

# 基于不同泵浦方案的全光纤少模放大器 放大特性对比研究

张心怡<sup>1,3</sup>, 方翼鸿<sup>2,3</sup>, 黄锡恒<sup>2,3</sup>, 曾 研<sup>2,3</sup>, 秦玉文<sup>2,3</sup>, 许 鸥<sup>2,3\*</sup>, 李建平<sup>2,3</sup>  
(1. 广东工业大学物理与光电工程学院, 广东广州 510006; 2. 广东工业大学信息工程学院, 广东广州 510006;  
3. 先进光子技术研究院, 广东广州 510006)

**摘 要:** 设计并构建全光纤型少模掺铒放大器, 实验对比研究不同泵浦模式及方向对 $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 、 $LP_{11b}$ 这3个信号模式的增益特性影响. 实验对泵浦功率、输入信号功率以及多波长情况下的放大器特性进行分析. 结果表明, 4种泵浦方案中, 前向 $LP_{11}$ 泵浦情况下放大器有最佳性能, 在整个C波段上信号增益超过20 dB, 模式增益差低于0.9 dB, 噪声系数小于9.6 dB; 信号输入功率为-10 dBm/模式时, 在1 550 nm处, 3个信号模式的增益均超过20.8 dB, DMG低至0.3 dB,  $LP_{01}$ 信号光的噪声系数低于6.2 dB以及 $LP_{11}$ 信号光的噪声系数低于9.6 dB. 4种泵浦方案下对比不同泵浦方向可得: 前向泵浦放大器的噪声系数最小, 但3种信号模式的增益也较小, 而采用后向泵浦时, 高阶信号模式增益增加, 但噪声系数也会变大. 对比泵浦模式可发现, 相比于 $LP_{01}$ 泵浦,  $LP_{11}$ 泵浦能大幅提高 $LP_{11}$ 信号光的增益, 对 $LP_{01}$ 信号光增益影响较小, 从而可降低DMG值.

**关键词:** 模分复用; 掺铒光纤; 全光纤放大器; 增益均衡; 噪声系数

**基金项目:** 国家重点研发计划(No.2018YFB1800900)

**中图分类号:** TN929.11; TN722 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2024)06-2074-09

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20230078

## Experimental Comparative Study on Gain and Noise Characteristics of All-Fiber Few-Mode Amplifier Under Different Pumping Methods

ZHANG Xin-yi<sup>1,3</sup>, FANG Yi-hong<sup>2,3</sup>, HUANG Xi-heng<sup>2,3</sup>, ZENG Yan<sup>2,3</sup>, QIN Yu-wen<sup>2,3</sup>,  
XU Ou<sup>2,3\*</sup>, LI Jiang-ping<sup>2,3</sup>

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

2. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

3. Institute of Advanced Photonics Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract:** An all-fiber few-mode erbium-doped amplifier was built to compare the effects of different pump modes and different pump directions on the gain characteristics of the three signal modes,  $LP_{01}$ ,  $LP_{11a}$ , and  $LP_{11b}$ . The experimental results show that the amplifier has the best performance under forward  $LP_{11}$  pumping. The signal gain is more than 20 dB, the differential modal gain (DMG) is less than 0.9 dB and the noise figure is less than 9.6 dB in the whole C band. At a signal input power of -10 dBm/mode, the gain of all three signal modes at 1 550 nm exceeds 20.8 dB, the DMG is as low as 0.3 dB, the noise figure of  $LP_{01}$  signaling light is lower than 6.2 dB, and the noise figure of  $LP_{11}$  signaling light is lower than 9.6 dB. Comparing the different pumping directions under the four pumping schemes, it can be found that the noise figure of the forward-pumped amplifier is the smallest, but the gains of the three signal modes are also smaller, while the gain of the higher-order signal modes is increased by using the backward-pumped one, but the noise figure will also become larger. Comparing the pumping modes, it can be found that compared with the  $LP_{01}$  pumping, the  $LP_{11}$  pumping can significantly increase the gain of the  $LP_{11}$  signaling light, and has less effect on the gain of the  $LP_{01}$  signaling light, which can reduce the DMG value.

**Key words:** mode division multiplexing; erbium-doped fiber; all-fiber amplifier; gain equalization; noise figure

**Foundation Item(s):** National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1800900)

## 1 引言

少模掺铒光纤放大器(Few Mode Erbium Doped Fiber Amplifier, FM-EDFA)是长距离模分复用传输系统中的关键器件. 在模分复用系统中,多个模式同时在一根光纤内传输,若不同模式获得的增益不均衡,随着传输距离增加,较大的模式增益差(Differential Modal Gain, DMG)将会导致系统容量、传输速率的下降<sup>[1]</sup>. 因此,模式增益差是衡量少模掺铒光纤放大器放大性能的一个重要指标. 目前,降低 DMG 的方法主要有三类:合理选择泵浦模式组合<sup>[2-4]</sup>、通过调整光纤折射率剖面改变信号光场分布<sup>[5-7]</sup>以及优化铒离子分层掺杂<sup>[8,9]</sup>. 其中,光纤折射率和铒离子分层优化设计方案在光纤制备过程中面临一些工艺问题,理论与实验结果一般存在较大偏差,而调控泵浦光具有操作灵活性和简便性,在实验过程中能通过反复调整以达到预期要求. 而在调控泵浦的实验方案中,采用不同泵浦模式及方向都将改变少模放大器的增益特性,因此研究泵浦方向及泵浦模式对放大器增益特性的影响十分必要.

