

文章编号: 0258-7025(2001)11-1013-04

L-波段掺铒光纤放大器增益谱特性研究

张岩滨 彭江得 刘小明 历群 刘丹

(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要 对掺铒光纤放大器(EDFA)在 L-波段(L-Band, 1570~1610 nm)的增益谱特性进行了理论和实验研究。理论和实验研究得出在最佳反转粒子数密度 ($N = 0.39$) 条件下, 掺铒光纤 L-Band 的平坦增益谱宽为 22 nm (± 0.5 dB), 抽运功率与输入信号功率呈线性关系。实验测得 L-Band EDFA 单信道小信号增益为 33 dB。

关键词 掺铒光纤放大器, L-波段, 波分复用

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Characteristics of L-Band Erbium Doped Fiber Amplifier Gain Spectra

ZHANG Yan-bin PENG Jiang-de LIU Xiao-ming LI Qun LIU Dan

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The investigation on the characteristics of L-Band erbium doped fiber is reported. At the optimum population inversion level ($N = 0.39$), the flattened amplification bandwidth of 22 nm (± 0.5 dB) and linear relation between pump power and signal power were demonstrated theoretically and experimentally. Small signal gain of 33 dB was achieved at 1572 nm.

Key words erbium doped fiber amplifier(EDFA), L-Band, wavelength-division-multiplexed (WDM)

1 引言

常规的掺铒光纤放大器(EDFA)工作在 1.52~1.56 μm 波长范围(称为 C-波段), 其增益带宽已不能满足宽带光通信网的要求。但是, 采用长的掺铒光纤并降低粒子数反转水平, EDFA 可工作在 1.57~1.61 μm (称为 L-波段)。将 C-波段 EDFA 与 L-波段 EDFA 通过并联实现了超宽带 EDFA, 增益带宽可到 70~80 nm。如不外加任何滤波元件, L-波段 EDFA 在 30 nm 带宽内有较平坦增益 (± 2 dB)。要获得更平坦的增益 (± 1 dB) 谱或大于 30 nm 的平坦增益带宽, 需要采用增益均衡滤波器^[1]。

本文报道 980 nm 和 1480 nm 混合抽运 L-波段掺铒光纤放大器的实验结果, 针对波分复用(WDM)系统应用, 着重研究了 L-波段的增益谱特性。理论和实验指出, 在最佳反转粒子数密度 ($N = 0.39$) 条件下, 掺铒光纤 L-波段的平坦增益谱宽为 22 nm (± 0.5 dB), 抽运功率与输入信号功率呈线性关系。

2 理论分析

EDFA 的放大过程可用均匀展宽的二能级模型来描述^[2]。设 $n_2(z)$ 为上能级 Er^{3+} 离子线密度, n_1 为掺 Er^{3+} 离子线密度。将掺铒光纤中传播的光(包括抽运光、信号光和放大自发辐射(ASE))在频域上进行划分, 设中心频率 ν_k 的光束带宽为 $\Delta\nu_k$, $P_k^+(z)$ 和 $P_k^-(z)$ 分别为带宽 $\Delta\nu_k$ 内沿 $+z$ 方向和 $-z$ 方向传输的光功率。二能级系统的速率方程可写成

$$\frac{\partial n_2(z)}{\partial t} = \frac{1}{\tau} \left[\sum_k \frac{P_k^+(z) \alpha_k [n_1 - n_2(z)]}{h\nu_k \zeta} - \sum_k \frac{P_k^+(z) g_k^+ n_2(z)}{h\nu_k \zeta} - n_2(z) \right] \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常数, α_k, g_k^+ 分别为吸收系数和增益系数, τ 为上能级粒子寿命, ζ 为饱和参数, 它与饱和功率 P_k^m 的关系是

$$\zeta = P_k^m (\alpha_k + g_k^+) / h\nu_k \quad (2)$$

稳态时, $\frac{\partial n_2(z)}{\partial t} = 0$, 定义上能级 Er^{3+} 离子的线密度 $n_2(z)$ 与掺 Er^{3+} 离子线密度 n_1 之比为反转粒子数分布 $N_2(z)$, 则有

$$N_2(z) = \frac{n_2(z)}{n_1} = \frac{\sum_k \frac{\alpha_k}{h\nu_k \zeta} (P_k^+ + P_k^-)}{1 + \sum_k \frac{\alpha_k + g_k^*}{h\nu_k \zeta} (P_k^+ + P_k^-)} \quad (3)$$

