

基于遗传算法的少模光纤放大器增益均衡

王文笙, 宁提纲, 裴丽*, 郑晶晶, 王建帅, 魏淮

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 根据少模掺铒光纤放大器的放大理论,对四模式复用信号和五模式复用信号进行增益仿真研究。通过遗传算法分别优化三层掺铒的四模式群组少模光纤放大器和四层掺铒的五模式群组少模光纤放大器。仿真优化的结果表明,利用 980 nm 的两模式复用泵浦并以芯层泵浦前向抽运的方式对 1550 nm 四模式复用信号进行放大,得到的信号各模式的平均增益为 24.48 dB,模间增益差值为 0.103 dB;以 980 nm 三模式复用泵浦并对五模式复用信号进行放大,得到的信号各模式的平均增益为 23.31 dB,模间增益差值为 0.016 dB。通过优化泵浦模式组合及光纤掺杂结构,提高了四模式群组与五模式群组少模光纤放大器在 C 波段的增益性能。

关键词 光通信; 模分复用; 少模光纤放大器; 增益均衡; 遗传算法

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0906001

Gain Equalization of Few-Mode Fiber Amplifier Based on Genetic Algorithm

Wang Wensheng, Ning Tigang, Pei Li*, Zheng Jingjing, Wang Jianshuai, Wei Huai

Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract According to the amplification theory of a few-mode erbium-doped fiber amplifier (FM-EDFA), the study on gain simulation is carried out for the four-mode multiplexed signal and the five-mode multiplexed signal. The genetic algorithm is used to optimize the three-layer erbium-doped four-mode group few-mode fiber amplifier and four-layer erbium-doped five-mode group few-mode fiber amplifier. The results of simulation and optimization show that the 1550 nm four-mode multiplexed signal is amplified by using the 980 nm two-mode multiplexing pump and the core pumped forward pump mode. The average gain of each mode is 24.48 dB, and the gain difference between the modes is 0.103 dB. The 980 nm three-mode multiplexing pump is used for amplifying signals, and the average gain of each mode is 23.31 dB. The gain difference between modes is 0.016 dB. By optimizing the pump mode combination and fiber doping structure, the gain performance of four-mode group and five-mode group few-mode fiber amplifiers in C-band is improved.

Key words optical communications; mode division multiplexing; few-mode fiber amplifier; gain equalization; genetic algorithm

OCIS codes 060.2330; 060.2410; 060.4230; 060.4510

1 引言

随着互联网等相关产业的飞速发展,通信业对于数据的传输容量需求正在飞速增长,单模光纤通

信系统的传输容量正在趋近其理论极限^[1]。为了提高光纤通信系统的传输容量,模分复用技术作为提高光纤通信系统容量的有效方法逐渐受到关注,该技术利用少模光纤或多芯光纤中相互正交的模式作

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2020-11-19; 录用日期: 2020-12-01

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801003)、国家自然科学基金(61827817,61525501)

* E-mail: lipei@bjtu.edu.cn

为独立信道进行信号传输,系统传输容量与模式复用数量成正比^[2-7]。光纤放大器是光纤传输系统中十分重要的中继器件,对于少模光纤传输系统而言,研究适用于该系统的少模光纤放大器尤为重要^[8]。当使用均匀掺杂的少模光纤放大器进行信号放大时,模分复用信号中各模式的交叠因子不同,导致产生较大的模间增益差值,从而使得模分复用传输系统的通信容量降低、中断概率大幅提高^[9]。影响少模光纤放大器增益性能的主要因素有掺铒光纤的掺杂结构、光纤的折射率分布^[10-11]及泵浦模式的组合^[12]。遗传算法(GA)是根据遗传学理论模拟生物种群进化的一种计算模型,通过模拟自然选择的过程得到多变量优化问题的全局最优解^[13],该算法十分适用于光纤掺杂结构的优化问题。

2018年,Gaur等^[14]设计了一种部分区域均匀掺杂的环芯光纤放大器,通过仿真验证了该放大器在基模泵浦下对五模式复用信号的平均增益大于20 dB且模间增益差小于0.5 dB的放大。2019年,Zhang等^[15]通过优化光纤掺杂结构及折射率分布,实现了基模泵浦下对四模式复用信号的平均增益为15 dB、模间增益差小于2.5 dB的放大。当确定信号波长对少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)进行优化后,FM-EDFA仅在此波长的信号处有较优的增益性能,但当信号波长改变时,模间增益差值会大幅增大,增益性能快速下降。本文分别针对四模式与

