

基于级联结构的四线偏振模掺铒光纤放大器设计

秦祖军^{1,2,3} 袁明^{1,3} 张文涛^{1,3} 叶松^{1,3} 熊显名^{1,3}

¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

²广西信息科学实验中心, 广西 桂林 541004

³广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 阶梯式掺杂和多环式掺杂设计的掺铒光纤(EDFs)结构复杂,采用改进化学气相沉积法(MCVD)制备困难。为此,将两段铒离子分别为中心掺杂和环形掺杂的掺铒光纤级联构成四线偏振模信号光放大器。该结构放大器使中心模式信号光(LP₀₁模和LP₀₂模)和离心模式信号光(LP₁₁模和LP₂₁模)分别在中心掺杂铒光纤和环形掺杂铒光纤中获得主要增益。基于一种改进遗传算法(GA),对该放大器两段掺铒光纤的长度和铒离子掺杂半径进行优化。结果显示,仅用270 mW LP₁₁模抽运光对该级联结构放大器进行抽运,四线偏振模信号光可获得20 dB的平均增益,且模式相关增益(DMG)不超过3.5 dB。

关键词 光纤光学;级联结构;模式增益均衡;掺铒光纤放大器

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.010605

Design of Cascaded Erbium-Doped Fiber Amplifier Supporting Four Linearly Polarized Modes

Qin Zujun^{1,2,3} Yuan Ming^{1,3} Zhang Wentao^{1,3} Ye Song^{1,3} Xiong Xianming^{1,3}

¹School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology University, Guilin, Guangxi 541004, China

²Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin, Guangxi 541004, China

³Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract Erbium-doped fibers(EDFs) with multi-step or multi-annular and multi-level doping profiles are difficult to be fabricated by modified chemical vapor deposition (MCVD). A cascaded amplifier, based on two EDFs with a central doping profile and an annular doping profile, is proposed to equalize modal gain among four linearly polarized modes. In the amplifier, the centered- and off-centered modes are mainly amplified in the central- and annular-doped EDFs, respectively. An improved genetic algorithm (GA) is employed to optimize the optimal fiber length and doping radius in each EDF. Results show that an average modal gain around 20 dB with differential modal gain (DMG) between signal modes being less than 3.5 dB is achieved for a pure LP₁₁ pump beam.

Key words fiber optics; cascaded configuration; modal gain equalization; erbium-doped fiber amplifier

OCIS codes 230.2285; 060.2320; 230.4480; 060.4230

1 引言

近年来随着波分复用、偏分复用等复用方案融合信号多维多阶高级调制格式和相干检测手段的应用,单模光纤通信传输容量得到极大增加;然而,受到光纤固有的非线性与放大器自发辐射等限制,其容量逼近香农极限^[1]。为满足未来大容量通信需求,尚未被利用的光纤空间自由度成为当前新的关注焦点^[2-6]。基于少模光纤(FMF)模式维度的模分复用(MDM)是当前被广泛关注拟突破光纤香农极限的重要研究方向之

收稿日期: 2015-06-20; 收到修改稿日期: 2015-07-15; 网络出版日期: 2015-12-16

基金项目: 广西自然科学基金(2013GXNSFB019269, 2014GXNSFAA118389, 2013GXNSFDA019002, 2014GXNSFGA118003)、广西信息科学实验中心、广西自动检测技术与仪器重点实验室资助项目

