

# 光纤型少模掺铒光纤放大器的差模增益可调性研究

江歆睿, 武保剑\*, 许焰, 文峰, 邱昆

电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

**摘要** 利用少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)的差模增益可调性,可实现模式增益均衡、补偿链路模式相关损耗,能够大大提高模分复用系统的组网灵活性。制作少模隔离器和波分复用器一体化光纤器件(FM-IWDM),并将其用于构建全光纤型FM-EDFA。采用中心波长为1480 nm的泵浦光源开展同向和双向泵浦光放大实验,保持泵浦总功率为200 mW,通过调节泵浦功率比例,分别获得2.6 dB和4.8 dB的最大可调差模增益。

**关键词** 光通信; 模分复用; 掺铒光纤放大器; 差模增益

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1506004

## Adjustability of Differential Mode Gain for All-Fiber Few-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifiers

Jiang Xinrui, Wu Baojian\*, Xu Yan, Wen Feng, Qiu Kun

Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China

**Abstract** The adjustability of differential mode gain for few-mode erbium-doped fiber amplifiers (FM-EDFAs) can be used for mode gain equalization and compensation for link mode-dependent loss, which can significantly improve the networking flexibility of mode division multiplexing systems. A few-mode optical fiber device integrating the isolator and the wavelength division multiplexer (FM-IWDM) is produced to build all-fiber FM-EDFAs. Two optical amplifying experiments using the codirectional and bidirectional pumps with a center wavelength of 1480 nm are carried out, and the maximum adjustable differential mode gain of 2.6 dB and 4.8 dB can be achieved by adjusting the pump power ratio under the pump total power of 200 mW.

**Key words** optical communications; mode division multiplexing; erbium-doped fiber amplifiers; differential mode gain

## 1 引言

单模光纤通信系统传输容量已接近非线性香农极限,空分复用(SDM)技术成为进一步扩容的有效手段,越来越受到人们的关注<sup>[1-2]</sup>。与单模通信系统一样,空分复用系统也依赖于相应的掺铒光纤放大器来补偿传输损耗<sup>[3-4]</sup>。不同模式间的增益差简称差模增益(DMG),是评价少模光放大性能的特有参数。在少模光纤通信系统中,DMG或模式相关损耗(MDL)需要控制在一定范围内,过大的DMG会导致系统中断<sup>[5]</sup>。因此,要求少模掺铒放大器具有尽可能低的DMG,通常小于2 dB<sup>[6]</sup>。然而,就整个模分复用

(MDM)传输系统而言,具有DMG可调功能的少模掺铒放大器(FM-EDFA)更有实用性,不仅能够实现少模掺铒放大器的增益均衡,还可以补偿通信系统的模式相关损耗。

模式信号的净增益取决于模式增益和吸收两部分,增益部分为信号模场与反转铒离子浓度分布的交叠积分,吸收部分为信号模场与铒离子掺杂浓度分布的交叠积分,其中反转铒离子浓度主要依赖于泵浦功率<sup>[7-8]</sup>。因此,改变DMG的方法可分为三种<sup>[9]</sup>。一种方法是改变铒离子掺杂分布<sup>[10]</sup>,如使用环形掺杂分布的掺铒光纤(EDF),可在基模泵浦下实现2.5 dB的差模增益<sup>[11]</sup>。第二种方法是优化掺铒光纤的折射率分

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-02-06; 录用日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(62171078)、国家重点研发计划(2018YFB1801003)

通信作者: \*bjwu@uestc.edu.cn

布,通过控制泵浦光的模场分布将差模增益减小到 1 dB<sup>[12]</sup>。上述两种方法与掺铒光纤的结构参数相关,成品后不便调节。第三种方法是通过改变泵浦的功率和模式成分来调节反转铒离子的分布,是实现 DMG 可调的有效手段。Bai 等<sup>[13]</sup>通过优化 LP<sub>01</sub>和 LP<sub>21</sub>泵浦,将 DMG 减小到 0.5 dB。Ip<sup>[14]</sup>采用 LP<sub>01</sub>、LP<sub>02</sub>、LP<sub>21</sub>、LP<sub>51</sub>四模泵浦,实现了 LP<sub>01</sub>、LP<sub>02</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>四模信号的增益均衡。

