

文章编号: 0258-7025(2002)11-0987-04

本征平坦增益带宽 > 33 nm 的高增益、 低噪声 L-波段铒光纤放大器

张岩滨, 彭江得, 刘小明

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

提要 对掺铒光纤 L-波段的增益谱特性进行了理论模拟与实验, 确定了形成平坦增益谱的最佳粒子数反转条件 (~40%); 采用两段级连分配抽运放大光路, 小信号增益 > 36 dB, 最低噪声系数 < 4.4 dB, 在不加增益平坦滤波器的条件下, 23 ± 0.5 dB 的本征平坦增益带宽达到 33.5 nm(1569 ~ 1602.5 nm)。

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

L-band Erbium Doped Fiber Amplifier with Intrinsic Gain Flattering Bandwidth of > 33 nm

ZHANG Yan-bin, PENG Jiang-de, LIU Xiao-ming

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

Abstract The characteristics of L-band erbium doped fiber are investigated by numerical simulation and experiment. Gain spectrum is flat on optimum population inversion level (~40%). High gain (> 36 dB) and low noise (< 4.4 dB) are achieved with dual-stage configuration. The flattened amplification bandwidth is 33.5 nm (± 0.5 dB) (1569 ~ 1602.5 nm) without gain equalized filter (GEF).

Key words erbium doped fiber amplifier (EDFA), L-band, wavelength division multiplexer (WDM)

1 引言

随着大容量宽带光通信网络的加速发展, 工作在 C-波段 (1.52 ~ 1.56 μm) 的掺铒光纤放大器 (C-EDFA) 的增益带宽已不能满足要求。采用长的掺铒光纤 (EDF) 并降低粒子数反转水平, 可使 EDFA 工作在 1.57 ~ 1.61 μm 波长范围 (称为 L-波段), 将 C-EDFA 与 L-EDFA 并联使用, 实现了超宽带的光放大, 增益带宽扩展到 70 ~ 80 nm^[1]。

与 C-EDFA 相比, L-EDFA 的光放大过程有两点显著的差别: 一是 EDF 在 L-波段的单位长度增益很低, 要获得高增益需要较长的光纤; 二是在长的 EDF 中, 980 nm 或 1480 nm 抽运光在靠近抽运源的光纤段中已经基本耗尽, 在剩余光纤段中传播的

主要是 C-波段放大的自发辐射 (C-ASE) 和被放大的 L-信号光; 而这部分 C-ASE 将被再吸收而成为 L-信号光放大的二次抽运源^[2]。因此, 如何适当配置抽运功率与 EDF 长度以实现最大的增益谱平坦度, 如何有效地控制 C-ASE 以改善噪声特性, 又充分利用 C-ASE 来提高整体抽运效率, 便成为实现 L-EDFA 高增益、低噪声、宽频带放大的关键问题。

本文报道了对 L-波段 EDF 本征平坦增益谱特性进行的理论模拟与实验结果, 并确定了形成平坦增益谱的最佳粒子数反转条件 (~40%)。采用级连分配抽运放大光路, 通过对 C-ASE 进行有效调控, 小信号增益可达到 > 36 dB, 最低噪声系数 < 4.4 dB, 在不另加增益平坦滤波器的情况下, 23 ± 0.5 dB 的本征平坦增益带宽达到 33.5 nm (1569 ~ 1602.5

收稿日期 2001-08-06; 收到修改稿日期 2001-11-05

作者简介 张岩滨 (1969—) 男, 1998 年至今在清华大学电子工程系攻读博士学位。主要研究掺铒光纤放大器。E-mail: zhangyanbin98@mails.tsinghua.edu.cn

nm)。

2 L-EDFA 的本征平坦增益谱特性

掺铒光纤在波长 λ_k 处的增益 g_k 与粒子数反转之间的关系式为^[3]

$$g_k(\text{dB}) = L \left[\left(\alpha_k + g_k^* \right) \frac{n_2}{n_1} - \alpha_k \right] \quad (1)$$

其中, L 为掺铒光纤的长度, α_k 和 g_k^* 分别为波长 λ_k 处实测的吸收系数和发射系数, n_1 为铒离子的线密度, $n_2 = \frac{1}{L} \int_0^L n_2(z) dz$ 为整个掺铒光纤的平均上能级粒子数线密度。从(1)式可以看出, 在光纤参数和长度确定的条件下, 增益谱形状只和总的平均粒子反转水平有关, 在此条件下的放大器增益唯一地由 EDF 长度决定。

