

# 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

赵清华 张振振 赵宁波\* 李小英

天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 依据少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)理论模型,在分析均匀掺铒光纤模式增益特性的基础之上,设计了一种分层掺铒的少模光纤结构。通过遗传算法优化分层掺铒光纤中的铒离子分布,实现了FM-EDFA信号光四模式群组的增益均衡。仿真结果表明,利用980 nm单模抽运模式,可以使1550 nm信号光的四模式群组平均增益达到22 dB,模间增益差值小于0.5 dB,且在C波段各模式光谱平坦度为2 dB。简化抽运模式结构,降低掺铒光纤制作复杂性,为进一步开展四模式群组增益均衡的实验研究奠定了基础。

**关键词** 光通信;少模掺铒光纤放大器;遗传算法;增益均衡

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.030602

## Optimizing the Erbium Doped Profile to Equalize the Modal Gain in Few Mode Erbium Doped Fiber Amplifier

Zhao Qinghua Zhang Zhenzhen Zhao Ningbo Li Xiaoying

*Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

**Abstract** Based on the theoretical model of few mode erbium doped fiber amplifier (FM-EDFA), the modal gain characteristics of uniform erbium-doped fiber are analyzed and a layered Er<sup>3+</sup> doped fiber structure is proposed. By optimizing the Er<sup>3+</sup> doped fiber with genetic algorithm, the equalization of four mode groups is realized. The simulation results show that, with 980 nm single-mode pump mode, the average gain of four mode groups can reach 22 dB and different modal gain is less than 0.5 dB at the wavelength of 1550 nm. The flatness of modal spectra is about 2 dB. This not only simplifies both the structure of pump mode and complexity of erbium-doped fiber manufacturing process, but also provides theoretical basis for the further research of realizing the equalization of four mode groups in experiment.

**Key words** optical communications; few mode erbium doped fiber amplifier; genetic algorithm; gain equalization

**OCIS codes** 060.2330; 060.4230; 060.4510

## 1 引言

随着网络数据流量指数倍地快速增长,标准单模光纤(SMF)传输系统的信息容量正趋近非线性香农极限<sup>[1]</sup>,为进一步提高通信容量,基于模分复用<sup>[2-3]</sup>和芯分复用<sup>[4]</sup>的空分复用系统在最近几年被提出并得到了深入研究。掺铒光纤放大器(EDFA)作为光信号传输的中继,在长距离光通信传输系统中发挥着重要的作用。现有的EDFA一般以单模掺铒光纤作为增益介质<sup>[5]</sup>,仅适用于放大单个模式,无法满足模分复用系统的需求。在模分复用系统中,若不同模式之间存在较大的模间增益差,则会导致系统传输容量的下降和中断

收稿日期: 2015-07-10; 收到修改稿日期: 2015-10-05; 网络出版日期: 2015-01-13

基金项目: 国家973计划(2014CB340103)

作者简介: 赵清华(1991—),男,硕士研究生,主要从事光通信放大器件方面的研究。E-mail: tsinghua@tju.edu.cn

导师简介: 李小英(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事量子光学、非线性光学与光电信息处理等方面的研究。

E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: nbzhao@tju.edu.cn

概率的升高<sup>[6]</sup>。因此,研制少模EDFA、并实现不同信号模式的增益均衡成为近几年光通信领域的热点。

目前实现模式间增益均衡的方法主要有如下3种:调节抽运模式组成<sup>[7]</sup>、优化光纤中铒离子分布以及改进光纤中折射率分布<sup>[8]</sup>。2011年,Bai等<sup>[9]</sup>首次对少模EDFA(FM-EDFA)进行研究,通过对FM-EDFA理论的分析仿真,研究了不同抽运模式下LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>两信号模式的增益均衡情况。但单纯通过抽运模式的组合难以实现更多信号模式的增益均衡,需要借助于极其复杂的铒离子分布结构<sup>[10]</sup>。随后,通过调整铒离子结构和折射率分布实现两信号模式群组的增益均衡方案相继被提出。2014年,南安普顿大学的Yongming Jung课题组<sup>[11-12]</sup>采用包层抽运方式,对四模式群组的放大进行了理论和实验研究。但对于四模式群组的增益均衡来说,采用包层抽运的抽运转换效率较低,且光纤铒离子分布设计较为复杂。在未来的模分复用系统中,采用简化的抽运模式结构、能耗更低的抽运源,制作低复杂性的掺铒光纤,实现多信号模式的增益均衡仍是研究的重点。