五模式模分复用信号通过遗传算法对三层和四层掺铒结构的阶跃光纤进行了优化设计,确定了较优的泵浦模式组合,实现了少模掺铒光纤放大器在C波段的增益均衡。

2 少模掺铒光纤放大器的仿真

2.1 FM-EDFA 的理论模型

在FM-EDFA进行信号放大时,模分复用信号光通过放大器时发生受激辐射,铒离子从亚稳定态能级跃迁到基态能级并产生与信号光波长相等的光子,实现信号的放大。在放大过程中,高能级的铒离子会自发跃迁到基态能级上发生自发辐射,产生带宽很大的光子并在传输中不断累积放大,生成自发辐射噪声(ASE)。模分复用信号包括基模和高阶模,由于不同模式的光场分布截然不同,掺铒光纤上下能级铒离子在横向端面的分布情况会随着泵浦光和信号光的模式光场分布而变化。FM-EDFA的数学模型中的掺铒光纤满足弱导近似条件,光纤模式为线偏振模式且忽略模间耦合,当信号沿掺铒光纤被放大时,泵浦光与信号光各模式的模场分布差异会使纤芯截面上下能级的铒离子分布不均,泵浦光和信号光共同决定了纤芯横向截面上下能级铒离子的分布。FM-EDFA的数学模型由泵浦光、信号光、正反向自发辐射光的功率传播方程和上下能级粒子数方程组成,其中掺铒光纤粒子数方程为

$$N_1(r, \varphi, z) = \frac{\frac{1}{\tau} + \sum_{i=1}^{m_s} \frac{[P_{s,i}(z) + P_{ASE,i}(z)]\sigma_{es,i}\Gamma_{s,i}(r, \varphi)}{h\nu_s}}{\frac{1}{\tau} + \sum_{i=1}^{m_s} \frac{[P_{s,i}(z) + P_{ASE,i}(z)](\sigma_{es,i} + \sigma_{as,i})\Gamma_{s,i}(r, \varphi)}{h\nu_s} + \sum_{j=1}^{m_p} \frac{P_{p,j}(z)\sigma_{ap,j}\Gamma_{p,j}(r, \varphi)}{h\nu_p}} N_0(r, \varphi, z), \quad (1)$$

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

泵浦光、信号光和正反向自发辐射光的功率传播方程为

$$\frac{dP_{p,j}}{dz} = \mu_1 P_{p,j} \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_{p,j}(r, \varphi) N_1(r, \varphi, z) \sigma_{ap,j} r dr d\varphi, \quad (3)$$

$$\frac{dP_{s,i}}{dz} = P_{s,i} \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_{s,i}(r, \varphi) [N_2(r, \varphi, z) \sigma_{es,i} - N_1(r, \varphi, z) \sigma_{as,i}] r dr d\varphi, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ASE,i}}{dz} = & \mu_2 P_{ASE,i} \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_{s,i}(r, \varphi) [N_2(r, \varphi, z) \sigma_{es,i} - N_1(r, \varphi, z) \sigma_{as,i}] r dr d\varphi + \\ & \mu_2 \int_0^{2\pi} \int_0^a 2\sigma_{es,i} \nu_s \Delta\nu \Gamma_{s,i}(r, \varphi) N_2(r, \varphi, z) r dr d\varphi, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: r 为柱坐标系下的光纤径向距离; φ 为光纤方位角; z 为光纤轴向距离; m_s 为信号光的模式复用

数量; m_p 为泵浦光的模式复用数量; $P_{s,i}(z)$ 为模分复用信号第*i*个模式的光功率; $P_{ASE,i}(z)$ 为第*i*个

信号模式的自发辐射光功率; $P_{p,j}(z)$ 为泵浦第 j 个模式的光功率; h 为普朗克常数; $N_0(r, \varphi, z)$ 为 FM-EDFA 纤芯中铒离子的粒子数浓度分布; $N_2(r, \varphi, z)$ 与 $N_1(r, \varphi, z)$ 分别为光纤中处于上能级与下能级铒离子的粒子数浓度分布; a 为掺铒光纤的纤芯半径; ν_s 为信号光频率; ν_p 为泵浦光频率; $\Gamma_{p,j}(r, \varphi)$ 为泵浦光第 j 个模式的归一化光强分布; $\Gamma_{s,i}(r, \varphi)$ 为信号光第 i 个模式的归一化光强分布; τ 为上能级弛豫时间; $\sigma_{es,i}$ 和 $\sigma_{as,i}$ 分别为信号光的辐射截面和吸收截面; $\sigma_{ap,j}$ 为泵浦光的吸收截面; $\Delta\nu$ 为噪声带宽; $\mu_1 = \pm 1$ 分别代表后向抽运方式和前向抽运方式; $\mu_2 = \pm 1$ 分别代表正反向自发辐射。

