

## 椭圆芯有源光纤中模式的增益特性

王齐全, 武保剑\*, 江歆睿

电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

**摘要** 为实现少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)的线偏振(LP)模态控制,采用多物理场仿真软件研究了椭圆芯光纤中的模场分布及其有效折射率随椭圆参数(纤芯的长短轴之比)的演化。当椭圆参数大于 1.050 时,  $TM_{01}$  和  $HE_{21e}$ 、 $TE_{01}$  和  $HE_{21c}$  分别演化为  $LP_{11}$  奇模和偶模,奇偶模的有效折射率差大于  $10^{-4}$ ,模式串扰可以忽略。用 LP 模的叠加形式近似表达椭圆芯光纤中的模场,比较了椭圆芯有源光纤中 LP 近似模场与精确模场的增益计算误差。当椭圆参数小于 1.250 时,采用 LP 近似模场计算的三模增益误差小于 0.5 dB。研究表明,采用 LP 近似模场分析方法可大大降低椭圆芯 FM-EDFA 的设计复杂性。

**关键词** 光纤光学; 掺铒光纤放大器; 椭圆纤芯; 模态控制

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2106001

## Modal Gain Characteristics in Active Fibers with Elliptical Core

Wang Qiquan, Wu Baojian\*, Jiang Xinrui

Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China

**Abstract** In order to control the linear polarization (LP) mode in few-mode erbium-doped fiber amplifiers (FM-EDFAs), the dependence of mode field distribution and effective refractive index in optical fibers with elliptical cores on the elliptical parameter (the ratio of the major to minor axis length of the elliptical core) is investigated by multi-physics field simulation software. When the elliptical parameter is more than 1.050,  $TM_{01}$  and  $HE_{21e}$ , as well as  $TE_{01}$  and  $HE_{21c}$  can be expressed by  $LP_{11}$  odd and even modes which have an effective refractive index difference of larger than  $10^{-4}$ , with negligible mode crosstalk. This paper approximately constructs the mode field in an optical fiber with an elliptical core through the superposition of the LP modes, and compares the gain errors calculated by the approximate LP mode field and the precise mode field in the active fiber with an elliptical core. When the elliptical parameter is less than 1.250, the three-mode gain error calculated by the approximate LP mode field is smaller than 0.5 dB. The results show that the approximate LP mode field can greatly reduce the design complexity of FM-EDFAs with elliptical cores during analysis.

**Key words** fiber optics; erbium-doped fiber amplifier; elliptical core; mode control

## 1 引言

在采用密集波分复用和多阶调制格式后,单模光纤通信系统传输容量可超过 100 Tb/s,但该传输容量已逼近非线性香农极限<sup>[1]</sup>。空分复用(SDM)技术可以将光纤容量进一步提升至 Pb/s<sup>[2]</sup>。模分复用(MDM)系统主要由少模光纤、少模光纤放大器和模式复用/解复用器等器件组成<sup>[3-5]</sup>。在传统少模光纤中,同一模式组内的奇偶本征模是简并的。为解决模式耦合导致的模式信道串扰问题,接收端往往采用多人多出

(MIMO)数字信号处理进行解复用,此时系统复杂度上升<sup>[6]</sup>。

为了降低系统成本,发挥少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)能够同时放大多个模式信号的优势,就要更好地控制少模掺铒光纤(FM-EDF)中模态的传输、降低模式间串扰,这还有助于简化或去除收发端复杂的 MIMO 均衡技术<sup>[7-9]</sup>。在模分复用系统中,采用椭圆芯少模光纤(EC-FMF)是实现模态控制的重要手段之一。人们对椭圆光纤的研究可以从三个方面进行归纳:1)将单模光纤的纤芯拉制成椭圆形,实现光波的偏

收稿日期: 2022-03-30; 修回日期: 2022-04-19; 录用日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(62171078)、国家重点研发计划(2018YFB1801003)

通信作者: \*bjwu@uestc.edu.cn

振保持传输,有关的单模产品已相当成熟<sup>[10]</sup>;2)在少模椭圆光纤传输方面有少量研究,利用 EC-FMF 的双折射效应在实现偏振模式保持的同时,能够有效地降低光纤中模式的耦合,从而实现模间串扰的降低<sup>[11]</sup>;3)关于椭圆芯有源光纤在 FM-EDFA 中的应用的研究很少。文献[12]采用改进的化学气相沉积(MCVD)方法拉制了椭圆率为 1.3 的 FM-EDF(主轴半径为 8.8 mm,环形掺铒分布),采用不同波长对应不同线偏振(LP)模式的方法测量了 LP 模式的开关增益,完成了 5 个模式的低串扰传输实验。本文将系统地研究纤芯椭圆参数对少模光纤精确模式的影响,给出相应的 LP 近似模场表示,并将其用于简化计算椭圆 FM-EDFA 的增益特性,为设计椭圆纤芯结构参数提供理论指导。