与使用相位板、二色镜和空间光调制器等空间光学元件所构建的 FM-EDFA<sup>[15-17]</sup>相比,紧凑的光纤型 FM-EDFA 在工程应用中更有实用化前景,具有损耗小、结构简单和集成度高的优点。目前,FM-EDFA 的光纤化仍需解决一些问题:1)需要光纤型的少模信号/泵浦光复用和解复用器,以便实现双向泵浦方案和泵浦光的灵活加载与滤除;2)增加光纤型少模隔离器阻止反射光,提升模式放大性能;3)泵浦光模式和功率能够在一定范围内调节,以适应不同 MDM 传输系统的需要。

本文将光隔离器和波分复用器(WDM)组合在一起(简称 IWDM),制作光纤型的少模 IWDM 复用和解复用器件,实现整个 FM-EDFA 的光纤化,并开展同向泵浦和双向泵浦两种情形下的 DMG 可调实验。实验中采用功率转化效率较高的 1480 nm 泵浦源<sup>[18]</sup>。实验结果表明:当保持泵浦总功率为 200 mW 时,LP<sub>11c</sub>和 LP<sub>11o</sub>模同向泵浦下可实现 DMG 在 -1.5 dB~1.1 dB 范围内可调;采用 LP<sub>11c</sub>和 LP<sub>01</sub>的双向泵浦方案,DMG 可调范围接近 5 dB。

## 2 光纤型 FM-IWDM 的制作

模式选择光子灯笼可以将输入的单模信号复用

到少模光纤中,也可以将信号光与泵浦光复用在—起构建 FM-EDFA,仅适用于同向泵浦方案,并且还需要在后端滤除泵浦光,这种方案适应性较差。为了满足不同泵浦方式的需求,简化 FM-EDFA 的结构,将波分复用器和隔离器进行光纤化集成设计,将输入和输出少模光纤封装在微光准直器组件中,制作光纤型正向 FM-IWDM 和反向 FM-IWDM,实现 1550 nm 少模信号光与 1480 nm 少模泵浦光的复用,同时可保持少模放大信号的单向传输。正向 FM-IWDM 将同向泵浦光复用到少模掺铒光纤(FM-EDF)中,并滤除或者解复用出反向泵浦光。类似地,反向 FM-IWDM 可将泵浦光反向复用,同时对同向泵浦光进行解复用。

以正向 FM-IWDM 为例描述 FM-IWDM 的制作过程,其结构示意图如图 1(a)所示。在正向 FM-IWDM 中:信号光从 1550 nm 端口输入,依次通过自聚焦透镜 1、隔离器和自聚焦透镜 2 到达复用端;泵浦光从 1480 nm 端口输入,被自聚焦透镜 2 的反射薄膜反射到复用端口处,其中隔离器正向放置,可抑制信号光和泵浦光的反射。反向 FM-IWDM 的结构与正向 FM-IWDM 类似,只是隔离器的方向相反。FM-IWDM 三个端口的尾纤都由少模光纤组成,并经过扩束处理以承受更高的激光功率。为了突出 IWDM 结构中光隔离和泵浦光/信号光的耦合过程,图 1(b)和图 1(c)分别给出了正向 FM-IWDM 和反向 FM-IWDM 的功能示意图,能够方便地分析 IWDM 作为复用和解复用器时泵浦光的传播方向和工作过程。例如,反向 FM-IWDM 可将 1480 nm 泵浦光反向复用到公共端处,根据光的可逆性,也可以将 1480 nm 泵浦光从公共端解复用下来。

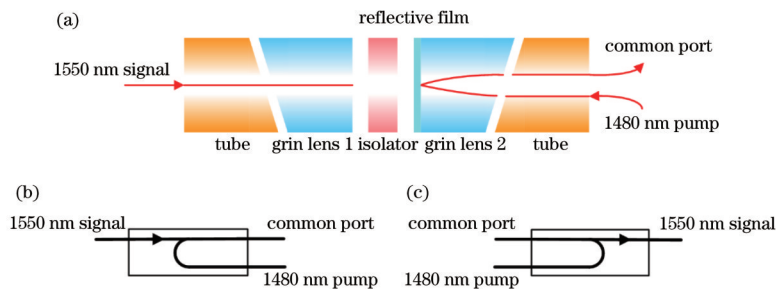


图 1 光纤型 1550 nm/1480 nm FM-IWDM 器件。(a) FM-IWDM 器件的结构示意图;(b)正向 FM-IWDM;(c)反向 FM-IWDM  
Fig. 1 All-fiber 1550 nm/1480 nm FM-IWDM devices. (a) Structural diagram of FM-IWDM device; (b) forward FM-IWDM; (c) backward FM-IWDM

