

# 椭圆纤芯少模光纤参量放大器设计

邢焕兴, 武保剑\*, 万峰, 曹亚敏, 文峰, 邱昆

电子科技大学信息与通信工程学院光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

**摘要** 研究了椭圆纤芯少模光纤的模式特性, 给出了少模光纤中克尔非线性耦合模方程的一般形式, 详细描述了少模光纤参量放大器的设计方法。利用 COMSOL 仿真软件获得了导波光场模式分布对纤芯椭圆率的依赖关系, 进而计算了少模之间的四波混频相位失配因子和相应的模场交叠积分(或非线性系数)。研究了阶跃型折射率分布的椭圆纤芯少模光纤中三个模群的简并四波混频过程。结果表明, 当  $LP_{21a}$  模的抽运光功率为 0.5 W 时,  $LP_{11a}$  模的信号光增益达到 20.15 dB, 在增益劣化 2 dB 的范围内可允许的椭圆纤芯误差为 0.6  $\mu\text{m}$ 。

**关键词** 光纤光学; 少模光纤; 光纤参量放大; 模场分布; 非线性系数

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.110603

## Design of Elliptical-Core Few-Mode Fiber Optical Parametric Amplifiers

Xing Huanxing, Wu Baojian\*, Wan Feng, Cao Yamin, Wen Feng, Qiu Kun

Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communication, Ministry of Education,

School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

**Abstract** Herein, we studied the mode characteristics of a few-mode fiber with an elliptical-core. We investigated the general expression of the Kerr nonlinear coupled-mode equations for the few-mode fiber and discussed the design process of an optical fiber parametric amplifier in detail. The dependence of the optical field mode distribution on core ellipticity was simulated using the COMSOL software, following which the phase mismatch factor in four-wave mixing and the corresponding mode field overlapping integral (or nonlinear coefficient) were calculated. In addition, we studied the degenerate four-wave mixing process of three mode groups in the elliptical-core few-mode fiber with a step refractive index distribution. The results show that when the  $LP_{21a}$ -mode pump power is 0.5 W, the maximum gain of 20.15 dB can be obtained and the elliptical-core tolerance size is 0.6  $\mu\text{m}$  in the gain deterioration range of 2 dB.

**Key words** fiber optics; few-mode fiber; fiber optical parametric amplifier; mode field distribution; nonlinear coefficient

**OCIS codes** 060.2280; 060.2320

## 1 引言

随着互联网流量的快速增长, 单模光纤传输系统的容量已接近非线性香农极限, 迫切需要开发新的复用维度来承载更多信息, 多芯少模空分复用技术<sup>[1]</sup>被认为是该领域中最具潜力的候选之一。与波分复用(WDM)系统类似, 空分复用系统的信号传输过程也需要光放大技术来同时保持多个复用信道光信号的光功率。鉴于单模掺铒光纤放大器

(EDFA)在 WDM 系统中已被广泛应用, 人们对少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)也进行了较多的研究, 已经有研究团队设计出了增益超过 20 dB 的 FM-EDFA<sup>[2-3]</sup>。Li 等<sup>[4]</sup>设计的低噪声少模拉曼放大器(FM-FRA)可获得约 15 dB 的增益。Guo 等<sup>[5]</sup>设计了一种少模参量放大器(FM-FOPA), 其可以产生 24 dB 的增益。FM-FOPA 具有更优秀的噪声抑制性能, 不仅能够达到与 FM-EDFA 同样的增益水平, 而且可以通过调整其抽运波长和模式将增益

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2018-12-27; 录用日期: 2019-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(61671108, 61505021)

\* E-mail: bjwu@uestc.edu.cn

范围扩展到 C 波带以外,获得针对不同信号模式的放大<sup>[4]</sup>。

目前,FM-FOPA 采用的光纤结构主要有圆芯<sup>[4]</sup>、椭圆芯<sup>[5-6]</sup>等类型。Nazemosadat 等<sup>[6]</sup>设计了一种适用于低阶模放大的圆芯光纤参量放大器,当输入抽运光的功率为 5 W 时,信号光最大可以产生 30 dB 的增益。Parmigiani 等<sup>[7]</sup>设计了一种圆芯型光纤参量放大器,通过实验完成了 17 dB 的低阶模放大。Guo 等<sup>[5]</sup>对椭圆芯色散移位少模光纤进行了研究以抑制简并模的耦合。