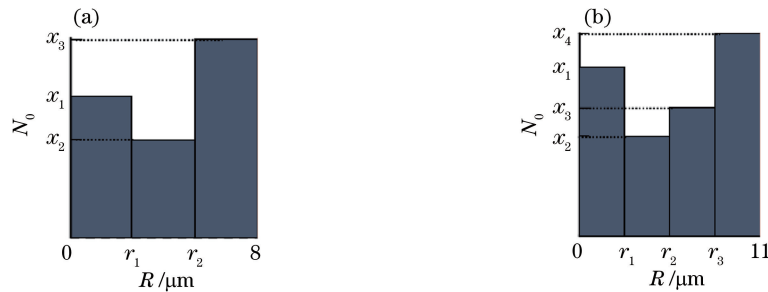


图 1 光纤径向掺铒半径和各层粒子数浓度。(a)三层掺铒结构;(b)四层掺铒结构

Fig. 1 Fiber radial erbium-doped radius and particle number concentration of each layer. (a) Three-layer erbium-doped structure; (b) four-layer erbium-doped structure

图 1 中:对光纤纤芯进行了环形分层掺杂, R 表示光纤的径向掺铒半径, r_k 表示光纤第 k 层的掺铒半径, x_k 表示掺铒光纤第 k 层的粒子数浓度。图 1(a) 为三层掺铒光纤的径向掺铒半径和各层粒子数浓度, 纤芯半径为 $8 \mu\text{m}$, 包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$, 纤芯折射率为 1.4499 , 包层折射率为 1.4421 , 在芯层进行三层掺铒, 结构参数为 $[r_1, r_2, x_1, x_2, x_3]$ 。图 1(b) 为四层掺铒光纤的径向掺铒半径和各层粒子数浓度, 纤芯半径为 $11 \mu\text{m}$, 包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$, 纤芯折射率为 1.4499 , 包层折射率为 1.4421 , 在芯层进行四层掺铒, 结构参数为 $[r_1, r_2, r_3, x_1, x_2, x_3, x_4]$ 。通过 FM-EDFA 数学模型分别对图 1(a)、(b) 所示的两种掺铒光纤构成的四模式群组少模光纤放大器(4M-EDFA)和五模式群组少模光纤放大器(5M-EDFA)进行 MATLAB 建模, 通过 GA 优化不同泵浦模式组合下图 1(a)、(b) 两种光纤的掺铒结构, 从而减小最大模间增益差(DMG)、实现增益均衡。

2.3 基于遗传算法的光纤掺铒结构优化

对于图 1 中光纤的掺铒结构, 需要同时优化掺铒浓度(粒子数浓度)与掺铒半径等多个变量, 故采

本文采用 980 nm 的泵浦源以芯层泵浦前向抽运的方式进行 FM-EDFA 的数值仿真, 考虑到存在正反向自发辐射光, 对 FM-EDFA 的数学模型进行数值求解本质上属于求解微分方程组的边值问题, 因此可以采用四阶龙格库塔法与打靶法相结合的方式对放大器的模型进行数值求解。

2.2 FM-EDFA 掺杂结构的设计

通过在两种少模阶跃光纤的纤芯部分进行多层掺铒的方式来实现四模式群组信号($LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}$)和五模式群组信号($LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}, LP_{31}$)的增益均衡, 两种少模掺铒光纤的径向掺铒结构及折射率分布如图 1 所示。

用遗传算法进行优化计算。遗传算法的优化流程包括: 个体编码、种群初始化、个体适应度计算、选择、交叉、变异及种群演化。对于光纤掺杂结构的优化问题而言: 个体编码是指将掺杂结构中的掺铒半径与掺铒浓度进行编码, 其中掺铒半径的搜索范围为 $[0, a]$ (a 为纤芯半径); 种群初始化是指设定种群中要计算的光纤结构总数量; 个体适应度计算是指利用适应度函数对种群中每个光纤掺杂结构的增益性能进行评估计算, 以为后续光纤掺杂结构的选择提供依据; 选择是指对增益性能较差的掺杂结构进行淘汰的过程; 交叉是指将两个现有光纤掺杂结构的编码相互交换并产生新的掺杂结构的过程; 变异是指随机改变单个光纤掺杂结构的编码以产生新结构的过程。

遗传算法采用二进制的编码方式, 种群规模为 50 , 以轮盘赌法进行淘汰选择, 交叉概率设为 0.9 , 变异概率设为 0.05 , 迭代总次数设为 600 。适应度函数为光纤掺杂结构增益性能的评估函数, 定义为