随着各种少模光纤器件性能的不不断提升,基于少模掺铒光纤的放大系统经历了依赖空间光离散组件向全光纤型系统的逐渐过渡,同时也出现了多种泵浦方案. 2011年,英国南安普敦大学首先利用空间光学装置,通过芯区基模后向泵浦放大两个模式,得到增益大于 20 dB, DMG 小于 5 dB 的放大效果<sup>[10]</sup>. 随后,法国里尔第一大学、日本 NTT 公司先后通过调控高阶模式泵浦,将 DMG 优化至 1 dB 以下,同时日本 NTT 公司对噪声系数(Noise Figure, NF)进行测量,得到噪声系数小于 6 dB 的结果<sup>[7,11]</sup>. 由于繁多的空间光学器件增加了实验测量的难度,同时引入较大噪声,因此科研人员逐步向全光纤型放大系统进行探索. 北京大学在全光纤实验系统中通过优化 LP<sub>11</sub> 芯区前向泵浦放大两模信号, DMG 降低至 1 dB,增益提高到 16.2 dB<sup>[12]</sup>. 美国中佛罗里达大学使用高阶泵浦组合,即 LP<sub>21a</sub> 和 LP<sub>21b</sub> 前向芯泵组合,将 DMG 优化到 0.25 dB,增益达到 16 dB<sup>[13]</sup>. 2022年,电子科技大学通过全光纤实验系统,利用双向组合泵浦并调控前后向泵浦功率比例,实现两模信号增益大于 14 dB 且 DMG 可调<sup>[14]</sup>. 综上所述,目前大部分少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)相关报道都是基于某种特定泵浦情况下的测量结果,缺乏对 FM-EDFA 在不同泵浦调控方案下的综合对比研究,且鲜有探讨泵浦方式对噪声系数的影响.

本文关注不同泵浦模场和注入方向条件下,少模掺铒放大系统的增益和噪声特性变化. 在搭建全光纤型少模放大系统的基础上,分别在前向和后向泵浦的情况下,采用不同泵浦模式,对比分析了掺铒光纤放大

器的增益及噪声特性,同时实现了 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub> 和 LP<sub>11b</sub> 模式的增益均衡. 实验结果表明,采用前向泵浦模式 LP<sub>11</sub> 时,放大器的增益性能最优:每个信号模式输入功率为 -10 dBm 时,在 1 550 nm 处增益均高于 20.8 dB、DMG 低至 0.3 dB、LP<sub>01</sub> 以及 LP<sub>11</sub> 信号光的噪声系数分别低于 6.2 dB 和 9.6 dB;在 C 波段 DMG 低于 0.9 dB 及增益平坦度小于 1.4 dB.

## 2 全光纤少模掺铒光纤放大系统实验对比研究

### 2.1 放大系统实验搭建

实验中搭建的全光纤少模掺铒放大系统,如图 1 所示,系统中采用模式选择型光子灯笼(Mode Selective Photonic Lantern, MSPL)作为模式转换及复用器件. 首先,3 路信号光经过可调衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA)和偏振控制器(Polarization Controller, PC),分别耦合进入光子灯笼的 3 个单模输入端口被激励为不同模式. 其次,不同模式的信号光通过少模隔离器(Isolator, ISO)、少模波分复用器(Wavelength Division Multiplexing coupler, WDM),与 976 nm 的泵浦光一起注入 7.5 m 的少模掺铒光纤进行放大. 经过放大的信号光和残余泵浦进入第二个 WDM,残余泵浦被滤除,放大信号最终进入光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)进行测量. 976 nm 泵浦光可通过模式转换器(Mode Selective Coupler, MSC)转换为 LP<sub>11</sub> 模式. WDM1 对 3 个模式 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub> 的插损分别为 0.47 dB、0.78 dB、0.64 dB. WDM2 对 3 个模式 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub> 的插损分别为 0.74 dB、1.02 dB、0.85 dB. FM-EDFA 放大特性实验测试装置如图 2 所示.

实验中选用的少模掺铒光纤(FM-EDF)支持 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>、LP<sub>02</sub> 这 4 个信号模式,纤芯半径为 7 μm,数值孔径 NA 约为 0.1. 铒离子在芯内均匀掺杂,掺杂浓度约为每立方米 4×10<sup>24</sup>,相对折射率分布如图 3 所示. 从图中可以看出,在光纤纤芯外侧存在沟槽结构,用于减少弯曲损耗并将信号模式有效约束在芯区<sup>[15,16]</sup>.

在测量整个少模放大系统增益特性之前,为了明确系统中的少模器件(MSPL、ISO、WDM)对不同信号模式的影响,将 1 550 nm 信号光的 3 个不同模式分别经过 A 点、B 点、C 点以及其放大后的模场分布,用电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)记录下来,结果如图 4 所示. 由于本实验优化了器件以及光纤之间的熔接,减小了模式失配的可能性,所以 3 个信号模式经过各器件以及被 FM-EDF 放大时,信号的模态没有明显的畸变,不同模式组之间没有明显的模式耦合.