本文将系统研究纤芯椭圆度对于参量模式增益性能的影响,重点考察在一定增益劣化范围内所允许的光纤制造工艺的误差。研究表明,一些在圆芯光纤中简并的模式,在椭圆芯少模光纤中将不再简并,这样更有助于模式解复用或数字信号处理的算法补偿。通过优化椭圆少模光纤的结构,并借助少模非线性光纤的四波混频耦合模方程,对少模光纤参量放大器进行了仿真,分析了纤芯结构尺寸的容错性能。

## 2 FM-FOPA 中导波光的耦合模方程

传统的波分复用四波混频过程可以解释光纤参量放大原理。对于简并四波混频,将角频率分别为  $\omega_p$  和  $\omega_s$  的抽运光和信号光一起注入到非线性光纤中,当满足相位匹配条件时光纤输出端的信号光会得到放大,同时在输出端产生频率为  $\omega_i$  的闲频光。文中用  $LP_{q,\omega}$  表示线偏振模的空间分布,其中下标  $q$  ( $q \geq 1$ ) 表示模式强度对空间方位角的周期依赖性,角周期为  $\pi/q$ ,  $\omega$  表示模式强度沿径向分布的层数。 $LP_{q,\omega,a}$  定义为  $LP_{q,\omega}$  简并状态下模式 a, TE 表示横电模, TM 表示横磁模。类似地,对于本文研究的 FM-FOPA 模分复用系统,将  $LP_{21a}$  模式的抽运光和  $LP_{11a}$  模式的信号光通过模式复用器(MMUX)耦合到椭圆纤芯高非线性光纤(EC-HNLF)。光纤发生四波混频,产生  $LP_{21b}$  模式的闲频光,同时  $LP_{11a}$  模式的信号光得到放大。在输出端,由模式解复用器(MDMUX)解复用出  $LP_{11a}$  信号光,从而实现少模参量放大,其原理如图 1 所示,图中  $a$  和  $b$  分别为椭圆纤芯在水平和垂直方向的半轴长度, $R$  为圆形包层半径。

光纤四波混频起源于光纤的三阶非线性效应<sup>[8]</sup>,4 个模式(分别用下标  $m, n, k, l$  表示)导波光束之间的四波混频过程可以用它们的光场包络  $A_j$  ( $j = m, n, k, l$ ) 满足的非线性耦合模方程<sup>[9-10]</sup>表示,

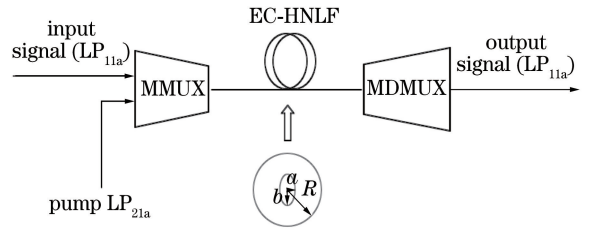


图 1 FM-FOPA 原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of FM-FOPA

即

$$\frac{\partial A_l}{\partial z} = i \sum_{m,n,k,l} \gamma_{mnlk} \times \frac{D_{mn}}{D_p} A_m A_n A_k^* \exp[i(\Delta\beta_{mnlk}z - \Delta\omega_{mnlk}t)], \quad (1)$$

式中: $z$  为非线性光纤的长度; $t$  为时间; $\Delta\omega_{mnlk} = \omega_m + \omega_n - \omega_k - \omega_l = 0$  (即导波光之间满足能量守恒关系);  $\Delta\beta_{mnlk} = \beta_m + \beta_n - \beta_k - \beta_l$  为相位失配因子,  $\beta_j$  为传播常数;  $\gamma_{mnlk} = n_2 k_0 f_{mnlk}$  为非线性系数, 其中  $n_2$  是光纤的非线性折射率,  $f_{mnlk} = \iint F_m F_n F_k^* F_l^* dx dy$  为归一化横向光场分布  $F_j(x, y)$  的交叠积分, 波数  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为导波光波长;  $D_{mn}$  是光波简并因子, 对应于简并四波混频过程, 若  $m = n$ ,  $D_{mn} = 1$ , 否则  $D_{mn} = 2$ ; 相同偏振作用时  $D_p = 1$ , 正交偏振时  $D_p = 3$ 。(1) 式忽略了传输损耗, 并将自相位调制和交叉相位调制视为四波混频<sup>[11]</sup>的特殊情形。