采用如图 1 所示的实验装置, 使用的 EDF 数值孔径 $NA = 0.257$, 截止波长 1210 nm, 对信号光和抽运光的吸收系数分别为 16.77 dB/m(1529 nm), 8.68 dB/m(979 nm) 和 7.67 dB/m(1480 nm)。采用 980 nm 正向抽运和 1480 nm 反向抽运, 以便获得较低的噪声系数和较高的抽运效率。前端置光隔离器以防止输入端光反馈; 后端接光循环器, 除用来隔离输出端光反馈之外, 还同时兼作反向抽运光的输入接口和放大信号光的输出接口。采用光谱仪 (AQ-6317, ANDO) 对输入、输出光谱进行观测。

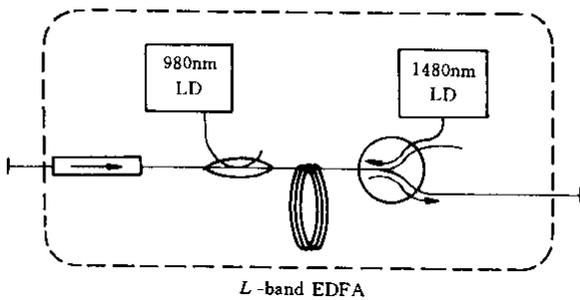


图 1 单段结构 EDFA 装置图

Fig. 1 Configuration of single-stage EDFA

EDFA 的波分复用(WDM)增益谱采用宽谱法进行测量^[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谱。实验中采用波长为 1586 nm 的半导体激光器作饱和信号源, 功率为 30 μW ; 采用掺铒光纤的

ASE 谱作为探测信号源, 功率为 0.3 μW 。相比于较高功率的饱和光信号而言, BBS 功率对粒子数反转水平的影响可忽略。980 nm 抽运功率固定在 100 mW, 通过改变 1480 nm 抽运功率调整粒子数反转水平使增益谱趋于平坦。

图 2 为实验测得的增益谱, 其中虚线是数值模拟结果。由图可见, 通过调整粒子数反转水平, EDFA 在 1570 ~ 1600 nm 波长范围内可获得比较平坦的增益谱; EDF 的本征增益谱在 L -波段有两个峰, 峰值分别在 1573 nm 和 1594 nm。调整抽运功率可以使这两个波长峰值增益相同, 此时 L -EDFA 的增益谱最为平坦, 在约 32 nm 宽(1570 ~ 1602 nm)的波长范围内增益谱的不平坦度小于 ± 0.5 dB。当 EDF 长度为 50 m 时, 平坦增益为 32 dB。当 EDF 长度为 40 m 时, 平坦增益为 22 dB。实验结果同数值模拟结果非常吻合。当光纤长度确定后, 平坦增益的大小也就决定了, 所以在设计增益谱平

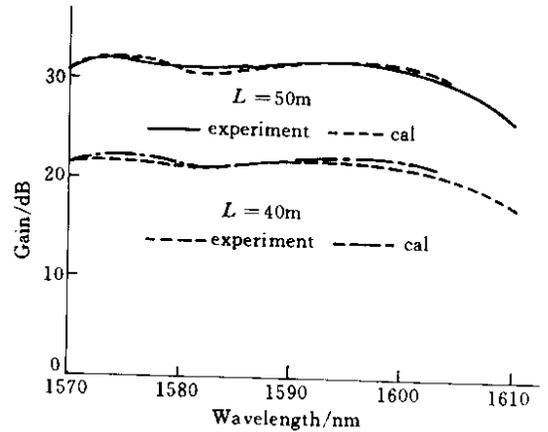


图 2 EDFA 增益谱

Fig. 2 Gain spectra of EDFA

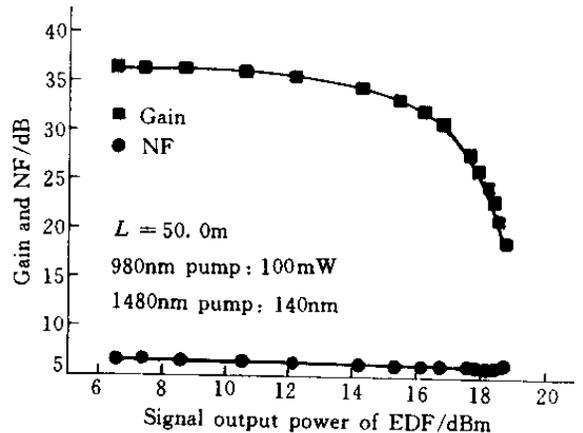


图 3 增益、噪声系数与输出功率关系曲线

Fig. 3 Gain and NF vs output power

坦的 EDFA 时 , 首先根据要求达到的平坦增益确定所需 EDF 的总长度。

图 3 给出当 EDF 为 50 m 时测得的放大器增益、噪声系数与输出光功率的关系曲线。由图可见 , 1586 nm 波长的小信号增益大于 36 dB , 噪声系数小于 6.5 dB。这说明尽管单段掺铒光纤的 L-EDFA 可获得足够增益的宽带光放大 , 但噪声系数较大 , 这主要是由于反向 ASE 的饱和作用降低了近抽运端 EDF 段的粒子数反转水平所造成的。