描述光功率的传播方程为

$$\pm \frac{dP_k^\pm}{dz} = [(\alpha_k + g_k^*)N_2(z) - (\alpha_k + l_k)]P_k^\pm + (2h\nu_k \Delta\nu_k g_k^*)N_2(z) \quad (4)$$

上式中, l_k 为光纤背景损耗, 右边第二项表示自发辐射。

将(3)代入(4)式得到关于 $P_k^\pm(z)$ 的非线性常微分方程组, 用数值积分的迭代法求解其两点边值问题。在忽略 ASE 的情况下, 传输方程(4)简化为

$$\pm \frac{dP_k^\pm}{dz} = [(\alpha_k + g_k^*)N_2(z) - (\alpha_k + l_k)]P_k^\pm \quad (5)$$

由(5)式可得增益(倍数)与光纤参量的关系

$$G_k = \exp[(\alpha_k + g_k^*)N_2^* - (\alpha_k + l) L] \quad (6)$$

式中

$$N_2^* = \frac{1}{L} \int_0^L N_2(z) dz \quad (7)$$

N_2^* 为整根光纤中的平均粒子数反转度。由(6)式可

知, 一旦掺铒光纤参数(α_k, g_k^*)及其长度 L 给定, 则放大器对各波长光信号的增益就由 N_2^* 唯一地确定。

数值模拟所采用的 L -波段 EDFA 结构和光纤参数与下述实验一致。计算结果如图 1 和图 2 所示。理论模拟得出以下结论:

1) 图 1 为不同平均粒子反转度下 L -波段 EDFA 的增益谱形状。由图可见, 增益随粒子数反转水平的提高而增高, 且增益谱的形状随粒子数反转水平的改变而改变。沿短波长方向的增益变化较大, 且在低反转状态下增益谱上翘, 在高反转状态下增益谱下滑; 沿长波长方向的增益变化较小, 且在任意反转水平下增益谱总随波长的增长呈下降趋势。通常取增益变化 ± 0.5 dB 的波长范围为平坦增益带宽, 在平均粒子反转度为 39% 时, 由图 1 可见平坦增益带宽为 22 nm(1574~1596 nm)。

2) 图 2 是在维持增益谱平坦条件下抽运功率与输入信号功率之间的关系, 可见抽运功率与输入信号功率呈线性关系。

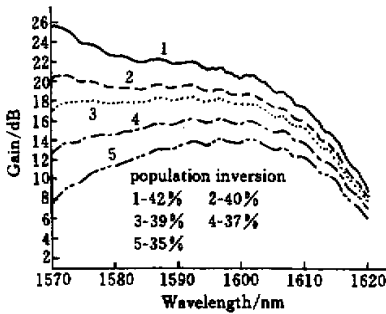


图 1 不同反转水平下 L -波段 EDFA 的增益谱
Fig. 1 Gain spectrum at different population inversion

