - (n_2^2 - n_3^2) \frac{r_1^2}{r_2^2}}. \quad (2)$$

归一化传播常数(NPC)的表达式^[30]为

$$b = \sqrt{[(\beta/k)^2 - n_1^2] / (n_e^2 - n_1^2)}, \quad (3)$$

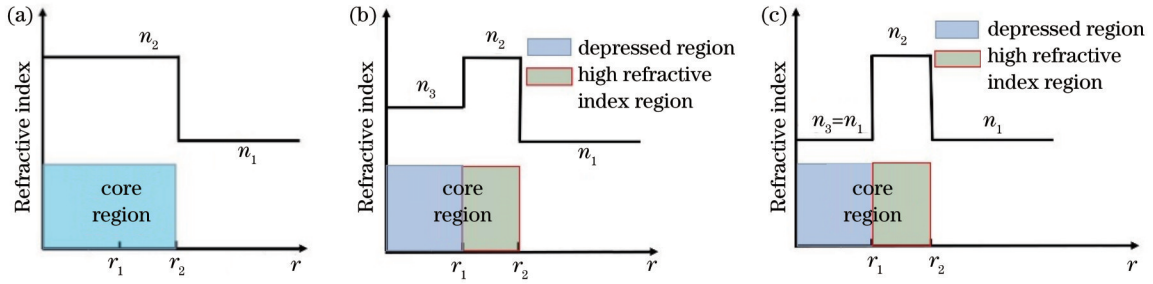


图 1 中心凹陷过程中光纤的典型折射率剖面。(a)阶跃折射率光纤;(b)中心凹陷型光纤;(c)环芯光纤

Fig. 1 Typical refractive index profiles of fiber in process of central depression. (a) Step-index fiber; (b) central depressed fiber; (c) ring-core fiber

式中: β 为模式的传播常数; k 为波数。

图 2 显示了不同 n_d 下的 $b-V$ 函数曲线。如图 2(a) 所示,在阶跃折射率光纤中, LP_{02} 模式总是出现在 LP_{31} 模式之前。无论归一化频率如何变化,光纤中可容纳的模式的激发次序都按固定顺序排列,即 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{02} 、 LP_{31} 、 LP_{12} 。在图 2(b)~(d) 中,随着 n_d 的增长, LP_{02} 模的归一化截止频率逐渐增大。相反, LP_{31} 模

式的归一化截止频率减小,并逐渐低于 LP_{02} 模式。当 $n_d=0.005$ 时, LP_{02} 模式的 NPC 与 LP_{31} 模式的 NPC 在 $V=6.2$ 处相等,如图 2(b) 所示。随着图 2(c) 和图 2(d) 中 n_d 的增长, LP_{02} 模式完全在 LP_{31} 模式之后激发。结果表明,随着中心折射率凹陷,传输模式的激发顺序会发生改变。

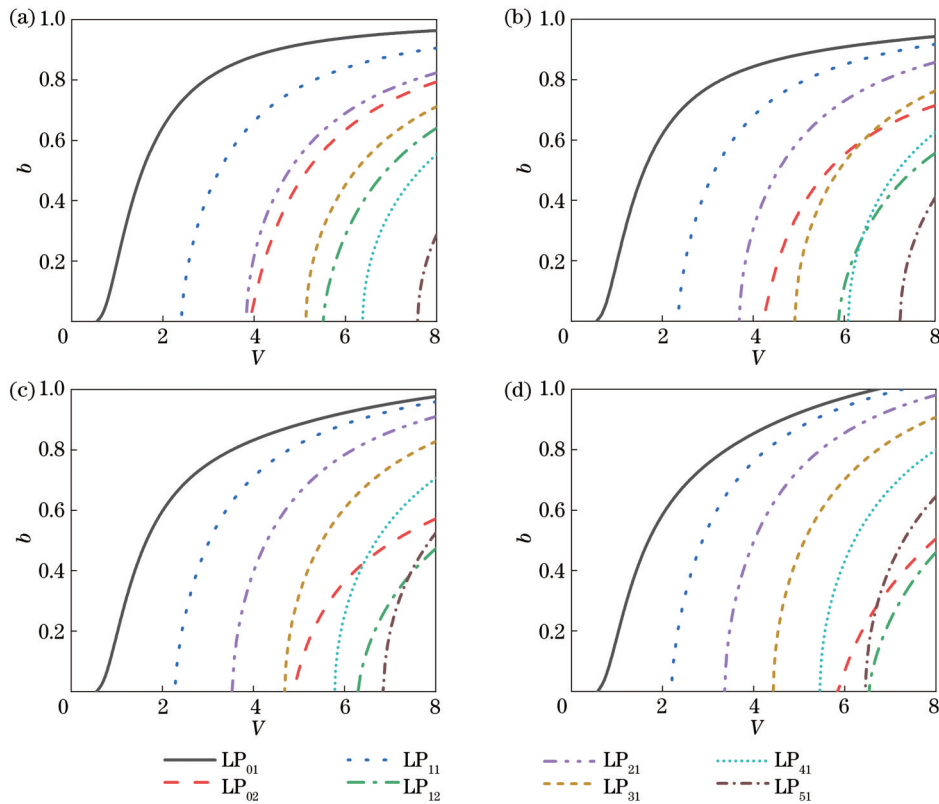


图 2 不同光纤线偏振模的 $b-V$ 曲线。(a) $n_d=0$ 时的阶跃折射率光纤;(b) $n_d=0.005$ 时的环芯光纤;(c) $n_d=0.010$ 时的环芯光纤;(d) $n_d=0.015$ 时的环芯光纤

