

增益均衡的远程遥泵少模光纤放大器

张振振¹, 郭骋¹, 张一弛², 杜城², 崔亮¹, 李小英^{1*}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;

²烽火藤仓光纤有限公司, 湖北 武汉 430074

摘要 模分复用技术是突破单模光纤通信系统容量极限的潜在途径。在未来可能存在的模分复用与波分复用相结合的系统, 不同空间模式和波长的增益差将制约系统容量和速率。为实现模式增益均衡和波长增益平坦, 利用 1480 nm LP₁₁ 模式抽运光抽运 44.5 km 超低损少模光纤, 进行分布式少模光纤拉曼放大。利用残余抽运光抽运少模掺铒光纤, 进行集中式少模掺铒光纤放大, 实验演示远程遥泵少模光纤放大器。实验表明, 在 1560~1600 nm 增益平坦带宽范围内, LP₀₁ 和 LP₁₁ 两个模式等效开关增益大于 15 dB, 模间增益差约为 2 dB。

关键词 光纤光学; 模分复用; 波分复用; 远程遥泵少模光纤放大器; 增益均衡

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1006004

Gain-Equalized Remotely Pumped Few-Mode Fiber Amplifier

Zhang Zhenzhen¹, Guo Cheng¹, Zhang Yichi², Du Cheng², Cui Liang¹, Li Xiaoying^{1*}

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology of the Ministry of Education, School of Precision Instruments & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Fiberhome & Fujikura Optics Fiber Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Mode division multiplexing is becoming a potential approach to overcome the capacity crunch of a single-mode fiber transmission system. In the future mode- and wavelength-division multiplexing system, different spatial modes and the wavelength gain difference will affect the transmission capacity and speed. In this study, to realize the modal gain equalization and wavelength gain flatness, a 44.5 km few-mode fiber with ultra-low loss is pumped by the 1480 nm pump light with LP₁₁ mode, and the distributed Raman amplification through the few-mode fiber is realized. The few-mode erbium doped fiber is pumped by the residual pump light, and the lumped few-mode erbium doped fiber amplification is realized. A remotely pumped few-mode fiber amplifier is experimentally demonstrated. The average equivalent on-off gain is greater than 15 dB, and a differential modal gain approximately 2 dB in the wavelength range of 1560-1600 nm is achieved.

Key words fiber optics; mode division multiplexing; wavelength division multiplexing; remotely pumped few-mode fiber amplifier; gain equalization

OCIS codes 060.2330; 060.2320; 060.4230; 190.5650

1 引言

随着云计算、大数据和物联网等新兴技术和业务的飞速发展, 网络流量呈指数增长, 单模光纤通信容量正逐渐逼近非线性香农极限^[1]。发展新型技术以满足未来流量增长趋势已迫在眉睫。作为突破单模光纤通信容量危机的潜在途径, 以少模光纤(FMF)中正交空间模式作为新增信道的模分复用技术(MDM), 在最近几年得到广泛关注^[2-5]。与波

分复用(WDM)系统类似, MDM 系统中不同模式信号较大的功率差, 将导致系统容量下降、中断概率升高^[6-7]。因此, 不同模式在传输过程中需要得到均衡放大。如何实现不同模式的增益均衡成为少模光纤放大器研究中的重点, 也是影响长距离 MDM 系统产业化的关键因素。

少模光纤放大器目前主要有两种。一种是少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA), 另一种是少模光纤拉曼放大器(FM-FRA)。FM-EDFA 模间增益差取

收稿日期: 2019-04-04; 修回日期: 2019-06-05; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 国家 973 计划(2014CB340103, 2014CB340101)

* E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn

决于抽运模式光强、信号模式光强和铒离子分布的交叠情况^[8]。因此,主要通过重构抽运模式^[9]、改变光纤折射率分布^[10]和精细裁剪铒离子分布^[11]等方式实现模式增益均衡。FM-FRA 的模式增益差则主要由抽运模式光强和信号模式光强的交叠决定,模式增益均衡主要依赖于抽运模式组合^[12]。以不同抽运方式实现拉曼增益均衡^[13],多波长增益平坦少模拉曼放大^[14]和二阶少模拉曼放大传输^[15]的研究相继出现。两种放大器各有特点,FM-EDFA 为集中式放大,抽运转换效率较高;而 FM-FRA 则以分布式放大、等效噪声系数低的特点,在长距离无中继的 MDM 光传输系统中发挥着重要作用^[16]。