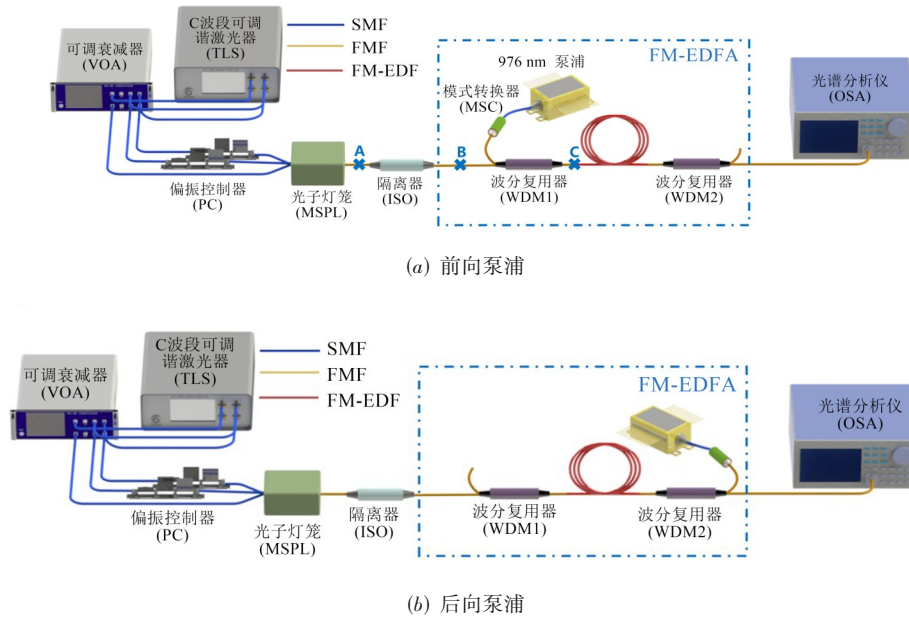


图1 全光纤少模掺铒放大系统示意图

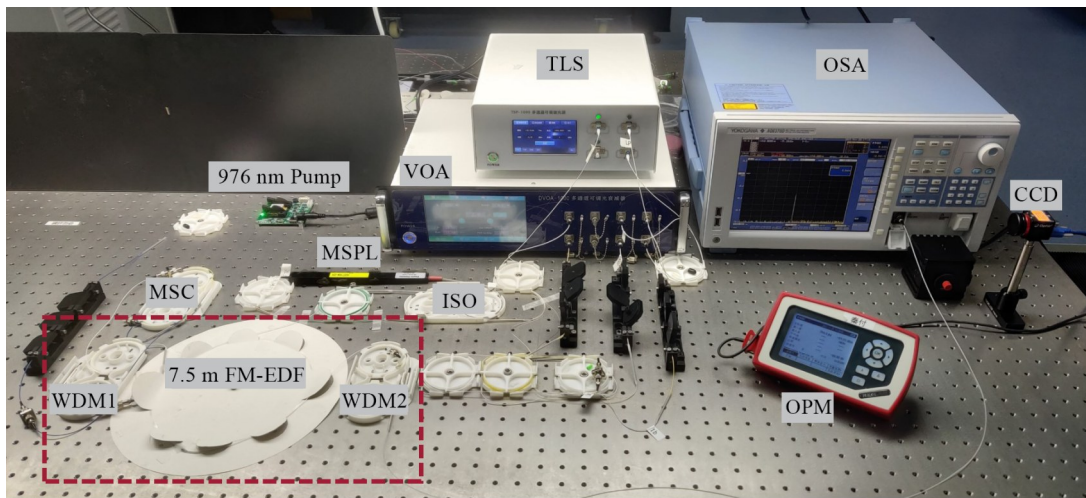


图2 放大器性能实验测试装置

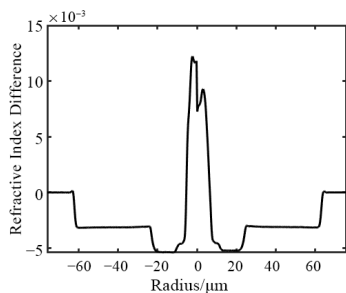


图3 FMEDF相对折射率分布图

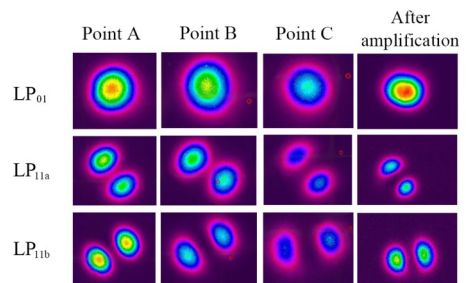


图4 信号空间模式LP01、LP11a、LP11b光强分布图

## 2.2 放大特性实验测量及对比分析

### 2.2.1 增益随泵浦功率变化

图5为不同泵浦模式与泵浦注入方向条件下,3个

模式增益和DMG随泵浦功率变化曲线,实验中每个信号光模式的输入功率为-10 dBm.从图中可以看出,当泵浦功率较低时,由于泵浦激励的粒子反转数不足,信

号光的增益较小. 随着泵浦功率的增加,更多的低能级铒离子吸收泵浦光,跃迁到高能级,进而能够提供给信号光更大的增益,因此每个信号模式的增益都表现出

随泵浦功率增大的总体趋势. 而随着泵浦功率的进一步增大,铒离子反转逐渐达到饱和,故信号增益的增长速度也逐渐变缓.