本文以均匀掺杂的阶跃折射率椭圆光纤为例,分析了光纤中  $TM_{01}$ (TM 为横磁模)和  $HE_{21e}$ (HE 为混合模)、 $TE_{01}$ (TE 为横电模)和  $HE_{21e}$  4 个精确模式随纤芯椭圆参数的变化,并将其模场用更加通用的 LP 模叠加形式近似表示。研究表明,随着纤芯椭圆参数  $\eta$ (长轴与短轴之比)的增大, $TM_{01}$  和  $HE_{21e}$ 、 $TE_{01}$  和  $HE_{21e}$  模式会逐渐演化成 LP 的奇模和偶模。当  $\eta \geq 1.05$  时,模式  $LP_{11e}$  与  $LP_{11o}$  的有效折射率差为  $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$ ,此时两个模式完全解简并。若采用椭圆芯掺铒光纤作为有源

介质,则可控制 FM-EDFA 中 LP 模态进行无串扰传输。利用 LP 近似模场与 COMSOL 导出的精确模分别计算了 FM-EDFA 三个模式的增益,发现当  $\eta \leq 1.250$  时,LP 近似计算所导致的增益误差小于 0.5 dB。采用 LP 近似模场分析方法,可大大降低椭圆芯 FM-EDFA 的设计复杂性。

## 2 椭圆芯光纤的模式特性

### 2.1 椭圆光纤中模式的演化

在理想的圆光纤中,基模  $HE_{11o}$  和  $HE_{11e}$  是简并的,对应于  $LP_{01}$  模群,而次模  $TM_{01}$ 、 $HE_{21e}$ 、 $TE_{01}$  和  $HE_{21o}$  4 个精确模对应于  $LP_{11}$  模群。作为例子,研究了  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  两个模群中 6 个精确模式随纤芯椭圆参数的变化情况。椭圆芯光纤的结构如图 1 所示,纤芯的长轴与短轴分别对应于  $x$  轴和  $y$  轴, $n_1$  和  $n_2$  分别表示纤芯和包层的折射率。定义椭圆参数  $\eta$  为纤芯的长轴( $a$ )与短轴( $b$ )的比值,即  $\eta = a/b$ 。在椭圆参数  $\eta$  的变化过程中,纤芯横截面的面积不变,即  $ab = r_1^2$ ,并暂且认为,纤芯和包层的折射率分布也不变。在 COMSOL 仿真中,所使用的参数为:光波波长为 1550 nm;圆光纤的纤芯半径( $r_1$ )和包层半径( $r_2$ )分别为  $8 \mu\text{m}$  和  $62.5 \mu\text{m}$ ,二者的折射率分别为 1.459 和 1.439。

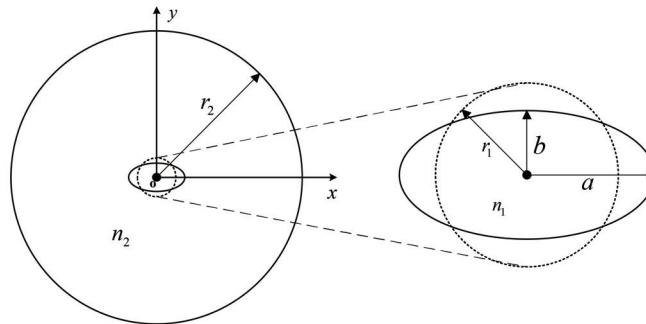


图 1 椭圆纤芯光纤结构

Fig. 1 Structure of elliptical-core fiber

图 2 给出了椭圆参数取三个典型值(1.000、1.001、1.050)时 6 个精确模式的模态。为了便于描述光纤的模态,约定波型符号的上标“x”和“y”分别表示偏振方向,下标“e”和“o”分别表示偶模和奇模。由图 2 可以看出:当纤芯椭圆参数增加到 1.050 时, $HE_{11o}$  和  $HE_{11e}$  逐渐演化成  $LP_{01x}$  和  $LP_{01y}$ ,电场强度仍呈高斯分布; $HE_{21o}$  和  $TM_{01}$  分别演化为  $LP_{11x}$  和  $LP_{11y}$ ,而  $HE_{21e}$  和  $TE_{01}$  分别演化为  $LP_{11e}$  和  $LP_{11o}$ 。6 个模式的模式有效折射率( $n_{\text{eff}}$ )随椭圆参数的变化将在 2.3 节中进行分析。可见,椭圆芯光纤中的模式用 LP 模表示更加方便。

### 2.2 椭圆芯光纤中模场的 LP 模表示

圆光纤的横向电场和任意截面中横向电场的形式有很大区别。从理想圆光纤到椭圆光纤的变化一定存在一个过渡区。一般来说,轻度不对称光纤中模式场随空间位置的变化与圆光纤情形相似,但偏振特性变

化较大。将椭圆芯光纤的横向电场( $e_{11} \sim e_{14}$ )用 LP 模叠加形式<sup>[13]</sup>近似表示为

$$\begin{cases} e_{11} = F_l(R) \{ \cos(l\phi) \hat{x} + a_1 \sin(l\phi) \hat{y} \} \\ e_{12} = F_l(R) \{ \cos(l\phi) \hat{x} - a_2 \sin(l\phi) \hat{y} \} \\ e_{13} = F_l(R) \{ \sin(l\phi) \hat{x} - a_3 \cos(l\phi) \hat{y} \} \\ e_{14} = F_l(R) \{ \sin(l\phi) \hat{x} + a_4 \cos(l\phi) \hat{y} \} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $l \geq 1$  为高阶模式; $\hat{x}$  为沿  $x$  轴的单位矢量; $\hat{y}$  为沿  $y$  轴的单位矢量; $\phi$  为圆坐标系自变量; $a_m > 0$  ( $m = 1, 2, 3, 4$ ) 对应于同一 LP 模群的 4 个模态,它们的取值依赖于纤芯与包层的折射率差和纤芯椭圆参数  $\eta$ ,用不同的  $a_m$  参数构建 LP 近似模场有助于定量分析每个模态随椭圆参数的变化规律,并且圆光纤情形下  $a_m = 1$ ;  $F_l(R)$  为满足标量波动方程的解,其表达式为