在长距离的无中继单模光纤通信系统中,采用 1480 nm 的抽运光对无源传输光纤进行分布式拉曼放大的同时,还可以利用残余抽运光抽运掺铒光纤(EDF),实现掺铒光纤放大。这种放大器被称为远程遥泵放大器(ROPA)。ROPA 可以进一步延长传输距离,减少有源中继器的使用,并在更宽的频谱上扩大传输容量,提高 WDM 的信道数目。因无需模式增益均衡,远程遥泵放大技术在以不同单模纤芯作为独立信道的芯分复用中得到实验演示^[17-18],但在基于少模光纤中以不同模式作为独立信道的 MDM 中尚未见报道。本文将分布式少模光纤拉曼放大和少模掺铒光纤(FM-EDF)放大过程相结合,

实验演示远程遥泵少模光纤放大器。

本文简要介绍 MDM 中远程遥泵放大的原理,并对其各过程中模式增益均衡进行分析。随后实验演示利用超低损少模光纤的宽带前向远程遥泵少模光纤放大,在保证模式增益均衡,两模式平均等效开关增益约为 15 dB 的同时,实现 1560~1600 nm 波长范围内的增益平坦,为进一步研究 MDM 在海底光通信等长距离无中继传输中的应用提供参考。

2 远程遥泵少模光纤放大器实验原理

由于前后向远程遥泵少模光纤放大器的作用机理相同,本研究仅对前向远程遥泵少模光纤放大器进行演示,分析利用 1480 nm 残余抽运模式实现增益带宽扩展、模式增益均衡的可行性。两信号模式传输前向远程遥泵少模光纤放大器原理如图 1 所示,不同信号经模式复用器转换复用后,耦合进入少模光纤中传输。1480 nm 的抽运光耦合进入少模光纤,对各模式上的信号光进行分布式拉曼放大。经过长距离传输后,残余的抽运光和经分布式放大后的信号光,同时耦合进入 FM-EDF 中,利用铒离子的受激辐射进一步放大信号光。最终放大传输的各信号模式由模式解复用器解调输出。因此,在远程遥泵过程中存在两种少模信号放大过程,即分布式少模光纤拉曼放大和集中式 FM-EDF 放大。

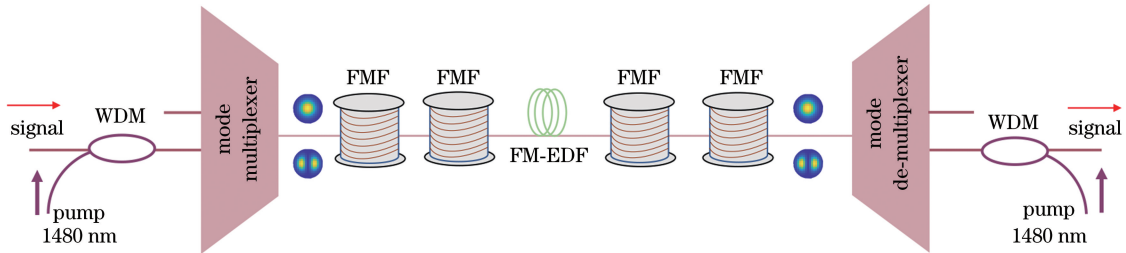


图 1 两信号模式传输前向远程遥泵少模光纤放大器原理框图

Fig. 1 Schematic of forward remotely pumped few-mode fiber amplifier with two-signal mode transmission

由少模光纤拉曼放大的机理可知^[12],少模光纤不同信号模式的增益取决于信号模式光强和抽运模式光强的交叠积分。第 n 个模式的抽运光与第 m 个模式的信号光光强的交叠积分可表示为^[12]

$$f_{m,n} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_{R,m}(r,\varphi) I_{R,n}(r,\varphi) r dr d\varphi}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_{R,m}(r,\varphi) r dr d\varphi \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_{R,n} r dr d\varphi}, \quad (1)$$