表 1 给出了成品后 FM-IWDM 的性能测试结果。由表 1 可知:正向 FM-IWDM 对 LP<sub>01</sub>和 LP<sub>11</sub>信号光的插入损耗分别为 0.8 dB 和 2.0 dB,隔离度不小于 44.6 dB;正向 FM-IWDM 对 LP<sub>01</sub>和 LP<sub>11</sub>泵浦光的插入损耗分别为 4.9 dB 和 4.3 dB;反向 FM-IWDM 对 LP<sub>01</sub>和 LP<sub>11</sub>信号光的插入损耗分别为 0.9 dB 和 1.9 dB,隔离度不小于 47.0 dB;反向 FM-IWDM 对 LP<sub>01</sub>和 LP<sub>11</sub>泵浦光的插入损耗分别为 5.0 dB 和 5.3 dB。

## 3 差模增益可调 FM-EDFA 设计

基于 FM-IWDM 构建了全光纤型的 FM-EDFA,并以三模情形为例加以描述,如图 2 所示。在 FM-EDFA 光纤化基础上,为了实现 DMG 可调的目标,还需对 FM-EDFA 的泵浦方式进行灵活设计,包括:1)能够同时兼容同向、反向和双向等多种泵浦方式;2)可以实现泵浦光基模到高阶模的灵活转换;3)泵浦功率能够在不同泵浦模式之间按需分配和调节。

表 1 FM-IWDM 的测试结果  
Table 1 Test results for FM-IWDM

FM-IWDM type	Mode	Insertion loss /dB	Isolation /dB
Forward FM-IWDM	LP <sub>01</sub> (1550 nm)	0.8	44.6
	LP <sub>11</sub> (1550 nm)	2.0	45.4
	LP <sub>01</sub> (1480 nm)	4.9	≥50
	LP <sub>11</sub> (1480 nm)	4.3	≥50
Backward FM-IWDM	LP <sub>01</sub> (1550 nm)	0.9	47.0
	LP <sub>11</sub> (1550 nm)	1.9	48.5
	LP <sub>01</sub> (1480 nm)	5.0	≥50
	LP <sub>11</sub> (1480 nm)	5.3	≥50

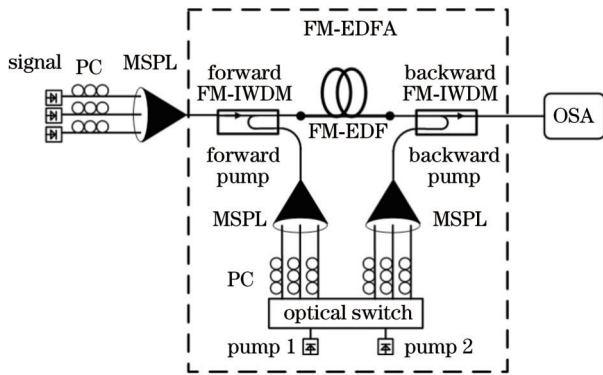


图 2 基于 FM-IWDM 的全光纤型 FM-EDFA  
Fig. 2 All-fiber FM-EDFA with FM-IWDMs

为了实现同向和反向泵浦,分别采用前后两个三模模式选择光子灯笼(3M-MSPL)对泵浦光基模进行模式转换,两个 3M-MSPL 的少模输出端分别连接正向 FM-IWDM 和反向 FM-IWDM 的 1480 nm 端口,如图 2 所示。3M-MSPL 的输入端可用偏振控制器(PC)控制 3M-MSPL 模式转换的纯度和模场的空间分布。为了实现双向泵浦并获得足够的模式增益,采用两个泵浦激光器,它们与上述 3M-MSPL 之间可通过一个大小为  $2 \times 6$  的光开关进行连接。泵浦方式的改变通过光开关进行控制,也可以利用光开关的组播功能共享同一泵浦光源。调节泵浦激光器电流可改变两个激光器的功率比例,从而实现模式功率的分配。

如图 2 所示,少模信号光由输入 3M-MSPL 复用产生,并注入到正向 FM-IWDM 的 1550 nm 端口,经 FM-EDFA 放大后的少模信号光可由光谱分析仪(OSA)测量,或者联合输出 3M-MSPL 进行波长解复用<sup>[19]</sup>。

