

# 宽带放大器用碲基掺铒光纤结构参量的设计考虑\*

周亚训 陈 芬 徐铁峰 聂秋华

(宁波大学信息科学与工程学院, 宁波 315211)

**摘 要** 利用光波导理论及均匀展宽四能级模型, 研究了宽带放大器用阶跃型折射率分布碲基掺铒光纤的结构参量—纤芯半径和相对折射率差的设计考虑. 理论研究表明, 在单模传输条件下, 为获取最大信号增益, 宜选择相对折射率差大的碲基掺铒光纤来构建光纤放大器. 相对折射率差一定的情况下, 在高泵浦功率、小信号输入或光纤长度短于各信道最佳增益长度时, 选择纤芯半径大的碲基掺铒光纤可以得到大的信号增益; 反之, 宜选择纤芯半径小的碲基掺铒光纤.

**关键词** 光纤通信; 碲基掺铒光纤; 相对折射率差; 纤芯半径; 信号增益

**中图分类号** TN256; TN929. 11 **文献标识码** A

## 0 引言

从技术和经济两方面考虑, 目前光纤通信技术的发展方向主要包括下面两点: 其一, 继续提高波分复用(WDM)系统信道的传输速率; 其二, 继续增加 WDM 系统复用的信道数. 相对而言, 提高信道传输速率会加剧色散对系统的影响, 行之有效的途径是充分利用光纤宽带资源, 增加系统复用信道数, 这就需要与之相匹配的宽带光纤放大器. 可以将传统硅基掺铒光纤放大器(EDFA)放大的 C 波段区域拓展至 C+L 波段的新型宽带碲基掺铒光纤放大器(EDTFA)是光纤通信技术发展的理想目标<sup>[1,2]</sup>, 由此引发了对新型宽带碲基掺铒光纤的研究热潮.

作为构建 EDTFA 的碲基掺铒主动光纤, 其最大优点在于具有相对较大的受激发射截面<sup>[2]</sup>, 从而为提供高信号增益和宽带谱提供了基本条件. 除此之外, 光纤的基本结构参量—纤芯半径和芯包间相对折射率差直接决定了光纤的传输特性进而影响到传输信号的放大特性. 对于单模传输光纤而言, 纤芯半径和相对折射率差的选取应能同时使光纤截止波长、模场半径和零色散波长满足使用的要求, 并尽量达到最佳化<sup>[3]</sup>. 考虑到 WDM 系统复用信道间隔越来越小, 非线性效应的影响越来越突出, 维持一定的光纤色散有利于克服光纤非线性造成的信道干扰, 而光纤衰减这一因素可以通过放大器提供的增益来补偿. 因此, 本文从信号增益要求出发, 理论上研究了新型宽带碲基掺铒光纤结构参量的设计考虑, 以便为后续碲基掺铒光纤的实际研制和应用提供一定的理论指导.

## 1 光纤传输特性分析

依据光纤波导理论, 对于 Gloge 描述的阶跃型折射率分布弱导光纤, 在单模传输条件下, 光纤芯层和包层的归一化本征模场分布可以表示为<sup>[4,5]</sup>

$$\Psi_1(r) = J_0(Ur/a) \quad r \leq a$$

$$\Psi_2(r) = J_0(U)K_0(Wr/a)/K_0(W) \quad r \geq a \quad (1)$$

式中  $J_m(U)$  为第一类贝塞尔函数,  $K_m(W)$  为第二类贝塞尔函数,  $m$  代表贝塞尔函数级次.  $a$  为纤芯半径,  $U$  为径向归一化相位常量,  $W$  为径向归一化衰减常量, 它们满足圆柱波导  $LP_{01}$  模的特征方程

$$\frac{U \cdot J_1(U)}{J_0(U)} = \frac{W \cdot K_1(W)}{K_0(W)} \quad (2)$$

$$V^2 = U^2 + W^2 \quad (3)$$

式中归一化频率  $V = 2\pi a n_1 \cdot \sqrt{2\Delta}/\lambda$ ,  $n_1$  是纤芯折射率,  $n_2$  是包层折射率,  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$  是阶跃光纤的芯包间相对折射率差.