$$F = \bar{G} / \Delta G, \quad (6)$$

式中: \bar{G} 为信号各模式的平均增益值; ΔG 为最大模

间增益差值,表示模式平均增益大、模间增益差值小的光纤掺杂结构更容易保留下来,从而可以更快地得到结构最优的掺铒光纤,适应度函数对遗传算法的优化结果起决定性作用。

3 优化后 FM-EDFA 的增益特性

3.1 优化后 4M-EDFA 的掺杂结构及增益特性分析

4M-EDFA 采用三层掺杂的结构,分别以不同模式的单模泵浦与双模组合泵浦对 1550 nm 的四模式复用信号(LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁, LP₀₂)进行放大,泵浦方式为芯层前向泵浦,泵浦总功率为 320 mW。信号各模式的初始功率为: P_{s01} = 0.1 mW, P_{s11} = 0.1 mW, P_{s21} = 0.1 mW, P_{s02} = 0.1 mW; 泵浦光波长为 980 nm,单模泵浦初始功率 P_{p1} = 320 mW,双模泵浦各模式的功率为: P_{p1} = 160 mW, P_{p2} = 160 mW,各模式泵浦的功率配比为 1:1; 光纤长度为 5 m,上能级弛豫时间 τ = 10 ms。利用遗传算法对不同模式泵浦下的 4M-EDFA 进行掺杂结构优化,通过对比可知:最佳单模式泵浦为 LP₀₁ 模泵浦,最佳双模式泵浦为 LP₀₂ + LP₂₁ 模泵浦,两种泵浦下的掺铒光纤放大器的适应度函数 F 分别为 220 和

238,最佳掺杂结构分别为

$$N_0(r, \varphi) = \begin{cases} 6.701 \times 10^{24}, & 0 \mu\text{m} < r \leq 2.75 \mu\text{m} \\ 2.662 \times 10^{24}, & 2.75 \mu\text{m} < r \leq 5.73 \mu\text{m}, \\ 1.853 \times 10^{25}, & 5.73 \mu\text{m} < r \leq 8.0 \mu\text{m} \end{cases} \quad (7)$$

$$N_0(r, \varphi) = \begin{cases} 1.212 \times 10^{25}, & 0 \mu\text{m} < r \leq 1.4 \mu\text{m} \\ 7.274 \times 10^{24}, & 1.4 \mu\text{m} < r \leq 6.5 \mu\text{m}. \\ 1.465 \times 10^{25}, & 6.5 \mu\text{m} < r \leq 8.0 \mu\text{m} \end{cases} \quad (8)$$

图 2 为在单模和双模泵浦下 4M-EDFA 光纤中信号增益随光纤长度的变化图,横轴(EDF length)为掺铒光纤长度,纵轴为信号模式增益,其中,图 2(a)的泵浦模式为 LP₀₁ 模,四模式复用信号各模式的平均增益为 23.59 dB,模间增益差值为 0.107 dB;图 2(b)的泵浦模式为 LP₀₂ 模与 LP₂₁ 模,四模式复用信号各模式平均增益为 24.48 dB,模间增益差值为 0.103 dB。对比图 2(a)、(b)可知,虽然二者在输出端信号的模间增益差相差不多,但当光纤长度小于 5 m 时,单模泵浦 4M-EDFA 的模间增益差远大于双模泵浦 4M-EDFA,这说明单模泵浦 4M-EDFA 的增益性能不稳定。

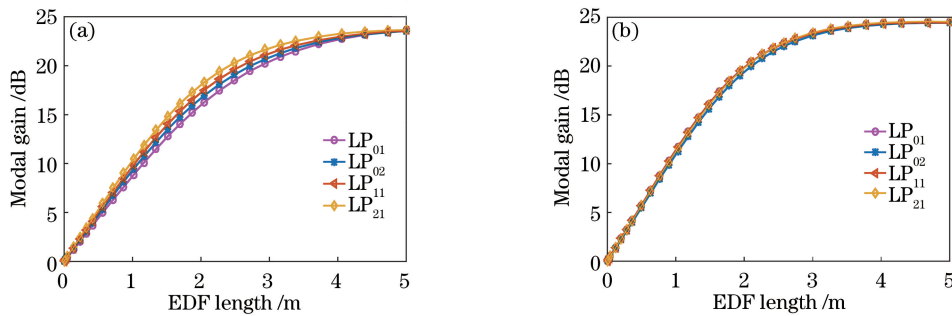


图 2 4M-EDFA 的增益特性。(a) LP₀₁ 模泵浦;(b) LP₀₂ + LP₂₁ 模泵浦

Fig. 2 Gain characteristics of 4M-EDFA. (a) LP₀₁ mode pumping; (b) LP₀₂ + LP₂₁ mode pumping

3.2 优化后 5M-EDFA 的掺杂结构及增益特性分析

5M-EDFA 采用四层掺杂结构,分别以不同模式组合的双模泵浦与三模泵浦对 1550 nm 的五模式复用信号(LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁, LP₀₂, LP₃₁)进行放大,泵浦方式为前向泵浦,泵浦总功率为 420 mW。信号各模式的初始功率设为: P_{s01} = 0.1 mW, P_{s11} = 0.1 mW, P_{s21} = 0.1 mW, P_{s02} = 0.1 mW, P_{s31} = 0.1 mW; 泵浦光波长为 980 nm,双模泵浦初始功率为: P_{p1} = 210 mW, P_{p2} = 210 mW; 三模泵浦各模式的功率为: P_{p1} = 140 mW, P_{p2} = 140 mW,

