

# 双芯光纤放大器的研究\*

陈海涓 杨祥林

(南京邮电学院光纤通信研究所, 南京 210003)

**摘 要** 研究了双芯光纤放大器的均衡性, 建立了理论模型并对其进行数值模拟, 结果表明双芯光纤放大器能为多路不同波长、不同输入功率的信号提供不同的增益, 从而在一定程度上实现了输出功率均衡, 非常适用于多级放大的光频分复用系统和网络。

**关键词** 均衡, 双芯光纤, 掺铒光纤放大器。

## 1 引 言

掺铒光纤放大器(EDFA)是光纤通信发展的里程碑, 它有效地克服了光纤传输和分路损耗对光纤通信系统的限制, 从而使长途、越洋光纤通信以及局域网(LAN)、广域网(WAN)等成为现实。掺铒光纤放大器可提供很高的信号增益、接近量子极限的噪声系数和很高的饱和输出功率, 然而在 30 nm 左右的信号带宽内, 增益谱不是完全平坦的, 起伏在 1 dB 以上。它的不规则的增益谱形状, 对单信道长距离通信几乎没有影响, 但用于多信道级联放大的光纤系统中时, 却存在严重问题: 与波长有关的增益差沿着光放大链累积起来, 导致强信号愈强, 弱信号愈弱, 信道间功率差别越来越大, 最终限制了光信道数和掺铒光纤放大器级联个数。另外, 室温下 1.55  $\mu\text{m}$  的  $\text{Er}^{3+}$  跃迁主要是均匀展宽的, 由于交叉饱和效应, 较强的信号抑制了增益, 使整个增益谱下降, 弱信号得不到充分放大, 更加破坏了信道间的功率均衡程度。

为了解决多信道光路中的信道功率差累积的问题, 人们提出了多种信道均衡方案, 如采用马赫-陈德尔(Mech-Zehnde)光滤波器或声光可调滤波器, 有选择地对增益高的信道进行衰减<sup>[1]</sup>; 通过控制泵浦功率来控制两级放大器的增益使两级放大的增益形状互补, 从而获得动态信道功率均衡<sup>[2]</sup>; 将放大器冷却至 77 K, 使之主要成为非均匀加宽, 也可获得无源均衡<sup>[3]</sup>; 用双芯光纤的掺铒光纤制作光放大器提供了一种新的全光无源信道功率均衡方案<sup>[4]</sup>, 可自动提供信道功率均衡, 容忍放大器之间的损耗变化, 忽略瞬态交叉饱和。

本文研究双芯掺铒光纤均衡放大器, 建立了理论模型并对其进行数值模拟, 分析和比较了常规单芯光纤和双芯光纤放大器的放大和均衡特性。

## 2 双芯掺铒光纤均衡放大器工作原理与理论模型

双芯掺铒光纤均衡放大器中, 两纤芯均为  $\text{Er}^{3+}$  掺杂, 在输入端, 所有不同波长的信号和

\* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-07-16; 收到修改稿日期: 1998-01-07

泵浦功率由同一纤芯入射, 在沿双芯光纤传播的同时交叉耦合, 空间耦合周期与波长有关, 所以这些信号从空间上被分开, 分别与不同的铒离子相互作用, 如图 1 所示。于是各个波长的信号增益互不干涉, 从空间(纵向)解耦合。如果一路信号功率增大, 仅引起自身增益饱和, 但不影响其他信道的增益, 从而使输出功率谱趋于均衡。该器件的工作基于信道的空间分离作用和铒离子与功率相关的饱和特性。这种技术可看作一种形式的“空间烧孔”。

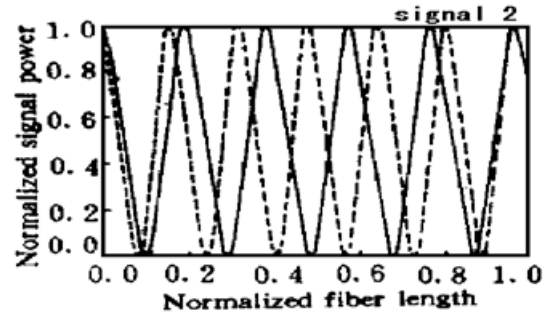


Fig. 1 The normalized signal power of two channels varying along twin-core fiber within a characteristic length