Fig. 2 $b-V$ curve under different liner polarization modes of fiber. (a) Step-index fiber at $n_d=0$; (b) ring-core fiber at $n_d=0.005$; (c) ring-core fiber at $n_d=0.010$; (d) ring-core fiber at $n_d=0.015$

在折射率下陷的过程中,模式的归一化截止频率 V 与 n_d 的关系如图 3 所示。可以发现, LP_{02} 模式的归一化截止频率随折射率下陷数值的增加而明显增大,而 LP_{31} 模式的归一化截止频率随折射率凹陷程度的加深而减小。当 $n_d=9 \times 10^{-3}$ 时, LP_{02} 和 LP_{31} 模式的 V 值

相等,表明随着凹陷的加深, LP_{02} 模式将在 LP_{31} 模式之后被激发。

在 1550 nm 波长下,有效折射率 n_{eff} ($n_{eff}=\beta/k$) 与 n_d 的关系如图 4 所示。阶跃型光纤 ($n_d=0$) 支持 6 种线偏振模式 (LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{02} 、 LP_{31} 和 LP_{12})。在阶跃型

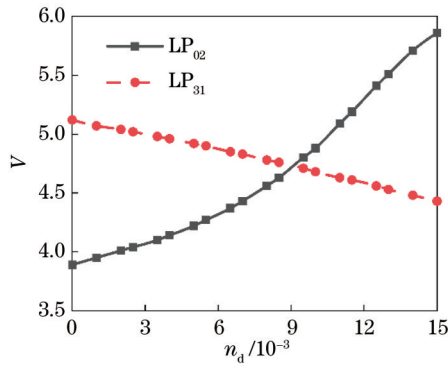


图 3 中心折射率凹陷过程中 LP₀₂ 模式和 LP₃₁ 模式的归一化截止频率变化

Fig. 3 Normalized cutoff frequency variation of LP₀₂ mode and LP₃₁ mode in process of central refractive index depression

光纤到 RCF 的变化过程中,模式的有效折射率明显降低。特别是,对于 LP₀₂ 和 LP₁₂ 模式,模式的有效折射率下降得更快。当 $n_d = 6 \times 10^{-3}$ 和 $n_d = 12 \times 10^{-3}$ 时,LP₁₂ 和 LP₀₂ 模式分别被截止。在 n_d 大于 12×10^{-3} 后,只剩下 4 个线性偏振模式(LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁ 和 LP₃₁)。由图 4 可知,在折射率的连续下降过程中,仅径向模数为 1 的 LP_{m1} 持续存在,且支持的模式序号和顺序都是确定的。此外,在阶跃折射率光纤中所有模式的有效折射率都小于中心凹陷区的折射率($n_{\text{eff}} < n_3$)。随着折射率的持续下降,有效折射率也逐渐降低,最后达到 $n_{\text{eff}} > n_3$ 。在折射率从 $n_{\text{eff}} < n_3$ 到 $n_{\text{eff}} > n_3$ 的变化过程中,必然有一个临界点使得 $n_{\text{eff}} = n_3$ 。根据边界连续性条件,当 $\beta = k_0 \times n_3$ (k_0 为真空中的波数)时,中心凹陷的模式大小可表示为

$$\Psi_m = J_m\left(\frac{U_i}{a} r\right) = I_m\left(\frac{W_i}{a} r\right), \quad (4)$$

式中: $J_m(\cdot)$ 为贝塞尔函数; $I_m(\cdot)$ 虚宗量贝塞尔函数; U_i 为第 i 层纤芯内的归一化横向参数; W_i 为第 i 层包层内的归一化横向参数; r 为光纤半径。在 $n_{\text{eff}} = n_3$ 的条件下,所支持模式的模式分布和对应的有效折射率如图 5 所示。此时,中心凹陷层的有效折射率分别为

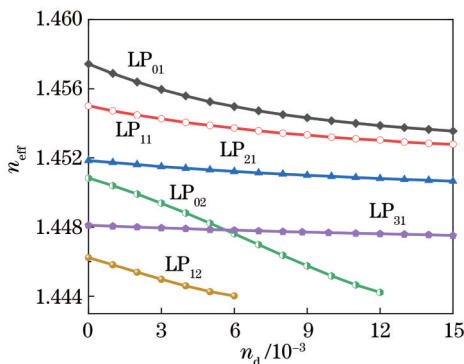


图 4 1550 nm 波长处中心折射率凹陷过程中的有效折射率变化

Fig. 4 Effective refractive index variation in process of central refractive index depression at wavelength of 1550 nm

1.4559(LP₀₁)、1.4538(LP₁₁)、1.4510(LP₂₁) 和 1.4476(LP₃₁)。从模式分布图可以看出,中心凹陷的方式具有使模式能量分布平衡的可能性。

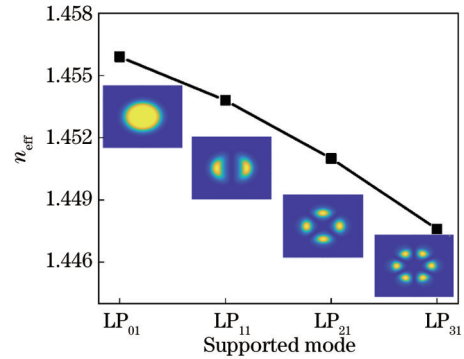


图 5 $n_{\text{eff}} = n_3$ 时所支持模式的模式分布和对应的有效折射率
Fig. 5 Mode distribution of supported modes and corresponding effective refractive indexes at $n_{\text{eff}} = n_3$

