

# 适合 WDM 网络动态增益均衡的全光增益锁定光纤放大器\*

崔景翠 刘小明 陈智浩 顾东华 彭江得

(清华大学电子工程系 北京 100084)

**提要** 在光纤放大器内部同时建立增益谱锁定与平坦机制,研制出适合 WDM 网络应用的全光锁定高增益、大功率掺铒光纤放大器(EDFA)。在 23 dB 输入功率动态范围(-40 ~ -17 dBm)内的增益箝制在 33 dB,对应总输入功率为-17 dBm 的输出光功率为 16 dBm,锁定的 -1 dB 增益带宽为 14 nm(1547~1561 nm)。

**关键词** 光纤放大器,增益锁定,动态均衡

## 1 引言

实现大动态范围内的信道增益均衡是掺铒光纤放大器(EDFA)用于波分复用(WDM)系统中的最主要问题。迄今已采用多种方法来改善 EDFA 增益谱的平坦度。然而,单纯平坦的静态增益谱并不能满足实际 WDM 系统的要求,因为掺铒光纤均匀展宽谱内的信道竞争仍将导致信道间的增益失衡<sup>[1]</sup>。对于点对点的长距离传输系统,采用信道输入功率预加重或增益均衡滤波器(如长周期光纤光栅)的确可在一定程度上减小级连 EDFA 累积的信道间光功率差<sup>[2]</sup>。然而,这些方法对多点对多点的光网络并不适用,因为不同的信道可能沿不同的路径传播,通过每个 EDFA 的信道可能因网络的重构或光上/下话路而改变,因而导致网点上信道间功率的跳变<sup>[3]</sup>;另外,在含不同格式信号的混合 WDM 传输系统中,较低输入功率(<-10 dBm)的数字信号与大功率(>+3 dBm)的视频信号可能在不同的信道上共线传播,一旦视频信号中断,数字信道就会从深饱和状态跳变到小信号状态<sup>[4]</sup>。所有这些问题使 WDM+EDFA 传输技术走向工程化遇到严重障碍。本文在对 EDFA 进行全光增益锁定的基础上,进一步引进对增益谱的滤波整形机制,研制出集放大、增益锁定与平坦功能于一体的均衡 EDFA,在足够平坦的增益带宽(-1 dB 带宽 14 nm)内赋予激光锁定级联放大器以高增益(33 dB)、低噪声(5 dB)、大功率(16 dBm)的优良特性。

## 2 均衡放大器工作原理

这种均衡放大器的设计思路是:第一,引进光反馈机制将放大器增益谱锁定,使不同波长

\* 国家 863 计划资助项目。

信道间的增益交叉耦合得以抑制,并在不同功率水平下保持恒定;第二,引进滤波整形机制在锁定放大的过程中将增益谱整平,使不同功率水平下各信号波长的增益相同,并被箝制在一固定数值;第三,引进隔离级联放大机制以抑制放大的自发辐射(ASE),可实现在高功率、低噪声工作状态下平坦增益的锁定。

均衡放大器的结构框图如图 1 所示。

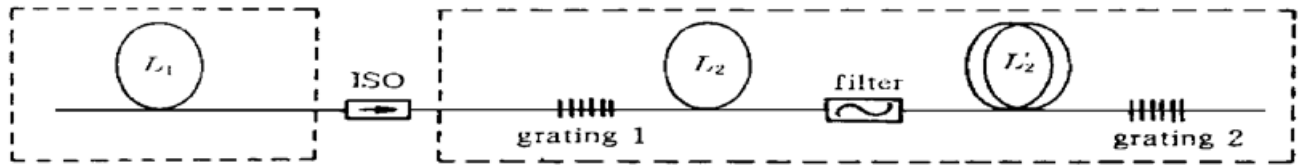


图 1 均衡放大器结构框图

Fig. 1 Gain-equalized EDFA scheme

## 2.1 增益谱的锁定

在 EDFA 内嵌入两个光纤光栅(图 1 中 Grating 1 和 Grating 2),选择某一合适波长的光形成激光振荡,利用激光功率随粒子数反转水平而变化的自动调节作用来维持增益的恒定。根据熟知的激光原理,激光稳定振荡的阈值条件为

$$G(\lambda) = \text{Loss}(\lambda) \quad (1)$$

式中  $G$ ,  $\text{Loss}$  分别表示激光波长  $\lambda_l$  处的总增益和腔内总损耗。而掺铒光纤中激光波长处的增益可以表示为

$$G(\lambda) = G_0(\lambda) \left[ 1 + \frac{P_l}{P_{\text{sat},l}} \right]^{-1} \quad (2)$$