下面采用耦合模理论描述信号与泵浦光在双芯掺铒光纤中的演化与交叉耦合, 其中增益沿光纤方向的变化则由线性掺铒光纤放大器的速率方程理论描述<sup>[5]</sup>。由于该掺铒光纤放大器模型仅仅是针对均匀加宽介质的, 所以均衡完全来源于双芯结构的空烧孔效应。对于波长为  $\lambda_k$  的信号或泵浦, 纤芯 1、2 中的光场  $b_j(\lambda_k, z)$  满足下列方程( $j = 1, 2$ ):

$$\frac{db_1}{dz} = i(\beta_1 + \gamma_1 |b_1|^2) b_1 + \frac{1}{2} \alpha_1 b_1 + \frac{s_1}{2b_1^*} + iCb_2 \quad (1a)$$

$$\frac{db_2}{dz} = i(\beta_2 + \gamma_2 |b_2|^2) b_2 + \frac{1}{2} \alpha_2 b_2 + \frac{s_2}{2b_2^*} + iCb_1 \quad (1b)$$

其中  $\beta_j$  为两纤芯相互独立时基模的传播常数,  $\gamma_j$  为光纤的非线性系数,  $\alpha_j$  表征掺铒光纤的增益系数,  $s_j$  为放大自发辐射噪声(ASE)项,  $C$  为线性耦合系数<sup>[6]</sup>:

$$C(\lambda) = \frac{A}{n_1 r} \frac{U^2}{V^3} \frac{K_0(Wd/r)}{K_1^2(W)} \quad (2)$$

式中  $A$  为光纤数值孔径,  $n_1$ 、 $r$ 、 $d$  分别为纤芯折射率、半径及芯间距,  $U$ 、 $W$ 、 $V$  为光纤归一化参量, 满足  $U^2 + W^2 = V^2$ , 且  $V = \frac{2\pi}{\lambda} r A$ , 对于阶跃折射率单模光纤,  $W = 1.1428V - 0.996$ ,  $1.5 < V < 2.4$ 。  $K_0$ 、 $K_1$  为第二类变型贝塞尔函数。  $\alpha_j$  和  $s_j$  的定义分别如下<sup>[5]</sup>:

$$\alpha_j(\lambda) = \Gamma_j(\lambda) [\sigma_e(\lambda) N_{2,j} - \sigma_a(\lambda) N_{1,j}], \quad j = 1, 2 \quad (3)$$

$$s_j(\lambda) = \Gamma_j(\lambda) \sigma_e(\lambda) N_{2,j} m h \nu \Delta \nu \quad (4)$$

其中  $\Gamma_k(\lambda)$  为信号或泵浦光场与铒离子掺杂部分的重叠积分,  $\sigma_e(\lambda)$ 、 $\sigma_a(\lambda)$  分别为铒纤的受激辐射、受激吸收截面,  $N_{2,j}$ 、 $N_{1,j}$  分别为铒离子上、下能级单位体积内的粒子数。通常  $m = 2$ , 表示光纤支持最低阶模的两个极化态。  $h$  为普朗克常数,  $\nu = c/\lambda$  表示光频率,  $\Delta \nu$  为放大自发辐射噪声带宽。实际上(1a), (1b)式就是一对包含增益和自发辐射噪声项的耦合模方程。

两纤芯内  $\text{Er}^{3+}$  总数分别守恒, 即  $N_{1,j} + N_{2,j} = N_{0,j}$ , 其中  $N_{0,j}$  为芯  $j$  中的  $\text{Er}^{3+}$  掺杂单位体积内的粒子数。在稳态情况(即  $\frac{dN_{2,j}}{dt} = 0$ )下, 上、下能级粒子浓度可由速率方程决定:

$$N_{2,j}(z) = N_{0,j} \frac{\sum_k \frac{\sigma_a(\lambda_k)}{\sigma_a(\lambda_k) + \sigma_e(\lambda_k)} \frac{P_j(\lambda_k, z)}{P_{\text{sat},j}(\lambda_k, z)}}{1 + \sum_k \frac{P_j(\lambda_k, z)}{P_{\text{sat},j}(\lambda_k, z)}} \quad (5)$$