由(1)式可知,对于同频率、同偏振方向的不同模式线偏振光,它们之间的简并四波混频过程可具体表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial A_p}{\partial z} = i[(\gamma_{pppp} |A_p|^2 + 2\gamma_{ppss} |A_s|^2 + 2\gamma_{ppii} |A_i|^2) A_p + 2\gamma_{ppsi} A_s A_i A_p^* \exp(-i\Delta\beta z)] \\ \frac{\partial A_s}{\partial z} = i[(\gamma_{ssss} |A_s|^2 + 2\gamma_{ppss} |A_p|^2 + 2\gamma_{ssii} |A_i|^2) A_s + \gamma_{ppsi} A_p^2 A_i^* \exp(i\Delta\beta z)] \\ \frac{\partial A_i}{\partial z} = i[(\gamma_{iiii} |A_i|^2 + 2\gamma_{ppii} |A_p|^2 + 2\gamma_{ssii} |A_s|^2) A_i + \gamma_{ppsi} A_p^2 A_s^* \exp(i\Delta\beta z)] \end{cases}, \quad (2)$$

式中:下标 p, s, i 分别表示抽运光、信号光和闲频光; 相位失配因子  $\Delta\beta = 2\beta_p - \beta_s - \beta_i$ 。需指出的是,少模光纤中导波光的模场分布不同,它们之间的非线性系数也有差异(不同于单模光纤情形)。根据(2)式可数值求解出光场包络  $A_j$  ( $j = m, n, k, l$ ) 随光纤长度的依赖关系。

### 3 少模椭圆纤芯光纤的模式特性

光纤参量过程的有效发生须满足相位匹配条件<sup>[12-13]</sup>,这取决于非线性光纤的色散特性<sup>[14-16]</sup>,可通过设计波导几何形状和材料折射率特性对相位匹配条件进行控制。采用基于有限元算法的COMSOL仿真软件来分析纤芯椭圆率对光纤模式的影响,并计算不同模式的非线性系数<sup>[17]</sup>。少模椭圆纤芯光纤仿真结构图如图1所示。纤芯折射率 $n_1$ 和包层折射率 $n_2$ 分别为1.4486和1.444。具体的仿真过程如下:1)建立椭圆纤芯的COMSOL仿真模型,并在软件中设置包层和纤芯的折射率;2)对运行结果进行模式分析;3)以纤芯折射率为搜索模态的基准点,设置待求的模态数,计算出各模式对应的有效折射率 $n_{\text{eff}}$ ,并由 $\beta = n_{\text{eff}}k_0$ 求出相应的相位失配因子 $\Delta\beta$ ;4)在仿真有效折射率的派生值模块中,通过自定义算子公式获取模场分布 $F_{m,n,k,l}(x,y)$ 的信息,通过面积分的子模块计算交叠积分 $f_{mnl}$ 。

#### 3.1 空间模式演化

为了方便分析,取椭圆纤芯横向半轴长度 $a = 8.20 \mu\text{m}$ ,改变纵向半轴长度 $b$ ,则光纤支持的模式及其有效折射率的变化如图2所示,其中工作波长为1550 nm。由图2可知,当 $a = b = 8.2 \mu\text{m}$ 时,光纤纤芯为圆形纤芯,此时只存在4个线偏振模式,分别为 $\text{LP}_{01}$ 、 $\text{LP}_{11a}$ 、 $\text{LP}_{11b}$ 和 $\text{LP}_{02}$ 。若进一步减小椭圆纤芯的纵向半轴长度 $b$ ,所支持的模式数量也随之减少;相反,椭圆芯少模光纤所支持的模式会增多,出现 $\text{LP}_{21a}$ 、 $\text{LP}_{21b}$ 模式。由图2可知,椭圆纤芯少模光纤纵向半轴长度 $b$ 的变化,不但会影响模式传播常数,而且会改变模场的空间分布,其模场的空间分布甚至会偏离圆芯少模光纤的模场特点。