式中: $I_{R,n}(r,\varphi)$ 和 $I_{R,m}(r,\varphi)$ 分别为第 n 个模式抽运光与第 m 个模式信号光在该无源传输光纤中的归一化光强; r,φ 分别为光纤横截面的径向半径和

切向角度。通过合理选择抽运模式,可以实现信号光模式的增益均衡。

经拉曼放大后,残余的 1480 nm 抽运光与信号光会同时进入铒离子均匀掺杂的少模光纤中,再分别以第 m 个模式和第 n 个模式定向激励,在能级跃迁的作用下,各信号光模式受激放大。在 FM-EDF 放大过程中,各信号模式的增益取决于抽运模式光强、信号模式光强和铒离子分布的交叠情况^[8-9]。

因此,要实现远程遥泵少模光纤放大器的模式增益均衡,需先在少模拉曼放大过程和 FM-EDF 放大过程中同时实现增益均衡。由文献[9]和[12]可

知,分布式少模光纤拉曼放大和 FM-EDF 放大,均可通过合理选择抽运模式实现模式增益均衡。对于两信号模式 LP₀₁ 和 LP₁₁,可利用 LP₁₁ 模式抽运方式,实现远程遥泵少模光纤放大器中两信号模式的模式增益均衡。同时,在 FM-EDF 放大的作用下,拉曼增益谱的平坦带宽可进一步增大。

3 实验装置

远程遥泵少模光纤放大器实验装置图如图 2 所示,实验所用无源超低损耗少模光纤和有源 FM-EDF 均为武汉烽火藤仓光纤公司制备。无源少模光纤的长度为 44.5 km,其折射率分布为阶跃型,纤芯半径为 7.8 μm,纤芯折射率为 1.44866,包层半径为 62.5 μm,包层折射率为 1.44402。该光纤在 1530~1600 nm 仅支持弱耦合的两模式群组(LP₀₁、LP₁₁ 模式)。定向激发 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式,采用光时域反射仪(OTDR)测量可知,1550 nm 附近 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式的损耗分别为 0.183 dB/km 和 0.185 dB/km。通过截断法测量可知,1480 nm 抽运光在 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式的损耗均为 0.239 dB/km。将超低损无源光纤的折射率分布代入有限元分析软件 COMSOL,计算得到 1480 nm 抽运光与 1550 nm 信号光的光强交叠积分,结果如表 1 所示。由表 1 可知,采用 LP₁₁ 模式抽运即可实现分布式少模光纤拉曼放大中 LP₀₁ 和 LP₁₁ 信号模式增益均衡。有源 FM-EDF 折射率为阶跃型分布,铒离子纤芯均匀掺杂,纤芯半径为 6.5 μm,数值孔径约为 0.1。所支持的两信号模式 LP₀₁ 和 LP₁₁ 在 1550 nm 处的吸收系数为 9.19 dB/m。

抽运光源为波长 1480 nm 的随机偏振光纤拉曼激光器(RLD-5-1480,IPG Photonics,USA)。基于上述理论分析,选用 LP₁₁ 模式作为抽运模式即可

实现分布式少模拉曼放大和 FM-EDF 放大过程中的模式增益均衡。

表 1 超低损无源光纤中 1480 nm 抽运光模式和 1550 nm 信号光模式的光强交叠积分
Table 1 Intensity overlap integral between 1480 nm pump mode and 1550 nm signal mode in the ultra-low-loss passive fiber

Intensity overlap integral	10 ⁹ m ⁻²	
	LP _{01_1480}	LP _{11_1480}
LP _{01_1550}	6.32	3.90
LP _{11_1550}	4.03	4.09