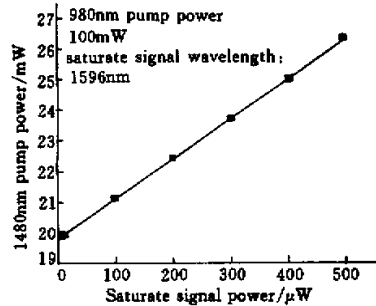


图 2 抽运功率与输入信号功率之间的关系
Fig. 2 Pump versus signal power in the flat gain condition

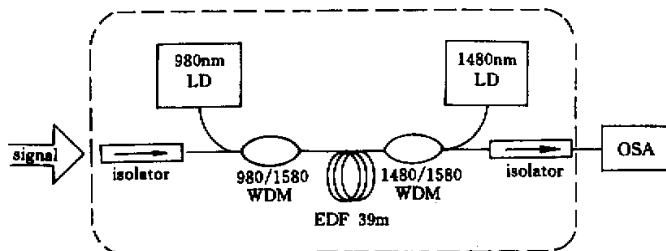


图 3 实验装置图
Fig. 3 Experimental setup

3 实验结果

实验装置如图3所示。掺铒光纤(EDF)长40 m,数值孔径 $NA = 0.22$,截止波长918 nm,对信号光和抽运光的吸收系数分别为15.6 dB/m(1531 nm),11.4 dB/m(979 nm)和6.5 dB/m(1480 nm),背景损耗0.035 dB/m。采用980 nm正向抽运和1480 nm反向抽运结构,输入和输出端分别放置光隔离器以防止光反馈。用光谱仪(OSA)AQ-6317(ANDO)进行输出谱的观测。

3.1 L-波段小信号增益与波长的关系

用可调谐掺铒光纤环形激光器作信号源,输出波长在1560~1604 nm范围内连续可调。980 nm抽运功率为100 mW,1480 nm抽运功率为58 mW。采用单个波长的逐点扫描法,实验测量了1572,1589,1594和1604 nm等四个波长的小信号增益及其饱和特性。实验结果如图4所示。

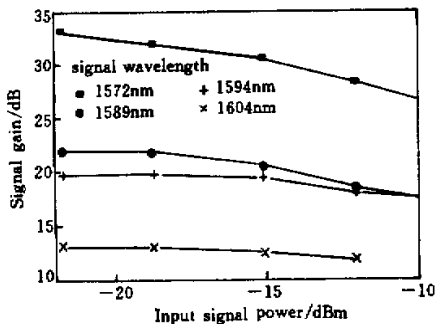


图4 增益与输入信号功率的关系

Fig. 4 Signal gain versus input signal power

实验结果表明,随着输入信号功率的增加,EDFA进入饱和工作状态,放大器的增益随输入信号功率增加而减小;另外,增益与信号波长相关,在相同抽运条件下,1572 nm的小信号增益高达33 dB,而1604 nm的增益仅13 dB,可见增益谱很不平坦。

3.2 L-波段的WDM增益谱

在多信道同时输入的WDM系统中,EDFA的WDM增益谱与单波长逐点测得的增益谱是不同的。WDM增益谱的测量采用宽谱法^[4],即采用适当波长和相当于多信道输入总功率的饱和激光信号将EDFA的粒子数反转水平箝制在相应的水平,用小功率的宽谱探测信号源(BBS)一次性测出整个谱宽范围内多信道的增益。与较高功率的饱和光信号

相比,BBS功率对粒子数反转水平的影响可忽略。实际测量时,先测出只有饱和输入信号时EDFA的输出谱 $P_{ASE}(\lambda)$;然后,测量同时输入饱和信号和BBS信号时EDFA的输出谱 $p_{out}(\lambda)$;最后,测量BBS信号的功率谱 $P_{in}(\lambda)$ 。于是,增益谱可从下式得出

$$\text{Gain}(\lambda) = \frac{P_{out}(\lambda) - P_{ASE}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (8)$$

实验中采用可调谐掺铒光纤环形激光器作饱和和信号源,波长为1594 nm,功率为300 μW ;采用掺铒光纤的ASE谱作探测信号源,功率为3 μW ,980 nm抽运功率固定在100 mW,通过改变1480 nm抽运功率以观测不同粒子数反转水平下的增益谱。

实验结果如图5所示。当1480 nm抽运功率低于25 mW时,L-波段EDFA的增益谱不平坦,增益峰值在1590 nm附近。提高1480 nm抽运功率,整个L-波段EDFA的增益明显增大,且短波长信号的增益增加幅度超过长波长信号,所以EDFA的增益谱趋于平坦。当1480 nm抽运功率增加到25 mW时,L-波段EDFA在约22 nm宽(1574~1596 nm)的波长范围内增益为16 dB,增益谱的不平坦度小于 ± 0.5 dB。通过计算得出此抽运条件下粒子数反转水平为39%,实验结果与理论计算结果相符。继续增大抽运功率,L-波段EDFA在短波长(1570 nm附近)处的增益将高于长波长处增益,平坦增益谱变窄。

