

基于退火算法的四模掺铒光纤放大器设计

王宝源, 延凤平*, 任国斌, 郭浩, 高娇

北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044

摘要 基于 COMSOL 平台, 设计一种沟槽辅助下双层阶跃折射率结构的四模掺铒光纤。通过对铒离子能级结构、稳态方程和速率方程的理论研究, 利用 Matlab 软件搭建少模光纤放大器系统。利用模拟退火算法实现三层掺杂区域下的铒离子浓度的优化, 以确保所设计的四模掺铒光纤放大器的增益特性。仿真结果表明: 在纤芯泵浦方式下利用波长为 1480 nm 的泵浦光对 1550 nm 的四模式信号进行放大, 得到的各模式信号平均增益为 26.07 dB, 模间增益差 (DMG) 为 0.106 dB; 对所设计光纤进行折射率容差分析, 得到的平均增益为 26.08 dB, DMG 为 0.34 dB。结果证明了所设计的少模光纤放大器的稳定特性, 其具有广泛的发展前景和应用潜力。

关键词 空分复用; 少模光纤放大器; 模拟退火算法; 增益均衡

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231042

1 引言

随着现代通信技术的高速发展, 传统单模光纤的传输容量已经远远不能满足日益增长的通信需求, 各种复用技术应运而生^[1-6]。其中空分复用下的模分复用少模光纤因结构简单、制作容易而备受关注。信号在少模光纤中传输时存在功率损耗, 需要引入少模光纤放大器进行功率补偿, 提高各模式信号的增益^[7-9]。与此同时, 在放大过程中, 不同模式信号放大的程度不同, 导致存在模间增益差 (DMG), 大大增加后续信号处理的难度, 所以少模光纤放大器需在提高模式增益的同时降低 DMG, 以增强传输系统的稳定性和可靠性^[10-15]。少模光纤放大器的主要设计思路: 分析不同模式的模场分布, 通过调节掺杂离子的浓度和范围, 分别对不同的模式放大不同的倍率, 使之在最后达到增益平衡。模拟退火 (SA) 算法是一种迭代求解的随机寻优算法, 通过对初值施加扰动, 产生新解, 并且通过多次迭代取值, 找到全局最优解^[16]。在少模光纤放大器的设计中, SA 算法可以有效解决变量复杂难以手动调控的问题, 更好地优化少模光纤放大器的效果。

2021 年, 王文笙等^[17]利用遗传算法优化泵浦的模式组合和光纤掺杂结构, 四模式放大平均增益大于 24 dB, DMG 小于 0.5 dB。2023 年, Zhao 等^[18]利用分层掺杂的方法设计四模光纤放大器, 仿真实现了 0.28 dB 的 DMG, 增益超过 20 dB, 在考虑容差的情况下 DMG 最大达到 2.04 dB。2022 年, Xu 等^[19]利用粒

子群算法优化少模光纤放大器, 在放大 4 个模式的情况下, 可以实现 20 dB 以上的增益, DMG 进一步降低, 低于 0.15 dB。本文针对四模式复用信号, 设计了一种带沟槽的双层阶跃折射率少模掺铒光纤放大器 (FM-EDFA), 利用模拟退火算法对不同掺杂范围的三层铒离子浓度进行优化, 实现了各模式增益均大于 26 dB 且 DMG 为 0.106 dB 的放大特性。FM-EDFA 在光通信系统中具有广泛的应用前景。

2 方法基本原理

2.1 铒离子能级系统

FM-EDFA 的铒离子能级特性是一种三能级系统, 掺杂的铒离子开始处于基态, 能量低且稳定; 在吸收了泵浦光的能量之后, 跃迁到激发态, 此时能量高且不稳定, 所以大多数铒离子会在亚稳态能级汇集; 随着泵浦光不断进入, 即可实现从基态到亚稳态的粒子数反转, 此时当有信号光入射, 亚稳态的铒离子受激辐射, 会激发出与信号光子相干的光子, 实现对信号光的放大; 与此同时, 铒离子跃迁回基态, 等待再次受激吸收, 同时有一部分高能级铒离子产生自发辐射跃迁到基态, 生成的光子与信号光不相干, 产生放大自发辐射 (ASE) 噪声。

2.2 掺铒光纤放大器模型

通过对掺铒光纤放大器的理论研究, 可以将铒离子能级系统简化成只有基态和亚稳态的二能级系统。考虑到不同波长不同模式的信号光在纤芯各个位置处的功率填充因子不相同, 且实际工艺掺杂铒离子不均

收稿日期: 2023-05-25; 修回日期: 2023-08-12; 录用日期: 2023-08-28; 网络首发日期: 2023-09-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB2800900)、国家自然科学基金 (61827818)