本文为了研制适应于模分复用系统的FM-EDFA,设计了一种铒离子分层掺杂少模增益光纤,可以实现四信号模式群组的增益均衡;描述了四信号模式群组EDFA的一般模型,并给出详细的模型公式;主要分析了铒离子均匀掺杂少模光纤中四信号模式的增益特性,说明不同信号模式间存在较大的增益差;设计了一种铒离子分层掺杂少模光纤,通过遗传算法优化铒离子分布,实现了四信号模式的增益均衡。

## 2 四模式群组掺铒光纤放大器一般模型

少模掺铒光纤放大器一般模型如图1(a)所示,不同的信号模式和抽运模式经过各自的模式复用器,通过二向色镜一起注入到少模增益光纤。在少模增益光纤中,各个信号模式在抽运光作用下实现放大输出。对于少模掺铒光纤放大器模型,一般采用如下假设:1)少模掺铒光纤中的铒离子沿光纤轴向均匀分布,忽略不同模式间的耦合;2)光纤为弱导近似光纤,光纤中的模式为线性偏振模式(LP模式)。

研究可以放大四信号模式群组的少模掺铒光纤放大器,具体模型如图1(b)所示。为简化抽运模式结构,采用980 nm单模激光器选择性激发少模光纤中的LP<sub>01</sub>抽运模式,并选择前向抽运方式。LP<sub>01</sub>抽运模式同4个信号模式群组一起通过二向色镜,注入到少模增益光纤,4个信号模式群组在LP<sub>01</sub>抽运模式的作用下实现放大输出。

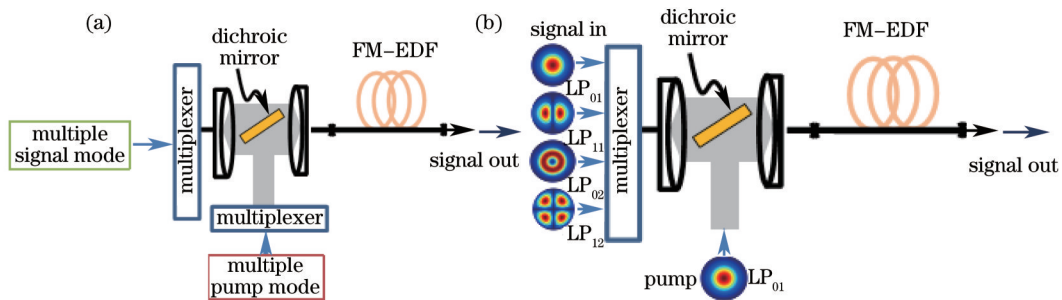


图1 掺铒光纤放大器模型装置图。(a)少模掺铒光纤放大器模型;(b)四模式群组掺铒光纤放大器

Fig.1 EDFA schematic diagram. (a) FM-EDFA model; (b) four mode groups EDFA

少模掺铒光纤放大器仿真模型是基于多个空间模式的粒子数方程和光功率传播方程,其中达到稳态时,粒子数方程为<sup>[9]</sup>

$$N_2(r, \varphi, z) = \frac{\left\{ \frac{1}{h\nu_p} \sum_{j=1}^{m_p} P_{p,j}(z) \sigma_{ap} i_{p,j}(r, \varphi) + \frac{1}{h\nu_s} \sum_{i=1}^{m_s} [P_{ASE,k,i}(z) + P_{s,k,i}(z)] \sigma_{as,k} \right\} N_0(r, \varphi)}{\frac{1}{h\nu_s} \sum_{i=1}^{m_s} [P_{ASE,k,i}(z) + P_{s,k,i}(z)] (\sigma_{es,k} + \sigma_{as,k}) i_{s,k,i}(r, \varphi) + \frac{1}{\tau} + \frac{1}{h\nu_p} \sum_{j=1}^{m_p} P_{p,j}(z) \sigma_{ap} i_{p,j}(r, \varphi)} \quad (1)$$