2.2 模式分布调控

阶跃折射率光纤变化到 RCF 的模场分布如图 6 所示。阶跃折射率光纤的模式剖面如图 6(a) 所示。光纤可支持类高斯型 LP₀₁ 和哑铃型 LP_{m1} 模式。当 $n_d = 9 \times 10^{-3}$ 时,中心凹陷型光纤中可容纳 5 种模式。与阶跃折射率光纤相比,LP₀₁ 模式在中心凹陷型光纤中心的强度分布减弱,且模式趋于发散。RCF 模场分布如图 6(c) 所示,其所支持模式的功率基本被限制在高折射率环芯中。

RCF 在 1550 nm 波长处支持多种模式。由于在中心凹陷加深的过程中,LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁、LP₃₁ 4 个模式始终不会被截止,故接下来仅讨论这 4 种模式的模式特征。图 7 显示了不同中心凹陷时的模式强度分布。在计算中,对各个模式的功率进行归一化。可以发现,随着中心折射率凹陷的加深,低阶模式 LP₀₁ 和 LP₁₁ 有相对明显的变化,而 LP₂₁ 和 LP₃₁ 模式变化得不明显。由图 7(a) 可知:当 $n_d = 0$ 时,LP₀₁ 模式强度呈类高斯形状分布;当 $n_d = 3 \times 10^{-3}$ 时,功率逐渐向外扩散,并出现平顶峰,此时 LP₀₁ 模式的功率在整个光纤纤芯中几乎为均匀分布;随着 n_d 值的继续增加,中心功率开始小于边缘功率,此时大部分功率集中在高折射率环芯内。对于图 7(b)~(d) 所示的 LP_{m1} ($m > 1$) 模式,随着中心凹陷的加深,功率向光纤中心处轻微偏移,其中图 7(b) 所示的 LP₁₁ 模式的能量偏移最显著。

从图 7 的分析可以看出,模式功率分布随不同的中心凹陷而逐渐变化。不同区域内功率所占的比例用功率限制因子(PCF)表示,其表达式^[32]为

$$\Gamma_i = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{-r_i}^{r_i} \Psi(r, \theta) \cdot \Psi^*(r, \theta) r dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(r, \theta) \cdot \Psi^*(r, \theta) r dr d\theta}, \quad (5)$$

式中: θ 为极角。图 8 给出了中心凹陷区和高折射率区的模式功率限制因子与凹陷深度 n_d 之间的关系,图中每个模式对应的 6 种情况从左到右分别为 $n_d = 0$ 、 $n_d =$

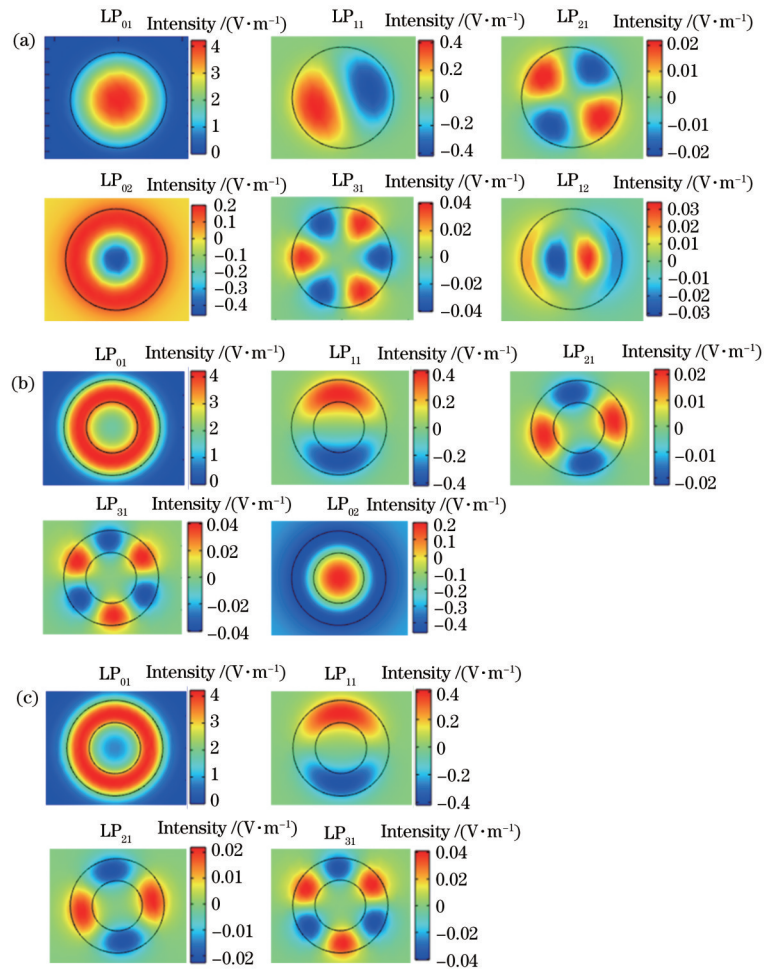


图 6 不同光纤的模场分布示意图。(a) $n_d=0$ 时的阶跃折射率光纤; (b) $n_d=9 \times 10^{-3}$ 时的中心凹陷型光纤; (c) $n_3=n_1$ 时的环芯光纤
Fig. 6 Schematic diagram of mode field distribution of different fibers. (a) Step-index fiber at $n_d=0$; (b) central depressed fiber at $n_d=9 \times 10^{-3}$; (c) ring-core fiber at $n_3=n_1$