通信作者: *fpyan@bjtu.edu.cn

匀,所以利用微分的思想将纤芯离散化为多个宽度极小的同心圆环,最后对各个圆环的功率进行累计求

和^[20]。铒离子稳态方程为

$$N_k(z) = N_{1k}(z) + N_{2k}(z), \quad (1)$$

$$\frac{N_{2k}(z)}{N_k(z)} = \left\{ \frac{\sum_{j=1}^{m_p} [P_{pj}^+(z) + P_{pj}^-(z)] \sigma_{ap} \Gamma_{pj} + \sum_{i=1}^{m_s} [P_{si}^+(z) + P_{si}^-(z)] \sigma_{asi} \Gamma_{sik}}{h\nu_p A_k} + \frac{\sum_{i=1}^{m_s} \sum_{m=1}^{m_{ASE}} [P_{ASEmi}^+(z) + P_{ASEmi}^-(z)] \sigma_{aASEmi} \Gamma_{ASEmik}}{h\nu_{ASEmi} A_k} \right\} / \left\{ \sum_{j=1}^{m_p} \frac{[P_{pj}^+(z) + P_{pj}^-(z)] (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) \Gamma_{pj}}{h\nu_p A_k} + \frac{1}{\tau} + \sum_{i=1}^{m_s} \frac{[P_{si}^+(z) + P_{si}^-(z)] (\sigma_{asi} + \sigma_{esi}) \Gamma_{sik}}{h\nu_{si} A_k} + \sum_{i=1}^{m_s} \sum_{m=1}^{m_{ASE}} \frac{[P_{ASEmi}^+(z) + P_{ASEmi}^-(z)] (\sigma_{aASEmi} + \sigma_{eASEmi}) \Gamma_{ASEmik}}{h\nu_{ASEmi} A_k} \right\} \quad (2)$$

泵浦光、信号光、ASE 噪声的速率方程分别为

$$\frac{dP_{pj}^\pm(z)}{dz} = \sum_k \Gamma_{pj} [(\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_{2k}(z) - \sigma_{ap} N_k(z)] P_{pj}^\pm(z) - \alpha_{pj} P_{pj}^\pm(z), \quad (3)$$

$$\frac{dP_{si}^\pm(z)}{dz} = \sum_k \Gamma_{sik} [(\sigma_{asi} + \sigma_{esi}) N_{2k}(z) - \sigma_{asi} N_k(z)] P_{si}^\pm(z) - \alpha_{si} P_{si}^\pm(z) - \sum_w d_w [P_{si}^\pm(z) - P_{stw}^\pm(z)], \quad (4)$$

$$\frac{dP_{ASEmi}^\pm(z)}{dz} = \sum_k \Gamma_{ASEmik} [(\sigma_{aASEmi} + \sigma_{eASEmi}) N_{2k}(z) - \sigma_{aASEmi} N_k(z)] P_{ASEmi}^\pm(z) - \alpha_{ASEmi} P_{ASEmi}^\pm(z) + 2h \sum_k \sigma_{ASEmik} N_{2k}(z) \Gamma_{ASEmik} \nu_{ASEmi} \Delta\nu_{ASEmi} \quad (5)$$

式(1)~(5)中参数的物理意义如表 1 所示。

表 1 公式的参数及意义

Table 1 Parameter and meaning of formulas

Parameter	Meaning	Parameter	Meaning
$N(z)$	Erbium ion doping concentration	σ_{ap}	Pump absorption cross section
$N_1(z)$	Erbium ion concentration in the upper level	σ_{ep}	Pump emission cross section
$N_2(z)$	Erbium ion concentration in the lower level	σ_{as}	Signal absorption cross section
$P_p^\pm(z)$	Forward and backward pump power	σ_{es}	Signal emission cross section
$P_s^\pm(z)$	Forward and backward signal power	σ_{aASE}	ASE noise absorption cross section
$P_{ASE}^\pm(z)$	Forward and backward ASE noise power	σ_{eASE}	ASE noise emission cross section
ν_p	Pump frequency	α_p	Pump loss coefficient
ν_s	Signal frequency	α_s	Signal loss coefficient
ν_{ASE}	ASE noise frequency	α_{ASE}	ASE noise loss coefficient
$\Delta\nu_{ASE}$	ASE noise bandwidth	h	Planck constant
Γ_p	Pump power fill factor	c	Velocity of light
Γ_s	Signal power fill factor	τ	Metastable level particle lifetime
Γ_{ASE}	ASE noise power fill factor	A	Optical fiber cross section area

速率方程中功率填充因子定义为

$$\Gamma(z)_{p/s/ASE} = \frac{I_{p/s/ASE}(r, \phi, z)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty I_{p/s/ASE}(r, \phi, z) dr d\phi}, \quad (6)$$

式中: $I_{p/s/ASE}(r, \phi, z)$ 为泵浦光、信号光或 ASE 噪声的光强分布函数。吸收截面和发射截面定义为

$$\sigma_{a/e}(\lambda) = \frac{\lambda_{a/e, peak}^4 I_{a/e}(\lambda)}{8\pi c n^2 \tau \int I_{a/e}(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

式中: $\lambda_{a/e, peak}$ 为吸收截面峰值或发射截面峰值对应的

波长; $I_{a/e}(\lambda)$ 为吸收或者荧光光谱。利用稳态方程求解光纤的铒离子分布,然后利用四阶 Runge-Kutta 的方法求解速率方程,得到泵浦光、信号光和 ASE 噪声的功率分布,从而构建 FM-EDFA 模型。