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

式中因为波长与光纤中的模式是2个独立的维度,为了区分,此处用 $k$ 表示波长,用 $i$ 表示此波长下掺铒光纤所容纳的不同模式。 $P_{s,k,i}$ 为波长 $k$ 的第 $i$ 个信号模式的功率, $P_{ASE,k,i}$ 为波长 $k$ 的第 $i$ 个信号模式的放大自发辐射(ASE)功率, $P_{p,j}$ 为抽运光的第 $j$ 个抽运模式的功率。 $N_0(r, \varphi, z)$ 为掺铒光纤中总的铒离子浓度分布, $N_2(r, \varphi, z)$ 为掺铒光纤中上能级铒离子在光纤横截面的浓度分布, $N_1(r, \varphi, z)$ 为掺铒光纤中下能级铒离子在光

纤横截面的浓度分布。 $\tau$ 为上能级弛豫时间, $\nu_s$ 为信号光频率, $\nu_p$ 为抽运光频率。

$\sigma_{es,k}$ 和 $\sigma_{as,k}$ 分别为信号光波长 $k$ 的辐射截面和吸收截面<sup>[13]</sup>, $\sigma_{ap}$ 为抽运光的吸收截面。关于辐射截面与吸收截面的Fuchtbauer-Landenberg方程的一种形式为<sup>[14]</sup>

$$\sigma_{a,e}(\lambda) = \frac{\lambda_{a,e,\text{peak}}^4 I_{a,e}(\lambda)}{8\pi c n^2 \tau \int I_{a,e}(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

式中 $\lambda_{a,e,\text{peak}}$ 表示在吸收峰或辐射峰处的波长, $c$ 是真空光速, $n$ 为光纤纤芯折射率,忽略铒离子掺杂对 $n$ 的影响, $\tau$ 为亚稳态能级的弛豫时间, $I_{a,e}(\lambda)$ 为吸收或辐射光谱。当光纤材料确定之后,辐射截面与吸收截面只是波长的函数,不随铒离子分布改变而改变,光纤所能容纳的不同模式是属于同一个波长下的具有不同传播常数的横向模,所以在特定波长下的所有模式均具有相同的辐射截面和吸收截面。

$i_{s,k,i}(r,\varphi)$ 和 $i_{p,j}(r,\varphi)$ 分别表示信号光波长 $k$ 的第 $i$ 个模式和抽运光第 $j$ 个模式在光纤横截面上的归一化光强分布,针对某一特定波长,其表达式为 $i_{s,p,i}(r,\varphi) = \frac{\psi_i(r,\varphi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^a r \psi_i(r,\varphi) dr d\varphi}$ ,在阶跃型折射率光纤中,模式光强

$\psi_i(r,\varphi)$ 为

$$\psi_i(r,\varphi) = \begin{cases} A \frac{J_m^2(Ur/a)}{J_m^2(U)}, & r < a \\ B \frac{K_m^2(Wr/a)}{K_m^2(W)} J_m^2(U), & r \geq a \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $a$ 为纤芯半径, $m$ 对应 $LP_{mn}$ 下标中的 $m$ 值, $A$ 、 $B$ 为常数, $U$ 、 $W$ 为各模式所对应的归一化横向相位参数和归一化横向衰减参数,可由模式特征方程得到, $J$ 和 $K$ 分别为贝塞尔函数和修正贝塞尔函数。信号光波长 $k$ 的第 $i$ 个信号模式、第 $i$ 个放大自发辐射模式以及抽运光第 $j$ 个模式的传播方程分别为<sup>[9]</sup>

$$\frac{dP_{s,k,i}}{dz} = P_{s,k,i} \int_0^{2\pi} \int_0^a i_{s,k,i}(r,\varphi) [N_2(r,\varphi,z) \sigma_{es,k} - N_1(r,\varphi,z) \sigma_{as,k}] r dr d\varphi - \alpha_s P_{s,k,i}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ASE,k,i}}{dz} = & \mu_1 P_{ASE,k,i} \int_0^{2\pi} \int_0^a i_{s,k,i}(r,\varphi) [N_2(r,\varphi,z) \sigma_{es,k} - N_1(r,\varphi,z) \sigma_{as,k}] r dr d\varphi + \\ & \mu_1 \int_0^{2\pi} \int_0^a 2\sigma_{es,k} h\nu_s \Delta\nu N_2(r,\varphi,z) r dr d\varphi - \mu_1 \alpha_s P_{ASE,k,i} \end{aligned}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{p,j}}{dz} = & \mu_2 P_{p,j} \int_0^{2\pi} \int_0^a [N_1(r,\varphi,z) \sigma_{ap} - N_2(r,\varphi,z) \sigma_{ep1} - N_3(r,\varphi,z) \sigma_{ep2}] \cdot \\ & i_{p,j}(r,\varphi) r dr d\varphi + \mu_2 \alpha_p P_{p,i} \end{aligned}, \quad (7)$$