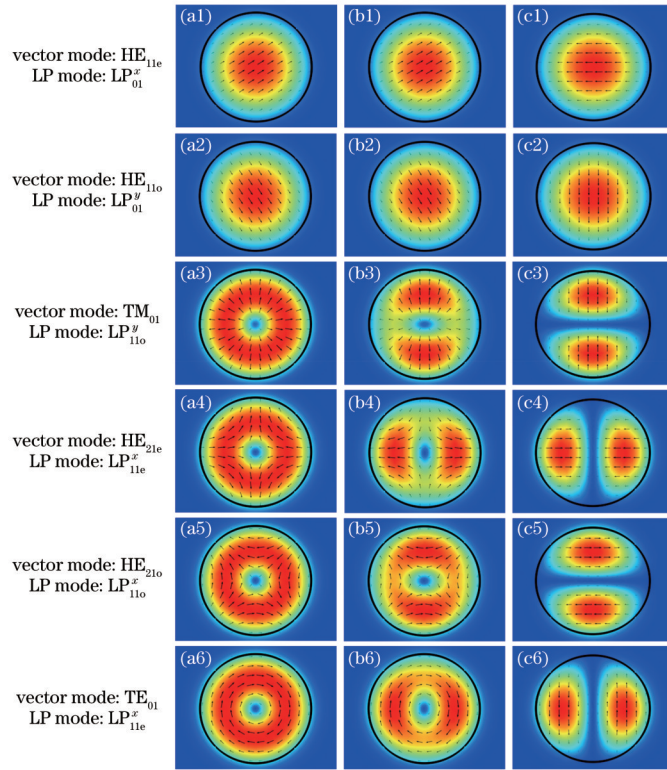


图 2 6 个精确模式的归一化电场分布和偏振态随纤芯椭圆参数的变化。(a1)~(a6)  $\eta=1.000$ ; (b1)~(b6)  $\eta=1.001$ ; (c1)~(c6)  $\eta=1.050$

Fig. 2 Normalized electric field distributions and polarization states of six vector modes varying with elliptical parameters. (a1)~(a6)  $\eta=1.000$ ; (b1)~(b6)  $\eta=1.001$ ; (c1)~(c6)  $\eta=1.050$

$$F_l(R) = \begin{cases} \frac{J_l(UR)}{J_l(R)}, & 0 < R \leq 1 \\ \frac{K_l(WR)}{K_l(R)}, & 1 < R \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $J_l$  是第一类贝塞尔函数;  $K_l$  是第二类变型贝塞尔函数;  $R=r/r_1$ , 其中  $r$  为实际半径;  $U$  为归一化横向相位参数;  $W$  为归一化横向衰减参数。

由式(1)可知, 椭圆芯光纤中的模式还可以用 LP 模的  $x$  偏振分量和  $y$  偏振分量叠加近似表示, 其中  $a_m$  值表示  $y$  偏振分量相对于  $x$  偏振分量所占的比重大小。当  $a_m \gg 1$  时, 模式会演化为  $LP^y$  模式。反之, 模式会演化为  $LP^x$  模式。因此,  $a_m$  的值可由  $y$  偏振分量的

最大值 ( $E_{y\max}$ ) 与  $x$  偏振分量的最大值 ( $E_{x\max}$ ) 之比得到, 即

$$a_m = E_{y\max}/E_{x\max} \quad (3)$$

图 3 展示了椭圆参数对  $a_m$  ( $TM_{01}$  和  $TE_{01}$ ) 和  $a_m^{-1}$  ( $HE_{21o}$  和  $HE_{21e}$ ) 的影响。由图 3(a) 可知,  $TM_{01}$  和  $TE_{01}$  分别对应于  $a_1$  和  $a_3$ , 它们近似正比于椭圆参数的改变量 ( $\eta - 1$ )。当  $\eta = 1.050$  时,  $a_1$  和  $a_3$  分别为 44.6 和 25.5, 此时  $y$  偏振的 LP 模式占主导。相应地,  $a_2^{-1}$  和  $a_4^{-1}$  分别为 44.4 和 24.6, 此时  $x$  偏振的 LP 模式占主导。上述分析与图 2 中的仿真结果一致。知道  $a_m$  的值后, 就可以近似表示椭圆芯光纤的空间模式分布, 后面将用它们计算椭圆芯掺铒光纤的模式增益, 并与 COMSOL 仿真得到的精确模场结果进行比较。