P_{p3} = 140 mW; 光纤长度为 3.5 m。通过遗传算法对不同模式泵浦下的 5M-EDFA 进行掺杂结构优化,经对比得:最佳双模式泵浦为 LP₀₂ + LP₃₁ 模泵浦,最佳三模泵浦为 LP₀₂ + LP₂₁ + LP₃₁ 模泵浦,两种泵浦下的掺铒光纤放大器的适应度函数 F 分别为 1354 和 1494,最佳掺杂结构分别为

$$N_0(r, \varphi) = \begin{cases} 2.951 \times 10^{24}, & 0 \mu\text{m} < r \leq 2.50 \mu\text{m} \\ 1.161 \times 10^{25}, & 2.50 \mu\text{m} < r \leq 6.32 \mu\text{m}, \\ 5.063 \times 10^{24}, & 6.32 \mu\text{m} < r \leq 9.0 \mu\text{m} \\ 1.264 \times 10^{25}, & 9.0 \mu\text{m} < r \leq 11.0 \mu\text{m} \end{cases} \quad (9)$$

$$N_0(r, \varphi) = \begin{cases} 3.955 \times 10^{24}, & 0 \mu\text{m} < r \leq 2.0 \mu\text{m} \\ 1.142 \times 10^{25}, & 2.0 \mu\text{m} < r \leq 6.3 \mu\text{m} \\ 5.247 \times 10^{24}, & 6.3 \mu\text{m} < r \leq 9.0 \mu\text{m} \\ 1.571 \times 10^{25}, & 9.0 \mu\text{m} < r \leq 11.0 \mu\text{m} \end{cases} \quad (10)$$

图 3 为双模和三模泵浦下 5M-EDFA 光纤中信号增益随光纤长度的变化图,其中,图 3(a)的泵浦

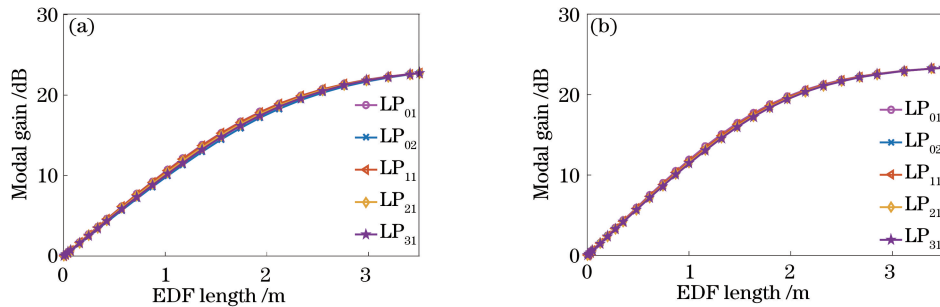


图 3 5M-EDFA 的增益特性。(a) $LP_{02} + LP_{31}$ 模泵浦;(b) $LP_{02} + LP_{21} + LP_{31}$ 模泵浦

Fig. 3 Gain characteristics of 5M-EDFA. (a) $LP_{02} + LP_{31}$ mode pumping; (b) $LP_{02} + LP_{21} + LP_{31}$ mode pumping

3.3 泵浦功率对 FM-EDFA 增益特性的影响

为了分析泵浦功率对信号增益均衡的影响,将 4M-EDFA 的泵浦功率由 160 mW 逐渐提升至 640 mW(双模式泵浦各模式功率比为 1:1),将 5M-EDFA 的泵浦功率由 180 mW 逐渐提升至 630 mW(双模式泵浦各模式功率比为 1:1,三模泵浦各模式

模式为 LP_{02} 模与 LP_{31} 模,五模式复用信号各模式的平均增益为 22.74 dB,最大模间增益差值为 0.017 dB;图 3(b)的泵浦模式为 LP_{02} 模、 LP_{21} 模与 LP_{31} 模,五模式复用信号各模式平均增益为 23.3074 dB,最大模间增益差值为 0.016 dB。对比图 3(a)、(b)两图可知,光纤长度小于 5 m 时,双模泵浦 5M-EDFA 的模间增益差与三模泵浦 5M-EDFA 相差不多,这说明二者的增益性能相对稳定。

功率比为 1:1:1)。噪声系数 NF 是衡量光纤放大器增益时附加到信号上的噪声大小的重要参数,NF 越大表明放大器输出信号中掺入噪声的功率越大。少模光纤放大器信号各模式增益、噪声系数及最大模间增益差(DMG)如图 4 所示。