作者简介: 秦祖军(1978—),男,博士,副教授,主要从事非线性光纤光学、光纤传感和光纤通信等方面的研究。

E-mail: qinzj@guet.edu.cn

一。模式是光纤波导固有电磁共振属性的表征,模式与模式之间满足彼此正交。依据信息理论,FMF中每一个模式都可作为一个独立的传输信道;若模式的非线性、噪声等传输特性与单模光纤可比拟,则MDM容量与模式复用数量成正比。当前大容量MDM传输实验复用模式最多的为FMF前4个线偏振模(4LP-MDM)(即基模 LP_{01} 、高阶模 LP_{11} 、 LP_{21} 和 LP_{02} 模),它相比2LP-MDM有效提高了传输容量。2013年,美国贝尔实验室报道的4LP-MDM实现了高达32 bit/(s·Hz)的频谱传输效率^[7]。该实验采用多个普通单模掺铒光纤放大器放大不同模式的信号光,由于不同模式空间场分布的差异性及其产生的模式相关增益限制,该系统最大传输距离仅为177 km。因此,高性能的在线少模掺铒光纤放大器(MEDFA)是实现MDM远距离传输、影响MDM系统性能提升和实用化的重要光子器件之一^[8-18]。其中,MEDFA性能的重要指标之一是模式差分增益(DMG,即不同模式信号光增益的最大差值)的控制。DMG的主要影响因素包括抽运光模场特征、信号光模场特征、掺铒光纤铒粒子横截面分布等;传统DMG控制途径包括:控制抽运光的模式组分、优化掺铒光纤横截面铒粒子分布、采用包层抽运技术等^[10-19]。由于4LP-MEDFA复用模式数目多,模式相关增益效应明显,实现模式增益均衡较困难。近三年来,国际上也提出了多种控制DMG的设计方案。2014年,南安普敦大学学者基于 LP_{21} 模双向抽运结合定制的复杂掺铒光纤将4LP-MEDFA的DMG降低至2 dB左右^[15]。目前,国际上报道的诸多4LP-MEDFA的DMG优化控制采用复杂铒粒子掺杂的掺杂光纤^[9,13,16-17](如铒光纤横截面铒离子阶梯式掺杂和多环式掺杂)或采用高阶抽运模式(如 LP_{41} 模)^[9,15],虽然理论上可将MEDFA的DMG降低至1 dB以下,然而也存在不足之处:1)铒离子阶梯式和多环式掺杂设计的掺铒光纤采用改进化学气相沉积法(MCVD)制备极为困难^[10];2)高阶抽运模式的产生与控制困难,传输过程不稳定。

为此,详细研究少模光纤4个LP模空间模场特征,设计了基于两段具有简单铒离子分布的掺铒光纤级联构成的4LP-MEDFA;根据少模光纤功率传输方程和速率方程,采用改进的遗传算法(GA)优化设计了两段掺铒光纤的长度和铒离子掺杂半径,使4个LP模式的平均增益达20 dB、DMG小于3.5 dB。

2 4LP-MEDFA结构与理论模型

2.1 4LP-MEDFA结构设计

4个LP模信号光,根据纤芯横截面内能量分布特征可分为2类:中心模式(即 LP_{01} 模和 LP_{02} 模)和离心模式(即 LP_{11} 模和 LP_{21} 模);前者通过纤芯铒离子中心掺杂实现放大,而后者放大则需纤芯铒粒子环形掺杂。目前报道大多数4LP-MEDFA模式增益均衡依据该思想设计,掺铒光纤纤芯横截面内铒粒子掺杂通常采取阶梯式和多环式。如上所述,此类光纤基于MCVD制备极为困难。

为简化掺杂光纤的制造工艺,同时能有效控制4LP-MEDFA中2类具有不同模场特征信号光的DMG,设计如图1所示的四模在线掺铒光纤放大器。该放大器由2段简单掺杂的掺铒光纤(EDF₁和EDF₂)级联而成:铒粒子中心掺杂的EDF₁主要放大中心模式信号光(掺杂外径为 r_1);铒粒子环形掺杂的EDF₂主要放大离心模式(其掺杂内径为 r_2 ,纤芯半径为 a);EDF₁和EDF₂铒粒子掺杂浓度相同。考虑到当前成熟的光纤制备工艺,在以下分析中假设EDF₁和EDF₂的结构尺寸和折射率分布差异不影响两者连接后的模场特征。除了掺铒光纤横截面内铒离子的分布外,抽运光模式设计是控制4LP-MEDFA模式增益的另一关键要素。抽运光模式的设计原则为:模式个数尽可能少和模式阶数尽可能低,并能使4个LP模信号光的DMG控制在指定范围内。依据该原则,经若干次理论仿真后可确定 LP_{11} 模抽运光满足设计要求。抽运光模式与待放大4个LP模信号光经双色分光镜模式复用后由EDF₁注入,信号光放大后由EDF₂输出。事实上,基于EDF₂与EDF₁级联结构的MEDFA也满足设计要求,这里以前者(EDF₁+EDF₂)为对象进行重点分析与研究。

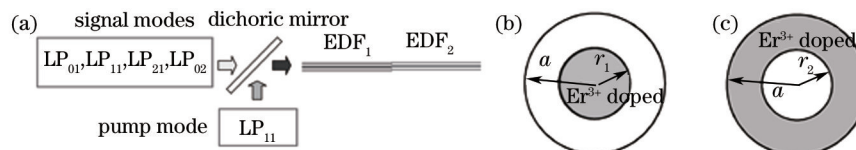


图1 四线偏振模掺铒光纤放大器。(a) 系统结构;(b) 中心掺杂铒光纤截面;(c) 环形掺杂铒光纤截面

Fig.1 Schematic of an erbium-doped fiber amplifier supporting four linearly polarized modes. (a) System configuration; (b) cross-section of the central-doped Erbium fiber; (c) cross-section of the annular-doped erbium fiber