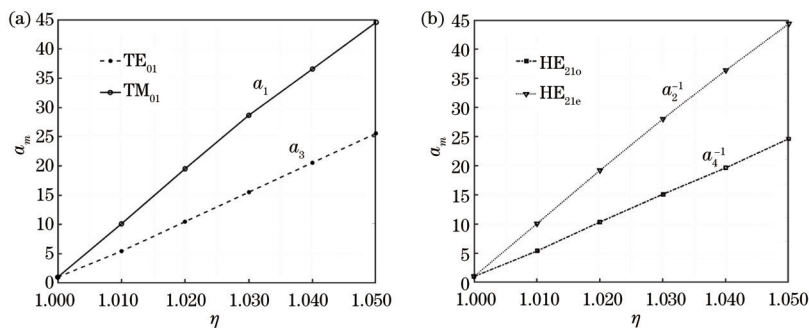


图 3 椭圆参数对  $a_m$  和  $a_m^{-1}$  的影响。(a)  $TE_{01}$  和  $TM_{01}$  的  $a_m$  值; (b)  $HE_{21o}$  和  $HE_{21e}$  的  $a_m^{-1}$  值

Fig. 3  $a_m$  and  $a_m^{-1}$  varying with elliptical parameter. (a)  $a_m$  of  $TE_{01}$  and  $TM_{01}$ ; (b)  $a_m^{-1}$  of  $HE_{21o}$  and  $HE_{21e}$

### 2.3 模式的有效折射率变化

利用 COMSOL 仿真模场分布的同时,还可以得到相应模式的有效折射率和模式之间的有效折射率

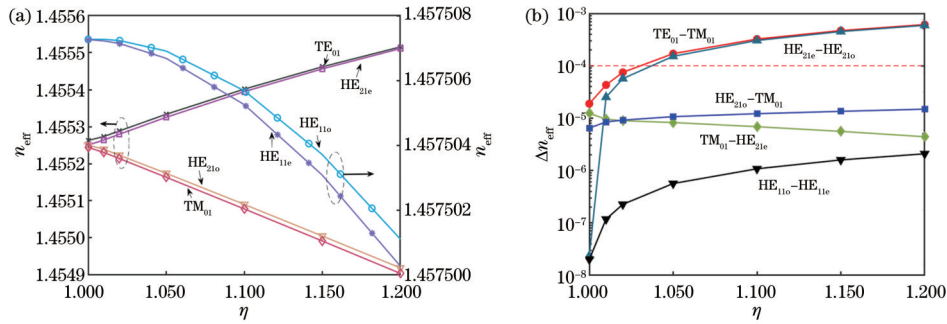


图 4 6 个模式的有效折射率和有效折射率差随椭圆参数的变化。(a)有效折射率;(b)有效折射率差

Fig. 4 Effective refractive index and effective refractive index difference between six modes varying with elliptical parameter. (a) Effective refractive index; (b) effective refractive index difference

当两个模式的有效折射率差大于  $10^{-4}$  时,可以认为两者不发生耦合。由图 4(a)可知,随着椭圆参数的增加, $HE_{11o}$  和  $HE_{11e}$  的有效折射率  $n_{eff}$  逐渐减小,两者的有效折射率差  $\Delta n_{eff}$  在增大,但始终没有超过  $10^{-4}$ ,故它们转换成的  $LP_{01}^x$  和  $LP_{01}^y$  模仍是近似简并的。

相应地,结合 2.1 节的分析结果,由图 4(b)可知,随着椭圆参数的增加, $HE_{21o}$  和  $TM_{01}$  分别演化为近似简并的  $LP_{01}^x$  和  $LP_{01}^y$ ,  $HE_{21e}$  和  $TE_{01}$  分别演化为近似简并的  $LP_{11e}^x$  和  $LP_{11e}^y$ 。当  $\eta \geq 1.050$  时,模式  $LP_{11e}$  与  $LP_{11o}$  的有效折射率差为  $\Delta n_{eff} > 10^{-4}$ ,此时两个模式不发生耦合,即椭圆光纤中次模解简并为  $LP_{11e}$  和  $LP_{11o}$  两个模式群组。因此,当椭圆参数为  $\eta \geq 1.050$  时,EC-FMF 中可实现  $LP_{01}$ 、 $LP_{11e}$  和  $LP_{11o}$  三个空间模式的无串扰传输。

### 3 椭圆芯少模掺铒光纤的增益计算

通常情况下,采用圆形 FM-EDF 构建 FM-

差。图 4(a)、(b)分别画出了  $HE_{11o}$ 、 $HE_{11e}$ 、 $TM_{01}$ 、 $HE_{21o}$ 、 $TE_{01}$  和  $HE_{21e}$  6 个模式在不同椭圆参数下的仿真结果。

EDFA。根据 2.3 节的分析,若 FM-EDFA 中采用椭圆芯的有源掺铒光纤,则  $LP_{01}$ 、 $LP_{11e}$  和  $LP_{11o}$  三个空间模式可在有源光纤中无串扰地独立传输,进而可实现模态控制。下面研究椭圆光纤 FM-EDFA 的三模放大特性,通过与精确模场比较,分析 LP 近似模场对增益计算的影响。为了方便比较,这里暂且考虑  $\eta = 1.050$  的情形,且有源光纤的结构参数与 2.1 节保持一致。纤芯采用均匀掺杂,铒离子的分子浓度为  $N_0 = 10^{24} \text{ m}^{-3}$ [14]。