3 设计与优化

3.1 折射率和分层掺杂的设计

根据研究,首先确定有源光纤的折射率结构为纤芯处带沟槽的双层阶跃型光纤,双层指纤芯处折射率高于包层的两层折射率结构。为了实现四模式群组

信号(LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁、LP₀₂)的传输,利用 COMSOL 进行仿真。根据模场图,调节纤芯半径和折射率大小,光纤折射率分布和传输的四模式群组信号模场如图 1 所示,光纤半径与折射率参数如表 2 所示,沟槽宽度为 2 μm,包层半径为 62.5 μm。

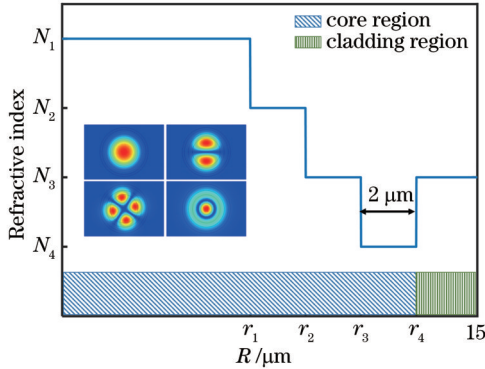


图 1 光纤径向折射率分布与模场分布示意图

Fig. 1 Radial refractive index distribution and mode field distribution of optical fiber

表 2 双层阶跃折射率光纤结构参数

Table 2 Structural parameter of double-layer step index fiber unit: μm

Parameter	Value	Parameter	Value
N_1	1.452	r_1	6.8
N_2	1.448	r_2	8.8
N_3	1.444	r_3	10.8
N_4	1.440	r_4	12.8

通过对 4 个模式模场能量分布的分析,利用 Matlab 对 FM-EDFA 进行建模,可以计算各个模式通过 FM-EDFA 的功率,据此调节铒离子掺杂范围和掺杂浓度。由于多个模式模场能量分布均有重叠,所以采用分层掺杂的方式,便于微调各个模式对应的增益。

考虑到实际有源光纤制作工艺的局限性,减小仿真结果与制作实物之间的误差,在设计过程中,尽量保证不同浓度的铒离子掺杂范围与折射率变化台阶对齐。三层掺杂范围分别是 0~1.9 μm、4~5.5 μm、6.8~8.8 μm,如图 2 阴影部分所示。

3.2 利用模拟退火算法进行优化

对于图 2 的三层掺杂方式,需要同时调节三层掺杂区域的浓度,以实现 4 个模式之间的增益均衡。为了在较短的光纤长度中使泵浦功率得到充分利用,同时避免出现光谱增宽导致信号失真、激光损伤等情况,铒离子的掺杂浓度不能过高。在有上下限的情况下寻找多个变量的最优解,模拟退火算法有着很广泛的应用。与其他优化算法相比,模拟退火算法在新解不满足目标条件的情况下,根据 Metropolis 准则接受新解,更容易跳出局部最优,从而找到全局最优解;与目前应用较多的遗传算法相比,模拟退火算法省略了对实际应用场景复杂的编码解码过程,在算法的实现方面更

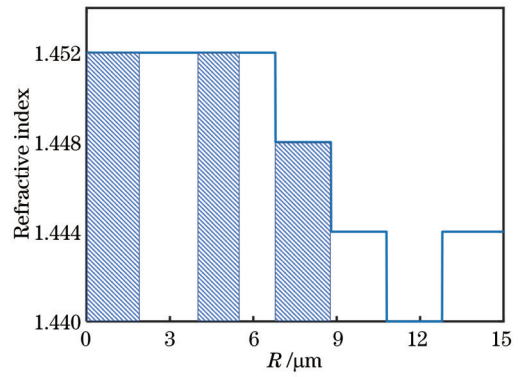


图 2 光纤中铒离子掺杂范围

Fig. 2 Radially doped range of erbium ions in optical fibers

加简洁明了。模拟退火算法的优化流程主要包括:设定初始解和目标函数,对解施加随机扰动,比较目标函数值,并根据一定概率选择是否接受新的解向量,不断降温使迭代次数达到设定值,输出最优解。

对于 FM-EDFA 的优化来说,优化流程如下:设定初始解向量为 $[\rho_1, \rho_2, \rho_3]$,分别代表三层掺杂范围的掺杂浓度,施加随机扰动产生新的掺杂浓度组合,计算泵浦功率耗尽处的 DMG;对 DMG 与当前最优解进行比较并取较低值,将较低值保存为当前最优解,并且不断循环此过程。随着迭代次数的增加,温度不断降低,直到迭代次数达到设定值,输出整个算法流程的最优解,流程如图 3 所示。