#### 4 FM-EDFA 的差模增益可调实验

为了研究全光纤型 FM-EDFA DMG 的可调性,开展了同向 LP<sub>11e</sub> 和 LP<sub>11o</sub> 泵浦实验与双向 LP<sub>11e</sub> 和 LP<sub>01</sub> 泵浦实验。在实验中,1480 nm 波长的泵浦光总功率始终固定在 200 mW,FM-EDF 的长度为 3 m,折射率分布如图 3 所示<sup>[20]</sup>。采用波长映射方法<sup>[17]</sup>测量 FM-

EDFA 的增益,两个信号光模式(LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11e</sub>)对应的光波长分别为 1552.5 nm 和 1553.0 nm,输入到 FM-EDF 中的光功率均为 -15 dBm。

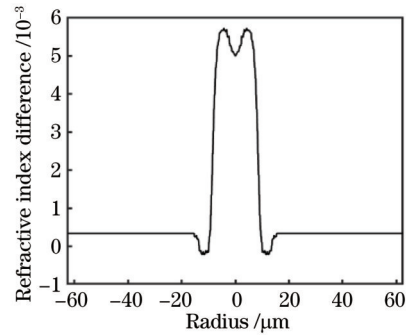


图 3 FM-EDF 的折射率分布  
Fig. 3 Refractive index profile of FM-EDF

#### 4.1 LP<sub>11e</sub> 和 LP<sub>11o</sub> 同向泵浦

根据图 2 所示的 FM-EDFA 结构,将两个泵浦激光器分别连接到前向 3M-MSPL 的两个单模输入端处,调节偏振控制器可在 FM-EDF 中激发 LP<sub>11e</sub> 和 LP<sub>11o</sub> 模式,模式质量和模瓣方向利用红外相机观察,如图 4(a)所示。输入信号的光模式也采用类似方法激发和观察。

在实验中,保持泵浦总功率不变,逐渐增大 LP<sub>11o</sub> 泵浦模式的功率占比,用光谱仪测量从 FM-EDF 中输出的 LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11e</sub> 信号光模式功率。实验测得的两模信号增益( $G_{01}$  和  $G_{11e}$ )及其 DMG 曲线如图 4(b)所示,其中 DMG 为  $G_{01} - G_{11e}$ 。由图 4(b)可知:1)随着 LP<sub>11o</sub> 泵浦模式功率比例的增加,LP<sub>01</sub> 信号增益从 12.4 dB 逐渐增加到 16.2 dB,而 LP<sub>11e</sub> 信号模式的增益变化相对较小;2)两个模式之间的 DMG 从 -1.5 dB 增加到 1.1 dB,可调范围为 2.6 dB,实现了 DMG 从负到正的可调性;3)当泵浦模式 LP<sub>11o</sub> 和 LP<sub>11e</sub> 的功率比例约为 1:1 时,可实现 LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11e</sub> 模式的增益均衡。

#### 4.2 LP<sub>11e</sub> 和 LP<sub>01</sub> 双向泵浦

将两个泵浦激光器分别与前后两个 3M-MSPL 的单模端连接,在 FM-EDF 中同时激发正向 LP<sub>11e</sub> 和反向 LP<sub>01</sub> 泵浦模式。与同向泵浦情况一样,先通过偏振控制器将信号光和泵浦光模斑调整到所需状态,如图 5(a)所示。逐渐将反向泵浦光 LP<sub>01</sub> 模式的功率由 0 增加到 200 mW,实验测量两个信号光模式的增益和 DMG 曲线,如图 5(b)所示。由图 5(b)可知,随着 LP<sub>01</sub> 泵浦模式功率占比的增加,LP<sub>01</sub> 信号模式增益从 13 dB 逐渐增加到 19 dB。增益的变化可以定性解释为提高反向泵浦模式 LP<sub>01</sub> 的比例,也会增加反转钕离子分布与 LP<sub>01</sub> 信号的交叠积分,从而使 LP<sub>01</sub> 信号增益逐渐增大。

由图 5(b)还可以看出:随着 LP<sub>01</sub> 模泵浦功率比例的增加,两个信号模式的差模增益从 -0.5 dB 增加到 4.3 dB,DMG 可调范围为 4.8 dB;当 LP<sub>01</sub> 模式的泵浦功率占比为 9% 时,两个信号模式的增益相同,可获得近 14 dB 的均衡放大。