所考虑的椭圆光纤 FM-EDFA 结构配置如图 5 所示,其中 FM-WDM 为少模波分复用器,FM-DWDM 为少模波分解复用器。信号光与泵浦光的波长分别为 1550 nm 和 980 nm。 $LP_{01}$ 、 $LP_{11e}$  和  $LP_{11o}$  模式信号光的输入功率均为 0.1 mW。采用  $LP_{01}$  模式的前向泵浦方式,泵浦功率为 300 mW。根据 FM-EDFA 的强度模型[13]研究信号和泵浦光模式的功率演化,计算中忽略自发辐射放大(ASE)对增益的影响。

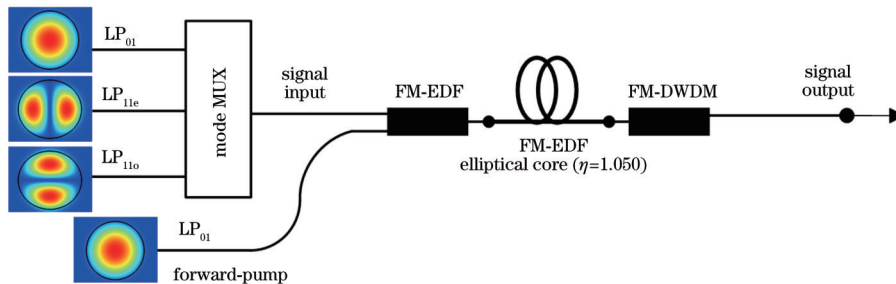


图 5 FM-EDFA 结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of FM-EDFA

在 FM-EDFA 中,信号光功率( $P_{s,i}$ )和前向泵浦光功率( $P_{p,j}$ )的演化方程为

$$\frac{dP_{s,i}}{dz} = P_{s,i} \Gamma_{s,i} (N_2 \sigma_{es} - N_1 \sigma_{as}) - \alpha_s P_{s,i}, \quad (4)$$

$$\frac{dP_{p,j}}{dz} = P_{p,j} \Gamma_{p,j} (N_2 \sigma_{ep} - N_1 \sigma_{ap}) - \alpha_p P_{p,j}, \quad (5)$$

式中: $\Gamma_{s,i}$  和  $\Gamma_{p,j}$  分别为信号光第  $i$  个模式和泵浦光第  $j$

个模式的归一化光强分布; $N_2$  和  $N_1$  分别为上能级和下能级的铒离子浓度,且铒离子总浓度为  $N_0 = N_1 + N_2$ ;  $\sigma_{es}$  和  $\sigma_{ep}$  分别为信号光和泵浦光的发射截面; $\sigma_{as}$  和  $\sigma_{ap}$  分别为信号光和泵浦光的吸收截面; $\alpha_s$  和  $\alpha_p$  分别为信号光和泵浦光的背景损耗系数。

VPI 仿真软件中掺铒光纤的发射谱和吸收谱如图 6 所示,1550 nm 信号光的发射截面和吸收截面( $\sigma_{es}$  和

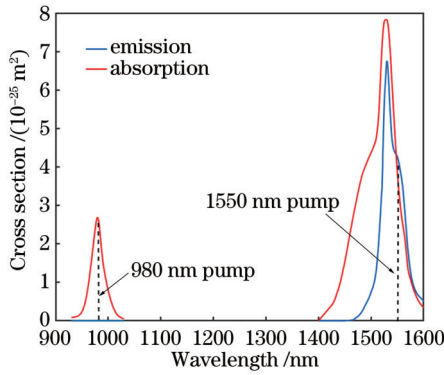


图6 掺铒光纤的发射谱和吸收谱

Fig. 6 Emission and absorption spectra of erbium-doped fiber

$$N_2(z) = \frac{\frac{1}{h\nu_p} \sum_{j=1}^{m_p} P_{p,j}(z) \sigma_{ap} \Gamma_{p,j} + \frac{1}{h\nu_s} \sum_{i=1}^{m_s} P_{s,i}(z) \sigma_{as} \Gamma_{s,i}}{\frac{1}{h\nu_s} \sum_{i=1}^{m_s} P_{s,i}(z) (\sigma_{as} + \sigma_{es}) \Gamma_{s,i} + \frac{1}{\tau} + \frac{1}{h\nu_p} \sum_{j=1}^{m_p} P_{p,j}(z) \sigma_{ap} \Gamma_{p,j}} N_0, \quad (6)$$

式中:  $h$  为普朗克常数;  $\nu_p$  和  $\nu_s$  分别为泵浦光和信号光的频率;  $\tau=10$  ms 为弛豫时间;  $m_s$  为信号光总模式数;  $m_p$  为泵浦光总模式数;  $z$  为光纤长度方向的自变量。由式(4)~(6)可知, 光纤中信号光和泵浦光的归一化模场分布与铒离子浓度之间的交叠积分对信号光的模式增益有很大影响, 模场的具体分布不同可能会导致 EDFA 增益计算结果出现差异。