对于阶跃折射率分布单模传输光纤, 光纤波导归一化频率受限于二阶导模  $LP_{11}$  的截止频率  $V_c \approx 2.405$ . 因此, 在给定传输光信号波长下, 单模传输光纤的纤芯半径  $a$  和芯包间相对折射率差  $\Delta$  的选取受到一定的限制, 对它们的选取只能局限于图 1 归一化频率曲线的左下方区域.

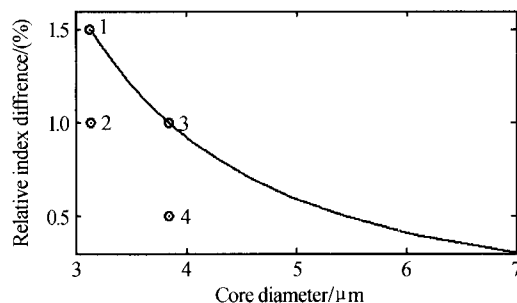


图 1 1480 nm 泵浦下对应  $V=2.405$  的设计曲线  
Fig. 1 Design curves at  $V=2.405$  for the pump wavelength of 1480 nm

\*浙江省自然科学基金(No: M603019)和宁波市自然科学基金(No: 2006A610026)资助项目  
Tel: 0574-87600319 Email: zhouyaxun@nbu.edu.cn  
收稿日期: 2005-03-09

导模在光纤中传输时,其光功率分布在纤芯和包层区域中,不同的光纤结构参量、不同的传输模式,光功率在纤芯和包层中的分配比例不同. 对于基模 LP<sub>01</sub>,纤芯和包层中光功率占总功率分别为

$$\frac{P_{\text{纤芯}}}{P_{\text{总}}} = \left[ 1 - \frac{U^2}{V^2} \right] \left[ 1 - \frac{J_0^2(U)}{J_1(U)J_{-1}(U)} \right] = \eta$$

$$\frac{P_{\text{包层}}}{P_{\text{总}}} = 1 - \eta \quad (4)$$

基模 LP<sub>01</sub>光功率分布随归一化频率  $V$  的变化如图 2. 可见,随着光纤归一化频率  $V$  的增大,包层中光功率所占比例越来越小,而纤芯中光功率所占比例越来越大,意味着光功率逐渐向纤芯集中. 当归一化频率  $V=2.405$  时,基模上大约有 83% 的光功率集中在纤芯区,剩余的 17% 分布在包层区. 因此,对于作为提供信号增益的掺铒主动光纤而言,应该选择接近于归一化频率曲线  $V=2.405$  的纤芯半径  $a$  和相对折射率差  $\Delta$  的组合结构参量,以利于提高泵浦光和信号光的注入效率.

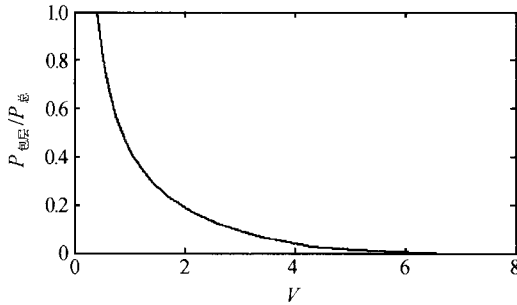


图 2 基模光功率分布与  $V$  关系  
Fig. 2 The power distribution versus  $V$  for the fundamental mode

## 2 信号增益数值模拟

选择高泵浦效率的 1480 nm 波长作为泵浦源,选取单纵泵浦模下对应归一化频率设计曲线  $V=2.405$  上及远离设计曲线的四组不同纤芯半径和相对折射率差  $(a, \Delta)$  组合对(图 1 圆圈),模拟比较它们作为光纤结构参量时提供的信号增益,从中确定作为信号放大用时碲基掺铒主动光纤最优结构参量.  $(a, \Delta)$  组合对数据列于表 1 中.