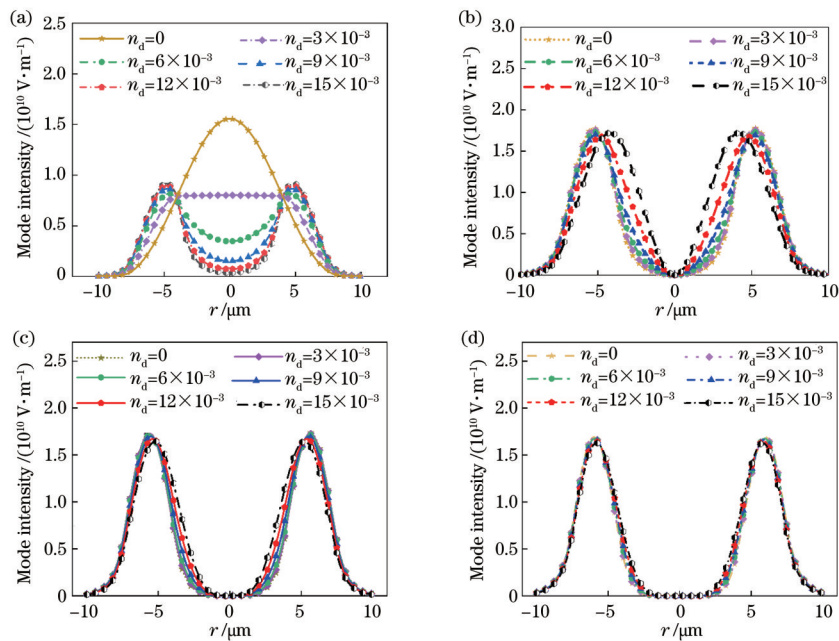


图 7 不同模式的强度分布。(a) LP_{01} ; (b) LP_{11} ; (c) LP_{21} ; (d) LP_{31}
Fig. 7 Intensity distribution of different modes. (a) LP_{01} ; (b) LP_{11} ; (c) LP_{21} ; (d) LP_{31}

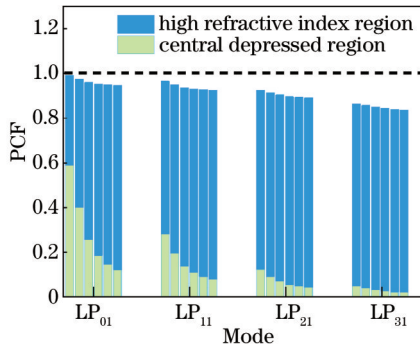


图 8 不同 n_d 下中心凹陷区域和高折射率区域中模式的功率限制因子

Fig. 8 Power confinement factors of modes in central depressed region and high refractive index region at different n_d

3×10^{-3} 、 $n_d = 6 \times 10^{-3}$ 、 $n_d = 9 \times 10^{-3}$ 、 $n_d = 12 \times 10^{-3}$ 和 $n_d = 15 \times 10^{-3}$ 。由于中心凹陷使得整个纤芯区域等效折射率降低,此时纤芯等效折射率和包层之间的折射率差减小,故纤芯对模式的束缚能力减弱,这会导致更多的功率泄漏到包层中,最终纤芯内总的限制因子随着下陷深度的增加而下降。虽然在纤芯高折射率区域中限制因子在不断增大,但是此时模式之间的功率限制因子之差比较稳定,基本不随凹陷深度的变化而改

表 1 中心凹陷型光纤计算模式增益的参数

Table 1 Parameters of central depressed fiber for calculating modal gain

Parameter	Value	Parameter	Value
Pump power P_p /W	1	Pump wavelength λ_p /nm	980
Signal input power P_s /mW	0.1	Signal wavelength λ_s /nm	1550
Fiber length L /m	5	Mass fraction of $\text{Er}^{3+} N_0 / 10^{-6}$	250

图 9(a)、(b)分析了不同离子掺杂区域的阶跃折射率光纤的增益特性。图 9(a)展示了在整个纤芯区域中掺杂铒离子的情况下,增益和 DMG 的变化情况。可以看出:基模 LP_{01} 增益最大,在长度为 2.2 m 时,模式增益达到了 20 dB;随着光纤长度的增加,增益有一个相对平缓的增长, $L=6$ m 时 LP_{01} 模式的增益达到了 27.7 dB,而 LP_{31} 模式的增益最小,仅为 24.3 dB;随着光纤长度的增加,DMG 在 3.4 dB 左右逐渐平稳。在均匀掺杂铒离子的情况下,由于基模 LP_{01} 模式分布集中,故总是获得最大的增益。如图 9(b)所示,当掺杂区变为高折射率区时,中心区域的掺杂消失,此时 LP_{01} 模式的增益最小, LP_{31} 模式的增益最大。当光纤长度为 6 m 时,DMG 增加到了 13 dB。图 9(a)、(b)的结果表明,调整中心凹陷区域的掺杂浓度有利于降低 DMG。

图 9(c)、(d)描述了 $n_d = 9 \times 10^{-3}$ 的凹陷型光纤在不同掺杂面积下的增益和 DMG。在中心折射率下降引起模场分布的变化后,仅在高折射率区域进行掺杂可将 DMG 降到 2 dB 以下。图 9(e)、(f)显示了 RCF 的增益性能,并且模式增益与 DMG 的变化一致。当光纤长度为 6 m 时,在高折射率环芯中掺杂铒离子与在

变。在阶跃折射率光纤到 RCF 的变化过程中,各信号模式在高折射率区的 PCF 之差从 0.4 减小到了 0.01。由于 PCF 的大小可直接影响各信号模式被放大的效果,故各模式间相近的 PCF 使得增益均衡成为了可能。