式中 $\alpha_s$ 、 $\alpha_p$ 分别为信号光、抽运光在掺铒光纤中的本底损耗系数,一般为0.03 dB/m。 $\sigma_{ep1}$ 、 $\sigma_{ep2}$ 分别为抽运光在亚稳态能级 $N_2$ 、抽运能级 $N_3$ 上的辐射截面,对于980 nm的抽运光,掺铒光纤放大器近似看作一个二能级放大系统,有 $\sigma_{ep2} = \sigma_{ep1}$ ,其在 $N_2$ 能级上的辐射截面为0,即 $\sigma_{ep2} = \sigma_{ep1} = 0$ 。 $\Delta\nu$ 为噪声带宽。 $\mu_1 = 1$ 表示信号光前向放大自发辐射, $\mu_1 = -1$ 表示信号光后向放大自发辐射。 $\mu_2 = 1$ 表示后向抽运方式, $\mu_2 = -1$ 表示前向抽运方式。

由少模掺铒光纤的粒子数方程和光传播方程[(1)~(7)式]可知,少模掺铒光纤中各信号模式的增益不仅与抽运模式归一化光强 $i_{p,j}(r,\varphi)$ 有关,也与纤芯中铒离子分布 $N_0(r,\varphi)$ 有关。

### 3 铒离子均匀掺杂光纤的模式增益特性分析

设定铒离子掺杂浓度 $N_0(r,\varphi)$ 在光纤横截面上为常量,不随 $r$ 、 $\varphi$ 变化。令 $N_0(r,\varphi) = 3 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ,与后面所设计的铒离子分层掺杂结构光纤的掺杂总量保持一致,将其值代入(2)式中,进行数值仿真分析。少模掺铒光纤的具体参数如表1所示。

由归一化截止频率 $V = 2\pi a NA / \lambda$ 可知( $NA$ 为数值孔径),对于波长在1520~1580 nm的信号光, $V$ 均介于3.8317~5.1356,即此通信波段的信号光在光纤中均支持4个模式群组:LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub>, LP<sub>21</sub>, LP<sub>02</sub>。对于同一模式的2个偏振态,其光场强度分布相同,与铒离子浓度分布的交叠相同,因而增益是一致的,故忽略模式偏振态对

模式增益的影响<sup>[15]</sup>。

表1 少模掺铒光纤放大器相应参数

Table 1 Parameters of the few mode EDFA

Parameter	Value	Parameter	Value
Core radius / $\mu\text{m}$	8	NA	0.15
Cladding radius / $\mu\text{m}$	62.5	$\tau$ /ms	10
Pump wavelength /nm	980	$\sigma_{es,1550}$ / $\text{m}^2$	$3.89 \times 10^{-25}$
Signal wavelength /nm	1550	$\sigma_{as,1550}$ / $\text{m}^2$	$2.49 \times 10^{-25}$
Core refractive index $n_1$	1.4457	$\sigma_{ap,980}$ / $\text{m}^2$	$2.86 \times 10^{-25}$
Cladding refractive index $n_2$	1.4378	$\Delta\nu$ /Hz	$1.25 \times 10^{12}$

由于无法得到偏微分方程组(1)~(7)式的解析解,所以通过标准四阶龙格库塔方法(数值迭代)进行数值求解。在求解时,设定信号模式初始功率,此处 $P_{s01}$ 代表信号模式 $LP_{01}$ 的初始功率,以此类推,令 $P_{s01}=0.05\text{ mW}$ , $P_{s02}=0.05\text{ mW}$ , $P_{s11}=0.1\text{ mW}$ , $P_{s21}=0.1\text{ mW}$ ,抽运光模式 $LP_{01}$ 的初始功率 $P_{p01}$ 为 $300\text{ mW}$ ,ASE初始功率 $P_{ASE01}=P_{ASE02}=P_{ASE11}=P_{ASE21}=0\text{ mW}$ ,光纤长度 $20\text{ m}$ ,算法迭代步长 $h=0.2\text{ m}$ ,信号波长为 $1550\text{ nm}$ ,抽运波长为 $980\text{ nm}$ 。