2.2 数值分析模型

在少模掺铒光纤中,抽运光和信号光间的相互作用由功率传输方程模型表示。假定铒粒子为二能级结构,光波在铒光纤传输过程中模场分布保持不变,并忽略不同模式间的线性交叉耦合,则第 k 个模式信号光功率 p_s^k 、第 l 个模式抽运光功率 p_p^l 和第 k 个模式信号光中自发辐射(ASE)噪声功率 p_{ASE}^k 随光纤位置 z 的演化由以下耦合微分方程表示为^[9]

$$u_k \frac{dp_s^k(z)}{dz} = p_s^k(z) \int_0^{2\pi} \int_0^a [\sigma_e^s n_2(r, \varphi, z) - \sigma_a^s n_1(r, \varphi, z)] |\phi_s^k(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi - \alpha_s p_s^k(z), \quad (1)$$

$$u_l \frac{dp_p^l(z)}{dz} = -p_p^l(z) \int_0^{2\pi} \int_0^a \sigma_a^p n_1(r, \varphi, z) |\phi_p^l(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi - \alpha_p p_p^l(z), \quad (2)$$

$$u_k \frac{dp_{\text{ASE}}^k(z)}{dz} = p_{\text{ASE}}^k(z) \int_0^{2\pi} \int_0^a [\sigma_e^s n_2(r, \varphi, z) - \sigma_a^s n_1(r, \varphi, z)] |\phi_s^k(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi - \alpha_s p_{\text{ASE}}^k(z) + \int_0^{2\pi} \int_0^a 2h\nu_s \Delta\nu \sigma_e^s n_2(r, \varphi, z) |\phi_s^k(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi, \quad (3)$$

式中 $|\phi_s^k(r, \varphi)|^2$ 和 $|\phi_p^l(r, \varphi)|^2$ 分别表示第 k 个模式信号光和第 l 个模式抽运光的归一化强度分布; σ_e^s 和 σ_a^s 分别表示铒粒子在信号光波长处的发射截面和吸收截面, σ_e^p 和 σ_a^p 分别表示铒粒子在抽运光波长处的发射截面和吸收截面; α 表示光波的背景吸收损耗(通常铒光纤长度为数米量级,其影响可忽略); u_k 表示光波 k 的传输方向($u_k=1$ 表示正向传输, $u_k=-1$ 表示反向传输,这里考虑抽运光和信号光同向传输情况);其中(3)式第2项表示ASE噪声。

掺铒光纤中铒粒子下能级和上能级粒子数分别为 $n_1(r, \varphi, z)$ 和 $n_2(r, \varphi, z)$,它们与抽运光和信号光模场分布密切相关。由光纤中的电磁理论可知,中心模式信号光场分布具有旋转对称特征,与方位角无关;离心模式信号光由具有不同传播常数的矢量模构成(如 LP_{11} 模由 TM_{01} 、 TE_{01} 和 HE_{21} 模构成; LP_{21} 模由 EH_{11} 模和 HE_{31} 模构成),其场分布与其方位角密切关联。离心模式信号光在注入图1所示的4LP-MEDFA之前,通常要经上百千米少模光纤传输,由于组成相应模式信号光的矢量模传播常数的差异性,其模场会不断演化。因此,将离心模式信号光(即 LP_{11} 模和 LP_{21} 模)近似成是其相等强度的空间简并模式的线性叠加,即: $\text{LP}_{u1}=0.5(\text{LP}_{u1,o}+\text{LP}_{u1,e})$ (其中 $u=1,2$;o和e分别表示对应离心LP模的2个空间简并分量),如图2所示。抽运光 LP_{11} 模在仅为数米量级掺铒光纤中传播,场分布可认为几乎不变。在以下研究中均采用线偏振模模场表征信号光和抽运光。

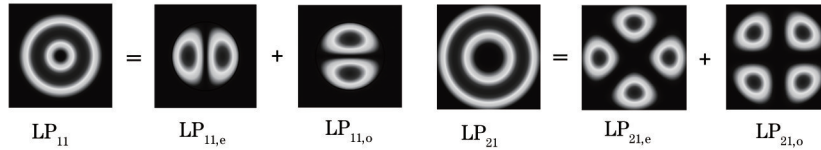


图2 离心模式信号光的空间模场分布

Fig.2 Modal transverse intensity patterns for the off-centered modes

2.3 数值算法设计

设计的4LP-MEDFA采取2段简单掺杂光纤级联以简化掺铒光纤制备。要使该放大器获得期望的平均模式增益和DMG,需对如下5个参数进行优化,包括:EDF₁和EDF₂长度(L_1 和 L_2)、纤芯铒粒子掺杂半径(r_1 和 r_2)和 LP_{11} 模抽运功率等。考虑到遗传算法(GA)具有很强的全局搜索能力,采用GA对上述5个参数实施优化设计。GA根据设定的目标函数对种群中的每个个体进行评价,模仿自然界适者生存、优胜劣汰的进化原则,最终得到最优个体。设4LP-MEDFA的目标平均增益为 \bar{G} ,GA个体数据结构为 $U=[L_1, L_2, r_1, r_2, p_{11}^p(0)]$,其中 $p_{11}^p(0)$ 表示EDF₁端注入的 LP_{11} 模抽运光功率,由个体 U 经数值模型(1)~(3)式计算后获得的4个LP信号光的模式增益为 $G(U)=[G_{01}, G_{11}, G_{21}, G_{02}]^T$,则GA评价个体优劣的目标函数定义为