	①	②	③	④
$a$	1.6 $\mu\text{m}$	1.6 $\mu\text{m}$	1.9 $\mu\text{m}$	1.9 $\mu\text{m}$
$\Delta$	1.5%	1.0%	1.0%	0.5%

碲基掺铒光纤中存在着  $\text{Er}^{3+}$  离子能量上转移、交叉弛豫和激发态吸收效应<sup>[6]</sup>. 基于这些效应,对于 EDTFA 的理论分析需采用均匀展宽的四能级模型<sup>[7]</sup>. 模拟中 EDTFA 采用双向对称泵浦方式,多路信号同时输入,1560~1620 nm 波长区域,各路信号间隔 4 nm. 所用其它参量<sup>[6,8,9]</sup>:纤芯折射率 2.083,

$\text{Er}^{3+}$  离子掺杂浓度 2000 ppm,掺杂分布  $N_T(r) = N_0[1 - (r/r_{\text{Er}})^3]$ ;自发辐射跃迁几率  $A_{21} = 263.2/\text{s}$ ,非辐射跃迁几率  $A_{32} = A_{43} = 10^9/\text{s}$ ;背景损耗  $L_{\text{bg}} = 1 \text{ dB/m}$ ;能量上转移系数  $C_{\text{up}} = 5.0 \times 10^{-23} \text{ m}^3/\text{s}$ ,交叉弛豫系数  $C_{14} = 3.5 \times 10^{-23} \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $\text{Er}^{3+}$  离子吸收截面  $\sigma_a$  和发射截面  $\sigma_e$  数据如图 3.

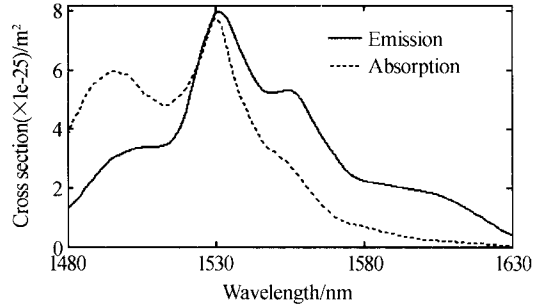


图 3  $\text{Er}^{3+}$  离子吸收和发射截面谱  
Fig. 3 Absorption and emission cross-section spectrum of  $\text{Er}^{3+}$

### 2.1 信号增益与光纤长度的关系

图 4 给出了四种不同结构参量条件下第 2 信道(1564 nm)和第 13 信道(1608 nm)信号增益随着碲基掺铒光纤长度的演变关系(其它信道类似),其中各信道信号输入功率 -20 dBm,泵浦功率 100 mW. 由图可见,发射截面大的短波长信道在较短的光纤长度内就能得到大的信号增益,超越其最佳增益长度后,信号增益随着光纤长度的增长而减小. 发射截面小的长波长信道则需要相对较长的光纤长度来吸收泵浦光子才能获得相对较大的信号增益. 由图可以看出,碲基掺铒光纤结构参量对各信道信号增

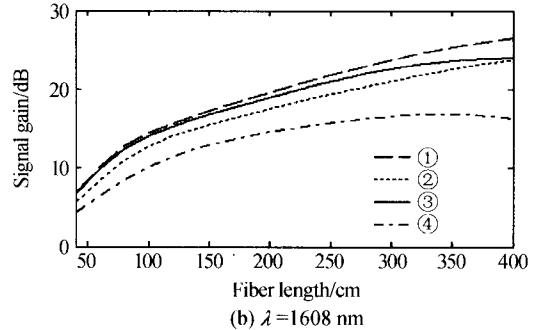
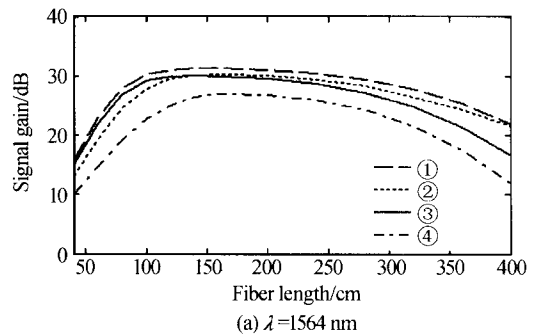