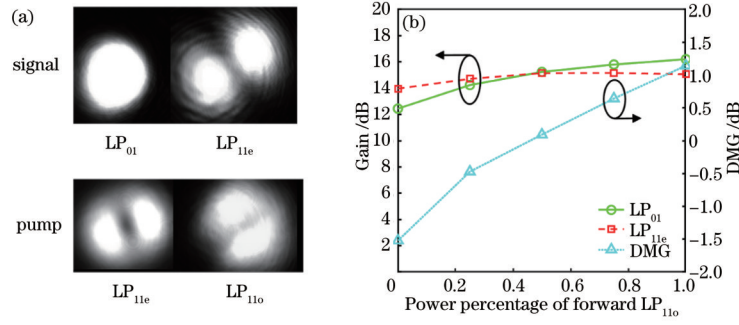


图 4 LP<sub>11e</sub>和LP<sub>11o</sub>同向泵浦实验。(a)信号和泵浦模斑;(b)增益和DMG曲线

Fig. 4 Codirectional LP<sub>11e</sub> and LP<sub>11o</sub> pumping experiment. (a) Signal and pump mode spots; (b) gain and DMG curves

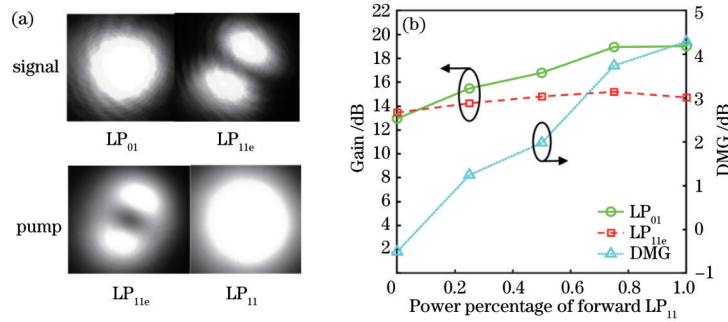


图 5 LP<sub>11e</sub>和LP<sub>01</sub>双向泵浦实验。(a)信号和泵浦模斑;(b)增益和DMG曲线

Fig. 5 Bidirectional LP<sub>11e</sub> and LP<sub>01</sub> pumping experiment. (a) Signal and pump mode spots; (b) gain and DMG curves

### 4.3 理论分析

以FM-EDFA的双向泵浦理论模型为基础,分别采用交叠积分和VPI仿真软件来定性和定量地分析泵浦方式或模式对信号光DMG的影响。FM-EDFA理

论模型可由铷离子二能级系统的速率方程和光功率传播方程描述。

在二能级系统中,亚稳态铷离子  $N_2(x, y, z)$  的速率方程为

$$N_2(x, y, z) = \frac{W_{13}(x, y, z) + W_{12}(x, y, z)}{1/T_1 + W_{13}(x, y, z) + W_{12}(x, y, z) + W_{21}(x, y, z)} N_0(x, y, z), \quad (1)$$

式中:  $W_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$  分别为铷离子能级  $i$  和  $j$  之间的受激发跃迁率;  $T_1$  为铷离子的弛豫时间(约 10 ms);  $N_0(x, y, z)$  为有源光纤中铷离子的掺杂分布。

在FM-EDFA强度模型中,信号光( $P_i^s$ )和泵浦光( $P_j^p$ )的功率传播方程为

$$\frac{dP_i^s}{dz} = P_i^s \left[ (\sigma_{as} + \sigma_{es}) \iint N_2(x, y) |f_i^s(x, y)|^2 dx dy - \sigma_{as} \iint N_0(x, y) |f_i^s(x, y)|^2 dx dy \right], \quad (2)$$

$$\frac{dP_j^p}{dz} = u_j^p P_j^p \left[ (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) \iint N_2(x, y) |f_j^p(x, y)|^2 dx dy - \sigma_{ap} \iint N_0(x, y) |f_j^p(x, y)|^2 dx dy \right], \quad (3)$$

式中:  $f_i^s(x, y)$  和  $f_j^p(x, y)$  为信号  $i$  模式和泵浦  $j$  模式的模场分布;  $\sigma_{es}$  ( $\sigma_{as}$ ) 和  $\sigma_{ep}$  ( $\sigma_{ap}$ ) 分别是信号光和泵浦光的辐射截面(吸收截面);  $u_j^p = \pm 1$  分别对应正向泵浦和反向泵浦情形。