3 级连 L-EDFA 的放大特性

对 L-EDFA 抽运效率的研究表明^[5] , C-ASE 对 L-波段的光放大器有二次抽运的重要作用 , 与 L-信号光同方向注入 C-ASE(或激光)可以显著提高抽运效率 , 且对噪声系数的影响不大 , 甚至在一定条件下还可改善噪声特性。在单段光纤的 L-EDFA 中 , 反向 C-ASE 不仅使输入光纤段的粒子数反转度降低 , 导致增益和噪声特性变坏 , 而且还因其从输入端漏出而不能对 L-波段的放大进行二次抽运 , 致使抽运效率降低。因此 , 实用的 L-EDFA 宜采用级连放大的光路结构。

类似于常见的两段级连 C-EDFA , 通过级间串接的光隔离器阻挡后级 EDF 产生的反向 ASE 进入前级 EDF , 使前级 EDF 处于高反转的低噪声放大状态 , 后级 EDF 处于低反转的高功率放大状态 , 从而同时实现低噪声和高功率的放大。而且 , 既然 C-ASE 对 L-波段放大的抽运效率有重要作用 , 从前级注入后级的正向 C-ASE 成为 L-波段放大的二次抽运源 , 这些因素都将导致整体抽运效率的提高。

考虑到 C-ASE 在 L-EDFA 中的特殊作用 , 前后两级 EDF 的长度比例与抽运功率的配置与 C-EDFA 的参量设计有很大不同 , 需要进行精细的模拟设计。图 4 是模拟计算的放大增益和噪声系数 (NF) 与光纤配比之间的关系。从增益与光纤配比关系曲线上 , 可以看出第一段光纤 (EDF1) 所占比例小于 5% 之前 , 信号的增益随 EDF1 所占比例的增加而迅速增大。EDF1 所占比例大于 5% 之后 , 信号的增益仍随 EDF1 所占比例增加而增大 , 但是增大的速度变缓 , 而且与最高增益 (30% 时) 的差别不大 , 只要 EDF1 的比例大于 5% , 级连放大器就工作在较高的抽运转换效率下。在 NF 与光纤配比曲线上 , 当 EDF1 所占比例大约为 6.3% (2.7 m) 时 , 放大器的 NF 有最小值。综合考虑抽运效率和 NF , L-

波段级连掺铒光纤放大器的结构特点是第一级 EDF 所占比例非常小 , 同时它的抽运功率也较小。

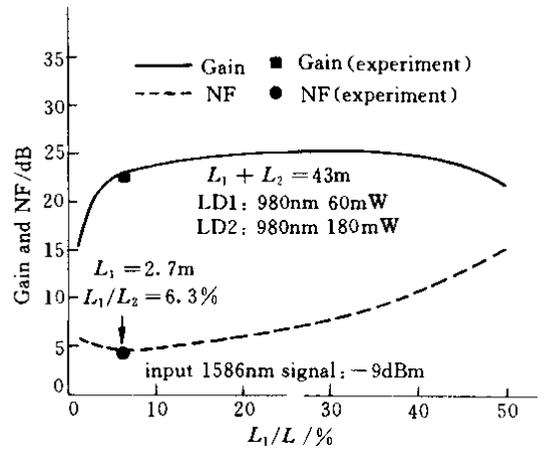


图 4 级连 L-EDFA 增益、噪声系数与光纤配比关系
Fig.4 Gain and NF vs proportion to total EDF

优化设计后的两段级连结构的 EDFA 如下 : L-波段 EDF 总长度 43 m , 其本征平坦增益在 23 dB 左右。其中 2.7 m EDF 作预放级 , 预放级采用 60 mW 的 980 nm (LD1) 反向抽运 , 一来减小输入 WDM 耦合器损耗对噪声系数的净影响 , 使 NF 降低 ; 二来可增强向后级正向注入的 C-ASE , 经后级进一步放大后即构成有效的 C-ASE 二次抽运源 , 以利提高抽运效率。后级主放大采用 40.3 m 的 EDF , 并采用 180 mW 的 980 nm (LD2) 正向抽运。980 nm 正向抽运可以减小后级放大的 NF , 从而降低 EDFA 的总的 NF , 同时 980 nm 抽运对前级注入的 C-ASE 的放大 , 有效地增强了后级放大中 C-ASE 的二次抽运作用。图 4 的实验结果也证明了此优化后的放大器增