图 4 四种结构参量下信号增益与光纤长度关系  
Fig. 4 The signal gain versus fiber length with four kinds of structure parameters

益的影响:1)随着芯包间相对折射率差的提高,各信道信号增益随之增大;2)对于同一相对折射率差,光纤长度小于各波长信道的最佳增益长度时,纤芯半径(或归一化频率)大的结构参量,放大器相应各信道信号增益越大;当光纤长度超越各自最佳增益长度后,纤芯半径小的结构参量,信号增益相对较大.

### 2.2 信号增益与输入功率关系

图 5 给出了四种不同结构参量条件下第 4 信道(1572 nm)和第 13 信道(1608 nm)信号增益与其输入功率的变化关系,其中光纤长度 240 cm,泵浦功率 100 mW,其它参量不变.可以看到,在小信号输入状态下,放大器各信道信号增益趋于稳定,随着信号输入功率的增大则迅速衰减,这是信号功率的增益饱和效应所致.但不同光纤结构参量对各信道信号增益的影响不同:1)相对折射率差越大,放大器信号增益随之变大;2)同一相对折射率差下,对于发射截面大的短波长信道,在小信号输入状态下,纤芯半径(或归一化频率)大的结构参量,其信道信号增益越大.而在大信号输入状态下,纤芯半径小的结构参量,其信号增益相对较大;对于发射截面小的长波长信道,在模拟的信号输入功率范围内,纤芯半径(或归一化频率)越大,其信道信号增益越大.

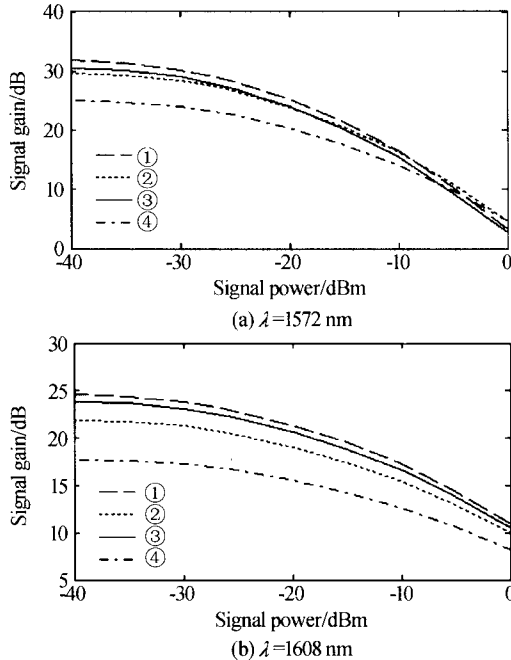


图 5 四种结构参量下信号增益与输入功率关系  
Fig. 5 The signal gain versus input power with four kinds of structure parameters

### 2.3 信号增益与泵浦功率关系

图 6 给出了四种不同结构参量条件下第 4 信道(1572 nm)和第 13 信道(1608 nm)信号增益随着泵浦功率的演变关系,其中光纤长度 240 cm,各信道信号输入功率 -20 dBm,其它参量不变.可见,随

着泵浦功率的逐步提高,放大器各信道信号增益开始迅速增大,然后增大速度减缓,这是泵浦功率的增益饱和效应所致,但长波长信道的饱和效应要明显于短波长信道.同样,可以看到光纤结构参量对信号增益的类似影响:1)相对折射率差越大,各信道信号增益随之越大;2)同一相对折射率差下,在小泵浦功率抽运下,纤芯半径(或归一化频率)小的结构参量,各信道信号增益相对较大.在大泵浦功率抽运下,纤芯半径(或归一化频率)大的结构参量,各信道信号增益越大.但各信道对泵浦功率的要求是不一样的.