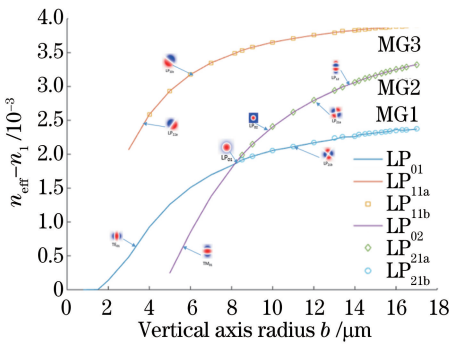


图2 椭圆芯少模光纤的模式特性

Fig. 2 Mode characteristics of elliptical-core few-mode fiber

#### 3.2 相位失配因子的变化

在圆芯少模光纤中,具有相同 $S$ 值的线偏振模

$\text{LP}_{q,\omega}$ 属于同一个模群(MG),其中 $S = q + 2(\omega - 1)$ ,显然该结论不适用于椭圆芯少模光纤情形。例如,椭圆芯少模光纤中, $\text{LP}_{21a}$ 和 $\text{LP}_{21b}$ 不再简并。由图2可知,根据有效折射率大小,可将椭圆芯少模光纤中导波光的模式分为3个模群:MG1( $\text{LP}_{01}$ 、 $\text{LP}_{21b}$ )、MG2( $\text{LP}_{21a}$ 、 $\text{LP}_{02}$ )和MG3( $\text{LP}_{11b}$ 、 $\text{LP}_{11a}$ )。同一模群内不同模式导波光的有效折射率十分接近,可将上述3个模群的传播常数分别记为 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 和 $\beta_3$ 。于是,可形成6个简并的四波混频组合,涉及3个不同的相位失配因子分别为

$$\begin{cases} \Delta\beta_{1123} = \Delta\beta_{1132} = 2\beta_1 - \beta_2 - \beta_3 \\ \Delta\beta_{2213} = \Delta\beta_{2231} = 2\beta_2 - \beta_1 - \beta_3 \\ \Delta\beta_{3312} = \Delta\beta_{3321} = 2\beta_3 - \beta_1 - \beta_2 \end{cases} \quad (3)$$

3个相位失配因子大小随纵向半轴长度 $b$ 的变化如图3所示,随着 $b$ 的增大, $\Delta\beta_{1123}/k_0$ 由最小值 $0.7 \times 10^{-3}$ 逐渐变大, $\Delta\beta_{3312}/k_0$ 由 $4.5 \times 10^{-3}$ 变化到最小值 $2 \times 10^{-3}$ ,而 $\Delta\beta_{2213}/k_0$ 由 $-3.7 \times 10^{-3}$ 逐渐增大至0。当 $b = 14.5 \mu\text{m}$ 时, $\Delta\beta_{2213} \approx 0$ ,满足准相位匹配条件<sup>[17]</sup>。

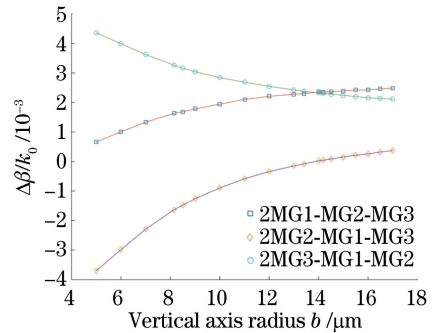


图3 相位失配因子随纵向半轴长度 $b$ 变化曲线

Fig. 3 Variation of phase mismatching factors with semi-axial length  $b$

#### 3.3 少模光纤的非线性系数计算

在少模光纤中导波光四波混频演化过程不仅依赖于相位匹配条件,还与各自的非线性系数大小有关。下面将进一步研究满足准相位匹配条件(即 $b \approx 14.5 \mu\text{m}$ )时的简并四波混频情形。根据上面的分析,从MG2中选择 $\text{LP}_{21a}$ 模式作为抽运光,从MG1和MG3中分别选取 $\text{LP}_{21b}$ 和 $\text{LP}_{11a}$ 作为闲频光和信号光。由上文可知 $\gamma_{mnl} = n_2 k_0 f_{mnl}$ ,其中 $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ,故计算非线性系数的关键是根据模场分布 $F_{m,n,k,l}(x,y)$ 计算出交叠积分 $f_{mnl}$ 。表1给出了 $b = 14.5 \mu\text{m}$ 时抽运光 $\text{LP}_{21a}$ 、信号光 $\text{LP}_{11a}$ 、闲频光 $\text{LP}_{21b}$ 之间非线性系数的计算结果,此时 $\Delta\beta_{2213} = \Delta\beta_{2231} \approx 0$ 。需指出的是,在发生