由式(1)~(3)可知,信号模式  $i$  的增益  $G_i =$

$P_{i,z=L}^s / P_{i,z=0}^s$  除依赖于信号光与泵浦光的功率外,还与信号光模场分布、泵浦光模场分布和光纤掺铷离子浓度之间的交叠积分有关<sup>[9]</sup>,即

$$\eta_i^s = \iint f_i^s(x, y) f_p(x, y) N_0(x, y) dx dy, \quad (4)$$

式中:  $f_p(x, y)$  为所有泵浦光的叠加模场分布,严格讲它还依赖于泵浦光功率演化<sup>[8]</sup>。FM-EDFA中存在模式增益竞争的同时,交叠积分越大,模式增益越大<sup>[9]</sup>。对于LP<sub>11e</sub>和LP<sub>11o</sub>同向泵浦情形,泵浦模场  $f_p(x, y)$  为LP<sub>11e</sub>和LP<sub>11o</sub>模场的叠加。当总泵浦光功率保持不变时,随着LP<sub>11o</sub>泵浦模式功率比例的增加,LP<sub>11e</sub>泵浦模式功率比例减小,与LP<sub>11e</sub>信号模式的交叠积分(或增益)减小,DMG逐渐增大,从而实现负到正的变化。类似地分析LP<sub>11e</sub>和LP<sub>01</sub>双向泵浦情形,随着LP<sub>01</sub>泵浦模式功率占比的增加,与LP<sub>01</sub>信号模式的交叠积分(或增益)也增大,DMG逐渐提高。

根据FM-EDFA理论模型,通过式(1)~(3)也可定量分析上述两种实验配置情形的DMG,这里采用

VPI 仿真软件进行计算。由于有源光纤中掺铒浓度分布未知,仿真中按均匀分布处理,并分别给出  $N_0$  为  $4 \times 10^{24}$ ,  $7 \times 10^{24}$ ,  $10 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  三个值的仿真曲线,以表明掺铒浓度的影响。掺铒光纤的辐射截面和吸收截面采用 VPI 软件默认值,分别为  $\sigma_{es} = 4.27 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_{as} = 3.86 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_{ep} = 1.88 \times 10^{-26} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_{ap} = 3.63 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 。其他仿真参数与实验参数一

致。两种泵浦情形下 DMG 仿真曲线如图 6 所示。可以看出:1)随着正向  $LP_{11e}$  泵浦或者反向  $LP_{01}$  泵浦比例的增加,两模信号的 DMG 逐渐增大,与实验结果的变化趋势一致;2)光纤中掺铒浓度越大,DMG 的可调范围越大。需指出的是,模式增益还依赖于掺铒光纤中信号光和泵浦光的模场变化及其光偏振特性等<sup>[21]</sup>,这些因素也会导致仿真结果与实验结果产生偏差。

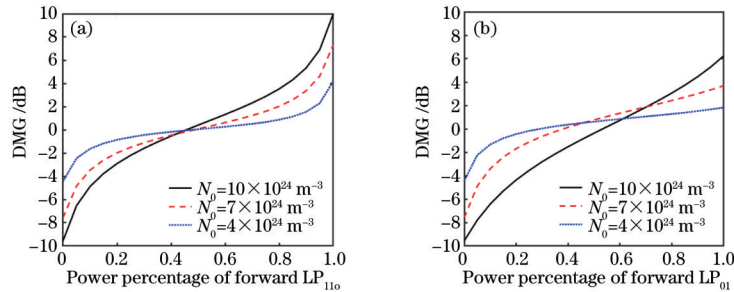


图 6 两种泵浦情形下 DMG 的仿真曲线。(a)  $LP_{11e}$  和  $LP_{11o}$  同向泵浦;(b)  $LP_{11e}$  和  $LP_{01}$  双向泵浦

Fig. 6 Simulated DMG curves for two pumping cases. (a) Codirectional  $LP_{11e}$  and  $LP_{11o}$  pumping; (b) bidirectional  $LP_{11e}$  and  $LP_{01}$  pumping