其中

$$P_{\text{sat},j}(\lambda) = \frac{h \nu \pi r^2}{[\sigma_a(\lambda) + \sigma_e(\lambda)] \Gamma_j(\lambda) \tau} \quad (6)$$

称为饱和功率,  $\tau$  为上能级粒子寿命,  $r$  为纤芯半径。

假设模场  $b_j(\lambda)$  已对模式功率  $P_j(\lambda)$  归一化, 即  $P_j(\lambda, z) = |b_j(\lambda, z)|^2$  为纤芯  $j$  内传播的波长为  $\lambda$  的光功率,  $\varphi(\lambda, z) = \arg(b_1) - \arg(b_2)$  为两芯内光场幅度之差, 则(1)式可改写为

$$\frac{dP_1(\lambda, z)}{dz} = \alpha_1 P_1 + s_1 + 2C \sqrt{P_1 P_2} \sin \varphi \quad (7a)$$

$$\frac{dP_2(\lambda, z)}{dz} = \alpha_2 P_2 + s_2 - 2C \sqrt{P_1 P_2} \sin \varphi \quad (7b)$$

$$\frac{d\varphi(\lambda, z)}{dz} = C \cos \varphi \frac{P_2 - P_1}{\sqrt{P_1 P_2}} + \gamma(P_1 - P_2) \quad (7c)$$

上式即为耦合形式的传播方程。每一路波长为  $\lambda_k$  的信号(泵浦或放大自发辐射)光功率沿光纤长度方向的变化由以上三个方程联合描述, 对于  $k$  路光则有  $3k$  个方程, 利用这  $3k$  个方程可以分析双芯掺铒光纤放大器对多波长信号的均衡与放大特性。

### 3 均衡放大特性

根据上述模型可对双芯掺铒光纤放大器的特性, 尤其是对多信道放大时均衡特性进行数值模拟和分析。定义波长为  $\lambda_k$  的信号增益为:

$$G(\lambda_k) = 10 \log \frac{P^{\text{out}}(\lambda_k)}{P^{\text{in}}(\lambda_k)} \quad (8)$$

其中  $P^{\text{in}}(\lambda_k) = P_1(\lambda_k, 0) + P_2(\lambda_k, 0)$ ,  $P^{\text{out}}(\lambda_k) = P_1(\lambda_k, L) + P_2(\lambda_k, L)$ ,  $L$  为光纤长度。

在下面的计算中, 假设双芯掺铒光纤的纤芯半径  $r$  和两芯间距  $d$  分别为  $1.5 \mu\text{m}$  和  $15 \mu\text{m}$ , 数值孔径  $A = 0.25$ , 长度  $L = 30 \text{ m}$ 。两路信号的波长分别为  $1550 \text{ nm}$  和  $1551 \text{ nm}$ , 泵浦光波长为  $1480 \text{ nm}$ , 功率为  $50 \text{ mW}$ 。其余参数分别取:  $\Gamma = 0.6$ ,  $\tau = 10 \text{ ms}$ ,  $N_0 = 2.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ,  $\sigma_e(\lambda_p) = 0.17 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_a(\lambda_p) = 2.2 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_e(\lambda_s) = 5.1 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_a(\lambda_s) = 2.4 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 。

图 2 为两路信号进行放大时, 增益与铒纤长度的关系。图 2(a), (b) 分别表示双芯和常规单芯掺铒光纤放大器的情况, 两路信号输入功率分别为  $-5 \text{ dBm}$ 、 $-10 \text{ dBm}$ , 泵浦功率为  $50 \text{ mW}$ 。对于常规单芯掺铒光纤放大器, 增益介质主要被强信号所饱和, 两路信号的增益几乎不可分辨同为  $20 \text{ dB}$ ; 而对于双芯掺铒光纤放大器, 由于两路信号纵向分离和空间烧孔效应, 两信道增益不同, 弱信号增益高( $22 \text{ dB}$ ), 强信号增益低( $19 \text{ dB}$ ), 因此输出功率趋于均衡。