根据对少模光纤中拉曼效应偏振和空间模式依赖特性的分析^[19],且光纤长度较长,仅定向激发 LP₁₁ 模式群组中的一个简并模式,即可实现不同模式增益均衡效果。信号光源为工作波长在 C+L 波段(1529~1603 nm)的宽带光源,其增益平坦度小于 1 dB。在本实验中采用模式选择型光子灯笼(MSPL)作为模式复用耦合器件^[20],该光子灯笼在 1550 nm 波长上 LP₀₁、LP₁₁ 模式的插入损耗分别为 1.02 dB 和 1.43 dB。LP₀₁ 模式到 LP₁₁ 模式的串扰约为 -18 dB,LP₁₁ 模式到 LP₀₁ 模式的串扰约为 -12 dB。受限于光子灯笼的数量限制,在出射端采用基于相位片的自由空间型模式解复用器件。对于实验中不同类型的光纤,通过拉锥匹配焊接技术,多次优化减小不同少模光纤之间的焊接损耗及分立式模式耦合,其中超低损少模光纤与少模铒纤的接续损耗约为 0.4 dB。

为实现无源少模光纤中的拉曼放大和有源光纤中的 FM-EDF 放大,信号光和抽运光同时经 MSPL 耦合进无源超低损少模光纤,并将无源光纤与有源光纤焊接。宽带光源出射的信号光经分束器分束

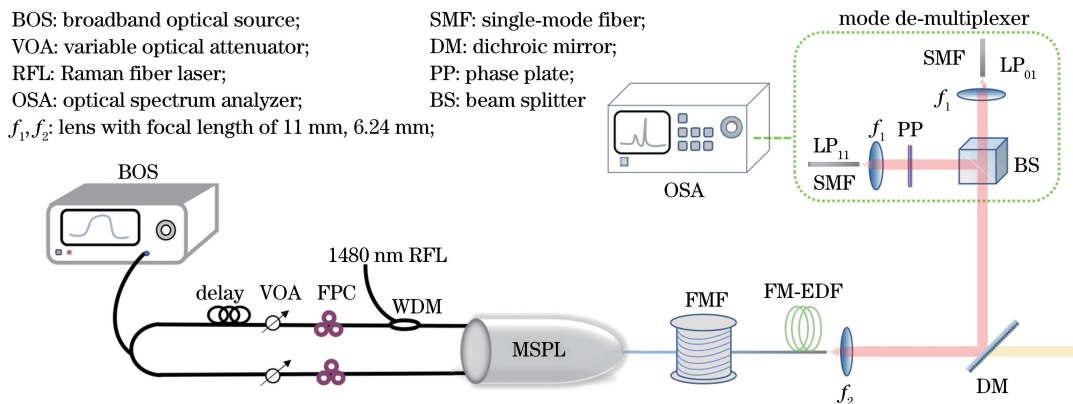


图 2 远程遥泵少模光纤放大器实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of remotely pumped few-mode fiber amplifier

后,分别耦合进入 MSPL 的各个单模端口,经过光纤延时,由可调谐衰减器衰减,及偏振控制器控制偏振后,进入 MSPL 中,激发出少模光纤中的 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式。1480 nm 的抽运光由波分复用器与激发 LP₁₁ 模式的 MSPL 的信号光合束,耦合进入 MSPL,实现 LP₁₁ 抽运模式的激发。信号光和抽运光在 44.5 km 的无源光纤发生受激拉曼放大后,进入 FM-EDF,发生掺铒光纤放大后的残余抽运光及放大后的信号光随后耦合到自由空间中,由二向色镜滤除残余抽运光,放大后的信号光经过光分束器分束后,进行

相应的模式变换,转换为 LP₀₁ 模式并被收集至单模光纤中,后采用光谱分析仪(OSA)测量。

4 实验结果

为呈现不同信号模式的纯度,首先采用电荷耦合器件(CCD)分别测量经少模光纤拉曼放大及经 FM-EDF 放大后的 LP₀₁ 模式和 LP₁₁ 模式的模态光强分布,结果如图 3(a)和 3(b)所示。可以清晰地看出,放大后的模式纯度较高,两模式存在较好的隔离度。