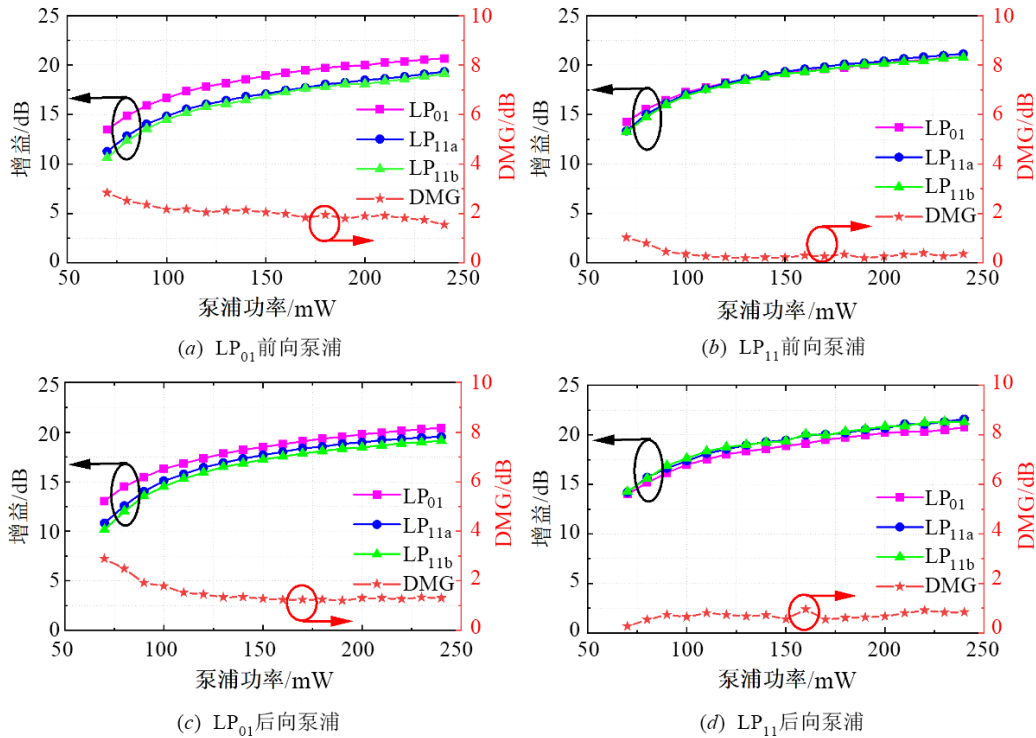


图5 不同模式的增益和DMG随LP<sub>01</sub>前向泵浦、LP<sub>11</sub>前向泵浦、LP<sub>01</sub>后向泵浦和LP<sub>11</sub>后向泵浦功率变化

采用前向泵浦时,对比分析图5(a)与(b),可得泵浦模式对放大器增益性能的影响.采用LP<sub>01</sub>泵浦时,LP<sub>01</sub>信号光的增益明显高于LP<sub>11a</sub>和LP<sub>11b</sub>信号光的增益,泵浦功率为240 mW时,LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>和LP<sub>11b</sub>信号光的增益分别能达到20.7 dB、19.3 dB和19.1 dB,最终DMG稳定在1.6 dB左右.而采用LP<sub>11</sub>泵浦能够显著提高LP<sub>11a</sub>和LP<sub>11b</sub>信号光的增益,泵浦功率为240 mW时,LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>和LP<sub>11b</sub>信号光的增益分别能达到20.8 dB、21.1 dB和20.8 dB,最终DMG稳定在0.3 dB左右.

不同泵浦情况下信号光的DMG存在差异,主要是由信号光、泵浦光和少模掺铒光纤中铒离子分布的交叠情况不同导致的<sup>[17,18]</sup>.图5(a)中,采用LP<sub>01</sub>泵浦时,由于LP<sub>01</sub>信号光的光强主要分布于纤芯中心区域,此时三者交叠积分因子最大,LP<sub>01</sub>信号模式得到充分放大,而LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>模式信号光却未能充分放大,导致模式增益差较大.图5(b)中,LP<sub>11</sub>模式泵浦光与LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>模式信号光的模场分布相较LP<sub>01</sub>模式更为相近,因此LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>模式得到了充分放大,从而达到优化DMG的效果.

同理,在后向泵浦情况下,对比不同泵浦模式的增益(图5(c)和(d))可以得到类似的结果.采用LP<sub>01</sub>泵浦

时,LP<sub>01</sub>信号光的增益明显高于LP<sub>11a</sub>和LP<sub>11b</sub>信号光的增益,泵浦功率为240 mW时,LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>和LP<sub>11b</sub>信号光的增益分别能达到20.4 dB、19.5 dB和19.1 dB,最终DMG稳定在1.3 dB左右.而采用LP<sub>11</sub>泵浦能够显著提高LP<sub>11a</sub>和LP<sub>11b</sub>信号光的增益,泵浦功率为240 mW时,LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>和LP<sub>11b</sub>信号光的增益分别能达到20.8 dB、21.6 dB和21.3 dB,最终DMG稳定在0.8 dB左右.

在采用LP<sub>11</sub>泵浦时,对比不同泵浦方向下的增益变化(图5(b)和(d))可以看出,后向泵浦下LP<sub>11a</sub>和LP<sub>11b</sub>信号光的增益提升得更加明显,迅速超过了LP<sub>01</sub>信号光增益,因此导致DMG性能劣化.在后向泵浦条件下,信号光与泵浦光反向传输,在泵浦注入铒纤的位置,由于信号光已经通过铒纤放大,此处信号光与泵浦光同时达到最强,因此信号能够得到充分放大,从而表现出高增益特性.所以同一信号模式在后向泵浦下的输出功率更高,增益更大.

## 2.2.2 噪声系数随泵浦功率变化

实验测量得到的不同模式噪声系数随泵浦功率变化曲线如图6所示.测量过程中,不同模式噪声系数计算式如下<sup>[19-21]</sup>:

$$NF_i(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{i-\text{ASE}}}{G_i h \nu_s B_0} + \frac{1}{G_i} \right) \quad (1)$$

其中,  $P_{i-\text{ASE}}$  为第  $i$  个模式的前向 ASE 功率;  $G_i$  为第  $i$  个模式的增益;  $h$  为普朗克常数;  $\nu_s$  为信号光频率;  $B_0$  为光

谱仪测量带宽. 在测量 ASE 功率时, 为了更加准确地测量中心波长处 (1 550 nm) 的 ASE 功率值, 在中心波长 (1 550 nm) 两侧  $\pm 0.5$  nm 处分别测量 ASE 功率值, 然后采用插值法计算得到中心波长处 (1 550 nm) 的 ASE 功率值.