2.3 模式增益均衡

降低光纤中心折射率可调整模式功率限制因子,有助于使得各个模式的强度分布相近。在铒离子掺入纤芯后,由于自发吸收和自发辐射效应的存在,故信号光将被放大。由于包层泵浦条件下有利于构建全光纤系统结构^[33-34],故接下来在包层泵浦条件下分析增益特性。在包层泵浦中,泵浦功率均匀地分布在纤芯内。在包层泵浦条件下,模式的放大效果与 PCF 息息相关。利用 DMG 来衡量放大器的性能,其表达式^[27]为

$$M_{\text{DMG}} = \max |G_{j_1} - G_{j_2}|, \quad (6)$$

式中: G_{j_1} 为 j_1 信号模式下的增益; G_{j_2} 为 j_2 信号模式下的增益; $\max(\cdot)$ 为取最大值函数。

为了进一步比较中心凹陷变化带来的影响,下面只讨论 LP_{n1} (LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{31}) 模式的增益特性。采用嵌套打靶法的四阶龙格-库塔法对掺铒光纤的增益特性进行数值求解^[35-36]。计算中采用的相关参数如表 1 所示。

整个纤芯区域中掺杂铒离子相比,DMG 从 3.8 dB 降低到了 0.8 dB。

总之,DMG 随着折射率凹陷和掺杂区域的改变而动态变化。设掺杂区的范围是 r_d 到 r_2 ,在图 10 中显示了 DMG 随着折射率凹陷深度 n_d 和掺杂半径 r_d 的动态变化过程,其中等高线代表相同的 DMG 值。在图 10(b)中,虚线代表 DMG 一直低于 2 dB。选取不同中心凹陷深度 n_d 使得 DMG 达到最小的掺杂半径 r_d ,经过数据线性回归拟合后,给出 r_d 和 n_d 的函数关系为

$$r_d = 197.94 \times n_d + 1.7, \quad 0 \leq n_d \leq 0.0114, \quad (7)$$

该回归直线的拟合优度 R^2 为 0.9817,残差平方和为 0.191,线性拟合结果较好。如式(7)所示,当中心凹陷值和掺杂半径符合线性变化时,DMG 均能保持在较低的水平。当 n_d 大于 0.01 时,选取相应掺杂半径 r_d ,可使得 DMG 小于 1 dB。该发现为光纤设计和制造提供了理论指导。