由图 4 可知,信号各模式增益随着泵浦功率的

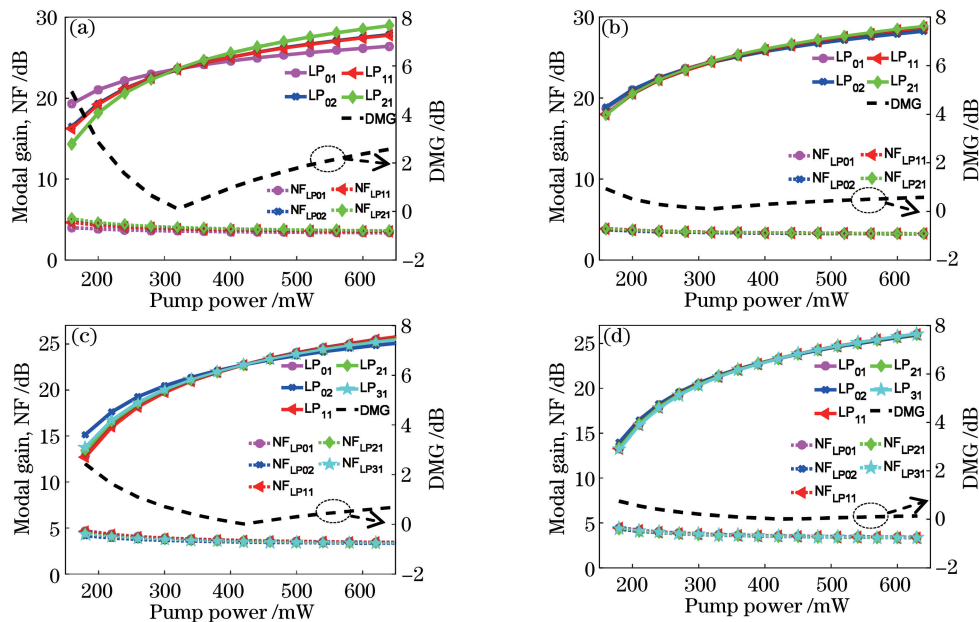


图 4 信号各模式增益与噪声系数随泵浦功率的变化。(a) 4M-EDFA 在 LP_{01} 模泵浦下;(b) 4M-EDFA 在 $LP_{02} + LP_{21}$ 模泵浦下;(c) 5M-EDFA 在 $LP_{02} + LP_{31}$ 模泵浦下;(d) 5M-EDFA 在 $LP_{02} + LP_{21} + LP_{31}$ 模泵浦下
Fig. 4 Gain and noise figure of each signal mode change with pump power. (a) 4M-EDFA is pumped in LP_{01} mode; (b) 4M-EDFA is pumped in $LP_{02} + LP_{21}$ mode; (c) 5M-EDFA is pumped in $LP_{02} + LP_{31}$ mode; (d) 5M-EDFA is pumped in $LP_{02} + LP_{21} + LP_{31}$ mode

提高而增加并逐渐达到饱和。对比图 4(a)、(b) 两图可知,在 LP_{01} 模泵浦下 4M-EDFA 在泵浦功率为 320 mW 时 DMG 为 0.107 dB,而 DMG 随泵浦功率的变化波动很大,泵浦功率增加至 520 mW 时 DMG 迅速增至 1.922 dB;而 $LP_{02} + LP_{21}$ 模泵浦下,4M-EDFA 在 320 mW 泵浦下的 DMG 为 0.103 dB,泵浦功率增加至 520 mW 时 DMG 为 0.463 dB。虽然在 320 mW 的泵浦下二者的 DMG 几乎相等,但相较于 LP_{01} 模泵浦,在 $LP_{02} + LP_{21}$ 模泵浦下 4M-EDFA 的泵浦功率对 DMG 的影响更小,增益性能更稳定。对比图 4(c)、(d) 可知,在泵浦总功率为 420 mW 时,5M-EDFA 在 $LP_{02} + LP_{31}$ 模泵浦下的 DMG 为 0.017 dB,在 $LP_{02} + LP_{21} + LP_{31}$ 模泵浦下的 DMG 为 0.016 dB;随着泵浦功率增加至 580 mW,5M-EDFA 在 $LP_{02} + LP_{31}$ 模泵浦

下的 DMG 为 0.532 dB,在 $LP_{02} + LP_{21} + LP_{31}$ 模泵浦下的 DMG 仅为 0.112 dB,三模泵浦下 5M-EDFA 的增益性能更稳定。4M-EDFA 与 5M-EDFA 在不同模式泵浦下的噪声系数均为 3 dB~4 dB,各模式噪声系数的差异较小且都随泵浦功率的增大而减小。因此,增加合适的泵浦模式可以有效地减小泵浦功率对少模光纤放大器模间增益差值的影响,从而提高放大器增益性能的稳定性。

3.4 FM-EDFA 增益的 C 波段光谱响应

设定 4M-EDFA 的泵浦总功率为 320 mW,5M-EDFA 的泵浦总功率为 420 mW,泵浦各模式的功率均相等,将信号光波长从 1530 nm 以 5 nm 步长增大至 1565 nm,研究 4M-EDFA 与 5M-EDFA 在 C 波段的增益特性,模分复用信号各模式在 C 波段获得的增益大小及噪声系数如图 5 所示。