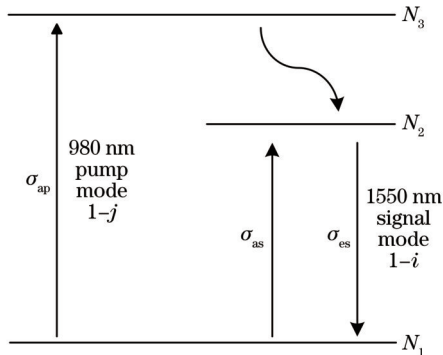


图7 少模光纤中铒离子在能级上的分布示意图

Fig. 7 Schematic diagram of Erbium ion distribution at energy levels in few-mode fiber

利用四阶龙格-库塔法求解式(6)所示的方程, 并分别采用 COMSOL 导出的精确模场和 LP 近似模场计算 FM-EDFA 的模式增益。在本文计算中, EDF 的圆纤芯半径  $r_1$  为  $8 \mu\text{m}$ , 包层半径  $r_2$  为  $62.5 \mu\text{m}$ , 椭圆纤芯长轴  $a$  为  $8.1976 \mu\text{m}$ , 短轴  $b$  为  $7.8072 \mu\text{m}$ , 纤芯折射率  $n_1$  取 1.459, 包层折射率  $n_2$  为 1.439。图 8(a) 给出了采用精确模场和 LP 近似模场计算得到的 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11c</sub> 和 LP<sub>11o</sub> 模式的增益曲线。相对于精确模场的增益计算结果, 采用 LP 近似模场所导致的计算误差如图 8(b)

$\sigma_{as}$ ) 分别取  $4.27 \times 10^{-25} \text{m}^2$  和  $3.86 \times 10^{-25} \text{m}^2$ , 980 nm 泵浦光的发射截面和吸收截面 ( $\sigma_{ep}$  和  $\sigma_{ap}$ ) 分别取 0 和  $2.86 \times 10^{-25} \text{m}^2$ 。此外, 在 980 nm 和 1550 nm 波长下, 背景损耗系数约为 1 dB/km 和 0.2 dB/km<sup>[15]</sup>, 由于所用有源光纤较短, 故背景传输损耗往往可忽略。

由式(4)和式(5)可知, 泵浦模式光功率和信号模式光功率沿光纤长度的演化还依赖于 FM-EDFA 中铒离子在上能级与下能级的浓度分布。FM-EDFA 中铒离子在能级上的分布示意图如图 7 所示, 其中  $N_3$  为第三能级上的粒子浓度。图 7 中画出了信号光和泵浦光的发射和吸收过程(用发射截面和吸收截面参数表示), 以及相应能级的铒离子浓度。稳态时上能级铒离子浓度  $N_2$  的表达式为

所示。由图 8 可以看出: 1) 两种模场下计算的 LP<sub>01</sub> 模式的增益基本相同, 在 FM-EDF 长度为  $L=30$  m 处, 两者相差约 0.05 dB; 2) 采用精确模场计算的 LP<sub>11c</sub> 和 LP<sub>11o</sub> 模式的增益差随 FM-EDF 长度  $L$  的增大逐渐增大, 而 LP 近似模场下两个模式的增益曲线重合, 更接近 LP<sub>11o</sub> 模式的精确计算结果(误差小于 0.15 dB)。因此, LP 近似模场所导致的增益计算误差取决于 LP<sub>11c</sub> 模式, 在计算长度范围内 LP<sub>11c</sub> 模式的最大增益误差为 0.23 dB。上述计算表明, 当椭圆参数为  $\eta=1.050$  时, 采用 LP 近似模场所导致的增益计算误差很小, 也就是说, 椭圆芯 FM-EDFA 可采用 LP 模进行简化分析。

## 4 分析与讨论

### 4.1 纤芯和包层折射率差对 LP 模场分量的影响

由光纤中导波光的矢量波动方程可知, 纤芯和包层的折射率差  $\Delta n$  也会导致模态的偏振依赖性。当  $\Delta n$  和椭圆参数  $\eta$  的影响在同一量级时, 弱导效应和非圆效应之间产生竞争<sup>[16]</sup>。仍将纤芯折射率固定为 1.459, 包层折射率在 1.459~1.499 范围内改变, 利用 COMSOL 仿真计算了 TM<sub>01</sub>、HE<sub>21o</sub>、TE<sub>01</sub> 和 HE<sub>21e</sub> 4 个模式的  $a_m$  值, 如图 9 所示。

由图 9 和图 3 可以看出: TM<sub>01</sub> 和 TE<sub>01</sub> 模式的  $a_m$  值随椭圆参数  $\eta$  的增加而增加, 随着折射率差  $\Delta n$  的增大而减小; HE<sub>21o</sub> 和 HE<sub>21e</sub> 模式的  $a_m$  值随椭圆参数  $\eta$  的增大而减小, 基本不依赖于折射率差。由此可见, 在较小的纤芯和包层折射率差(弱导条件)下, 改变椭圆参数  $\eta$  就能获得较为纯净的 LP 模式。

### 4.2 椭圆参数对增益计算误差的影响

第 3 章研究了椭圆参数为 1.050 时椭圆芯 FM-EDFA 的增益特性。这里分析不同椭圆参数下, 式(1)表示的 LP 近似模场对三模增益计算带来的误差, 如图