其中  $P_l$  为激光功率,  $P_{\text{sat},l}$  为相应激光波长的饱和功率。 $G_0(\lambda)$  表示激光波长处的小信号增益。当有其他波长的信号光输入时,放大过程将消耗部分反转粒子数致使小信号增益  $G_0(\lambda)$  降低。这时,为满足阈值条件,激光功率  $P_l$  将随之下降而保持激光增益  $G(\lambda)$  及其他信号波长处的增益不变。随着输入信号的增大,  $G_0(\lambda)$  将进一步下降,直至通过  $P_l$  的下降不再能保持  $G(\lambda)$  满足阈值条件(1)而导致激光熄灭。这时的临界信号功率称作放大器增益箝制的动态范围。

任意一段掺铒光纤的增益随信号波长的变化可以用下式表示

$$G(\lambda) = \exp \left[ \int_0^L \left[ g^*(\lambda) \frac{n_2}{n_t} - \alpha(\lambda) \frac{n_1}{n_t} \right] dz \right] \quad (3)$$

其中  $n_2, n_1$  分别为相应上、下能级粒子数,  $n_t$  为铒离子总数并有  $n_t = n_1 + n_2$ ,  $g^*$ ,  $\alpha$  分别为掺铒光纤的增益系数和吸收系数,均为波长的函数,  $L$  为掺铒光纤长度。由于掺铒光纤以均匀加宽为主的谱特性,任何波长输入信号的受激放大都可引起粒子数  $n_1, n_2$  的改变而影响其他波长下的增益,这就是信道间的增益交叉耦合作用。当泵浦充分且信号较小时,  $n_2 \gg n_1$ , 光增益主要由(3)式右边第一项决定。当信号较大时,反转粒子数消耗较多,光增益由(3)式两项之差决定,因而放大器的饱和深度将导致增益谱的改变。但在增益箝制的动态范围内,反转粒子数始终被箝制在激光的阈值水平上,因而增益谱也是被箝制的,其形状取决于掺铒光纤的特征参数  $g^*$ ,  $\alpha$  及激光腔的损耗。

## 2.2 增益谱的整平

数值模拟和实验都证明,对于一般的铒/铝共掺光纤,当光纤较短、泵浦较强时,由于粒子

数反转水平较高,增益谱在 1530 nm 附近有极大值;当光纤较长、泵浦不够充分时,粒子数反转水平较低,增益谱在 1558~1560 nm 附近有极大值。增益锁定动态范围较大的 EDFA 总是工作于深饱和状态而使增益谱变得不平坦,而且增益峰值随饱和程度的加深而向长波长方向偏移,因而必须设法将锁定的增益谱整平。为此,在增益区的适当位置插入其损耗谱与增益谱演变趋势成反演分布的宽带光滤波器(图 1 中的 Filter),不仅可通过滤波器损耗谱对放大过程的增益谱进行调整而将其滤平,而且,滤波器引进的附加损耗可从放大过程得到补偿。一旦达到平坦要求,在锁定动态范围内输入信号功率的大小对增益谱的形状不再产生影响。

### 2.3 隔离级联放大

增益锁定动态范围较大的 EDFA 将因伴生强激光的产生而消耗大量反转粒子数,致使锁定的增益水平降低,并使噪声特性恶化。因而必须设法实现在高增益、高功率和低噪声条件下平坦增益谱的锁定。EDFA 的增益及噪声特性取决于泵浦掺铒光纤中的粒子反转程度。对于使用单段掺铒光纤的激光增益锁定 EDFA,因其始终工作于低反转的深饱和工作状态而很难同时获得高增益、大功率和低噪声特性。因此,提高锁定放大性能的有效途径是采用级联放大光路<sup>[5]</sup>。采用光隔离器(图 1 中 ISO)将 EDFA 分为两级,因光隔离器有效地阻挡了后级掺铒光纤 ASE 对前级的影响,使第一级处于高反转水平而工作在高增益、低噪声状态,将第二级增益锁定使之工作于低反转水平的大功率状态。研究表明,级联放大器的噪声特性主要由第一级决定,处于深饱和状态的第二级对噪声的影响不大;而放大器总增益等于两级放大增益之和。这样,就能保证激光锁定级联放大器在足够平坦的增益谱宽内给出高增益、大功率和低噪声特性。