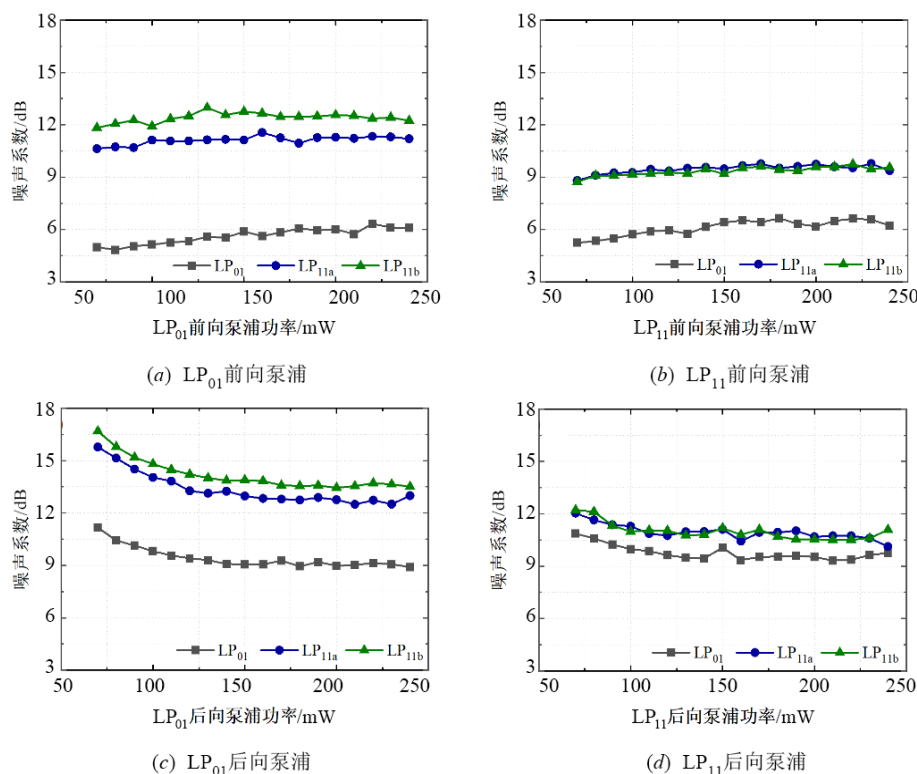


图6 不同模式的噪声系数随  $LP_{01}$  前向泵浦、 $LP_{11}$  前向泵浦、 $LP_{01}$  后向泵浦和  $LP_{11}$  后向泵浦功率变化趋势

观察图6可以发现, 每个信号模式的噪声系数都随着泵浦功率的增加而减小, 并逐渐趋于平稳. 在后向泵浦条件下, 3个模式信号光经过放大器后的噪声系数都比前向泵浦情况下更大. 这是由于在前向泵浦条件下, 信号与泵浦光同向进入掺铒光纤, 由于泵浦光能量被铒纤吸收, 入纤处的泵浦功率最大, 相对于出纤处产生更多的粒子数反转, 因此信号在入纤位置的单位长度增益要高于出纤处的单位长度增益. 而在后向泵浦中情况正好相反, 信号和泵浦光从铒纤两端进入, 泵浦光在信号光入纤处已几乎被消耗殆尽, 因此信号光在入纤处的单位长度增益较低, 等同于在信号的入纤位置引入了较高损耗, 而高损耗导致了高噪声系数. 另外, 在同样的泵浦方向下对比不同泵浦模式噪声系数(图6(a)和(b)或图6(c)和(d))可以看出, 采用  $LP_{01}$  泵浦时  $LP_{01}$  信号光的噪声系数显著低于  $LP_{11a}$  和  $LP_{11b}$  信号光的噪声系数, 而采用  $LP_{11}$  泵浦时3个计算信号模式的噪声系数值则相对比较接近. 由噪声系数式可知, 信号光的增益越高、ASE 越低, 噪声系数值就会越低. 实验中当泵浦功率为 240 mW 时,  $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$  和  $LP_{11b}$  信号光的噪

声系数分别为 6.1 dB、11.2 dB 和 12.2 dB, 如图6(a)所示. 而采用  $LP_{11}$  泵浦能够显著提高  $LP_{11a}$  和  $LP_{11b}$  信号光的增益, 因此能够降低  $LP_{11a}$  和  $LP_{11b}$  信号光噪声系数, 泵浦功率为 240 mW 时, 测量得到的  $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$  和  $LP_{11b}$  信号光噪声系数分别是 6.2 dB、9.4 dB 和 9.6 dB, 如图6(b)所示. 但综合增益和 ASE 值的影响, 放大器中的  $LP_{01}$  模式在4种泵浦情况下均表现出噪声系数最小的特性.

### 2.2.3 增益随输入信号功率变化

为了探究输入信号功率变化对不同模式增益特性的影响, 图7给出了放大器在不同泵浦条件下, 增益随输入信号功率变化曲线, 实验中泵浦输入功率固定为 240 mW. 图中可以看出, 当输入信号功率较小时 (小于 -20 dBm), 增益随输入信号功率的变化较为缓慢, 且增益值较高. 随着信号功率的进一步增加, 由于在一定的掺铒浓度和泵浦功率条件下, 信号功率的提升代表信号对泵浦功率和铒离子的消耗程度更高, 而现有的泵浦功率无法提供足够的粒子反转数, 导致各个信号模式的增益都快速下降, 即出现增益饱和现象, 说明该泵浦功率不足以继续支持高增益放大.