模拟退火算法优化过程中,设定初始温度 90 °C,

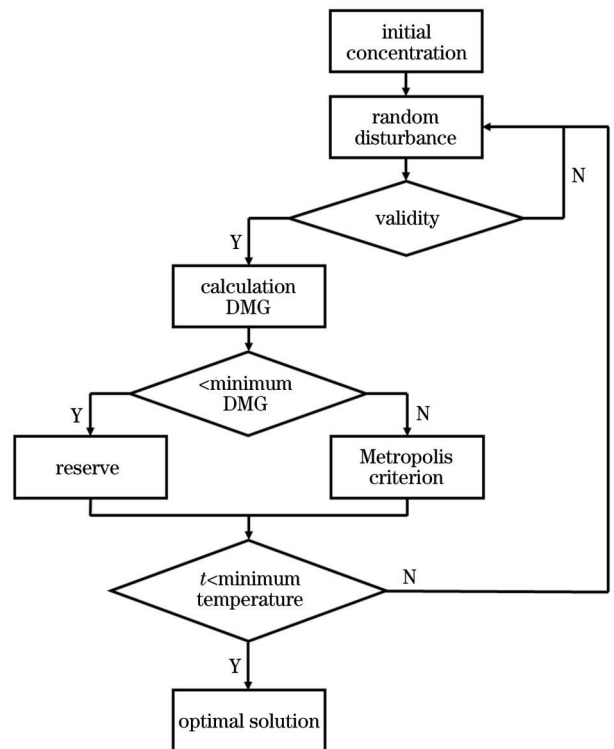


图 3 模拟退火算法优化 FM-EDFA 的流程

Fig. 3 Flow chart of FM-EDFA optimized by simulated annealing algorithm

降温系数 $a=0.99$, 最终温度为 $0.0039\text{ }^{\circ}\text{C}$, 迭代次数为 1000 次。初始掺杂浓度均为 9×10^{24} 。因为每次随机扰动对掺杂浓度的改变在规定范围内, 对信号增益的影响较小, 所以将目标函数设定为泵浦功率耗尽处的 DMG 即可。根据 Metropolis 准则, 接受概率设定为 $\exp(-df/T)$, 其中 df 为新解对应的 DMG 与当前解对应的 DMG 的差值, T 为当前温度。在新解不满足接受条件的情况下, 在 $(0, 1)$ 区间内生成随机数 rand , 若 rand 小于接受概率, 仍旧接受新解, 可以避免陷入局部最优。通过模拟退火算法, 可以更快而准确地寻找到极低的 DMG, 优化三层铷离子的掺杂浓度。

4 仿真与分析

FM-EDFA 所使用的光纤为带沟槽的双层阶跃折射率分布, 通过三层掺杂方式分别使用波长为 980 nm 和 1480 nm 的泵浦光进行放大。泵浦方式为纤芯前向泵浦, 泵浦功率为 200 mW; 四模式信号波长均为 1550 nm, 功率分别为 $P_{s1}=0.1\text{ mW}$ 、 $P_{s2}=0.1\text{ mW}$ 、

$P_{s3}=0.1\text{ mW}$ 、 $P_{s4}=0.1\text{ mW}$; 亚稳态能级粒子寿命 $\tau=10\text{ ms}$ 。利用模拟退火算法对掺杂浓度进行优化。

当泵浦波长为 980 nm 时, 得到优化后的四模式 FM-EDFA 的最佳铷离子掺杂结构为

$$N(r, \varphi) = \begin{cases} 5.3537 \times 10^{24}, & 0\ \mu\text{m} < r < 1.9\ \mu\text{m} \\ 5.5163 \times 10^{24}, & 4\ \mu\text{m} < r < 5.5\ \mu\text{m} \\ 12.2667 \times 10^{24}, & 6.8\ \mu\text{m} < r < 8.8\ \mu\text{m} \end{cases}, \quad (8)$$

当泵浦波长为 1480 nm 时, 得到优化后的四模式 FM-EDFA 的铷离子掺杂结构为

$$N(r, \varphi) = \begin{cases} 7.6045 \times 10^{24}, & 0\ \mu\text{m} < r < 1.9\ \mu\text{m} \\ 8.0255 \times 10^{24}, & 4\ \mu\text{m} < r < 5.5\ \mu\text{m} \\ 9.5473 \times 10^{24}, & 6.8\ \mu\text{m} < r < 8.8\ \mu\text{m} \end{cases}. \quad (9)$$

图 4 为泵浦波长分别为 980 nm 和 1480 nm 时, 泵浦功率随光纤长度的变化。可知: 当泵浦波长为 980 nm 时, 泵浦功率在光纤长度为 20 m 时得到充分利用; 当泵浦波长为 1480 nm 时, 泵浦功率在光纤长度为 15 m 时得到充分利用, 有效地缩短了有源光纤的长度。