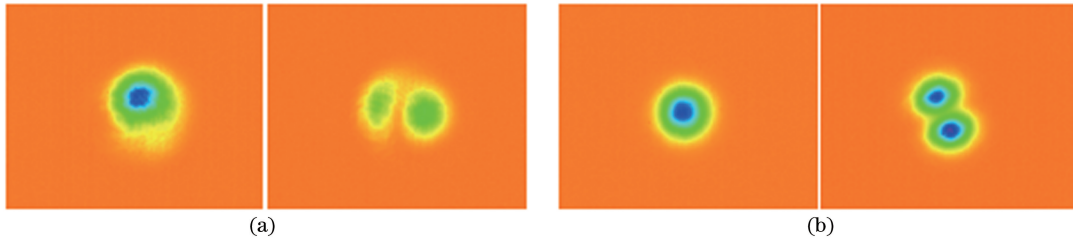


图 3 经少模光纤拉曼及 FM-EDF 放大后的 LP₀₁ 模式和 LP₁₁ 模式光强分布图。(a)少模光纤拉曼放大;(b) FM-EDF 放大

Fig. 3 Images of modal intensities for LP₀₁ and LP₁₁ modes after few-mode fiber Raman amplification and FM-EDF amplification. (a) Few-mode fiber Raman amplification; (b) FM-EDF amplification

对于光纤拉曼放大,由于其放大介质即为传输介质,一般采用开关增益来衡量其特性。开关增益定义为

$$G_{\text{on-off}} = 10 \lg \frac{P_{\text{on}}(L)}{P_{\text{off}}(L)}, \quad (2)$$

式中: $P_{\text{on}}(L)$ 和 $P_{\text{off}}(L)$ 分别为抽运光打开和关闭时,在长度为 L 的光纤输出端测量得到的信号光功率。不同波长不同模式的信号光开关增益,均可由(2)式求得。

为实现增益带宽的最大化和模间增益差的最小化,在固定抽运功率下,改变 FM-EDF 长度,分别测量 LP₀₁ 模式和 LP₁₁ 模式的功率。因此,在超低损少

模光纤后焊接 7 m 的 FM-EDF,测量远程遥泵放大输出功率,随后依次截断 0.5 m,测量剩余铒纤作用下远程遥泵放大输出功率,直至没有铒纤。为公平比较远程遥泵少模光纤放大与分布式少模光纤拉曼放大的差异,将该功率与无放大时信号光经过 44.5 km 传输后的功率进行比较,计算得到的增益定义为等效开关增益。实际耦合入超低损耗无源光纤的功率为 1.49 W 时,依据 FM-EDF 的长度及信号波长作出的 LP₀₁ 模式和 LP₁₁ 模式的等效开关增益等高线如图 4 所示。

由图 4 可以看出,在不同 FM-EDF 长度下,不同信号波长 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式的等效开关增益各异。

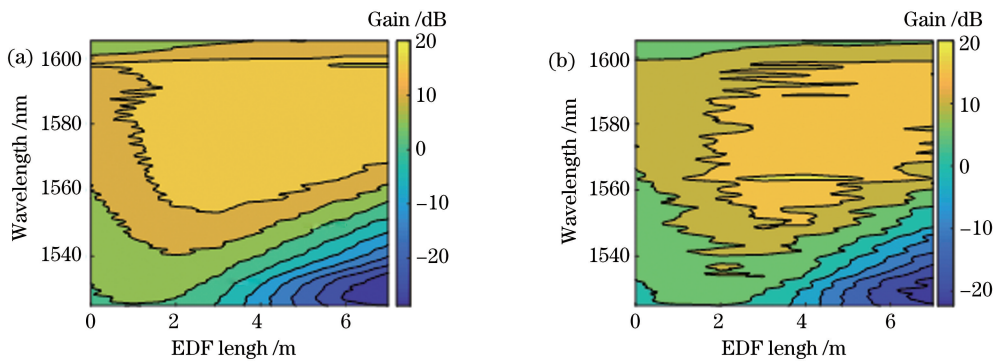


图 4 各模式等效开关增益随 FM-EDF 长度和信号波长的等高线图。(a) LP₀₁ 模式;(b) LP₁₁ 模式

Fig. 4 Contours of equivalent on-off gain as a function of FM-EDF length and signal wavelength.