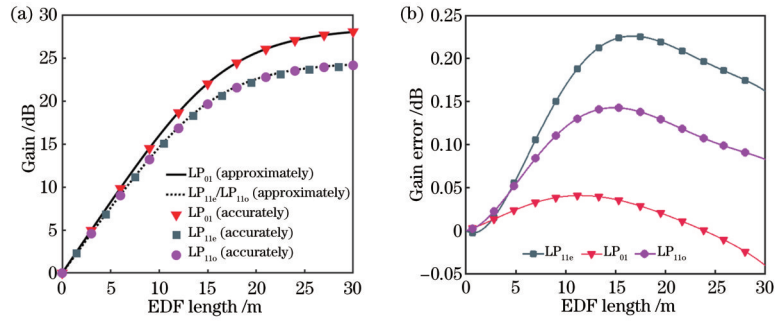


图 8 用 LP 近似形式和精确模场计算得到的模式增益及其增益误差曲线。(a) 模式增益; (b) 增益误差

Fig. 8 Curves of mode gain and gain error calculated by LP mode approximation and accurate mode field. (a) Mode gain; (b) gain error

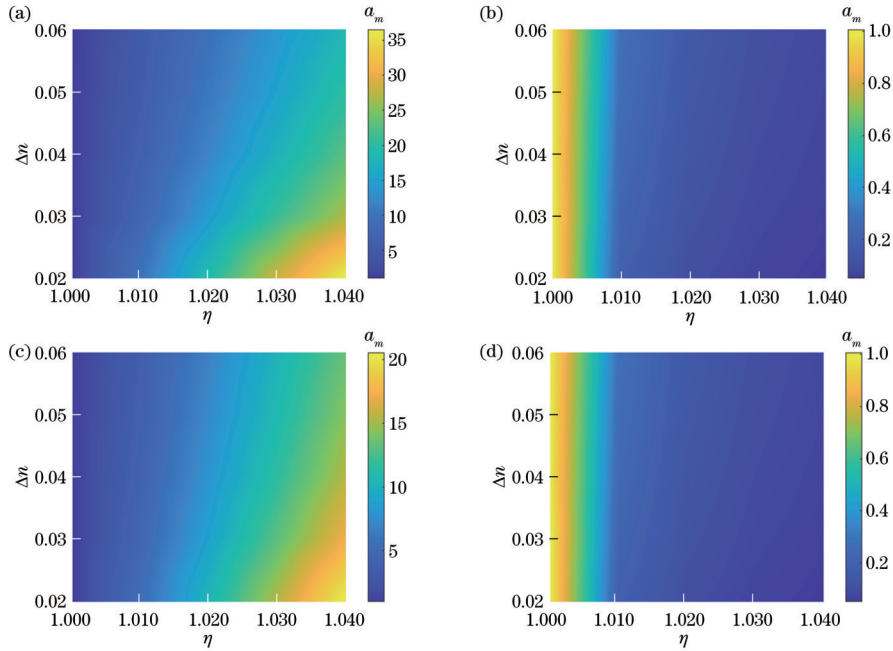


图 9 椭圆参数和折射率差对不同模式的  $a_m$  值的影响。(a)  $TM_{01}$ ; (b)  $HE_{21e}$ ; (c)  $TE_{01}$ ; (d)  $HE_{21o}$

Fig. 9 Influence of  $a_m$  of different modes on elliptical parameter and refractive index difference. (a)  $TM_{01}$ ; (b)  $HE_{21e}$ ; (c)  $TE_{01}$ ; (d)  $HE_{21o}$

10 所示, 计算过程与第 3 章中相同, 其中  $L=30$  m。

由图 10 可知: 随着光纤椭圆参数的增大,  $LP_{01}$  模式的增益越加被低估;  $LP_{11o}$  模式的增益误差由正变

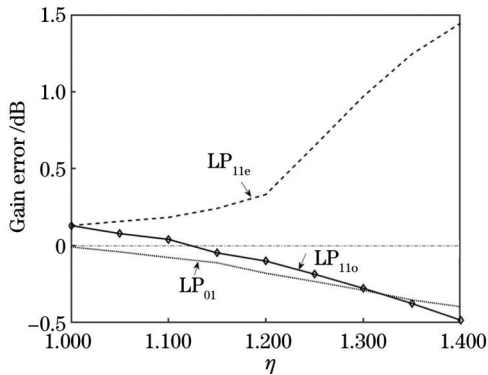


图 10 LP 模近似导致的模式增益误差随椭圆参数的变化

Fig. 10 Mode gain error caused by LP-mode approximation varying with elliptical parameter

负, 在  $\eta \leq 1.400$  范围内这两个模式的增益误差均不超过 0.5 dB;  $LP_{11e}$  模式的增益总是被高估, 椭圆参数越大, 增益误差也越大。当椭圆参数为 1.400 时,  $LP_{11e}$  模式的增益误差可达 1.5 dB。因此, LP 近似模场带来的增益误差可通过  $LP_{11e}$  模式进行计算。若要控制增益计算误差小于 0.5 dB, 则椭圆参数不应超过 1.250。