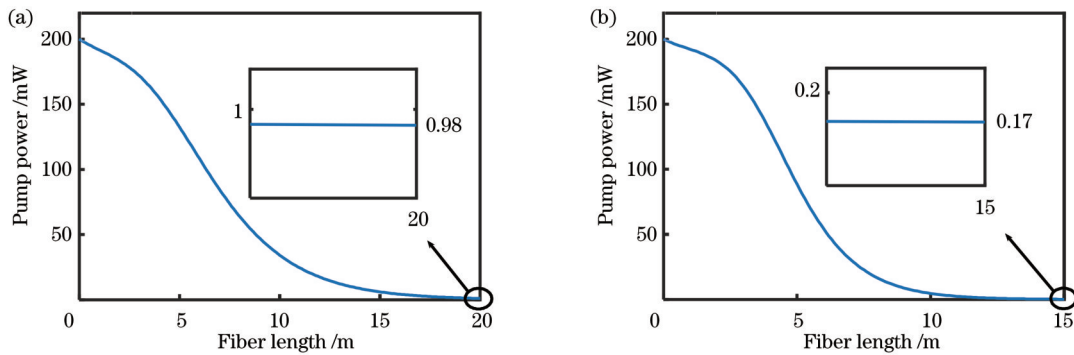


图 4 泵浦功率随光纤长度的变化。(a)980 nm 泵浦波长;(b)1480 nm 泵浦波长

Fig. 4 Pump power varing with fiber length. (a) 980-nm pump wavelength; (b) 1480-nm pump wavelength

图 5 为泵浦波长分别为 980 nm 和 1480 nm 时, FM-EDFA 的增益特性。从图 5(a) 可知, 利用 980 nm 波长的泵浦光进行放大时, 在光纤长度 20 m 处, 四模式信号平均增益为 24.65 dB, DMG 为 2.704 dB。从图 5(b) 可

知, 利用 1480 nm 波长的泵浦光进行放大时, 四模式信号平均增益为 26.12 dB, 在满足高增益的同时, DMG 为 0.106 dB, 具有更好的增益均衡效果。接下来利用 1480 nm 波长的泵浦光进行放大 FM-EDFA 分析。

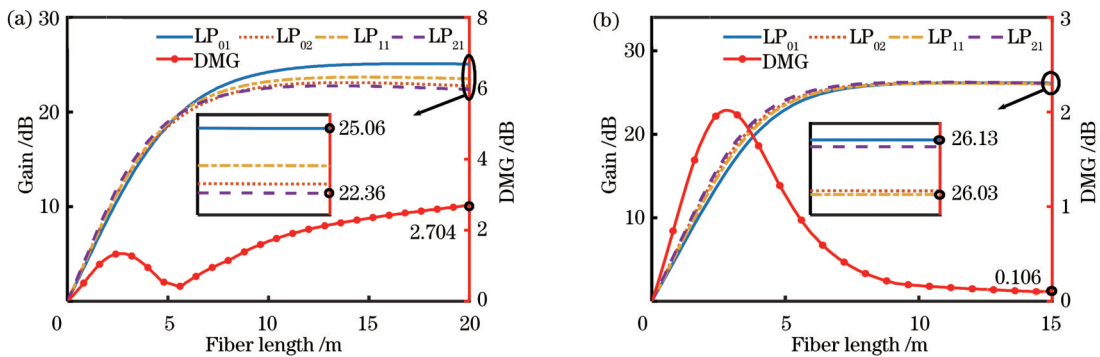


图 5 FM-EDFA 增益特性。(a)980 nm 泵浦波长;(b)1480 nm 泵浦波长

Fig. 5 FM-EDFA gain characteristics. (a) 980-nm pump wavelength; (b) 1480-nm pump wavelength

噪声系数(NF)反映了信号经过 FM-EDFA 之后的恶化程度,计算公式为

$$F_{NF} = 10 \log \frac{R_{SN, in}}{R_{SN, out}}, \quad (10)$$

式中: $R_{SN, in}$ 为输入信噪比, $R_{SN, out}$ 为输出信噪比。NF 越大,说明放大之后信号噪声占比越大,信号恶化程度越大;反之,NF 越小,表明放大之后信号质量越好。使用 1480 nm 波长的泵浦光时,FM-EDFA 的 NF 如图 6 所示。四模式信号的 NF 最大值为 3.71 dB,表明该结构的 FM-EDFA 具有较为优良的噪声特性。

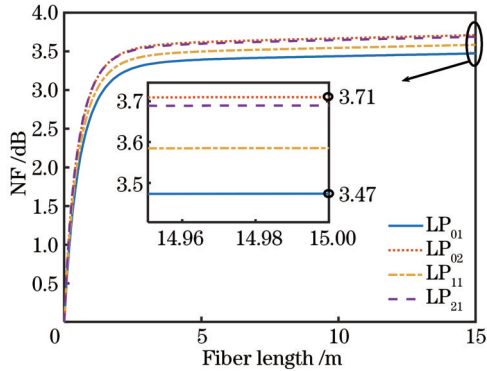


图 6 噪声系数随光纤长度的变化

Fig. 6 Noise figure varying with fiber length

使用波长为 1480 nm 的泵浦光进行放大,设置泵浦功率为 200 mW。改变信号光的波长,对 FM-EDFA 在 C 波段的增益特性进行研究,波长变化步长为 5 nm,结果如图 7 所示。由图 7 可知:在 C 波段,平均增益最大值为 26.10 dB,最小值为 25.96 dB,变化幅度控制在 0.14 dB 以内,表明四模式信号的平均增益随波长的变化较小,在全波段增益均大于 25.90 dB,表明具有较好的放大效果;在 C 波段,DMG 最大值为 1.29 dB,最小值为 0.106 dB,变化幅度控制在 1.19 dB 以内,表明放大四模式信号的 DMG 随波长的变化较小,并且在全波段,DMG 均小于 1.3 dB,表明具有较好的增益均衡效果。通过分析信号在 C 波段的