(a) LP₀₁ mode; (b) LP₁₁ mode

随着铒纤长度的增加,由于铒离子的吸收效应,两信号模式在短波长处的增益先增高后降低,长波长处的增益可以维持在较高水平。由于 EDF 各信号波长的吸收辐射截面各异,随着 EDF 长度的改变,1480 nm 抽运掺铒光纤放大器实现的增益和带宽均发生改变。通过合理选择 FM-EDF 的长度,可以实现 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式增益的增大及带宽的扩展。当完全去除 FM-EDF 时,可以得到两信号模式分布式少模光纤拉曼放大的开关增益。

为进一步分析特定长度下增益随波长的变化,给出了铒纤长度为 2 m 时远程遥泵少模光纤放大及分布式少模光纤拉曼放大过程中两信号模式增益谱,如图 5 所示。可以看出,相对于分布式少模光纤拉曼放大,远程遥泵少模光纤放大在不增大模间增益差的同时,提升了各模式的增益,在 EDF 放大的作用下,将增益平坦带宽进一步拓宽。当增益平坦波长范围为 1560~1600 nm 时,两信号模式等效开关增益大于 15 dB,模间增益差约为 2 dB。

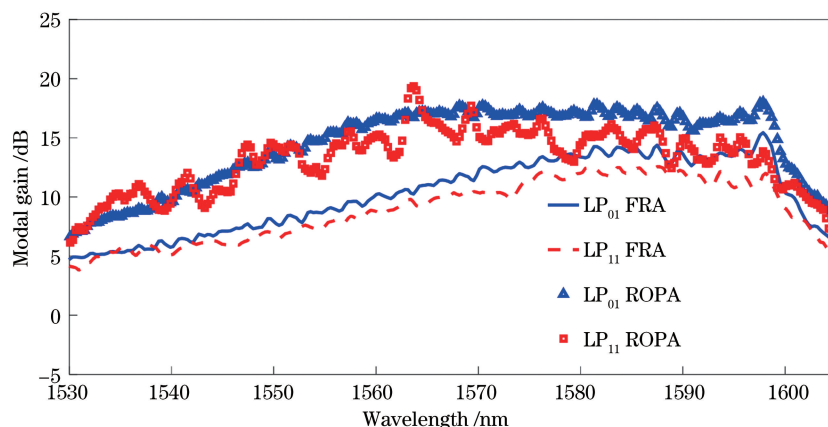


图 5 波长为 1530~1605 nm 时少模光纤拉曼放大的开关增益及远程遥泵少模光纤放大的等效开关增益

Fig. 5 On-off gain in few-mode fiber Raman amplification and equivalent on-off gain in remotely pumped few-mode fiber amplification at the wavelength range of 1530-1605 nm

受选用光子灯笼的模式选择特性等限制,模间增益差仍存在,通过精确调控抽运模式配比,可以实现更好的模式增益均衡效果。并且,合理选用抽运模式和铒纤长度,可以实现更多信号模式的均衡,提升各模式的增益,扩展增益平坦带宽。在未来 MDM+WDM 的长距离无中继传输系统中,可以考虑将 FM-FRA 与 FM-EDFA 相结合,依靠远程遥泵少模光纤放大的结构,可实现 MDM 传输距离的进一步延长。

5 结 论

理论分析了前向远程遥泵少模光纤放大器中的物理过程,搭建了基于模式选择型光子灯笼和自由空间模式解复用器的远程遥泵少模光纤放大器。利用 1480 nm LP₁₁ 模式抽运光将分布式少模光纤拉曼放大与 FM-EDF 放大相结合,首次实现模式增益均衡、波长增益平坦的远程遥泵少模光纤放大。当增益平坦带宽在 1560~1600 nm 范围内,两信号模式等效开关增益大于 15 dB,模间增益差约为 2 dB。本文实验演示的增益均衡远程遥泵少模光纤放大器,为进一步研究 MDM 在长距离无中继传输的应