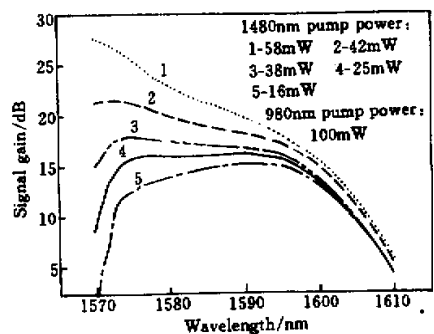


图5 L-Band EDFA的增益谱

Fig. 5 Gain spectrum of L-Band EDFA

3.3 维持平坦增益谱条件下抽运功率与信号功率的关系

对于一个增益谱达到最佳平坦度的EDFA,当信号功率改变时,将因粒子数反转水平的改变而引

起平坦增益谱的畸变,这可以通过调整抽运功率来补偿,即实现 EDFA 的动态增益均衡。为此,实验研究了维持平坦增益谱条件下的抽运功率与信号功率的关系。

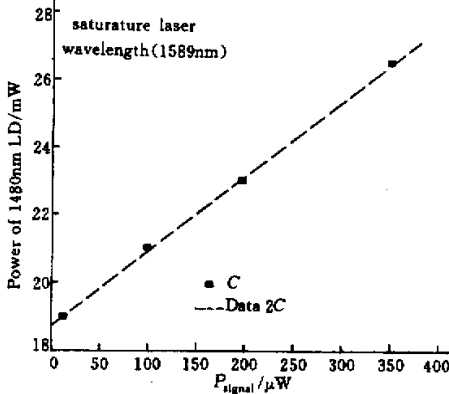


图6 维持平坦增益,抽运功率与信号功率的关系

Fig.6 Pump versus signal power in the flat gain condition

实验中,将 980 nm 前向抽运的功率保持在 100 mW,改变信号功率的大小,通过调节 1480 nm 反向抽运功率达到增益谱平坦。图 6 是实验测得的维持平坦增益谱状态下抽运功率与输入信号功率的关系,可见抽运功率随信号功率的增大而线性增大。这说明 L-波段 EDFA 抽运的微分子量子转换效率

$$QCE_d = \frac{\Delta P_{\text{pump}}/h\nu_{\text{pump}}}{\Delta P_{\text{signal}}/h\nu_{\text{signal}}}$$

是常数。这个结论同前面数值模拟计算所得结论也相符合。

4 结论

理论和实验研究了 L-波段 EDFA 的增益谱特性。当工作在多信道时,通过调节抽运功率,改变掺铒光纤的粒子数反转水平,L-波段 EDFA 的 WDM 增益谱形状会改变。选择合适的粒子数反转水平,可以在 1574~1596 nm 间获得较为平坦的增益谱。在平坦增益条件下,抽运功率增加与信号功率的增加呈线性关系。

参考文献

1. Y. Sun, J. W. Sulhoff, A. K. Srivastava *et al.*. 80 nm ultra-wideband erbium-doped silica fibre amplifier. *Electron. Lett.*, 1997, 33(23):1965~1967
2. C. R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, 9(2):271~283
3. Hirotaka Ono, Makoto Yamada, Terutoshi Kanamori *et al.*. 1. 58- μm band gain-flattened erbium-doped fiber amplifiers for WDM transmission systems. *J. Lightwave Technol.*, 1999, 17(3):490~496
4. Yuan Wei, Liu Xiaoming, Li Qun *et al.*. The iterative method of measurement on multichannel gain spectrum of EDFAs. *Acta Electronic Sinica* (电子学报), 1999, 27(5):40~42 (in Chinese)