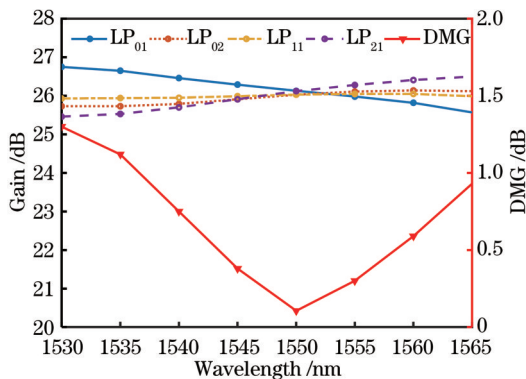


图 7 信号增益特性随信号波长的变化

Fig. 7 Variation of signal gain characteristics with signal wavelength

增益特性,可以得出 FM-EDFA 在整个波段的增益较为平稳,均可实现 25.90 dB 以上的放大效果,且 DMG 最大值不超过 1.3 dB,可以实现较好的增益均衡效果。

在 FM-EDFA 中,泵浦光起到的作用是使铒离子从基态跃迁到高能级,实现粒子数反转,改变泵浦光功率大小,对四模式信号放大和增益均衡效果有一定的影响。使用波长为 1480 nm 的泵浦光进行放大,设置信号光波长为 1550 nm,调节泵浦光功率,范围为 0.1~1 W,步长为 0.1 W,信号增益特性如图 8 所示。通过图 8 可知:随着泵浦功率的增大,四模式信号的平均增益不断增大,当泵浦功率大于 0.3 W 之后,上升趋势较为缓慢,因为铒离子的浓度没有变化,泵浦功率的增大对跃迁到高能级的粒子数的影响较小;当泵浦功率为 0.2 W 时,DMG 最低,这是因为利用模拟退火算法优化时,设定的泵浦功率为 0.2 W,所以此时增益均衡效果最好;泵浦功率为 0.1~1 W 时,最大 DMG 为 1.99 dB,始终保持在 2 dB 以下,具有较好的稳定性。

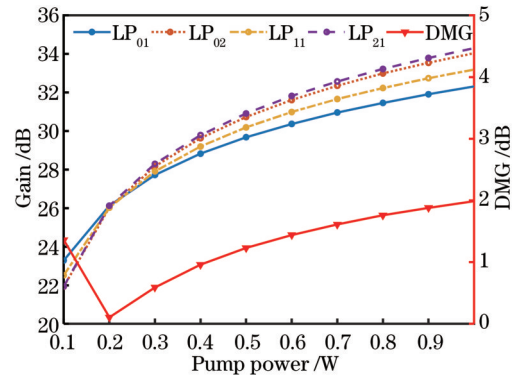


图 8 信号增益特性随泵浦功率的变化

Fig. 8 Variation of signal gain characteristics with pump power

考虑到有源光纤的实际制作工艺会产生误差,主要体现在沉积时掺杂离子的浓度是不均匀的,这就导致光纤折射率突变时呈渐变型,而且掺杂平台也不是水平形状,而是存在渐变的斜度,通过仿真这种情况下的 FM-EDFA,得到贴近实际制作状态的 FM-EDFA 增益特性。折射率分布与增益特性如图 9 所示。如图 9(a)所示,在折射率改变处为渐变型时,掺杂平台也呈渐变倾斜状,在这情况下模拟实际工艺制作的误差,容差后的光纤放大器增益特性如图 9(b)所示。在考虑制作误差的情况下,平均增益为 26.08 dB,最低增益大于 25.9 dB,DMG 为 0.34 dB。所设计 FM-EDFA 可以很好地实现对四模式信号的放大,具有良好的增益均衡效果,且此光纤结构稳定性较好。