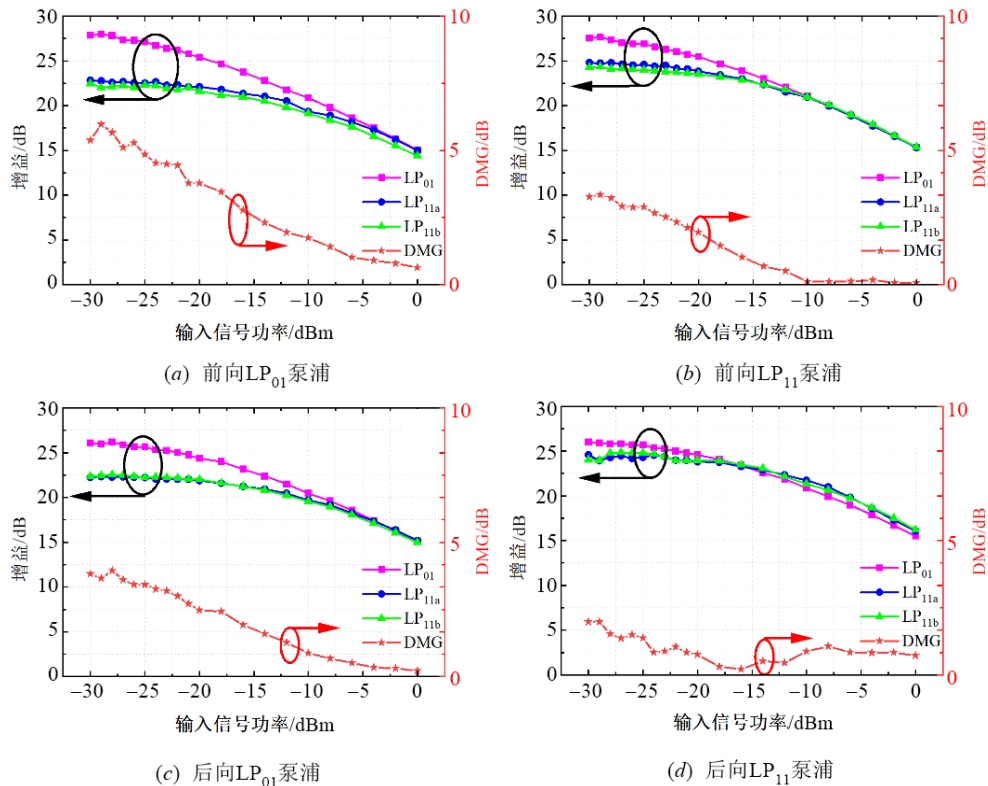


图7 在前向 $LP_{01}$ 泵浦、前向 $LP_{11}$ 泵浦、后向 $LP_{01}$ 泵浦和后向 $LP_{11}$ 泵浦情况下不同模式的增益、DMG随输入信号功率变化曲线

采用前向 $LP_{01}$ 泵浦时, $LP_{01}$ 信号光的增益明显高于 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 信号光的增益, $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 信号光分别在 $-18.6$  dBm、 $-10.7$  dBm和 $-10.3$  dBm时达到饱和输入功率(小信号增益值降低3 dB所对应的输入功率)<sup>[22]</sup>. 而采用前向 $LP_{11}$ 泵浦能够显著提高 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 信号光的增益,且 $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 信号光分别在 $-17.7$  dBm、 $-12.6$  dBm和 $-10.7$  dBm时达到饱和输入功率. 同理,在后向泵浦情况下对比不同泵浦模式的增益(图7(c)和(d))可以得到类似的结果. 采用 $LP_{01}$ 泵浦时, $LP_{01}$ 信号光的增益明显高于 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 信号光的增益, $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 信号光分别在 $-15.8$  dBm、 $-8.4$  dBm和 $-9.7$  dBm时达到饱和输入功率. 而采用 $LP_{11}$ 泵浦明显提高 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 信号光增益,甚至很快超过 $LP_{01}$ 模信号增益,如图7(d)所示,且 $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 信号光分别在 $-14.8$  dBm、 $-8.7$  dBm和 $-9.8$  dBm时达到饱和输入功率.

#### 2.2.4 增益及噪声系数随波长变化

为评估FM-EDFA在C波段的增益特性,将输入信号的波长范围设置为1 530 nm到1 565 nm,步长为5 nm,同时固定输入信号功率为 $-10$  dBm/模式、泵浦功率为240 mW,对3个模式信号光进行增益和噪声系数的测量,如图8所示.

3个信号模式在C波段内的增益均超过20 dB. 在整个C波段内前向 $LP_{01}$ 泵浦情况下的DMG在1.1~

1.5 dB范围内波动,前向 $LP_{11}$ 泵浦情况下的DMG小于0.9 dB,在后向 $LP_{01}$ 泵浦情况下的DMG范围在0.6~1.2 dB以内,后向 $LP_{11}$ 泵浦情况下的DMG范围在0.9 dB以下. 综上所述,当采用 $LP_{11}$ 泵浦时,3个信号模式在整个C波段内的DMG均在1 dB以下. 对比 $LP_{11}$ 泵浦不同方向下的增益平坦度可以发现,前向 $LP_{11}$ 泵浦情况下 $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 信号光的增益平坦度分别为1.2 dB、1.4 dB和0.9 dB;后向 $LP_{11}$ 泵浦情况下 $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 信号光的增益平坦度分别为1.4 dB、1.6 dB和1.6 dB.

另外,由噪声系数计算式可知:噪声系数与ASE功率、信号光增益有关. 信号光增益一定的情况下,噪声系数随ASE功率的降低而减小. 信号光在C波段的增益平坦度在1.6 dB以内,故暂忽略信号光增益对噪声系数的影响. 信号光在4种泵浦情况下经过掺铒光纤放大后,产生的ASE谱如图9所示. 由此可知,C波段内ASE功率随着波长的增加而呈降低趋势<sup>[23]</sup>,因此4种泵浦情况下的各个模式的噪声系数在整个C波段也随着波长变长表现出降低的趋势. 并且,前向 $LP_{01}$ 泵浦、前向 $LP_{11}$ 泵浦、后向 $LP_{01}$ 泵浦和后向 $LP_{11}$ 泵浦情况下,C波段内测量得到的NF差值(相同波长条件下、不同信号模式间的NF最大差值)波动范围分别为3~7 dB、1.9~4.2 dB、2.2~4.3 dB和1.2~3.3 dB.