3 实验测试

图 11(a)所示为自制的中心凹陷型 FM-EDF 折射率曲线与横截面。虽然制造的光纤和理论讨论的光纤之间存在差异,但是仍然可以证实中心凹陷对模式增

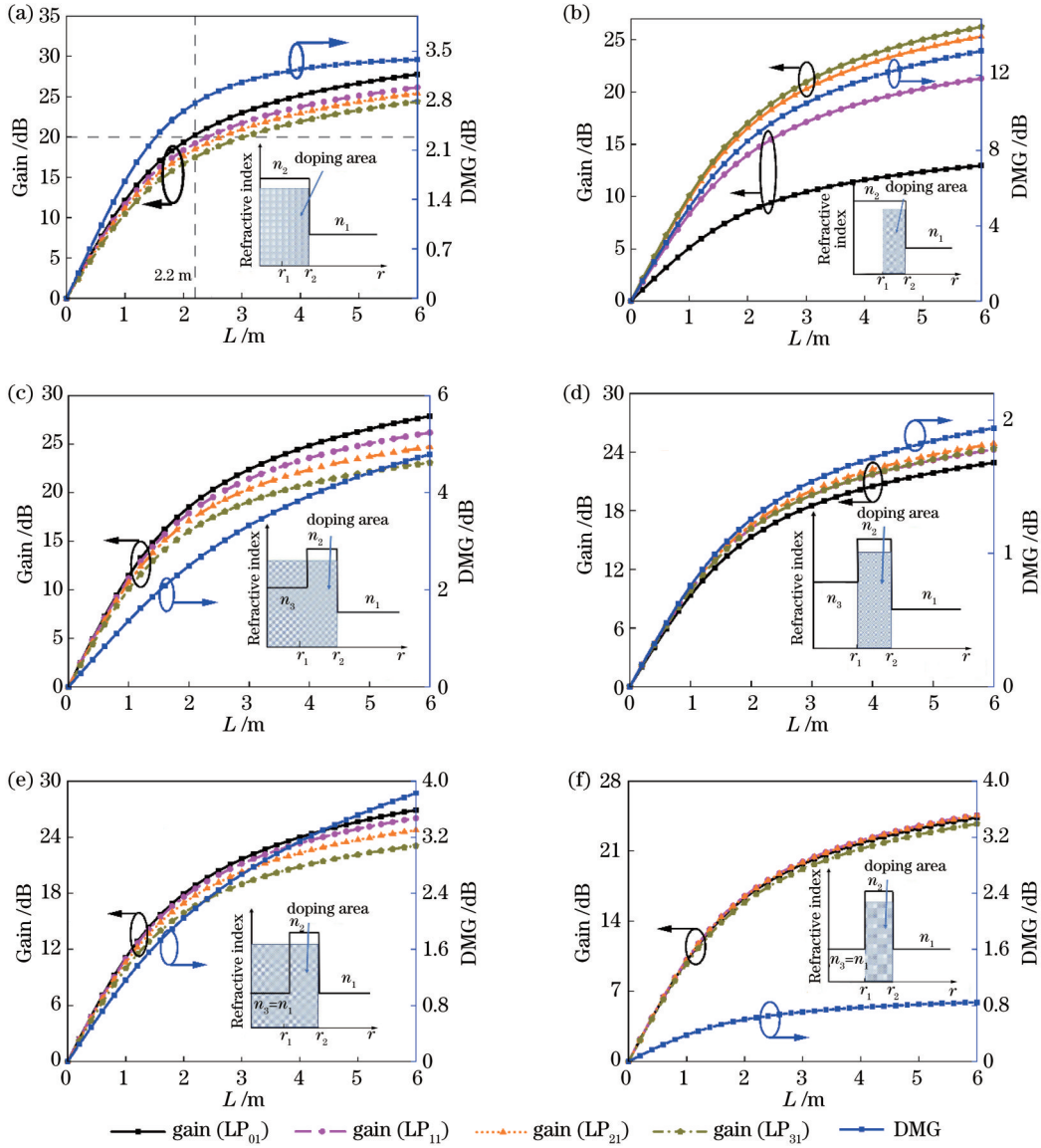


图 9 增益和DMG与光纤长度的关系。(a) $0 \sim 7.5 \mu\text{m}$ 掺杂面积下的阶跃折射率光纤；(b) $4.0 \sim 7.5 \mu\text{m}$ 掺杂面积下的阶跃折射率光纤；(c) $0 \sim 7.5 \mu\text{m}$ 掺杂面积、 $n_d = 9 \times 10^{-3}$ 下的中心凹陷型光纤；(d) $4.0 \sim 7.5 \mu\text{m}$ 掺杂面积、 $n_d = 9 \times 10^{-3}$ 下的中心凹陷型光纤；(e) $0 \sim 7.5 \mu\text{m}$ 掺杂面积下的环芯光纤；(f) $4.0 \sim 7.5 \mu\text{m}$ 掺杂面积下的环芯光纤

Fig. 9 Gain and DMG varying with fiber length. (a) Step-index fiber with doping area of $0 \sim 7.5 \mu\text{m}$; (b) step-index fiber with doping area of $4.0 \sim 7.5 \mu\text{m}$; (c) central depressed fiber with doping area of $0 \sim 7.5 \mu\text{m}$ and $n_d = 9 \times 10^{-3}$; (d) central depressed fiber with doping area of $4.0 \sim 7.5 \mu\text{m}$ and $n_d = 9 \times 10^{-3}$; (e) ring-core fiber with doping area of $0 \sim 7.5 \mu\text{m}$; (f) ring-core fiber with doping area of $4.0 \sim 7.5 \mu\text{m}$

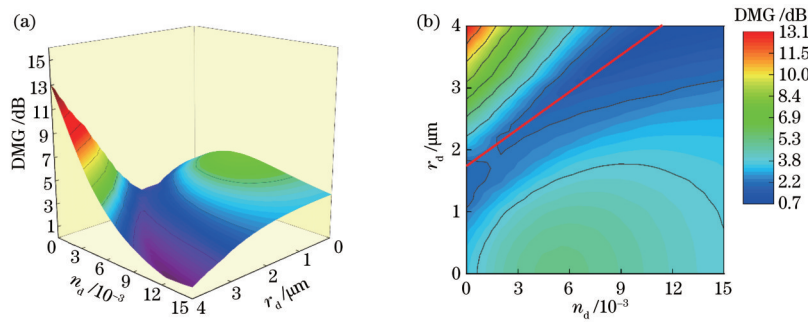


图 10 不同 n_d 和 r_d 下的 DMG。(a) 三维图；(b) 表面等高线

Fig. 10 DMGs under different n_d and r_d . (a) Three-dimensional illustration; (b) surface contour lines

益均衡是有帮助的。自制光纤的中心凹陷深度 n_d 为 0.0027。在制造的中心凹陷型光纤的基础上,搭建了 FM-EDFA,如图 11(b)所示,其中 MUX 为复用器, Gel 为凝胶。信号源和泵浦源采用可调谐半导体激光器 (TLS, Santec, TSL-510) 和多模泵浦 (Vanus-MM-

980)。受到器件的限制,利用光子灯笼 (PL) 来得到信号模式 (LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{21a})。信号和泵浦的耦合采用自制的包层泵浦耦合器实现。在玻片上使用高折射率凝胶来吸收 EDF 输出端的剩余泵浦功率。采用光谱分析仪 (OSA, AQ6370) 来测试增益特性。

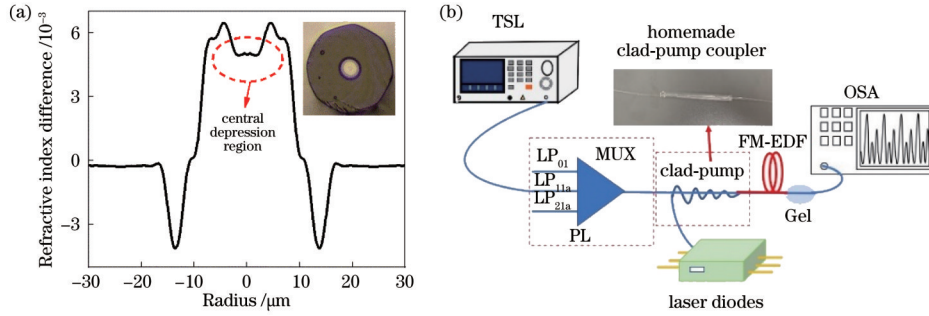


图 11 自制中心凹陷型光纤折射率剖面与相应实验装置示意图。(a) 光纤的折射率剖面和扫描电子显微镜截面图; (b) 基于中心凹陷型光纤的 FM-EDFA 装置图

Fig. 11 Refractive index profile of homemade central depressed fiber and schematic diagram of corresponding experimental device. (a) Refractive index profile and scanning electron microscope section of fiber; (b) experimental setup of FM-EDFA based on central depressed fiber