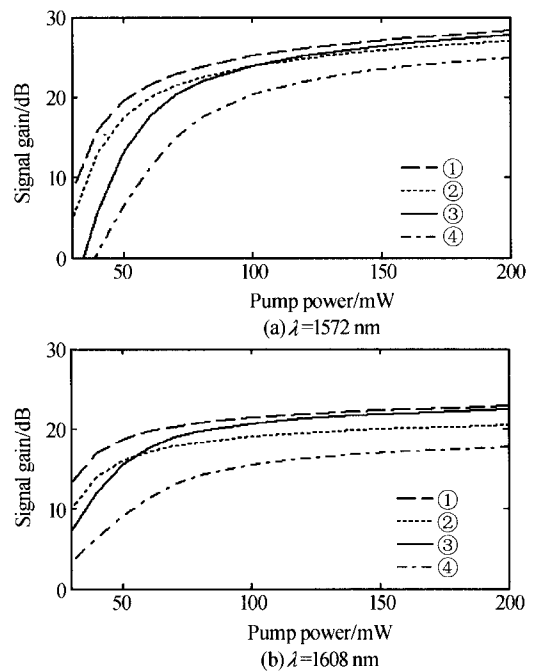


图 6 四种结构参量下信号增益与泵浦功率关系  
Fig. 6 The signal gain versus pump power with four kinds of structure parameters

## 3 结果分析

光纤放大器的信号放大过程是注入到碲基掺铒光纤内的泵浦光子与掺杂铒离子相互作用转换为信号光子的过程.显然:1)随着芯包间相对折射率差的增大,光纤模场半径随之减小,意味着注入到光纤内的泵浦模场分布更加集中到纤芯轴附近.同时,在非均匀掺杂分布情形下,铒离子掺杂浓度分布也在纤芯轴附近最大.因此,这时泵浦模场与铒掺杂离子的重叠因子最大,泵浦光子更能有效地转换为信号光子,自然信号增益越大;2)同一相对折射率差下,随着纤芯半径的增大,光纤的归一化频率随之增大,注入到光纤纤芯内的泵浦功率提高,参与转换的泵浦光子数增加.同时,随着纤芯半径的增大,光纤模场半径也随之增大,光纤内的泵浦光模场分布弥散,泵浦模场与铒掺杂离子的重叠因子有所减小.

因此,这时信号光子数能否有效增加,取决于纤芯半径增大的结果是使注入到纤芯内参与转换的泵浦光子数增加的成分是否大于由于重叠因子减小的影响. 在小信号输入、高泵浦功率或者碲基掺铒主动光纤长度较短的工作状态下,碲基掺铒光纤内的上能级粒子数处于一个较高的分布状态,纤芯半径增大的结果是使前者增加的成分因素大于后者减小的影响,因此,这时纤芯半径越大,各信道信号增益越大. 反之,当碲基掺铒主动光纤工作在一个很低的上能级粒子数分布态时,则这时纤芯半径越大,信号增益相对越小;3)在 WDM 系统多波长输入情形下,各波长信道间的信号增益存在着一个竞争过程,这种竞争过程主要取决于上能级粒子数分布. 对于截面差值( $\sigma_e - \sigma_a$ )大的短波长信道,在高的上能级粒子数分布态下具有相对较大的竞争优势,而截面比值( $\sigma_e/\sigma_a$ )大的长波长信道,则在低的上能级粒子数分布态下具有一定的竞争优势. 因此,在一定的工作条件下,结构参量( $a, \Delta$ )对不同波长信道信号增益的作用是有差异的. 可以看到,在一定相对折射率差下,长波长信号可以在更宽的工作范围内,在纤芯半径大的掺铒主动光纤中获得相对较大的信号增益.