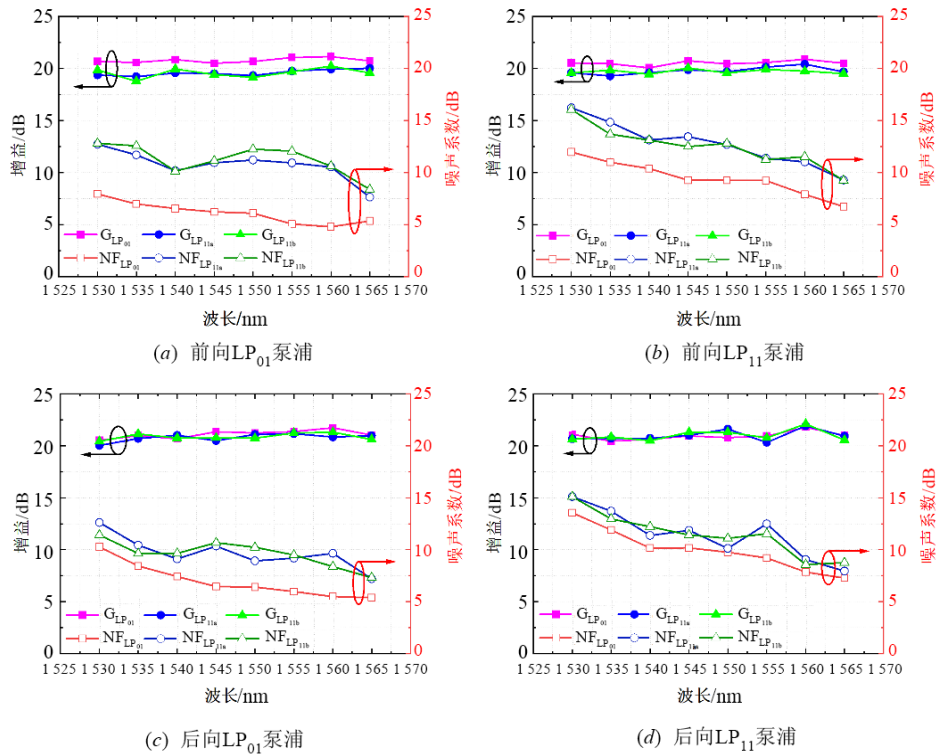


图8 不同模式的信号光在前向 $LP_{01}$ 泵浦、前向 $LP_{11}$ 泵浦、后向 $LP_{01}$ 泵浦和后向 $LP_{11}$ 泵浦情况下随波长变化的增益和NF趋势

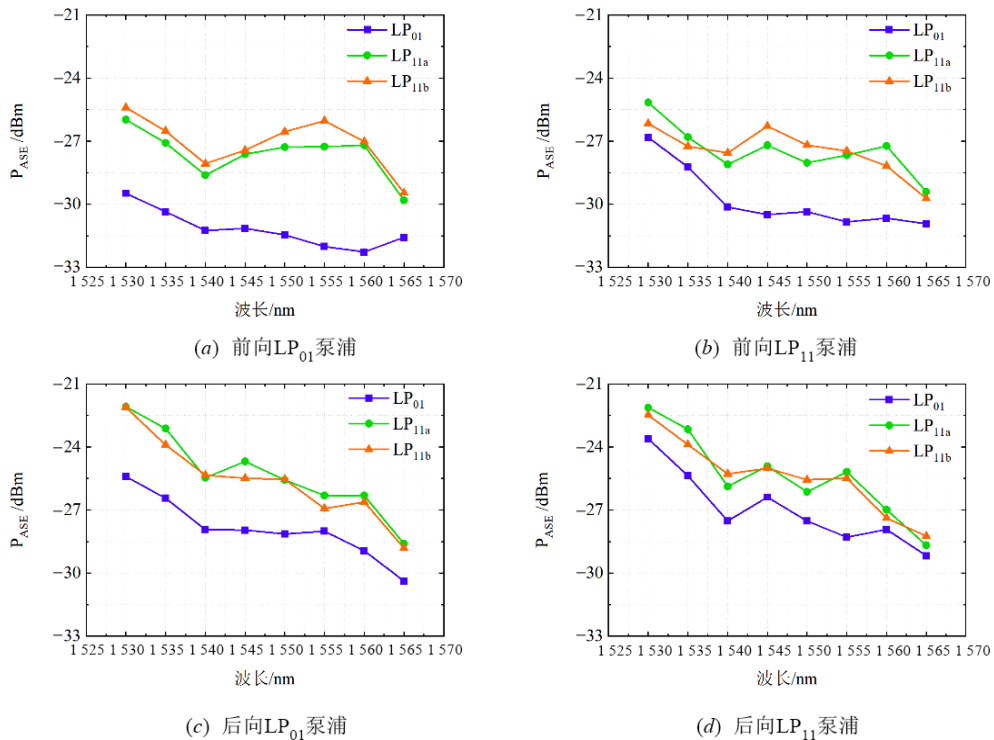


图9 不同模式的信号光在前向 $LP_{01}$ 泵浦、前向 $LP_{11}$ 泵浦、后向 $LP_{01}$ 泵浦和后向 $LP_{11}$ 泵浦情况下产生的ASE功率谱

由图9还可发现,4种泵浦情况下 $LP_{01}$ 信号光ASE功率均低于 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 信号光的ASE功率.因而3个

模式信号光的NF值在4种泵浦情况下都表现出, $LP_{01}$ 信号光NF数值低于 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 信号光的NF数值.

### 3 结论

利用搭建的全光纤型少模掺铒放大器,实验研究并对比分析了不同泵浦方向以及泵浦模式对放大器中各个信号模式的增益及噪声特性影响.通过对泵浦功率、输入信号功率以及多波长情况下的放大器特性进行分析可得:相比于前向泵浦,采用后向泵浦可提升高阶信号模式增益,但同时会导致噪声系数变大;相比于 $LP_{01}$ 泵浦, $LP_{11}$ 泵浦能大幅提高 $LP_{11}$ 信号光的增益,对 $LP_{01}$ 信号光增益则影响较小,从而可降低DMG值.实验结果表明,4种泵浦方案中,采用前向 $LP_{11}$ 泵浦模式时,放大器增益特性最优:信号输入功率为 $-10$  dBm/模式时,在 $1550$  nm处,3个信号模式的增益均超过 $20.8$  dB、DMG低至 $0.3$  dB、 $LP_{01}$ 信号光的噪声系数低于 $6.2$  dB以及 $LP_{11}$ 信号光的噪声系数低于 $9.6$  dB;在C波段实现了低于 $0.9$  dB的DMG和小于 $1.4$  dB的增益平坦度.