通过数值求解可以得出模式增益及放大自发辐射随光纤长度变化的情况如图2所示。从图2(a)可以看出,对于铒离子均匀掺杂光纤,4个信号模式群组增益在光纤 $8\text{ m}$ 处开始达到饱和,在 $20\text{ m}$ 处, $LP_{01}$ 信号模式增益为 $28\text{ dB}$ , $LP_{21}$ 信号模式增益为 $18\text{ dB}$ , $LP_{01}$ 和 $LP_{21}$ 信号模式的增益差为 $10\text{ dB}$ 。图2(b)中, $LP_{01}$ 信号模式的前后向放大自发辐射最大, $LP_{21}$ 信号模式的前后向放大自发辐射最小。由此可见,各信号模式群组增益存在较大的差异,并且各信号模式群组的自发辐射功率差距较大。

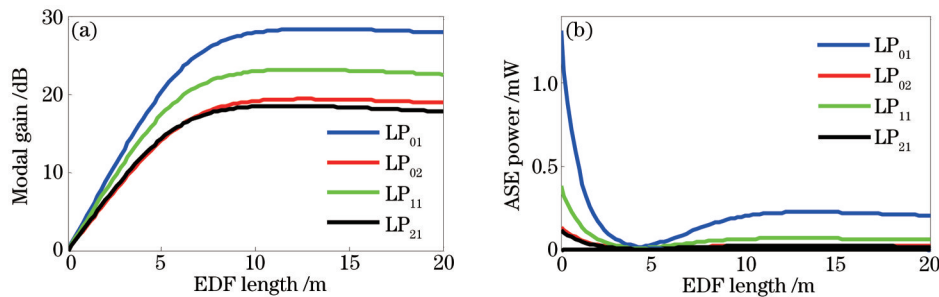


图2 铒离子均匀掺杂光纤。(a) 信号模式增益随光纤长度变化;(b) ASE功率随光纤长度变化

Fig.2 Uniform  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber. (a) Gain of signal mode versus optical fiber length;  
(b) ASE power versus optical fiber length

设定光纤长度 $L=15\text{ m}$ ,进一步分析均匀掺杂铒光纤放大器的模式增益随抽运功率的变化情况以及光谱响应,如图3所示。在图3(a)中,随着抽运功率的提高,各个信号模式的增益也相应提高,但在达到饱和后增加幅度有限,四模式的模间增益差基本维持 $10\text{ dB}$ 左右,抽运功率的增加对每个信号模式的增益影响是一致的。图3(b)是铒离子均匀掺杂光纤的光谱响应,信号波长在 $1520\sim 1580\text{ nm}$ 之间的模式间增益差值很大,增益最高的仍是 $LP_{01}$ 模式,增益最低的是 $LP_{21}$ 模式,模间增益差约在 $9\text{ dB}$ 。

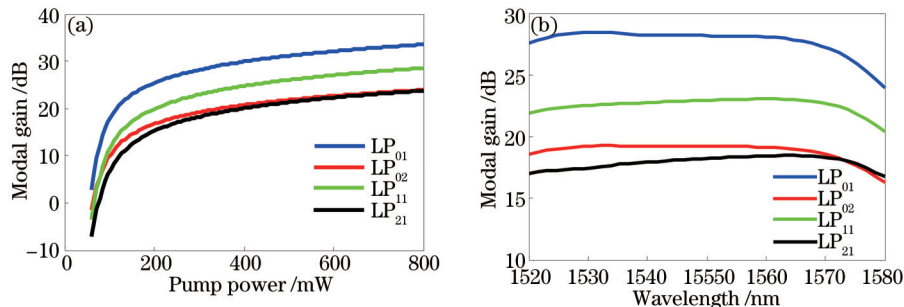


图3 铒离子均匀掺杂光纤中信号模式增益随(a)抽运功率和(b)信号波长的变化

Fig.3 Signal modal gains of uniform  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber versus (a) pump power and (b) signal wavelength