$$y(U) = 0.5 \|G(U) - \bar{G}\| + \|\Delta G\| / \sqrt{6}, \quad (4)$$

式中, $\Delta G = [|G_{01} - G_{11}|, |G_{01} - G_{21}|, |G_{01} - G_{02}|, |G_{11} - G_{21}|, |G_{11} - G_{02}|, |G_{21} - G_{02}|]^T$, G_{ij} 表示 LP_{ij} 模信号光的增益,通过标准四阶龙格-库塔法对差分方程组(1)~(3)式进行积分获得。(4)式目标函数包含了2项,第1项表示模式增益对目标增益的偏离程度;第2项表示LP模式间的两两增益差,其最大值即为4LP-MEDFA的DMG。当目标函数(4)式小于指定误差容限 ε 时,则GA满足收敛性条件,此时对应的个体为最优个体。需注意的是,尽

管 GA 全局搜索优势明显,但其种群在任意指定范围内随机产生,使其收敛速度较慢且易早熟^[20]。为此,需对传统 GA 进行改进以使之适用于 4LP-MEDFA 的参数优化设计。改进 GA 具体操作步骤如下:

1) 指定 GA 搜索范围,产生具有 N 个个体的随机种群 U 。该范围应包含最优解,能使目标函数最小值小于指定的 ε 。

2) 根据(4)式实施种群个体评估,并依此进行选择、交叉和变异等传统 GA 运算;在遗传算子中,采取最优保存策略。这一步可称为主遗传算法。

3) 从评估后的种群中择优选择出一定比例的、适应度较高的优良个体 M 。

4) 对择优挑选的每个个体压缩搜索范围,产生以该个体元素值为搜索中心的 N 个新个体组成的新种群 \tilde{U} ,并进行一定遗传代数的选择、交叉和变异等传统迭代运算(以 10~15 代为宜),这一步可称为子遗传算法。判断迭代后有无个体满足 $y(\tilde{U}) < \varepsilon$, $y(\tilde{U}) < \varepsilon$;若无,则保存该个体及其目标函数值之后强制使择优挑选出的对应个体目标函数赋以一个较大值,增加其在后续主遗传算法迭代中被淘汰的概率;若种群 \tilde{U} 中存在个体满足该条件,则退出并输出对应个体,否则返回步骤 2)。

由上可知,改进 GA 相比传统 GA 增加了步骤 3) 和步骤 4)。经数值实验证明,改进 GA 一定程度加速了计算过程的收敛,同时改善了种群多样性。

3 结果分析与讨论

采用上述算法分析图 1 所示 4LP-MEDFA,其中信号光和抽运光波长分别为 1550 nm 和 980 nm。设 EDF₁ 和 EDF₂ 纤芯直径 $2a$ 均为 18.7 μm ,数值孔径为 0.11,则信号光归一化频率 V 为 4.17。弱导条件下,可以传播的信号光线偏振模包括 LP₀₁ 模、LP₁₁ 模、LP₂₁ 模和 LP₀₂ 模。铒离子掺杂区的浓度为 $15 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$,铒离子在信号光波长位置处的发射截面和吸收截面分别为: $\sigma_e^* = 3.667 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_a^* = 2.46 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,在抽运光波长位置处的发射截面和吸收截面分别为: $\sigma_e^p = 0$, $\sigma_a^p = 1.879 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 。每个模式光信号注入的功率为 -13 dBm(4 个 LP 模共计约 -7 dBm)。遗传算法种群规模 N 为 50,为加速收敛而挑选出的、压缩搜索范围的优良个体数 $M = 10\% \times N$;4 个 LP 模信号光的平均目标增益 \bar{G} 设为 20 dB,DMG 不超过 3.5 dB^[12]。经过若干代数的 GA 搜索,可获得满足设定要求的优化个体 U_{opt} ,其中:EDF₁ 的长度 L_1 为 6.1 m,铒离子掺杂外径为 r_1 为 $0.29a$ (具体参考图 1 所示);EDF₂ 的长度 L_2 为 4.8 m,铒离子环形掺杂的内径 r_2 为 $0.77a$;LP₁₁ 模抽运功率为 270.1 W。