用提供了依据。

参 考 文 献

- [1] Richardson D J. Filling the light pipe[J]. Science, 2010, 330(6002): 327-328.
- [2] Li G F, Bai N, Zhao N B, *et al.* Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication [J]. Advances in Optics and Photonics, 2014, 6(4): 413-487.
- [3] Xie Y W, Fu S N, Zhang H L, *et al.* Design and optimization of mode differential group delay for few-mode fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906010.
谢意维,付松年,张海亮,等.少模光纤模式差分群时延的设计与优化[J].光学学报,2013,33(9): 0906010.
- [4] Chen J K, Hu G J, Han Y Y. Communication experimental system with 3×3 mode division multiplexing based on photonic lantern[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106009.
陈嘉轲,胡贵军,韩悦羽.基于光子灯笼的 3×3 模分复用通信实验系统[J].中国激光,2017,44(11): 1106009.
- [5] Lu S F, Xiao Y Y, Jiang X Y. Research on fused

- taper all fiber multi-mode multiplexer/de-multiplexer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (7): 0706002.
- 陆少凡, 肖悦娱, 蒋晓勇. 熔融拉锥型全光纤多模式复用器/解复用器研究[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0706002.
- [6] Winzer P J, Foschini G J. MIMO capacities and outage probabilities in spatially multiplexed optical transport systems [J]. Optics Express, 2011, 19 (17): 16680-16696.
- [7] Ho K P, Kahn J M. Mode-dependent loss and gain: statistics and effect on mode-division multiplexing [J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16612-16635.
- [8] Zhang Z Z, Guo C, Cui L, *et al.* 21 spatial mode erbium-doped fiber amplifier for mode division multiplexing transmission[J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1550-1553.
- [9] Bai N, Ip E, Wang T, *et al.* Multimode fiber amplifier with tunable modal gain using a reconfigurable multimode pump[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16601-16611.
- [10] Amma Y, Hosokawa T, Ono H, *et al.* Ring-core multicore few-mode erbium-doped fiber amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(24): 2163-2166.
- [11] Kang Q Y, Lim E L, Jung F P Y, *et al.* Minimizing differential modal gain in cladding-pumped EDFAs supporting four and six mode groups [J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21499-21507.
- [12] Ryf R, Essiambre R, von Hoyningen-Huene J, *et al.* Analysis of mode-dependent gain in Raman amplified few-mode fiber [C]//Optical Fiber Communication Conference 2012, March 4-8, 2012, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2012: OW1D.2.
- [13] Zhou J H. An analytical approach for gain optimization in multimode fiber Raman amplifiers [J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21393-21402.
- [14] Li J X, Wang L L, Du J B, *et al.* Experimental demonstration of a few-mode Raman amplifier with a flat gain covering 1530-1605 nm[J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4530-4533.
- [15] Li J X, Cai C K, Du J B, *et al.* Ultra-low-noise mode-division multiplexed WDM transmission over 100-km FMF based on a second-order few-mode Raman amplifier [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3254-3260.
- [16] Esmaelpour M, Ryf R, Fontaine N K, *et al.* Transmission over 1050-km few-mode fiber based on bidirectional distributed Raman amplification [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34 (8): 1864-1871.
- [17] Masuda H, Ono H, Takara H, *et al.* Remotely pumped multicore erbium-doped fiber amplifier system with high pumping efficiency[C]//2013 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, July 8-10, 2013, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE, 2013: 13827215.
- [18] Takara H, Mizuno T, Kawakami H, *et al.* 120.7-Tb/s MCF-ROPA unrepeated transmission of PDM-32QAM channels over 204 km[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(7): 1473-1478.
- [19] Zhang Z Z, Guo C, Cui L, *et al.* Spectra of Raman scattering in few mode fibers [C]//Laser Science 2018, September 16-20, 2018, Washington, D.C., United States. Washington, D.C.: OSA, 2018: JW3A.78.
- [20] Yang H, Chen Z L, Liu W G, *et al.* Recent progress in photonic lantern [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 120002.
- 杨欢, 陈子伦, 刘文广, 等. 光子灯笼研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120002.