#### 参考文献

- [1] JUNG Y, ALAM S U, RICHARDSON D J, et al. Multi-core and multimode optical amplifiers for space division multiplexing[M]//Optical Fiber Telecommunications VII. Amsterdam: Elsevier, 2020: 301-333.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] YUNG Y, ALAM S, LI Z, et al. First demonstration of multimode amplifier for spatial division multiplexed transmission systems[C]//2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication. Piscataway: IEEE, 2011: 1-3.
- [5] 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). Piscataway: IEEE, 2017: 1-3.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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]//2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications. Piscataway: IEEE, 2012: 1-3.
- [9] LE COCQ G, QUIQUEMPOIS Y, BIGOT L. Optimization algorithm applied to the design of few-mode erbium doped fiber amplifier for modal and spectral gain equalization[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(1): 100-108.
- [10] JUNG Y, ALAM S, LI Z, et al. First demonstration and detailed characterization of a multimode amplifier for Space Division Multiplexed transmission systems[J]. Optics Express, 2011, 19(26): B952-B957.
- [11] 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]. Optics Express, 2012, 20(24): 27051-27061.
- [12] ZHU J L, YANG Y, ZHANG Z Z, et al. Weakly-coupled MDM-WDM amplification and transmission based on compact FM-EDFA[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(18): 5163-5169.
- [13] LOPEZ-GALMICHE G, SANJABI EZNAVEH Z, ANTONIO-LOPEZ J E, et al. Few-mode erbium-doped fiber amplifier with photonic lantern for pump spatial mode control[J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2588-2591.
- [14] 江歆睿, 武保剑, 许焰, 等. 光纤型少模掺铒光纤放大器的差模增益可调性研究[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 1506004.  
JIANG X R, WU B J, XU Y, et al. Adjustability of differential mode gain for all-fiber few-mode erbium-doped fiber amplifiers[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1506004. (in Chinese)
- [15] MOLIN D, BIGOT-ASTRUC M, SILLARD P. Leaky modes in trench-assisted bend-insensitive MMFs[C]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013. Washington: OSA, 2013: 1-3.
- [16] REN G B, LIN Z, ZHENG S W, et al. Resonant coupling in trenched bend-insensitive optical fiber[J]. Optics Letters, 2013, 38(5): 781-783.
- [17] BECKER P M, OLSSON A A, SIMPSON J R. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology[M]. San Diego: Academic Press, 1999.
- [18] 张振振. 增益均衡的少模光纤掺铒及拉曼放大器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.  
ZHANG Z Z. Study on the Gain Equalized Few-Mode Erbium Doped Fiber Amplifiers and Fiber Raman Amplifiers[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)

- [19] 武保剑. 光纤放大器噪声系数的光学测量[J]. 中国有线电视, 2001(4): 26-30.  
WU B J. Optical measurement of noise figure of fiber amplifier[J]. China Cable Television, 2001(4): 26-30. (in Chinese)
- [20] 张珂卫, 赵卫, 谢小平, 等. 基于掺铒光纤的高增益低噪声光放大器实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506003.  
ZHANG K W, ZHAO W, XIE X P, et al. Experimental research of high gain and low noise figure optical amplifier based on erbium-doped fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0506003. (in Chinese)
- [21] 窦清影. 增益控制 EDFA 研究[D]. 天津: 南开大学, 2006.  
DOU Q Y. Research on Gain Control EDFA[D]. Tianjin: Nankai University, 2006. (in Chinese)
- [22] 明海, 刘宇, 杨宝, 等. 979nm 波长泵浦掺 Er<sup>3+</sup> 光纤的放大自发辐射[J]. 中国科学技术大学学报, 1995, 25(3): 330-333.  
MING H, LIU Y, YANG B, et al. Amplification of spontaneous emission in Er<sup>3+</sup>-doped fiber pumped at 979nm wavelength[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 1995, 25(3): 330-333. (in Chinese)
- [23] 强则焯. 低噪声、高增益、高平坦度掺铒光纤放大器的分析与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
QIANG Z X. Experimental Studies, Analysis and Design for Erbium Doped Fiber Amplifiers with Low Noise Figure, High and Flat Gain[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)

#### 作者简介



**张心怡** 女, 1998 年 12 月出生于山东省威海市. 2021 年考入广东工业大学物理与光电工程学院. 现为广东工业大学硕士研究生. 主要研究方向为少模掺铒光纤放大器的增益特性优化.  
E-mail: 2112115137@mail2.gdut.edu.cn



**方翼鸿** 男, 1995 年 11 月出生于广东省揭阳市. 2020 年毕业于广东工业大学物理与光电工程学院. 现为广东工业大学信息工程学院在读博士研究生. 主要研究方向为少模掺铒光纤放大器.  
E-mail: nymph@uestc.edu.cn



**黄锡恒** 男, 1998 年 7 月出生于广东省深圳市. 2021 年考入广东工业大学信息工程学院. 现为广东工业大学硕士研究生. 主要研究方向为少模掺铒光纤放大器.  
E-mail: 2112103110@mail2.gdut.edu.cn



**曾研** 男, 1997 年 1 月出生于广东省梅州市. 2020 年毕业于广东工业大学电子信息工程专业. 现为广东工业大学在读博士研究生. 主要研究方向为少模光纤放大器与激光器.  
E-mail: nymph@uestc.edu.cn



**秦玉文** 男. 广东工业大学百人特聘教授, 先进光子技术研究院院长. 目前的科研工作主要集中于光纤通信、光纤传感和光学信息处理等方面.  
E-mail: qinyw@gdut.edu.cn



**许鸥** 女. 现为广东工业大学信息工程学院副教授. 主要研究方向为光纤通信及传感应用、光纤光栅器件等.  
E-mail: xuou@gdut.edu.cn



**李建平** 男. 现为广东工业大学“百人计划”特聘教授. 主要研究方向为高速光纤通信.  
E-mail: jianping@gdut.edu.cn