为清晰地把握掺铒光纤中的信号光的模式增益特性,图 2 给出了上述指定优化参数下信号光模式增益与掺铒光纤长度的关系(图中竖直虚线左侧表示 EDF₁ 中的模式增益,右侧表示 EDF₂ 中的模式增益)。由图 2 可知其与上述根据光波模场分布所预测的结果基本一致,中心模式信号光在 EDF₁ 中得到主要放大,离心模式信号光在 EDF₂ 中增益斜率远大于中心模式。最终在放大器 EDF₂ 的输出端,获得约 20 dB 平均模式增益和 3.39 dB 的模式相关增益;在该优化参数情况下,还发现此时 LP₀₁ 模增益与 LP₂₁ 模增益相等、LP₁₁ 模增益和 LP₀₂ 模增益相等。增大 EDF₁ 或 EDF₂ 长度,在同等抽运功率条件下可增加平均模式增益,但 DMG 值也相应增加,该结果由 LP₁₁ 模抽运模场分布、四线偏振模信号光模场分布和掺铒光纤铒离子掺杂分布等三者的空间重叠程度决定。根据图 3 可知,若 EDF₁ 长度增加,中心模式增益占有支配地位,导致 EDF₂ 无法补偿 EDF₁ 输

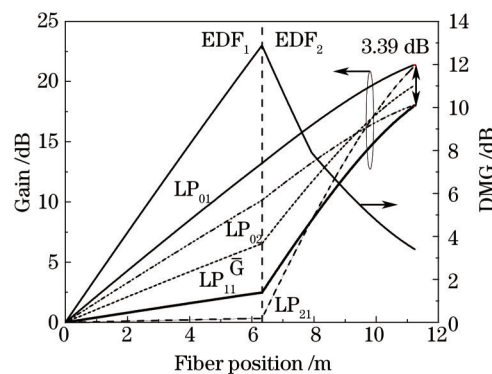


图3 四模信号光增益与掺铒光纤长度关系

Fig.3 Modal gains for the four LP modes as a function of erbium-doped fiber length

出端的DMG值。若EDF₂长度增加,则在EDF₂中中心模式信号光增益逐渐饱和,离心模式增益占主导,进而使EDF₂输出的DMG值增加。

为进一步研究模式增益与EDF₁和EDF₂长度的演变规律,图4给出了四模信号光的模式增益特性随两者变化的等高线曲线,其中EDF₁铒离子的掺杂外径 r_1 和EDF₂铒离子掺杂内径 r_2 取上述优化值。在图4(a)中,黑实线等高线表示平均模式增益,彩色等高线表示信号光的DMG值,单位均为dB。可以看出,高的平均增益区域位于等高线的右上角(即EDF₁和EDF₂长度均较长),低DMG值区域则位于等高线的左下角。因此,通过增加掺铒光纤长度提高模式平均增益将同时使DMG值增加;通过缩短掺铒光纤长度降低DMG值将同时使平均模式增益减小;同时满足高增益、低模式相关增益的设计指标存在矛盾,两者应予以折中考虑。为分析模式增益特性随光纤长度变化的敏感度,图4(b)和图4(c)分别给出了信号光DMG值随EDF₁和EDF₂长度变化的曲线。注意的是,图4(b)和图4(c)计算中分别将EDF₂和EDF₁的长度固定在GA搜索获得的最优长度位置。可以看出,要使信号光DMG值小于4 dB,则EDF₁长度的变化范围为5.8~6.4 m(允许约5%的设计误差容限),EDF₂的长度的变化范围为4.3~5.2 m(允许约上、下限设计误差容限分别为8%和10%),即DMG值对EDF₁的变化更灵敏。这是由于在于中心模式和离心模式的DMG值主要在EDF₁中产生(如图3所示)。