由图2和图3的分析结果可知,在铒离子均匀掺杂光纤中,不同信号模式的增益存在较大差异,并且各个信号模式在C波段的增益也相差较大。



## 4 铒离子分层掺杂光纤的设计与分析

### 4.1 分层铒离子掺杂光纤的设计

光纤中铒离子与信号模式光场的交叠影响信号模式增益<sup>[8]</sup>,因此,通过改变光纤中铒离子分布结构,可实现不同信号模式增益的调控。为了减小不同模式之间的增益差值,初步设计分层掺杂铒离子的光纤结构,如图4所示,通过优化结构参数,进而实现信号光四信号模式群组的增益均衡。

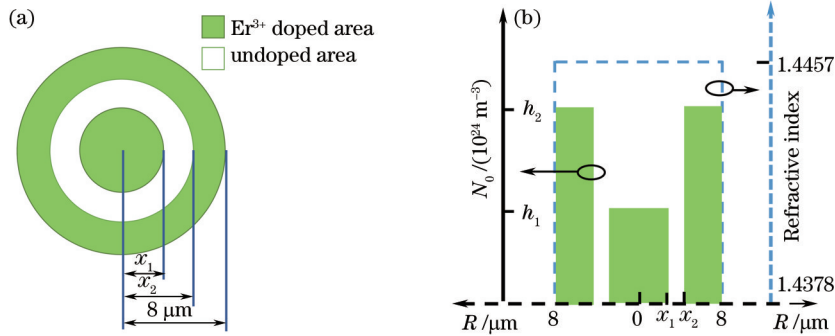


图4 分层铒离子掺杂光纤结构。(a) 横截面分布图;(b) 掺杂和折射率沿径向分布

Fig.4 Layered structure of  $\text{Er}^{3+}$  doped fiber. (a) Cross section; (b) doping profile and refractive index in radial direction

图4(a)表示光纤横截面上的铒离子掺杂分布,图4(b)表示光纤沿半径方向上的铒离子浓度分布以及折射率分布。从图中可以看出,设计的铒离子结构其内部为半径 $x_1$ 的实心圆掺杂,掺杂浓度为 $h_1$ ,外部为内半径为 $x_2$ ,外半径为 $8\ \mu\text{m}$ (光纤纤芯半径)的圆环掺杂,掺杂浓度为 $h_2$ ,半径介于 $x_1$ 与 $x_2$ 之间的圆环未掺杂铒离子。具体掺杂方式可表示为

$$N_0(r, \varphi) = \begin{cases} h_1, & 0 < r < x_1 \\ 0, & x_1 \leq r < x_2 \\ h_2, & x_2 \leq r \leq a \end{cases} \quad (8)$$

优化 $N_0(r, \varphi)$ ,就是对4个参数 $x_1, h_1, x_2, h_2$ 进行优化,得到最优的 $N_0(r, \varphi)$ 分布,以实现不同信号模式在掺铒光纤中的增益均衡。由于涉及到4个变量的同时优化,考虑到遗传算法具有多变量同时优化和全局搜索的特性,故采用模仿生物遗传进化原理的遗传算法<sup>[16]</sup>进行优化。

(1)~(7)式为要优化的目标函数, $x_1, h_1, x_2, h_2$ 为待优化参量,将优化参量 $x_1, x_2$ 的搜索范围设置为 $[0, 8\ \mu\text{m}]$ ,优化参量 $h_1, h_2$ 的搜索范围设置为 $[0, 10^{25}\ \text{m}^{-3}]$ ,使用二进制编码方法,采用赌轮盘选择算法,用最优保存策略保证搜索算法的全局收敛性,通过单点交叉算子和单点变异算子留存后代。初始化种群数为50,编码长度为20,交叉概率0.8,变异概率0.01。为实现较高模式增益,并保证模式间的增益差值最小,优化过程中定义适应度函数作为评定优化结果的标准:

$$F = \frac{\bar{G}}{\Delta G}, \quad (9)$$

式中 $\bar{G}$ 为模式平均增益, $\Delta G$ 为模式间最大增益差值。每一步优化过程中,均采用标准四阶龙格库塔方法求解(1)~(7)式,各参数初始值同铒离子均匀掺杂求解时保持一致。优化结果显示, $F$ 值最大可达到185,并且收敛性很好。选取算法收敛时对应的一组优化数据: $x_1=2.7\ \mu\text{m}, x_2=4.8\ \mu\text{m}, h_1=2.6 \times 10^{24}\ \text{m}^{-3}, h_2=4.6 \times 10^{24}\ \text{m}^{-3}$ ,作为最终优化结果。