本文采用两个 3M-MSPL 实现前后泵浦光的模式转换,并构建全光纤型 FM-EDFA。如果对泵浦光模式和泵浦方式等进行双泵浦组合,可有 3 种同向泵浦、3 种反向泵浦和 9 种双向泵浦配置,共计 15 种双泵浦配置。作为例子,本文开展其中两组实验,以表明实现可调 DMG 的可行性。两个实验表明,适当调节 FM-EDFA 的泵浦模式及其功率分配,不仅可以获得 DMG 反转的少模信号的放大,也可以实现更大的 DMG 可调范围。此外,通过制作 1550 nm/1480 nm 的 FM-IWDM,并将 3M-MSPL 替换为支持  $LP_{01}$ 、 $LP_{11e}$ 、 $LP_{11o}$ 、 $LP_{21e}$ 、 $LP_{21o}$ 、 $LP_{02}$  的 6M-MSPL,能够获得更多的可选泵浦组合,有助于实现更大的 DMG 可调范围。

## 5 结 论

制作 1550 nm/1480 nm 正向和反向 3M-IWDM,它们的模式相关损耗分别为 1.2 dB 和 1.0 dB。将 FM-IWDM 用于构建全光纤型 FM-EDFA,测量泵浦功率比例变化对 FM-EDF 输出信号模式增益和 DMG 的影响。实验表明,固定泵浦总功率为 200 mW,适当调节 FM-EDFA 的泵浦模式及其功率分配,可使少模信号的 DMG 出现反转,从而用于模式增益均衡或补偿链路模式相关损耗。

### 参 考 文 献

- [1] Puttnam B J, Rademacher G, Luís R S. Space-division multiplexing for optical fiber communications[J]. *Optica*, 2021, 8(9): 1186-1203.
- [2] 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0106003.  
Tu J J, Li Z H. Review of space division multiplexing fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106003.
- [3] Wada M, Sakamoto T, Aozasa S, et al. Recent progress on SDM amplifiers[C]//European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2018: 18265080.
- [4] Le Taillandier de Gabory E, Takeshita H, Matsumoto K, et al. Reduction in power consumption in multi-core amplifier[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2019: 18618840.
- [5] 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.
- [6] Jung Y, Kang Q Y, Sahu J K, et al. Reconfigurable modal gain control of a few-mode EDFA supporting six spatial modes[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(11): 1100-1103.
- [7] Chen X W, Wu B J, Xie Y Q, et al. Analytical method for few-mode erbium doped fiber amplifiers[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(3): 035102.
- [8] Jiang X R, Wu B J, Xie Y Q, et al. A semi-analytic method for FM-EDFA intensity model[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 64: 102546.
- [9] 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.
- [10] 王文笙, 宁提纲, 裴丽, 等. 基于遗传算法的少模光纤放大器增益均衡[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0906001.  
Wang W S, Ning T G, Pei L, et al. Gain equalization of few-mode fiber amplifier based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0906001.
- [11] 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]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, March 17-21, 2013, Anaheim, California. Washington, D.C.: OSA, 2013: JTh2A.18.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Ip E. Gain equalization for few-mode fiber amplifiers beyond two propagating mode groups[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(21): 1933-1936.
- [15] Jung Y, Kang Q, Sahu J K, et al. Few-mode EDFA supporting 5 spatial modes with reconfigurable differential modal gain control[C]//39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), June 23-25, 2013, London, UK. New York: IEEE Press, 2013: 582-584.
- [16] Lim E L, Jung Y, Kang Q, et al. First demonstration of cladding pumped few-moded EDFA for mode division multiplexed transmission[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 9-13, 2014, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: 14546705.
- [17] Zhang Z Z, Guo C, Cui L, et al. All-fiber few-mode erbium-doped fiber amplifier supporting six spatial modes[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(10): 100604.
- [18] Lei C M, Feng H L, Messaddeq Y, et al. Investigation of bi-directionally, dual-wavelength pumped extended L-band EDFAs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(18): 1227-1230.
- [19] 郭浩森, 武保剑, 江歆睿, 等. 基于光子灯笼的模式功率检测方法研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0106003.
- Guo H M, Wu B J, Jiang X R, et al. Research on detection method of modal power using photonic lantern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0106003.
- [20] Xu Y, Wu B J, Jiang X R, et al. Experimental measurement of absorption coefficients for effective erbium-doping concentration to optimize few-mode erbium-doped fiber amplifiers with low differential mode gain[J]. *Photonics*, 2021, 8(6): 185.
- [21] Jiang X R, Wu B J. Gain characteristics of few-mode erbium-doped fiber amplifiers pumped with complex mode field[C]//Asia Communications and Photonics Conference, October 24-27, 2021, Shanghai, China. Washington, D.C.: OPTICA, 2021: T4A.31.