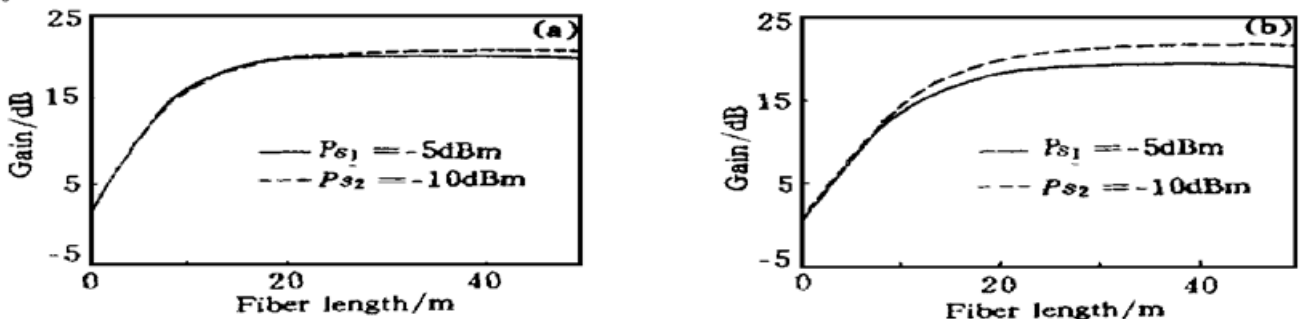


Fig. 2 Signal gain versus fiber length. The input power of signals are  $-5 \text{ dBm}$  and  $-10 \text{ dBm}$ .

(a) Conventional single core amplifier, (b) Twin-core amplifier

图 3 为两路信号输入功率分别为 - 20 dBm 和 - 10 dBm，经过 10 级掺铒光纤放大器放大的输出功率，放大器级间损耗为 20 dB。对于常规单芯放大器，输入功率较大的信号基本饱和，维持在 16 dBm 左右，而较小的信号则越来越小，因此这两路信号的功率差随放大器级联个数的增大而增大，10 级放大后，这一差别已高达 15 dB；而双芯放大器则使这两路信号功率逐渐靠近，10 级放大后，功率差仅为 1 dB。

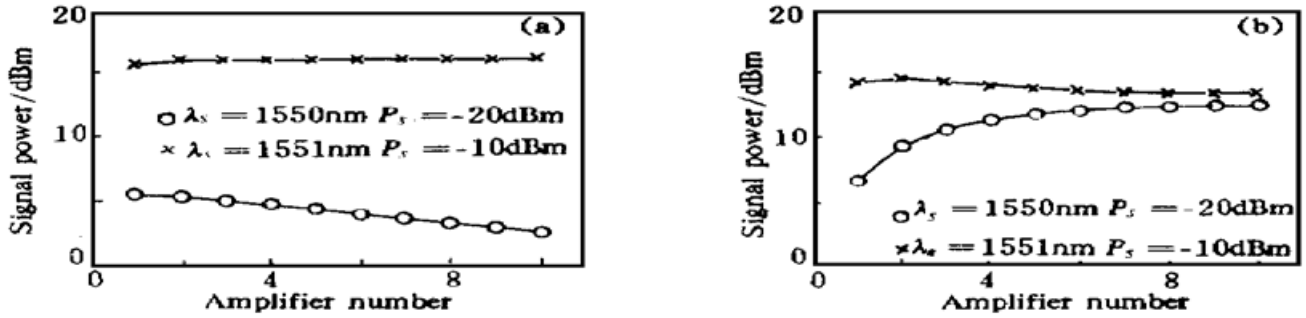


Fig. 3 Output signal power of cascaded amplifier chain. The loss between amplifiers is 20 dB. The signal input powers are - 20 dBm and - 10 dBm respectively. (a) Conventional single core amplifier, (b) Twin-core amplifier

图 4 为两路输入功率同为 - 20 dBm 的信号经过 10 级掺铒光纤放大器放大的输出功率，其中级间损耗为 20 dB，一路信号在两级放大后有附加损耗 5 dB。对于常规单芯放大器，附加损耗使功率差别变大，10 级放大后累积至 8 dB；而双芯放大器不但能提供均衡，还具有自愈功能，使这两路信号功率渐趋靠近，10 级放大后，功率差仅为 3 dB，且有继续减小的趋势。