实验测量了模式增益和 DMG, 结果如图 12 所示。实验中 EDF 的长度为 2.5 m, TLS 的功率被设定为 -15 dBm。由于与模式相关的损耗会导致信号光进入 EDF 的功率不相同, 故需要在 EDF 的输入端测量基底信号功率 (P_m)。基底信号功率的含义为信号光在 EDF 输入端的功率, 可用于计算模式增益。利用一个可调谐的衰减器来确保基底信号功率一致, 进而使得各模式信号功率 P_m 的差值低于 1 dB, 便于分析数据以

评价 EDF 性能的优劣。图 12 给出了不同泵浦功率下的信号光谱。对 LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{21a} 信号模式分别测试的光谱如图 12(a)~(c) 所示, 其中 -20 dB 附近的虚线代表基础信号功率。由于 EDF 的吸收, 故 $P_p=0$ 时的信号功率基本被吸收。随着泵浦功率的增大, 信号逐渐被放大。当 $P_p=5$ W 时, 信号功率超过了基底功率。图 12(d) 为模式增益和 DMG 的情况。在中心凹陷的情况下, LP_{01} 模式的增益与高阶模基本相同。当 $P_p >$

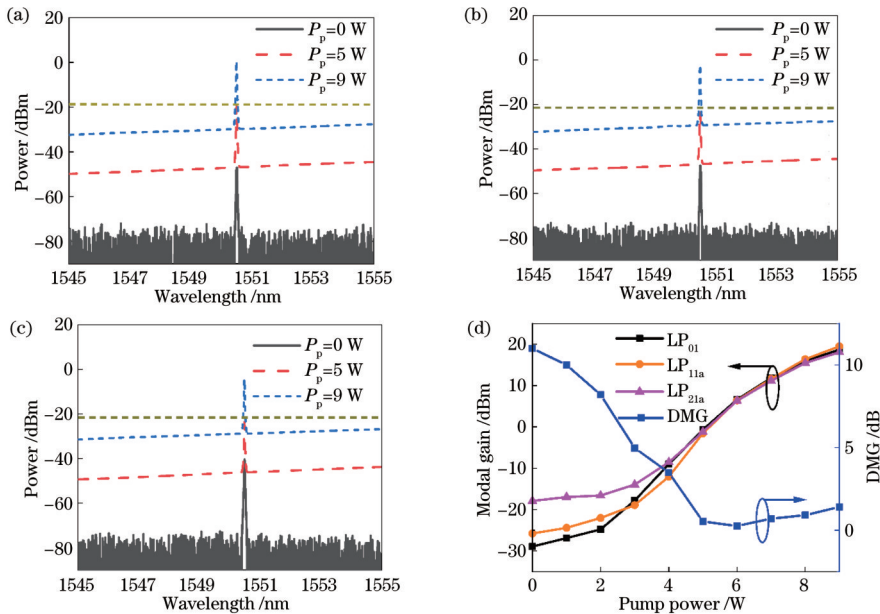


图 12 不同泵浦功率下不同模式的传输功率, 以及模式增益和 DMG 与泵浦功率的关系。(a) 不同泵浦功率下 LP_{01} 模式的传输功率; (b) 不同泵浦功率下 LP_{11a} 模式的传输功率; (c) 不同泵浦功率下 LP_{21a} 模式的传输功率; (d) 模式增益和 DMG 与泵浦功率的关系

Fig. 12 Transmission power of different modes under different pump powers, and modal gain and DMG varying with pump power. (a) Transmission power of LP_{01} mode under different pump powers; (b) transmission power of LP_{11a} mode under different pump powers; (c) transmission power of LP_{21a} mode under different pump powers; (d) modal gain and DMG varying with pump power

6 W 时, LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{21a} 模式的 DMG 为 0.26 dB, 模式增益约为 6.5 dB。在 6~9 W 泵浦功率范围内, DMG 始终低于 1.5 dB。当 $P_p=9$ W 时, LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{21a} 模式的增益分别为 18.7 dB、19.4 dB 和 18.1 dB, 同时 DMG 为 1.3 dB。可以预见, 随着研究的深入, 所搭建的全光纤 FM-EDFA 有希望与模分复用系统结合, 为信道完美均衡提供助力。

4 结 论

从理论和实验两方面分析了中心凹陷辅助的少模掺铒光纤的模式分布和增益均衡特性。结果表明, 在中心凹陷的变化过程中, LP_{01} 模式能量分布变化显著。当将该光纤用于信号放大中, 且中心折射率凹陷数值大小和离子掺杂半径之间存在一定线性关系时, DMG 可保持在较小区间内。利用自制的中心凹陷辅助光纤进行了增益测量。在包层泵浦条件下, 信号增益大于 20 dB, DMG 为 1.3 dB。预期通过进一步优化折射率和掺杂剖面, 可以实现更好的增益均衡性能。基于自制包层泵浦的全光纤 FM-EDFA 结构可与现有的少模光纤链路直接互联, 进而实现 MDM 系统中无源传输与有源放大的在线集成。

参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [2] CISCO V. Cisco visual networking index: forecast and trends, 2017-2022[EB/OL]. [2021-02-05]. <https://twiki.cern.ch/twiki/pub/HEPIX/TechwatchNetwork/HtwNetworkDocuments/white-paper-c11-741490.pdf#:~:text=The%20current%20Cisco%20Visual%20Networking%20Index%20%28VNI%29%20forecast,2017%2C%20a%20CAGR%20of%2026%20percent%20%28Figure%20%29.>
- [3] Richardson D J. Filling the light pipe[J]. *Science*, 2010, 330(6002): 327-328.
- [4] Bigot L, le Cocq G, Quiquempois Y. Few-mode erbium-doped fiber amplifiers: a review[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(3): 588-596.
- [5] 裴丽, 王建帅, 郑晶晶, 等. 空分复用光纤的特性及其应用研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1002001. Pei L, Wang J S, Zheng J J, et al. Research on specialty and application of space-division-multiplexing fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1002001.
- [6] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[C]//2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 6-10, 2011, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011.
- [7] Olshansky R. Mode coupling effects in graded-index optical fibers[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(4): 935-945.
- [8] Askarov D, Kahn J M. Design of transmission fibers and

doped fiber amplifiers for mode-division multiplexing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(21): 1945-1948.