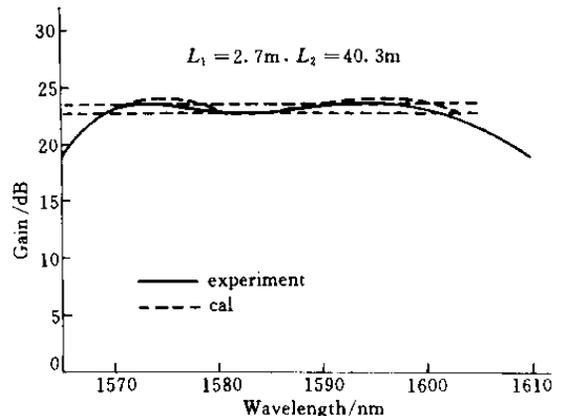


图 5 级连 L-EDFA 增益谱
Fig.5 Gainspectrum of dual-stage L-EDFA

益较高而 NF 较低,并且实验结果与理论模拟符合较好。

考虑实际密集波分复用(DWDM)系统对 L-波段 EDFA 传输带宽的要求,在采用宽谱法测量增益带宽时,将饱和信号源功率增大到 $200 \mu\text{W}$, ASE 宽谱信号源功率取为 $2.5 \mu\text{W}$ 。图 5 给出实验测量的增益谱,虚线是数值模拟结果,在约 33.5 nm 宽 ($1569 \sim 1602.5 \text{ nm}$) 的波长范围内增益为 23.1 dB ,增益谱的不平坦度小于 $\pm 0.5 \text{ dB}$,理论模拟与实验结果一致。

图6为实验测得的放大器增益、噪声系数与输出

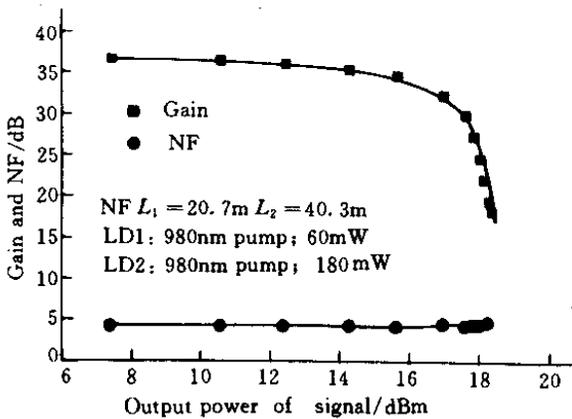


图 6 级连 L-EDFA 增益、噪声系数与输出功率关系曲线

Fig. 6 Gain and NF vs output power in dual-stage L-EDFA

出光功率的关系曲线。实验结果说明,与图 3 所示单段光纤 L-EDFA 的放大特性相比,这种优化设计的两段级连 L-EDFA 的噪声系数大大降低。在输入信号功率 -20 dBm 时, NF 小于 4.4 dB ,小信号增益大于 36 dB 。

参 考 文 献

- 1 Y. Sun, J. W. Sulhoff, A. K. Srivastavva. 80 nm ultra-wideband erbium-doped silica fibre amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(23):1965 ~ 1967
- 2 Hiroataka Ono, Makoto Yamada, Terutoshi Kanamori *et al.*. 1. 58- μm band gain-flattened erbium-doped fiber amplifiers for WDM transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(3):490 ~ 496
- 3 C. R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2):271 ~ 283
- 4 Yuan Wei, Liu Xiaoming, Li Qun *et al.*. Iterative measurement of EDFA multichannel gain spectrum [J]. *Acta Electronic Sinica* (电子学报), 1999, **27**(5):40 ~ 42 (in Chinese)
- 5 Zhang Yanbin, Liu Xiaoming, Peng Jiangde. L-band EDFA Efficiency Enhancement and Dynamic Range Extension by C-band Laser Injection [C]. *Asia-Pacific Optical and Wireless Communications (APOC2001), Passive Components and Transmission Systems*, 164
- 6 H. S. Chung, M. S. Lee, D. Lee *et al.*. Low noise, high efficiency L-band EDFA with 980 nm pumping [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(13):1099 ~ 1100