表 1  $b=14.5 \mu\text{m}$  和  $b=9.0 \mu\text{m}$  两种情形下不同模群组合之间的非线性系数

Table 1 Nonlinear coefficients corresponding to two different MG combinations when  $b=14.5 \mu\text{m}$  or  $b=9.0 \mu\text{m}$

Nonlinear coefficient / ( $\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ )	$\gamma_{\text{ppsi}}$	$\gamma_{\text{ppss}}$	$\gamma_{\text{ssii}}$	$\gamma_{\text{ppii}}$	$\gamma_{\text{ssss}}$	$\gamma_{\text{pppp}}$	$\gamma_{\text{iiii}}$
$b=14.5 \mu\text{m}$	5.565	7.516	13.328	6.071	12.995	10.690	9.058
$b=9.0 \mu\text{m}$	0.421	1.029	1.168	0.268	3.795	0.669	0.865

上述“2231”四波混频过程中,因为其他模间四波混频过程(如“2233”等)的相位失配大于  $0.0001 \text{ rad/m}$  量级,所以其他模间的四波混频对上述增益计算结果的影响可以忽略<sup>[18]</sup>,尽管其非线性系数可能高于“2231”过程。为了便于后面比较分析,表 1 还列出  $b=9 \mu\text{m}$  时  $\text{LP}_{01}$  抽运光、 $\text{LP}_{11a}$  信号光、 $\text{LP}_{02}$  闲频光之间的非线性系数,此时  $\Delta\beta_{1123} = \Delta\beta_{1132} = 0.00723 \text{ rad/m}$ 。

### 4 椭圆芯少模光纤的参量放大特性

在四波混频的参量过程中,抽运光的能量会转移到信号光上,从而达到放大信号的效果<sup>[15]</sup>。从 MG1、MG2 和 MG3 模群中分别选取抽运光  $\text{LP}_{21a}$ 、信号光  $\text{LP}_{11a}$  和闲频光  $\text{LP}_{21b}$ ,计算  $b=14.5 \mu\text{m}$  时信号增益对光纤长度的依赖关系,结果如图 4 所示,其中抽运光功率  $P_{10} = 0.5 \text{ W}$ ,信号光功率  $P_{30} = 0.001 \text{ W}$ 。由图 4 可以看出,参量增益与光纤长度基本上呈现周期性变化,获得最大增益所需的最短光纤长度为  $1.2 \text{ km}$ 。

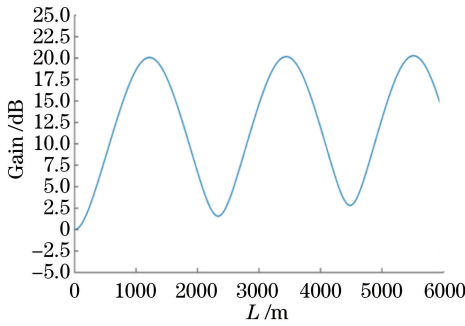


图 4 增益对光纤长度的依赖曲线 ( $b=14.5 \mu\text{m}$ )

Fig. 4 Dependence of gain on fiber length ( $b=14.5 \mu\text{m}$ )

按照上述同样方法,在  $b=14.5 \mu\text{m}$  附近计算出参量增益随半轴长  $b$  的依赖关系,结果如图 5 所示,其中光纤长度为  $1.2 \text{ km}$ 。由图 5 可以看出,增益曲线是不平坦的,在所计算的范围内出现了 3 个增益极大值  $19.6 \text{ dB}$ ,  $20.06 \text{ dB}$ ,  $20.16 \text{ dB}$ , 对应的  $b$  分别为  $13.8, 14.5, 16.05 \mu\text{m}$ 。在增益劣化  $2 \text{ dB}$  的范围内,所允许的椭圆纤芯误差也有所不同。由图 5 可知,对于  $b=16.05 \mu\text{m}$  情形,当抽运光功率为  $P_{10} = 0.5 \text{ W}$  时可获得的最大参量增益为  $20.16 \text{ dB}$ ,此时,