由此可见, 当  $1.050 \leq \eta \leq 1.250$  时, 椭圆光纤的模式可以用 LP 模场进行简化分析, 且增益计算误差小于 0.5 dB, 相应的椭圆芯 FM-EDFA 能够使  $LP_{01}$ 、 $LP_{11e}$  和  $LP_{11o}$  三个模式始终保持本征状态。

需指出的是, 本文以阶跃折射率椭圆光纤中均匀钬离子掺杂分布为例, 分析了 LP 近似模场带来的模式增益误差, 类似的分析过程也可以用于其他掺钬分布的椭圆光纤放大器设计。目前, 本团队正着手采用光纤膨胀器缠绕少模有源光纤的方式获得椭圆光纤<sup>[17]</sup>, 并在深入研究其对信号模式和泵浦模式的影响后, 开展相应的 FM-EDFA 放大实验。

## 5 结 论

研究了椭圆芯少模光纤中高阶模式的精确模场演化及其 LP 模近似表示, 主要分析了光纤相对折射率差和椭圆参数对  $TM_{01}$ 、 $HE_{210}$ 、 $TE_{01}$  和  $HE_{21c}$  模态的影响。仿真表明, 当椭圆参数为  $\eta \geq 1.050$  时, 椭圆纤芯中  $LP_{01}$ 、 $LP_{11c}$  和  $LP_{11o}$  模式之间可以实现无串扰传输。在此基础上, 以 FM-EDFA 的强度模型为基础, 分别采用精确模场和 LP 模近似计算椭圆芯 FM-EDFA 对三模信号的放大曲线。分析表明, 当椭圆参数为  $\eta < 1.250$  时, LP 模近似引起的增益计算误差小于 0.5 dB, 且误差取决于  $LP_{11c}$  模式的增益计算结果。由此可见, 采用 LP 模场近似可以有效降低椭圆芯光纤的计算复杂度, 进而可用于分析椭圆芯 FM-EDFA 的模态增益特性。

## 参 考 文 献

- [1] Essiambre R J, Tkach R W. Capacity trends and limits of optical communication networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1035-1055.
- [2] 陈健, 黄青青, 张倩武, 等. 基于光子灯笼的正交频分/模分复用 IM-DD 多模光纤传输系统[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0606008.  
Chen J, Huang Q Q, Zhang Q W, et al. Orthogonal frequency division/mode division multiplexing IM-DD multimode fiber transmission system based on photonic lanterns[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0606008.
- [3] Li A, Chen X, Al Amin A, et al. Space-division multiplexed high-speed superchannel transmission over few-mode fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3953-3964.
- [4] 张振振, 郭聘, 张一弛, 等. 增益均衡的远程遥泵少模光纤放大器[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006004.  
Zhang Z Z, Guo C, Zhang Y C, et al. Gain-equalized remotely pumped few-mode fiber amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006004.
- [5] 陈健, 王芳, 李正璇, 等. 利用数字正交滤波降低 IM-DD 模分复用传输中的信号串扰[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0806005.  
Chen J, Wang F, Li Z X, et al. Reducing signal crosstalk in IM-DD-mode-division multiplexing transmission via digital orthogonal filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0806005.
- [6] 张艺赢. 短距离模分复用通信系统中新型少模光纤研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.  
Zhang Y Y. Research on novel few-mode fibers for short-reach mode division multiplexing communication systems [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [7] 阮江冉, 裴丽, 郑晶晶, 等. 基于包层泵浦的 4 模掺铒光纤放大器的增益均衡[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0406001.  
Ruan J R, Pei L, Zheng J J, et al. Gain equalization of 4-mode erbium-doped fiber amplifier based on cladding pump[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0406001.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 江岭, 赵浙明, 李杏, 等. 中远红外保偏光纤研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 4005-4013.  
Jiang L, Zhao Z M, Li X, et al. Advances on middle and far infrared polarization maintaining fibers[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(12): 4005-4013.
- [11] Milione G, Ip E, Ji P, et al. MIMO-less space division multiplexing with elliptical core optical fibers[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 19-23, 2017, Los Angeles, California. Washington, D. C.: OSA, 2017: Tu2J.1.
- [12] Trinel J B, Quiquempois Y, le Rouge A, et al. Amplification sharing of non-degenerate modes in an elliptical-core few-mode erbium-doped fiber[J]. Optics Express, 2016, 24(5): 4654-4661.
- [13] Snyder A W, Love J D. Optical waveguide theory[M]. Boston: Springer, 1986.
- [14] 张振振. 少模掺铒光纤放大器的仿真研究[D]. 天津: 天津大学, 2015: 35-38.  
Zhang Z Z. The simulation research of few-mode erbium doped fiber amplifier[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015: 35-38.
- [15] Giles C R, Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(2): 271-283.
- [16] (美)阿曼·亚里夫, (美)波奇·耶赫. 光子学: 现代通信光电子学[M]. 陈鹤鸣, 施伟华, 汪静丽, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2014.  
Yariv A, Yeh P. Photonics: optical electronics in modern communications[M]. Chen H M, Shi W H, Wang J L, et al., Transl. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2014.
- [17] Zhao T F, Wen F, Zhang P, et al. Transmission performance and noise suppression in a two-mode fiber (TMF) channel[C]//2021 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET), November 4-6, 2021, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2021: 121-124.