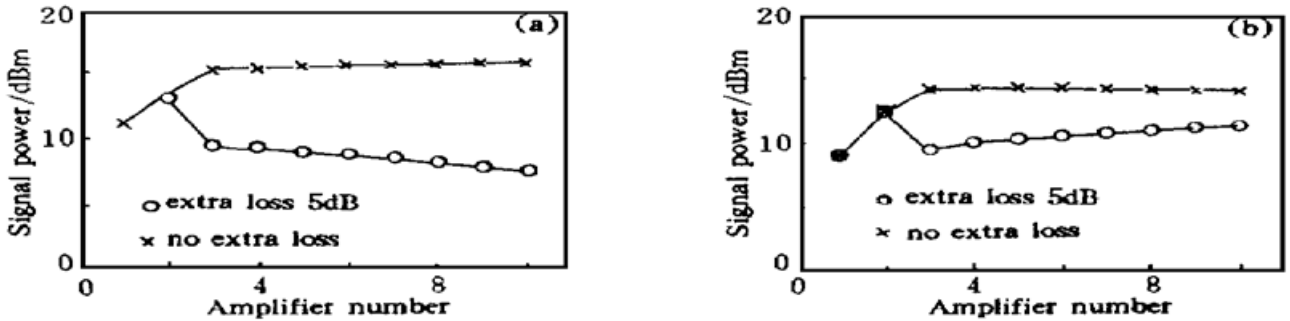


Fig. 4 Signal output power of cascaded amplifier chain with extra channel loss. The loss between amplifiers is 20 dB. The two signals are both input with initial power of - 20 dBm, one of the signal experienced extra loss of 5 dB after 2 amplifiers. (a) Conventional single core amplifier, (b) Twin-core amplifier

**结 论** 从理论上研究了双芯掺铒光纤放大器，得到耦合形式的传播方程，对其进行的数值模拟表明：

对于单级掺铒光纤放大器放大的情况，两路输入功率相差 5 dBm 的信号，采用双芯掺铒光纤放大器时，弱信号增益比强信号增益高 3 dB，而采用常规单芯掺铒光纤放大器时，两路信号的增益几乎相同。

对于 10 级掺铒光纤放大器放大的情况，若两路信号输入功率相差 10 dBm，常规单芯放大器使信号的输出功率差累积至 15 dB，而双芯放大器则使这两路信号功率逐渐靠近，输出功率差仅为 1 dB；若两路信号输入功率相同但一路信号在两级放大后有附加损耗，常规单芯放大器使功率差别变大，而双芯放大器不但能提供均衡，还具有自愈功能，使这两路信号功

率渐趋靠近, 10 级放大后, 功率差仅为原附加损耗的一半。

因此, 双芯掺铒光纤放大器能在一定程度实现输出功率均衡, 非常适合未来的多信道多级放大波分复用光纤系统和网络的要求。

### 参 考 文 献

- [1] A. R. Charplyvy, J. A. Nagel, R. W. Tkach. Equalization in amplified WDM lightwave transmission systems. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(9) : 920~ 922
- [2] K. Inoue, T. Kominato, H. Toba. Tunable gain equalization using a Mach-Zehnder optical filter in multistage fiber amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(7) : 718~ 720
- [3] E. L. Goldstein, V. da Silva, L. Eskildsen *et al.*. Inhomogeneously broadened fiber amplifier cascade for wavelength multiplexed systems. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(5) : 543~ 545
- [4] M. N. Zervas, R. I. Laming. Twin-core fiber erbium-doped channel equalizer. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5) : 721~ 731
- [5] C. R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2) : 271 ~ 283
- [6] A. W. Snyder, J. D. Love. *Optical Waveguide Theory*. London: Chapman and Hall, 1983.

## Equalizing Characteristics of Twin-Core Fiber Amplifier

Chen Haijuan      Yang Xianglin

(*Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003*)

(Received 16 July 1997; revised 7 January 1998)

**Abstract** The equalizing property of twin-core erbium-doped fiber amplifier has been studied by establishing a theoretical model and numerically simulating the characteristics of the amplifier. The twin-core erbium-doped fiber amplifier can provide different gains for different channels and self-heal the extra channel loss between amplifying stages, thus equalizes the output signal level. The twin-core fiber amplifiers is very suitable for the multi-wavelength, multi-channel fiber networks.

**Key words** equalizing, twin-core fibre, erbium-doped fiber amplifier (EDFA).