若椭圆纤芯半轴长度变化  $0.6 \mu\text{m}$ ,参量增益将降低  $2 \text{ dB}$ 。计算表明,当抽运光功率增加到  $4 \text{ W}$  时,参量增益可达  $30 \text{ dB}$ 。可见,对于所考虑的椭圆纤芯光纤,其增益劣化  $2 \text{ dB}$  范围内所允许的最大椭圆纤芯误差为  $0.6 \mu\text{m}$ 。相比而言,对于圆芯光纤情形(即  $b=8.2 \mu\text{m}$ ),由于模式的相位失配较大(参见图 3),四波混频参量增益非常小。可见,优化设计椭圆纤芯结构,可使相应模式的光束实现相位匹配,从而有效提高参量增益。

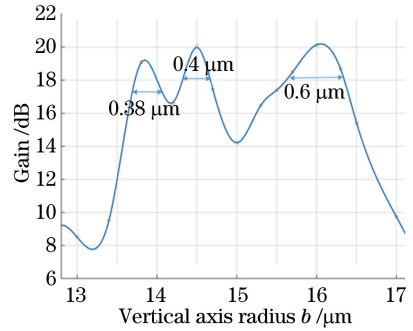


图 5 增益随半轴长度  $b$  的变化曲线 ( $P_{10}=0.5 \text{ W}$ )

Fig. 5 Variation of gain with semi-axial length  $b$  ( $P_{10}=0.5 \text{ W}$ )

与前面  $b=14.5 \mu\text{m}$  时的匹配情形不同,以  $b=9.0 \mu\text{m}$  时的相位失配情形为例,计算此时的参量增益并将其与相位匹配的情形进行对比。从 3 个模群中选择另一种相位失配尽可能小的四波混频模式组合状态,即在模群 MG1 中选抽运光  $\text{LP}_{01}$ 、MG3 中选信号光  $\text{LP}_{11a}$ 、MG2 中选闲频光  $\text{LP}_{02}$ 。保持输入的抽运光和信号光的功率不变,计算出的参量增益只有  $2.65 \text{ dB}$ 。事实上,采用类似于图 5 的分析方法,在本文简并四波混频情况下, $\text{LP}_{01}$  不适合作为简并四波混频的抽运光,如 Nazemosadat 等<sup>[7]</sup> 选择  $\text{LP}_{11}$  和  $\text{LP}_{01}$  共同作为非简并四波混频的抽运光; Guo 等<sup>[5]</sup> 则使用  $\text{LP}_{11a}$  和  $\text{LP}_{11b}$  作为非简并四波混频的抽运光,并提出了使用  $\text{LP}_{02}$  作为简并四波混频的抽运光。

需指出的是:1) 参量增益大小不仅与相位是否匹配有关,还依赖于模式非线性系数。模式非线性系数是模场分布的函数,故即使在同样的准相位匹配条件下,不同的纤芯椭圆率也可能对应着不同的

参量增益,如图5所示。2)在选定椭圆纤芯尺寸的情形下,上述分析方法也可以计算出对应于不同信号光波长的增益谱曲线,从而分析增益带宽问题<sup>[7]</sup>,但是具体仿真过程比较耗时,限于篇幅,本文暂不考虑。

## 5 结 论

研究了椭圆纤芯少模光纤的模式特性,通过COMSOL仿真方法优化纤芯结构,有效提高了少模光纤参量放大器的增益。具体分析了同频率、同偏振的3个模群之间的简并参量过程,根据3个模群的相位失配因子曲线,确定了LP<sub>21a</sub>的光抽运方案。当抽运光功率为0.5 W时,LP<sub>11a</sub>信号光的参量增益达到20.15 dB。计算结果表明,通过采用椭圆纤芯结构,少模光纤参量放大器不但能够有效提高参量增益,而且可以容忍一定的椭圆率误差,在增益劣化2 dB范围内所允许的椭圆纤芯半轴长度的误差为0.6 μm。