5 结 论

为了对四模式复用信号进行有效的放大和增益均衡,设计了一种带沟槽的双层阶跃折射率少模掺铒光

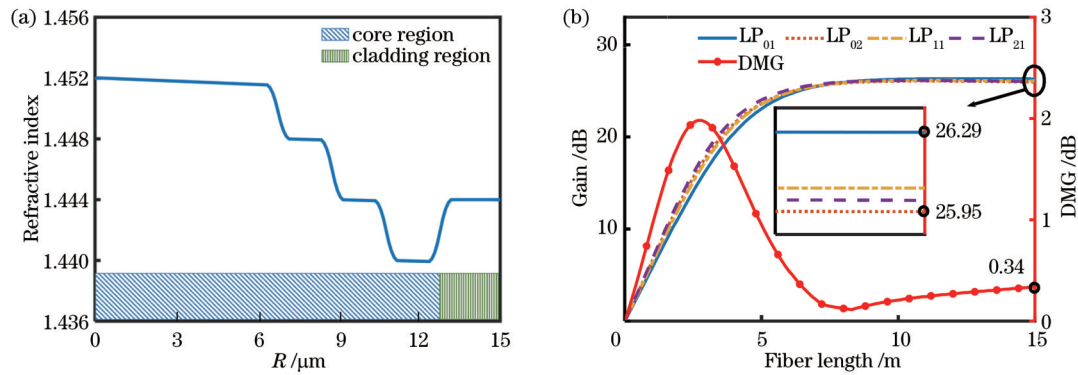


图 9 考虑 FM-EDFA 制作误差的折射率分布和增益特性。(a) 光纤纤芯径向折射率分布; (b) FM-EDFA 增益特性

Fig. 9 Refractive index distribution and gain characteristics of FM-EDFA fabrication errors are considered. (a) Radial refractive index distribution of fiber core; (b) gain characteristics of FM-EDFA

纤放大器。通过分析模场设计铒离子掺杂范围,利用模拟退火算法对不同掺杂范围的三层铒离子浓度进行优化。通过仿真分析可知:1480 nm 的泵浦光较 980 nm 而言能实现更好的增益均衡效果,且能缩短有源光纤的长度;在泵浦光波长为 1480 nm 的情况下,实现四模式复用信号平均增益大于 26 dB,DMG 为 0.106 dB,噪声系数最大为 3.71 dB;在 C 波段上,四个模式均可实现 25.90 dB 以上的放大特性,DMG 最大值为 1.29 dB。考虑到泵浦功率的影响,当泵浦功率在 0.1 W 到 1 W 范围内改变时,DMG 始终保持在 2 dB 以下。容差分析得到的增益在 25.9 dB 以上,DMG 为 0.34 dB。结果证明所设计的 FM-EDFA 具有良好的稳定特性。

参 考 文 献

- [1] Sillard P. Next-generation fibers for space-division-multiplexed transmissions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(5): 1092-1099.
- [2] Puttnam B J, Rademacher G, Luis R S. Space-division multiplexing for optical fiber communications[J]. *Optica*, 2021, 8(9): 1186-1203.
- [3] 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.
- [4] Du J B, Shen W H, Liu J C, et al. Mode division multiplexing: from photonic integration to optical fiber transmission[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(9): 091301.
- [5] Sabitu R I, Khan N G, Malekmohammadi A. Recent progress in optical devices for mode division multiplex transmission system[J]. *Opto-Electronics Review*, 2019, 27(3): 252-267.
- [6] 余哲, 徐祖应, 付松年. 空分复用传输用掺铒光纤研究进展[J]. *邮电设计技术*, 2018(6): 77-82.
Yu Z, Xu Z Y, Fu S N. Review of erbium-doped fiber for space-division multiplexing transmission[J]. *Designing Techniques of Posts and Telecommunications*, 2018(6): 77-82.
- [7] 赵新月, 邱强, 褚应波, 等. 少模掺铒光纤及其放大器研究进展[J]. *发光学报*, 2022, 43(12): 1915-1927.
Zhao X Y, Qiu Q, Chu Y B, et al. Research progress of few-mode erbium-doped fiber and its amplifier[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, 43(12): 1915-1927.
- [8] Qiu Q, Gu Z M, He L, et al. High power-efficiency, low DMG cladding-pumped few-mode Er/Yb/P co-doped fiber amplifier for mode division multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(22): 7421-7430.
- [9] Rademacher G, Luis R S, Puttnam B J, et al. A comparative study of few-mode fiber and coupled-core multi-core fiber transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(6): 1590-1596.
- [10] 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.
- [11] 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. Study on differential mode gain tunability of fiber-type few-mode erbium-doped fiber amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(15): 1506004.
- [12] 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.
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.
- [13] 许焰, 武保剑, 江歆睿, 等. 少模掺铒光纤放大器的等效掺铒浓度仿真方法研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(5): 0501003.
Xu Y, Wu B J, Jiang X R, et al. Research on simulation method for FM-EDFAs by effective erbium doping concentration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(5): 0501003.
- [14] 赵新月, 邱强, 姜阳, 等. 高增益、低 DMG 少模掺铒光纤及其放大性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(9): 221336.
Zhao X Y, Qiu Q, Lou Y, et al. Study on few-mode erbium-doped fiber with high gain, low DMG and its amplification performance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(9): 221336.
- [15] Anwar N M, El-Sahn Z A, El-Badawy E S A, et al. A few mode EDFA with different pumping schemes: performance evaluation[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(2): 109.
- [16] 何庆, 吴意乐, 徐同伟. 改进遗传模拟退火算法在 TSP 优化中的应用[J]. *控制与决策*, 2018, 33(2): 219-225.
He Q, Wu Y L, Xu T W. Application of improved genetic simulated annealing algorithm in TSP optimization[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(2): 219-225.
- [17] 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.
- [18] Zhao Q, Pei L, Tang J J, et al. Design of few-mode erbium-doped fiber with a low differential modal gain and weak coupling based on layered doping[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(6): 1567-1574.
- [19] Xu W X, Pei L, Wang J S, et al. Gain equalization of few-mode fiber amplifier based on particle swarm optimization[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12478: 1247825.
- [20] 李德伟. 少模光纤放大器的增益及噪声特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 29-35.
- Li D W. Study on gain and noise characteristics of few-mode fiber amplifier[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 29-35.