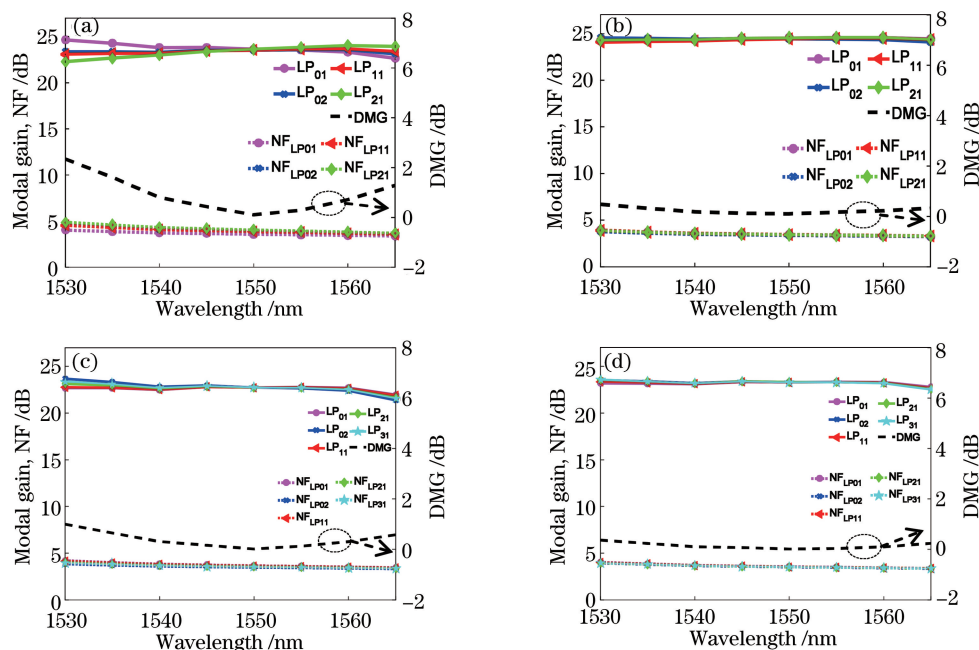


图 5 信号各模式增益与噪声系数随信号波长的变化。(a) 4M-EDFA 在 LP_{01} 模泵浦下;(b) 4M-EDFA 在 $LP_{02} + LP_{21}$ 模泵浦下;(c) 5M-EDFA 在 $LP_{02} + LP_{31}$ 模泵浦下;(d) 5M-EDFA 在 $LP_{02} + LP_{21} + LP_{31}$ 模泵浦下

Fig. 5 Gain and noise figure of each signal mode change with wavelength of signal. (a) 4M-EDFA is pumped in LP_{01} mode; (b) 4M-EDFA is pumped in $LP_{02} + LP_{21}$ mode; (c) 5M-EDFA is pumped in $LP_{02} + LP_{31}$ mode; (d) 5M-EDFA is pumped in $LP_{02} + LP_{21} + LP_{31}$ mode

由图 5 可知,4M-EDFA 与 5M-EDFA 在 C 波段上对不同波长信号光各模式的平均增益变化较小且全部大于 20 dB,噪声系数均为 3 dB~4 dB,但 DMG 随着信号波长的变化有较大的波动。当信号光波长从 1530 nm 增大至 1550 nm 时,DMG 逐渐减小并在 1550 nm 处达到最小,随着信号光波长从 1550 nm 进一步增大至 1565 nm,DMG 逐渐增加;

4M-EDFA 与 5M-EDFA 信号各模式在 C 波段的噪声系数均为 3 dB~4 dB 且随信号波长的增大而减小。由图 5(a)可知,4M-EDFA 在 LP_{01} 模泵浦下且信号光波长为 1530 nm 时,DMG 为 2.352 dB,波长增大至 1550 nm 时最小 DMG 为 0.107 dB,波长为 1565 nm 时 DMG 为 1.282 dB;由图 5(b)可知,在 $LP_{02} + LP_{21}$ 模泵浦下信号光波长为 1530 nm 时,

DMG 为 0.479 dB, 信号光波长为 1550 nm 时 DMG 为 0.103 dB, 信号光波长为 1565 nm 时 DMG 为 0.324 dB。由图 5(c)、(d) 可知, 信号光波长为 1530 nm 时, 5M-EDFA 在 $LP_{02} + LP_{31}$ 模泵浦与 $LP_{02} + LP_{21} + LP_{31}$ 模泵浦下的 DMG 分别为 1.004 dB 与 0.372 dB, 波长增大至 1550 nm 时的 DMG 达到最小值, 分别为 0.017 dB 与 0.016 dB, 波长为 1565 nm 时的 DMG 又分别增至 0.578 dB 与 0.244 dB。