## 参 考 文 献

- [1] Mukasa K, Imamura K, Tsuchida Y, *et al.* Multi-core fibers for large capacity SDM[C]//Optical Fiber Communication Conference 2011, March 6-10, 2011, Los Angeles, California. Washington D. C.: OSA, 2011: OWJ1.
- [2] Mumtaz S, Essiambre R J, Agrawal G P. Nonlinear propagation in multimode and multicore fibers: generalization of the Manakov equations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(3): 398-406.
- [3] 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.
- [4] Li J X, Wang L L, Du J B, *et al.* Experimental demonstration of a few-mode Raman amplifier with a flat gain covering 1530-1605 nm[J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4530-4533.
- [5] Guo C, Zhang Z Z, Zhao N B, *et al.* Design of elliptical-core few-mode fibers for optical parametric amplification [C] // Optical Fiber Communication Conference 2017, March 19-23, 2017, Los Angeles, California, United States. Washington D. C.: OSA, 2017: W2A.20.
- [6] Nazemosadat E, Lorences-Riesgo A, Karlsson M, *et al.* Design of highly nonlinear few-mode fiber for C-band optical parametric amplification[J]. Journal of

Lightwave Technology, 2017, 35(14): 2810-2817.

- [7] Parmigiani F, Jung Y, Horak P, *et al.* C- to L- band wavelength conversion enabled by parametric processes in a few mode fiber [C] // Optical Fiber Communication Conference 2017, March 19-23, 2017, Los Angeles, California, United States. Washington D. C.: OSA, 2017: Th1F.4.
- [8] Cao H. Theoretical and experimental study on fiber optical parametric amplifiers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006:11-20. 曹辉. 光纤参量放大器的理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006:11-20.
- [9] Mao X R, Kou Z F, Zhang J H. Two improved methods of suppression four wave mixing effect in optical fiber transmission [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 080601. 毛昕蓉, 寇召飞, 张建华. 抑制光纤传输中四波混频效应的两种改进方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 080601.
- [10] Yuan H, Wu B J, Zhou X Y, *et al.* Equalization and regeneration of four-wave mixing for time-interleaved channel[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206002. 袁浩, 武保剑, 周星宇, 等. 时隙交织信道的四波混频均衡再生[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0206002.
- [11] Cao Y M, Wu B J, Wan F, *et al.* Principle and noise performance of optical phase arithmetic devices using four wave mixing[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(9): 094208. 曹亚敏, 武保剑, 万峰, 等. 四波混频光相位运算器原理及其噪声性能研究[J]. 物理学报, 2018, 67(9): 094208.
- [12] Xiao Y Z, Essiambre R J, Desgroseilliers M, *et al.* Theory of intermodal four-wave mixing with random linear mode coupling in few-mode fibers[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 32039-32059.
- [13] Bebawi J, Kandas I, El-Osairy M, *et al.* A comprehensive study on EDFA characteristics: temperature impact [J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1640.
- [14] Nazemosadat E, Pourbeyram H, Mafi A. Phase matching for spontaneous frequency conversion via four-wave mixing in graded-index multimode optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(2): 144-150.
- [15] Liu Y L. Parameters optimization and the crosstalk characteristics research in optical parametric amplifier [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,

- 2015:6-18.
- 刘宇林. 光纤参量放大器参数优化及串扰特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015:6-18.
- [16] Liu Q, Bi W H, Wang S W, *et al.* Few-mode fiber temperature sensor based on interference between  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$  modes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0206001.
- 刘强, 毕卫红, 王思文, 等. 基于  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模式干涉的少模光纤温度传感器 [J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0206001.
- [17] Xu Z. Control the orbital angular momentum in third-harmonic generation using quasi-phase-matching [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018:5-27.
- 徐周. 通过准相位匹配控制三倍频过程中的光子轨道角动量 [D]. 南京: 南京大学, 2018:5-27.
- [18] Essiambre R J, Mestre M A, Ryf R, *et al.* Experimental investigation of inter-modal four-wave mixing in few-mode fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(6): 539-542.