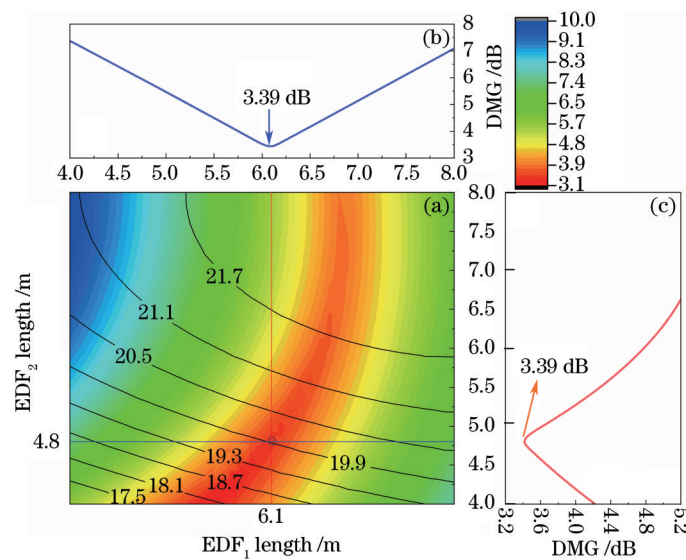


图4 模式增益特性随2段掺铒光纤长度演化的等高线

Fig.4 Contour map for modal gains between EDF₁ and EDF₂ lengths

除了光纤长度外,掺铒光纤铒离子的掺杂半径也影响信号光的模式增益特性。图5给出了四模信号光的模式增益特性随EDF₁的掺杂外径 r_1 和EDF₂掺杂内径 r_2 变化的等高线曲线,其中EDF₁的长度 L_1 和EDF₂的长度 L_2 固定在对应的优化值位置。同样,图5(a)中的黑实线等高线表示平均模式增益,彩色等高线表示信号光的DMG值,单位均为dB。可以看出,高的平均增益区域位于等高线的右下角(即EDF₁铒离子的掺杂外径 r_1 大和EDF₂铒离子掺杂内径 r_2 小),但此区域信号光的DMG值很高。该结果可由抽运光、信号光以及铒离子空间重叠度解释,低DMG值区域则位于等高线图的主对角线的上半段(即EDF₁铒离子的掺杂外径 r_1 小和EDF₂铒离子掺杂内径 r_2 大),但此区域的平均模式增益小于20 dB,越靠近左上角,光波与铒离子掺杂分布的空间重叠度因子越小,模式增益也越小。因此,通过掺铒光纤铒离子掺杂半径改变4LP-MEDFA的模式增益特性,同样存在高增益、低模式相关增益的设计指标矛盾。为分析模式增益特性随光纤铒离子掺杂半径变化的敏感程度,图5(b)和图5(c)分别给出了信号光DMG值随EDF₁铒离子的掺杂外径 r_1 和EDF₂铒离子掺杂内径 r_2 的变化曲线。注意的是,图5(b)和图5(c)计算中分别将EDF₂和EDF₁的铒离子掺杂半径参数固定在GA搜索获得的最优值位置。可以看出,要使信号光DMG值小于4 dB,则EDF₁铒离子的掺杂外径 r_1 的变化范围为 $0.287a \sim 0.302a$ (仅允许上、下限设计误差容限分别为4%和1%),EDF₂的铒离子掺杂内径 r_2 的变化范围为 $0.76a \sim 0.81a$ (允许约上、下限设计误差容限分别为5.2%和1.3%)。通过对比图4和图5结果发现,光纤铒离子掺杂半径对4LP-MEDFA的模式增益特性更灵敏,实际设计中应加以注意。虽然该结果与铒离子阶梯式掺杂设计的掺铒光纤相似^[10],但采用MCVD制备图1所示的简单掺杂铒光纤远比阶梯式掺杂铒光纤