通过对比图 5(a)、(b) 与图 5(c)、(d) 可知, 4M-EDFA 与 5M-EDFA 在 1550 nm 信号波长处的 DMG 最小, 这是由于为了减少遗传算法的优化时间、降低算法复杂度, 将算法的适应度函数 F 定义为 1550 nm 单波长信号的模式平均增益与最大模间增益差之比, 优化后的掺铒光纤对波长 1550 nm 的信号有最优的放大效果, 信号波长变化导致的模场分布改变会造成复用信号增益效果变差、DMG 增大, 且信号波长较 1550 nm 变化越大, DMG 的增加越大; 增加合适的泵浦模式可以减小 FM-EDFA 在 C 波段上的 DMG 波动, 使 FM-EDFA 在整个 C 波段上的 DMG 相较平稳。

4 结 论

为了实现四模式复用信号与五模式复用信号在 C 波段的增益均衡, 通过优化泵浦的模式组合及光纤的掺杂结构, 减小了复用信号的模间增益差。利用龙格库塔法与遗传算法对少模光纤放大器进行了仿真与优化: 经 $LP_{02} + LP_{21}$ 模泵浦的 4M-EDFA 的放大后, 四模式复用信号在 C 波段上的模式平均增益大于 24 dB, DMG 小于 0.5 dB 且信号光波长为 1550 nm 时的 DMG 最小为 0.103 dB; 经 $LP_{02} + LP_{21} + LP_{31}$ 模泵浦的 5M-EDFA 的放大后, 五模式复用信号在 C 波段上的模式平均增益大于 23 dB, DMG 小于 0.4 dB 且 1550 nm 信号光的 DMG 最小为 0.016 dB。从优化过程中发现, 增加光纤的掺铒层数是减小 DMG 的有效方法, 随着信号模式复用数量的增多, 掺杂结构的复杂度也需相应升高, 但受到光纤生产技术的限制, 复杂度过高的掺铒光纤难以制作, 因此需要根据复用信号的模式合理地选择泵浦模式组合, 适当增加泵浦的模式复用数量, 这样不但可以进一步降低 FM-EDFA 的模间增益差, 还可以提高 FM-EDFA 在 C 波段上的增益性能, 从而为进一步开展六模式群组增益均衡的研究提供基础。

参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E, et al. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [2] Franz B, Bülow H. Mode group division multiplexing in graded-index multimode fibers [J]. *Bell Labs Technical Journal*, 2013, 18(3): 153-172.
- [3] Xing H X, Wu B J, Wan F, et al. Design of elliptical-core few-mode fiber optical parametric amplifiers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110603.
邢焕兴, 武保剑, 万峰, 等. 椭圆纤芯少模光纤参量放大器设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 110603.
- [4] Fang Y, Hu G J, Gong C L, et al. Mode demultiplexing based on cascaded independent component analysis for mode division multiplexing system with high mode group delay [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0806001.
方妍, 胡贵军, 宫彩丽, 等. 高模式群时延模分复用系统的级联独立成分分析解复用技术研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0806001.
- [5] 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.
- [6] Li C, Zhao J, Wang W, et al. 4×100 Gbit/s long-distance quasi-single-mode bi-directional transmission with few-mode fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0206001.
李超, 赵健, 王伟, 等. 4×100 Gbit/s 少模光纤长距离准单模双向传输的实验研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0206001.
- [7] Li G F, Liu X. Focus issue: space multiplexed optical transmission [J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16574-16575.
- [8] Salsi M. Challenges of few mode amplifiers [C]//OFC 2014, March 9-13, 2014, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: 1-3.
- [9] Zhao Q H, Zhang Z Z, Zhao N B, et al. Optimizing the erbium doped profile to equalize the modal gain in few mode erbium doped fiber amplifier [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 030602.
赵清华, 张振振, 赵宁波, 等. 优化光纤铒离子分布实现少模掺铒光纤放大器模式增益均衡 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 030602.
- [10] Bigot L, le Cocq G, Quiquempois Y, et al. Few-mode erbium-doped fiber amplifiers: a review [J].

- Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(3): 588-596.
- [11] Zhang Z Z, Zhao Q H, Zhao N B, et al. Gain equalization of few mode amplifiers using Er^{3+} -doped fibers designed with a refraction index trench [C] // Asia Communications and Photonics Conference 2015, November 19-23, 2015, Hong Kong, China. Washington, D.C.: OSA, 2015: ASu2A.53.
- [12] Akhtari S, Krummrich P M. Optical amplifier with rotationally symmetrical pump modes for enhanced mode multiplexing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(23): 2097-2100.
- [13] Liang S T, Yang J F, Xue B, et al. A new phase diversity wave-front error sensing method based on genetic algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1015-1019.
- 梁士通, 杨建峰, 薛彬, 等. 基于遗传算法的改进相位差法波前误差传感技术研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1015-1019.
- [14] Gaur A, Rastogi V. Modal gain equalization of 18 modes using a single-trench ring-core EDFA [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(9): 2211-2216.
- [15] 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.