## 3 实验结果

实验按图 1 所示的光路结构,采用 980 nm 波长的激光二极管泵浦源分别对掺铒光纤进行分段泵浦,泵浦总功率为 190 mW;Er<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup>共掺杂光纤数值孔径为 0.21,截止波长为 925 nm,对泵浦光和信号光的吸收分别为 3.2 dB/m 和 4.57 dB/m;按工程化模拟理论方法优化设计的两级 EDFA 的掺铒光纤长度比约为 1:3;在第二级 EDFA 内嵌入两个中心波长为 1532 nm,反射率为 95% 的光纤光栅,形成 1532 nm 波长的激光振荡;光纤腔内插入双锥光纤滤波器;信号光从第一级光纤左端经光隔离器输入,放大的信号光从第二级光纤右端经光隔离器输出。实验中所用光纤滤波器插入损耗小于 0.2 dB,光隔离器的隔离度大于 35 dB。实验中 ISO, Grating 1, Grating 2 和 Filter 均用 FC 头接入。输入端和输出端都有用 FC 头外接的隔离器。文中的实验结果曲线均是根据未加校正的原始数据画出的。采用扫描光谱分析仪和光功率计对 EDFA 的输出光谱及功率进行监测。

### 3.1 增益、功率、噪声特性

用中心波长为 1553 nm 的带尾纤输出的分布反馈激光器作信号源,测量放大器在锁定前后和平坦前后的增益/噪声与输入光功率的关系曲线,如图 2(a)所示。未引入锁定和平坦机制时,小信号增益高达 44 dB,进入饱和区后增益急剧下降,当输入功率为 -17 dBm 时,增益为 33.7 dB。增益锁定后的 EDFA 在输入功率小于临界值(-17 dBm)的整个锁定区有恒定的增益(33.5 dB),其中增益下降的 0.2 dB 是光栅插入损耗引起的;当进一步引入滤波器后,锁定的动态范围并没有改变,只是因为滤波器在 1553 nm 处引入了约 0.2 dB 的插入损耗而导致

恒定增益下降为 33.3 dB。超出锁定范围后,除了光栅和滤波器引入的附加损耗外,三种情况下增益特性仍然相同。

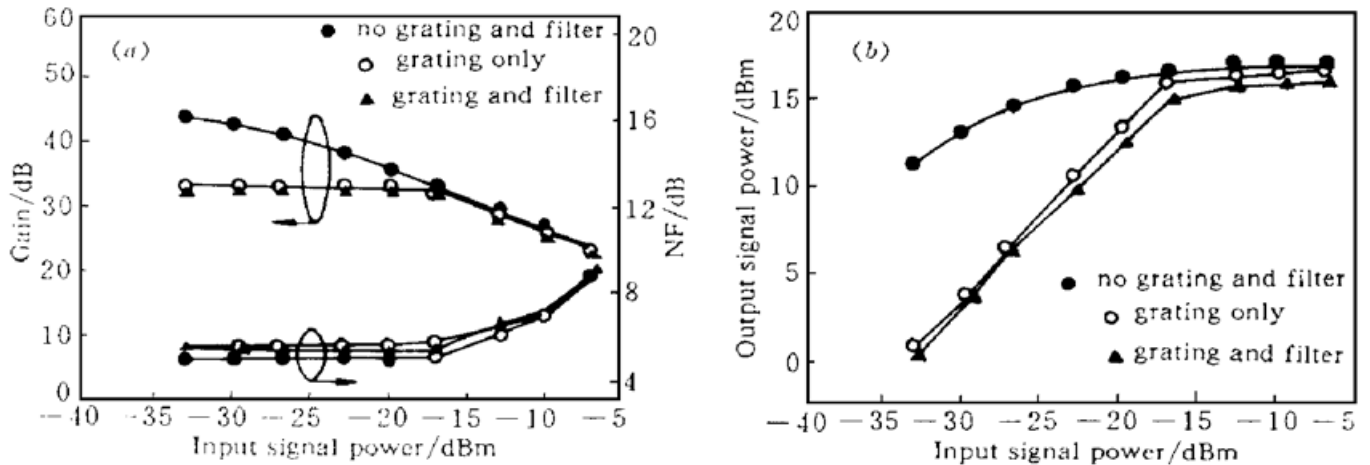


图 2 EDFA 的增益、噪声和功率特性

(a) 增益、噪声与输入功率关系曲线; (b) 输出功率与输入功率关系曲线

Fig. 2 EDFA gain/noise/power characteristics

(a) gain/noise vs input power; (b) output power vs input power

由图 2(a) 可见,在没有引入锁定与平坦机制时,小信号噪声系数  $NF$  为 5 dB。考虑输入光隔离器和焊点损耗为 0.9 dB,光纤内部噪声系数约为 4.1 dB。可以看出:在后级加上光栅后,  $NF$  稍有恶化,而再加上滤波器后  $NF$  又比只加光栅时有所改善。从级联放大的原理来说,当 EDFA 工作于线性放大区时,噪声特性主要由前级的  $NF$  决定。然而,在本实验中,因兼顾锁定放大器高增益、大功率及宽动态范围的要求,放大器并不工作于线性区,而且前级的泵浦功率和光纤长度配置也没有满足对噪声特性优化的条件,所以总  $NF$  应不仅仅由前级决定。由于光栅插入损耗的引入使得后级噪声系数恶化,从而影响了总  $NF$ ;而宽带滤波器对 ASE 有一定的抑制作用,从而又使放大器的总  $NF$  有所改善。