容易。

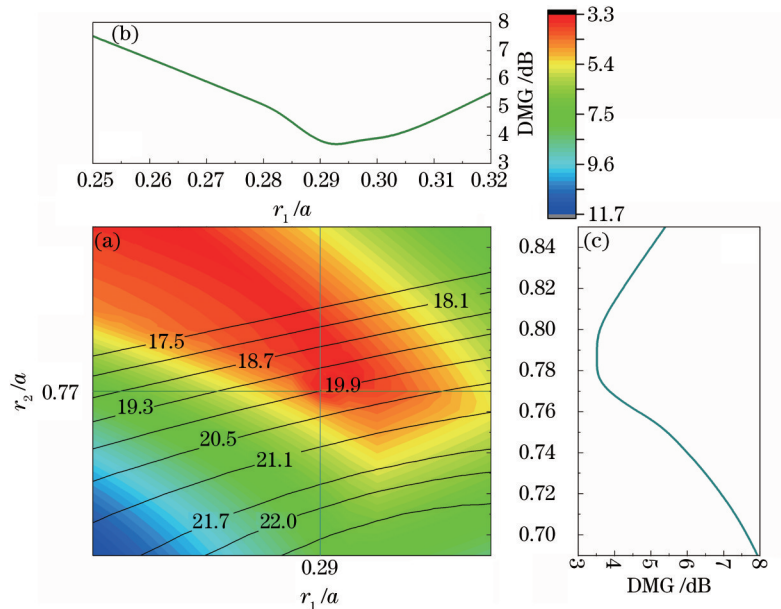


图5 模式增益特性随2段光纤铒离子掺杂半径演化的等高线

Fig.5 Contour map for modal gains between r_1/a and r_2/a

此外,还研究了4LP-MEDFA的模式增益特性随抽运功率变化的关系,结果如图6所示。其中,EDF₁和EDF₂的长度、铒离子掺杂半径均固定于对应的GA优化值位置。可以看出,随着抽运功率增加,信号光的模式增益以近似对数函数形式增大。由于LP₀₁模和LP₂₁模信号光与LP₁₁模抽运光、铒离子掺杂分布具有更大的重叠因子,它们获得的增益比LP₀₂模和LP₁₁模大。在150~350 mW的抽运功率范围内,信号光的DMG值小于5 dB。图6(b)同时分析了信号光噪声指数(NF)与抽运功率演化关系。可以看出,在该抽运范围内,信号光的NF值位于5.8~7.4 dB之内,与相关实验报道的结果基本一致^[12]。

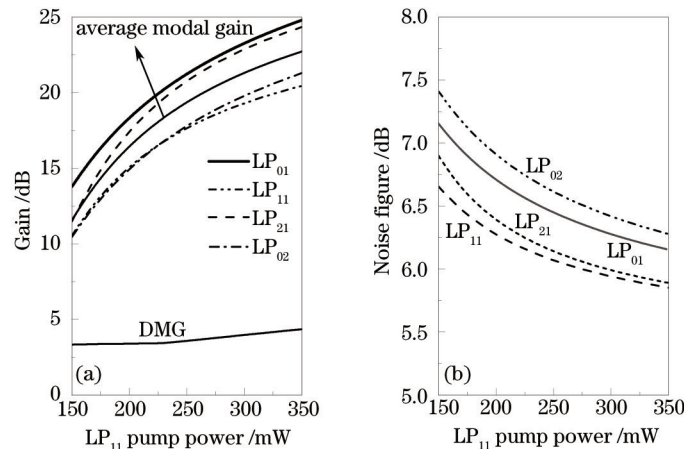


图6 模式增益和信号光噪声指数与抽运功率关系

Fig. 6 Modal gains and noise figures as a function of LP₁₁ pump power

最后,分析了基于级联结构设计的4LP-MEDFA在C波段内信号光的模式增益特性。值得注意的是,在C波段内,2段少模掺铒光纤均支撑且仅支持LP₀₁模、LP₁₁模、LP₂₁模和LP₀₂模的传播。结果如图7所示,其中铒光纤长度(L_1 和 L_2)和铒离子掺杂半径(r_1 和 r_2)、LP₁₁模抽运光功率均采用上述GA优化结果。由图7可知,C波段内各模式信号光的模式增益较平坦,在1540~1560 nm近20 nm宽的波长范围内各模式增益几乎保持不变;在短波长和长波长处的增益起伏主要与该处铒离子的发射截面、吸收截面大小密切相关。在C波段范围内,基于GA优化获取的设计参数使各信号光模式的模式相关增益小于5 dB。同时,图7(b)也给出了各模式信号光的NF值。可发现,C波段内4LP-MEDFA各信号光的NF值在5.6~7.9 dB范围内变化。

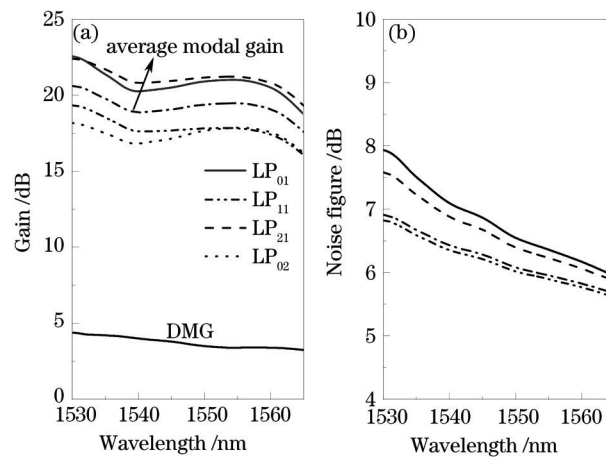


图7 C波段内的模式增益和信号光噪声指数特性

Fig.7 Modal gains and noise figures over C band

4 结 论

为避免采用铒离子为阶梯式掺杂或多环式掺杂结构的掺铒光纤,设计了由铒离子分别为中心掺杂和环形掺杂的2段掺铒光纤级联构成的四模掺铒光纤放大器。根据少模光纤中的功率方程和速率方程,采用改进遗传算法对该放大器进行了优化设计,获得了满足指标要求的掺铒光纤长度、铒离子掺杂半径和抽运功率等参数。优化结果显示,当中心掺杂铒光纤、环形掺杂铒光纤的长度、掺杂半径参数分别为(6.1 m, 0.29a)和(4.8 m, 0.77a)时,仅通过270 mW的LP₁₁模抽运光可获得20 dB的平均模式增益和小于3.5 dB的模式相关增益。研究了该放大器模式增益特性对掺铒光纤长度和铒离子掺杂半径变化的敏感性,结果显示对铒离子掺杂半径的设计误差容忍更严格。同时,也分析了该放大器模式增益与抽运功率关系以及C波段的模式增益特性,结果均显示该放大器具有较好的性能。