Design of Four-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier Based on Annealing Algorithm

Wang Baoyuan, Yan Fengping*, Ren Guobin, Guo Hao, Gao Jiao

School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract

Objective With the rapid development of modern communication technology, the transmission capacity of conventional single-mode optical fibers cannot meet growing communication needs, thus leading to the development of various multiplexing technologies. Among them, mode-division multiplexing of few-mode fibers based on space-division multiplexing has attracted much attention because of its simple structure and easy fabrication. The signal-transmission process in the few-mode fiber suffers from power loss, which must be compensated for introducing an amplifier to increase the gain of each mode signal. In addition, amplification involves amplifying the signals of different modes to different degrees, resulting in inter-mode gain differences, which greatly increases the difficulty of subsequent signal processing. Therefore, the few-mode fiber amplifier must reduce the differential modal gain (DMG) while increasing the mode gain to enhance the stability and reliability of the transmission system.

Methods A four-mode erbium-doped fiber with a double-layer step-index structure assisted by trenches was designed based on the COMSOL platform. Based on theoretical research on the energy-level structure of erbium ions as well as the steady-state and rate equations, a few-mode fiber amplifier system is built using Matlab software. The simulated-annealing algorithm realizes the optimization of the erbium ions concentration under the three-layer-doped region to ensure the gain characteristics of the designed four-mode erbium-doped fiber amplifier. The gain and gain equalization effect of pump light with wavelengths of 980 nm and 1480 nm on the FM-EDFA were compared, and the 1480-nm pump light with better amplification characteristics was selected for subsequent analysis. The stability of the designed FM-EDFA was analyzed based on four aspects, including the simulation of the noise figure of the FM-EDFA. In addition, the gain characteristics of the FM-EDFA in the C-band are studied based on the varying wavelengths of the signal light. A 1480-nm pump light was used for amplification, the signal wavelength was set to 1550 nm, the pump-light power was adjusted, and the influence of the pump-light power on the gain characteristics was analyzed. By considering the errors produced in the actual production process, the FM-EDFA is simulated to obtain gain characteristics that are close to those of the actual production state.

Results and Discussions When a pump light with wavelength of 980 nm is used for amplification, the average gain of the four-mode signal is 24.65 dB and DMG is 2.704 dB. When a pump light with a wavelength of 1480 nm is used for amplification, the average gain of the four-mode signal is 26.12 dB. Moreover, while satisfying the high gain, the DMG is 0.106 dB, indicating a better gain balance effect. When using pump light with a wavelength of 1480 nm, the maximum noise figure of the four-mode signals is 3.71 dB. These results demonstrate that the FM-EDFA with this structure has relatively good noise characteristics. The analysis of the gain characteristics of the signal in the C-band shows that the gain of the FM-EDFA in the entire band is relatively stable and can achieve an amplification effect of more than 25.90 dB. Moreover, the DMG does not exceed 1.3 dB, which can achieve a gain equalization effect. When the pump power was changed in the range of 0.1 W and 1 W, the maximum DMG is 1.99 dB, which is always maintained below 2 dB, proving that the FM-EDFA has a good stability. Considering the production error, the average gain is 26.08 dB, the lowest gain is greater than 25.9 dB, and the DMG is 0.34 dB.

Conclusions To effectively amplify and gain equalization of the four-mode multiplexed signal, a double-layer step-index few-mode erbium-doped fiber amplifier with a trench is designed. The doping range of erbium ions is designed by analyzing the mode field, and the concentration of the three layers of erbium ions in different doping ranges is optimized using a

simulated annealing algorithm. The simulation analysis shows that the 1480-nm pump light can achieve a better gain equalization effect than that of 980 nm and can shorten the length of the active optical fiber. For the pump light with 1480-nm wavelength, the average gain of the four-mode multiplexing signal is greater than 26 dB, DMG is 0.106 dB, and the maximum noise is 3.71 dB. In the C-band, all four modes can achieve amplification characteristics above 25.90 dB, and the maximum value of the DMG is 1.29 dB. Considering the influence of the pump power, the DMG is always maintained below 2 dB when the pump power was changed within 0.1 W and 1 W. The gain obtained by the tolerance analysis is above 25.9 dB, and the DMG is 0.34 dB. Thus, this study proves that the designed FM-EDFA exhibits good stability characteristics.

Key words space-division multiplexing; few-mode fiber amplifier; simulated-annealing algorithm; gain equalization