### 4.2 分层铒离子掺杂光纤的模式增益特性分析

将优化得到的铒离子分层掺杂结构:

$$N_0(r, \varphi) = \begin{cases} 2.6 \times 10^{24}\ \text{m}^{-3}, & 0 < r < 2.7\ \mu\text{m} \\ 0, & 2.7\ \mu\text{m} \leq r < 4.8\ \mu\text{m} \\ 4.6 \times 10^{24}\ \text{m}^{-3}, & 4.8\ \mu\text{m} \leq r < 8\ \mu\text{m} \end{cases} \quad (10)$$

代入(2)式中,再次用标准四阶龙格库塔方法求解(1)~(7)式,计算过程中各参数初始值同铒离子均匀掺杂求解时保持一致。

铒离子分层掺杂光纤的信号模式增益,以及ASE功率随掺铒光纤长度的变化情况如图5所示。从图5(a)中可以看出,优化后的分层掺杂铒离子光纤,在光纤长度15 m处,模式平均增益为22 dB,最小模间增益差值为

0.5 dB。相对于均匀掺杂铒离子光纤,四信号模式群组具有较高的模式平均增益,模间增益差得到极大的改善。图5(b)中不同模式的前后向ASE功率曲线也很好地重合到了一起,且各模式的ASE功率均有所下降。

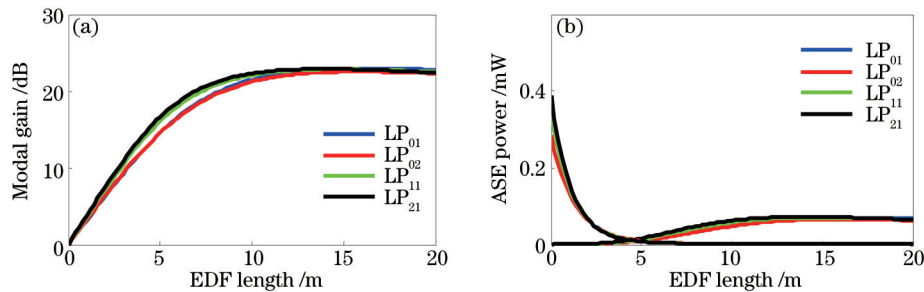


图5 分层掺杂铒离子光纤。(a) 信号模式增益随光纤长度变化;(b) ASE功率随光纤长度变化

Fig.5 Layered  $\text{Er}^{3+}$  doped fiber. (a) Gain of signal mode versus optical fiber length;  
(b) ASE power versus optical fiber length

同样设定光纤长度为15 m,分析铒离子分层掺杂光纤的增益随抽运功率的变化情况以及其光谱响应,如图6所示。由图6(a)可知,对于优化后的铒离子分层掺杂光纤,当抽运功率小于300 mW时,LP<sub>01</sub>信号模式增益一直是最高,LP<sub>21</sub>信号模式增益最低。随着抽运功率的增加,各个信号模式增益在300 mW左右达到均衡,当抽运功率大于300 mW时,LP<sub>21</sub>信号模式增益变得最高,而LP<sub>01</sub>信号模式增益最低,但抽运功率的增加对模式间增益差值整体影响不大。图6(b)是优化后铒离子分层掺杂光纤的光谱响应,与铒离子均匀掺杂光纤相比,模式光谱增益平坦度降至2 dB,且平均模式增益较高。