- [9] Xie Y H, Pei L, Zheng J J, et al. Design and characterization of nanopore-assisted weakly-coupled few-mode fiber for simpler MIMO space division multiplexing [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 76173-76181.
- [10] Rademacher G, Puttnam B J, Luís R S, et al. 1.01 Peta-bit/s C+L-band transmission over a 15-mode fiber[C]//2020 European Conference on Optical Communications (ECOC), December 6-10, 2020, Brussels, Belgium. New York: IEEE Press, 2020.
- [11] Rademacher G, Luis R S, Puttnam B J, et al. 159 Tbit/s C+L band transmission over 1045 km 3-mode graded-index few-mode fiber[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [12] Beppu S, Soma D, Sumita S, et al. 402.7-Tb/s MDM-WDM transmission over weakly coupled 10-mode fiber using rate-adaptive PS-16QAM signals[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(10): 2835-2841.
- [13] Rademacher G, Luís R S, Puttnam B J, et al. 93.34 Tbit/s/mode (280 Tbit/s) transmission in a 3-mode graded-index few-mode fiber[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [14] Shibahara K, Mizuno T, Lee D, et al. DMD-unmanaged long-haul SDM transmission over 2500-km 12-core×3-mode MC-FMF and 6300-km 3-mode FMF employing intermodal interference canceling technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(1): 138-147.
- [15] Shibahara K, Mizuno T, Kawakami H, et al. Full C-band 3060-km DMD-unmanaged 3-mode transmission with 40.2-Tb/s capacity using cyclic mode permutation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 38(2): 514-521.
- [16] Ryf R, Fontaine N K, Wittek S, et al. High-spectral-efficiency mode-multiplexed transmission over graded-index multimode fiber[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2018.
- [17] Shibahara K, Mizuno T, Miyamoto Y. Long-haul mode multiplexing transmission enhanced by interference cancellation techniques based on fast MIMO affine projection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(18): 4969-4977.
- [18] 刘畅, 裴丽, 解宇恒, 等. 异质结构的低串扰少模多芯光纤设计[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1106004. Liu C, Pei L, Xie Y H, et al. Design of low crosstalk few mode multi-core fiber based on heterogeneous structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106004.
- [19] Choutagunta K, Arik S Ö, Ho K P, et al. Characterizing mode-dependent loss and gain in multimode components [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(18):

- 3815-3823.
- [20] 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. Pei L, Li Z Q, Wang J S, et al. Review on gain equalization technology of fiber amplifier using space division multiplexing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106001.
- [21] Kasahara M, Saitoh K, Sakamoto T, et al. Design of three-spatial-mode ring-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(7): 1337-1343.
- [22] Yung Y, Alam S, Li Z, et al. First demonstration of multimode amplifier for spatial division multiplexed transmission systems[C]//37th European Conference and Exposition on Optical Communications, September 18-22, 2011, Geneva, Switzerland. Washington, D. C.: OSA, 2011: Th.13.K.4.
- [23] Kang Q Y, Lim E L, Jung Y, et al. Accurate modal gain control in a multimode erbium doped fiber amplifier incorporating ring doping and a simple LP_{01} pump configuration[J]. Optics Express, 2012, 20(19): 20835-20843.
- [24] 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 (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [25] Ono H, Hosokawa T, Ichii K, et al. 2-LP mode few-mode fiber amplifier employing ring-core erbium-doped fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27405-27418.
- [26] Jung Y, Kang Q, Shen L, et al. Few mode ring-core fibre amplifier for low differential modal gain[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2017.
- [27] Fang Y H, Zeng Y, Qin Y W, et al. Design of ring-core few-mode-EDFA with the enhanced saturation input signal power and low differential modal gain[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(4): 7200506.
- [28] 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.
- [29] Jung Y, Alam S U, Richardson D J, et al. Multicore and multimode optical amplifiers for space division multiplexing[M]//Willner A E. Optical fiber telecommunications VII. Amsterdam: Elsevier, 2020: 301-333.
- [30] Gloge D. Weakly guiding fibers[J]. Applied Optics, 1971, 10(10): 2252-2258.
- [31] Belardi W, de Lucia F, Poletti F, et al. Composite material hollow antiresonant fibers[J]. Optics Letters, 2017, 42(13): 2535-2538.
- [32] Qiu Q, Gu Z M, Shi C J, et al. Six-mode extended L-band EDFA with a low differential modal gain[J]. OSA Continuum, 2021, 4(5): 1676-1687.
- [33] LaRochelle 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, May 13-16, 2018, Quebec, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2018.
- [34] Jung Y, Lim E L, Kang Q, et al. Cladding pumped few-mode EDFA for mode division multiplexed transmission [J]. Optics Express, 2014, 22(23): 29008-29013.
- [35] 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]. Optics Express, 2007, 15(6): 3236-3246.
- [36] Morrison D D, Riley J D, Zancanaro J F. Multiple shooting method for two-point boundary value problems [J]. Communications of the ACM, 1962, 5(12): 613-614.