#### 4 结论

研究表明,为提供大的信号放大能力,对于碲基掺铒主动光纤而言,应提高芯包间相对折射率差. 相对折射率差要求一定时,在高泵浦功率、小信号输入或光纤长度短于各信道最佳增益长度的工作状态下,应选取大的纤芯半径. 相比于短波长信号,长波长信号更适合放大于纤芯半径大的掺铒主动光纤中. 当然,碲基掺铒光纤结构参量的选取是一个综合过程,应考虑到提高芯包间相对折射率差而引起的成纤过程中的工艺问题、与普通硅基光纤熔接时的损耗问题以及碲基掺铒光纤衰减、零色散波长

等多种因素的要求.

#### 参考文献

- 1 Ono H, Mori A, Shikano K, *et al.* A low-noise and broadband erbium-doped tellurite fiber amplifier with a seamless amplification band in the C- and L-bands. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(8):1073~1075
- 2 Mori A, Sakamoto T, Kobayashi K, *et al.* 1.58  $\mu\text{m}$  broadband erbium-doped tellurite fiber amplifier. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(5):794~799
- 3 宋宁, 殷宗敏, 葛文萍. 光纤传输特性的理论计算. *光子学报*, 2002, **31**(5):565~569  
Song N, Yin Z J, Ge W P. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5):565~569
- 4 Gloge D. Weakly guiding fibers. *Applied Optics*, 1971, **10**(10):2252~2258
- 5 郭福源, 陈钰清, 林斌, 等. 一种新的阶跃折射率光纤本征函数表达形式. *光子学报*, 2003, **32**(9):1074~1078  
Guo F Y, Chen Y Q, Lin B, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1074~1078
- 6 Lopez-baraero A P, Areliano-espinoza W A, Fragnito H L, *et al.* Tellurite-based optical fiber amplifier analysis using the finite-element method. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2000, **25**(2):103~107
- 7 周亚训, 聂秋华, 徐铁峰, 等. WDM 系统中碲基掺铒光纤放大器泵浦问题的理论研究. *光子学报*, 2004, **33**(9):1054~1059  
Zhou Y X, Nie Q H, Xu T F, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9):1054~1059
- 8 Mori A, Kobayashi K, Yamada M, *et al.* Low noise broadband tellurite-based  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber amplifiers. *Electronics Letters*, 1998, **34**(9):887~888
- 9 Wang J S, Vogel E M, Snitzer E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices. *Optical Materials*, 1994, **3**(2):187~203

## A Consideration to Structure Parameter Design for Tellurite-based Erbium-doped Fiber applied in Broad-band Amplifiers

Zhou Yaxun, Chen Fen, Xu Tiefeng, Nie Qihua

*The College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211*

Received date: 2005-03-09

**Abstract** Based on the fiber waveguiding theory and homogeneously broadened four energy-level model, the designing considerations of the fiber structure parameters—fiber core radius and relative index difference of tellurite-based erbium-doped fiber with step-type index distribution, which is applied in broad-band amplifiers, are presented theoretically. It is shown that the tellurite-based erbium-doped fiber with bigger relative index difference is needed to form fiber amplifier in order to get larger signal gain under single-mode conditions. While, for the same relative index difference, the bigger the fiber core radius, the larger the signal gain when in the state of high pump power, low signal input or shorter than the best fiber length. On the contrary, the smaller fiber core radius is needed. The above results will provide theoretical significance for the fabrication of new type broad-band tellurite-based erbium-doped fiber.

**Keywords** Fiber communication; EDTF; Relative index difference; Fiber core radius; Signal gain



**Zhou Yaxun** was born in 1965. He received B. S. degree in 1987 and M. S. degree in 1990 from Nankai University, respectively. He is now an associate professor in the College of Information Science and Engineering, Ningbo University. His major research fields include optical fiber communication and image processing.