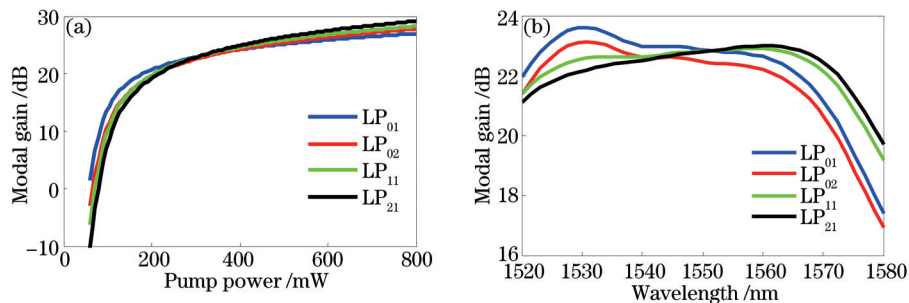


图6 分层掺杂铒离子信号模式增益随(a)抽运功率和(b)信号波长的变化

Fig.6 Signal modal gain of layered  $\text{Er}^{3+}$  doped fiber versus (a) pump power and (b) signal wavelength

图5和图6的分析结果说明,对于优化后的铒离子分层掺杂光纤,四信号模式群组可以达到较高的平均模式增益,模间增益差得到极大的改善。在光纤长度为15 m时,其光谱响应较好,可以实现C波段信号光四模式群组的增益均衡。

## 5 结 论

为了实现少模掺铒光纤放大器中四信号模式群组的增益均衡,在简化抽运结构的基础之上,设计了一种铒离子分层掺杂的少模增益光纤。通过遗传算法优化铒离子分布,四信号模式群组平均增益可以达到22 dB,模间增益差小于0.5 dB,且各模式光谱平坦度下降至2 dB。对控制模分复用少模掺铒光纤,进一步开展四模式群组增益均衡的实验研究奠定了基础。

## 参 考 文 献

- Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, *et al.*. Capacity limits of optical fiber networks[J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(4): 662-701.
- Ryf R, Randel S, Gnauck A H, *et al.*. Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, Optical Society of America, 2011: PDPB10.
- 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.
- Zhu B, Taunay T F, Yan M F, *et al.*. Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network[J]. *Opt Express*,

- 2010, 18(11): 11117–11122.
- 5 Zhang Kewei, Zhao Wei, Xie Xiaoping, *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.  
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.
- 6 Ho K P, Kahn J M. Mode-dependent loss and gain: Statistics and effect on mode-division multiplexing[J]. *Opt Express*, 2011, 19(17): 16612–16635.
- 7 Akhtari S, Krummrich P M. Optical amplifier with rotationally symmetrical pump modes for enhanced mode multiplexing [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(23): 2097–2100.
- 8 Kang Q, Lim E L, Jung Y, *et al.*. Accurate modal gain control in a multimode erbium doped fiber amplifier incorporating ring doping and a simple LP<sub>01</sub> pump configuration[J]. *Opt Express*, 2012, 20(19): 20835–20843.
- 9 Bai N, Ip E, Wang T, *et al.*. Multimode fiber amplifier with tunable modal gain using a reconfigurable multimode pump[J]. *Opt Express*, 2011, 19(17): 16601–16611.
- 10 Ip E. Gain equalization for few-mode fiber amplifiers beyond two propagating mode groups[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(21): 1933–1936.
- 11 Kang Q, Lim E, Poletti F, *et al.*. Minimizing differential modal gain in cladding pumped MM-EDFAs for mode division multiplexing in C and L bands[C]. *Fiber-Based Technologies and Applications*, Optical Society of America, 2014: FTh4F1.
- 12 Jung Y, Lim E L, Kang Q, *et al.*. Cladding pumped few-mode EDFA for mode division multiplexed transmission[J]. *Opt Express*, 2014, 22(23): 29008–29013.
- 13 Barnes W L, Laming R, Tarbox E J, *et al.*. Absorption and emission cross section of Er<sup>3+</sup> doped silica fibers[J]. *IEEE J Quantum Elect*, 1991, 27(4): 1004–1010.
- 14 Giles C R, Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers[J]. *J Lightwave Technol*, 1991, 9(2): 271–283.
- 15 Jung Y, Alam S, Li Z, *et al.*. First demonstration and detailed characterization of a multimode amplifier for space division multiplexed transmission systems[J]. *Opt Express*, 2011, 19(26): B952–B957.
- 16 Deb K, Pratap A, Agarwal S, *et al.*. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Trans on Evolut Comput*, 2002, 6(2): 182–197.

栏目编辑: 王晓琰