参 考 文 献

- 1 D J Richardson, J M Fini, L E Nelson. Space division multiplexing in optical fibers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- 2 G Li, N Bai, N Zhao, *et al.*. Space-division multiplexing: The next frontier in optical communication[J]. Advances in Optics and Photonics, 2014, 6(4): 413-487.
- 3 Xie Yiwei, Fu Songnian, Zhang Hailiang, *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 Chang Yuxin, Hu Guijun, Bai Song, *et al.*. Research of asymmetric planar waveguide type mode division multiplexer/demultiplexer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1205004.
常玉鑫, 胡贵军, 柏松, 等. 非对称平面光波导型模式复用/解复用器研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1205004.
- 5 Lu Ju, Chen Mingyang, Zhang Yongkang. Dispersion characteristics of few-mode large-mode-area fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s2): s206001.
陆驹, 陈明阳, 张永康. 少模大模场光纤的色散特性[J]. 光学学报, 2013, 33(s2): s206001.
- 6 Yao Shuchang, Fu Songnian, Zhang Minming, *et al.*. Demodulation and multi-input multi-output equalization for mode division multiplexing system using a novel few-mode fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 144215.
姚殊畅, 付松年, 张敏明, 等. 基于少模光纤的模式复用系统多输入多输出均衡与解调[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 144215.
- 7 R Ryf, S Randel, N K Fontaine, *et al.*. 32-bit/s/Hz spectral efficiency WDM transmission over 177-km few-mode fiber[C]. Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, 2013: PDP5A 1.
- 8 K P Ho, J M Kahn. Mode-dependent loss and gain: Statistics and effect on mode-division multiplexing[J]. Opt Express, 2011, 19(17): 16612-16635.
- 9 E Ip. Gain equalization for few-mode fiber amplifiers beyond two propagating mode groups[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(21): 1933-1936.
- 10 D Askarov, J M Kahn. Design of transmission fibers and doped fiber amplifiers for mode-division multiplexing[J]. IEEE

- Photon Lett, 2012, 24(21): 1945–1948.
- 11 Q Kang, E Lim, Y Jung, *et al.*. Accurate modal gain control in a multimode erbium doped fiber amplifier incorporating ring doping and a simple LP₀₁ pump configuration[J]. Opt Express, 2012, 20(19): 20835–20843.
 - 12 M Salsi, R Ryf, G Le-Cocq, *et al.*. A six-mode erbium-doped fiber amplifier[C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2012, Th.3.A: Th.3.A.6.
 - 13 C Jin, B Ung, Y Messaddeq, *et al.*. Tailored modal gain in a multi-mode erbium-doped fiber amplifier based on engineered ring doping profiles[C]. SPIE, 2013, 8915: 89150A.
 - 14 R N Mahalati, D Askarov, J M Kahn. Adaptive modal gain equalization techniques in multimode erbium-doped fiber amplifiers [J]. J Lightwave Technol, 2014, 32(11): 2133–2143.
 - 15 Y Jung, Q Kang, J K Sahu, *et al.*. Reconfigurable modal gain control of a few-mode EDFA supporting six spatial modes[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 26(11): 1100–1103.
 - 16 G Le-Cocq, Y Quiquempois, A Le-Rouge, *et al.*. Few mode Er³⁺-doped fiber with micro-structured core for mode division multiplexing in the C-band[J]. Opt Express, 2013, 21(25): 31646–31659.
 - 17 A H erbster, M A Romero. On the design of few-mode Er-doped fiber amplifiers for space-division multiplexing optical communications system[C]. SPIE, 2014, 9131: 91310Y.
 - 18 B Laurent, G Le-Cocq, Y Quiquempois. Few-mode Erbium-doped fiber amplifiers: A review[J]. J Lightwave Technol, 2015, 33(3): 588–596.
 - 19 Q Kang, E L Lim, F P Y Jung, *et al.*. Minimizing differential modal gain in cladding-pumped EDFAs supporting four and six mode groups[J]. Opt Express, 2014, 22(18): 21499–21507.
 - 20 Qin Zujun, Zhou Xiaojun, Wu Haocheng, *et al.*. Design of multi-wavelength cascaded Raman fiber lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 244–248.
秦祖军, 周晓军, 伍浩成, 等. 多波长级联拉曼光纤激光器的设计[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 244–248.

栏目编辑: 王晓球