图 2(b) 为放大器输出光功率与输入光功率的关系曲线。由图可见,在没有引入锁定与平坦机制的情况下,输入功率为 -30 dBm 时,放大器开始进入饱和工作状态。随着输入功率增大,输出功率缓慢增长,增益下降。这对 WDM 网络应用中信道的均衡是不利的。而在引入锁定后,在锁定区 EDFA 对输入信号进行线性放大,增益保持不变。考虑到输出隔离器和接头损耗为 0.9 dB,实验测量结果(图 2(b))应校正 0.9 dB。所以,若将工作点选在临界输入功率(-17 dBm)附近,可以在锁定范围内获得尽可能大的输出功率(16 dBm)。

### 3.2 带宽特性

由于均匀展宽为主的铒离子辐射跃迁导致信道间的竞争,用单个波长测得的 EDFA 静态增益谱并不能真实反映在 WDM 系统中实际增益谱的情况。因此,实验中采用等效饱和条件的宽谱光源来模拟 WDM 系统中各个信道的增益分布,并测量 EDFA 的动态增益谱。图 3(a) 所示为总输入功率为 -17 dBm 时不同情况下的增益谱。在没有锁定和平坦措施时, -1 dB 增益带宽仅为 6 nm(1555~1561 nm);在锁定的基础上,在掺铒光纤的适当位置加上损耗谱与 EDFA 增益谱演变趋势成反对称分布的宽带双锥光纤滤波器(其滤波特性如图 3(b))后, -1 dB 增益带宽达到了 14 nm(1547~1561 nm),且增益被锁定在将近 33 dB。这一特性基本满足中继距离为 120 km 的 WDM 8×2.5 Gbit/s 系统的要求。

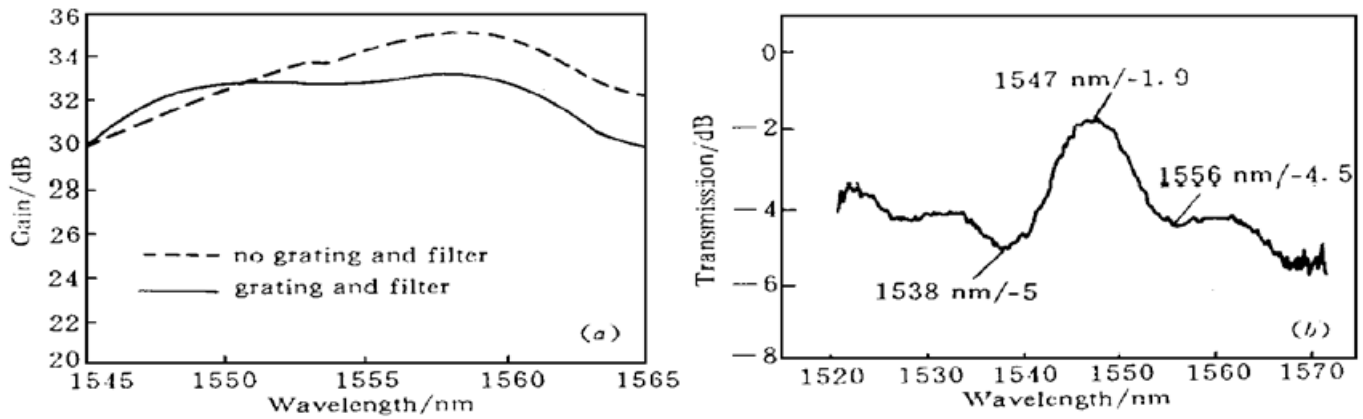


图3 (a) 不同情况下 EDFA 的增益谱; (b) 双锥滤波器的滤波特性

Fig. 3 (a) EDFA gain spectrum under different operating conditions; (b) Transmission of a tapered filter

## 4 结 论

采用经参量优化设计并引入增益锁定与增益平坦机制的级联放大光路,使同一掺铒光纤放大器在  $1.55 \mu\text{m}$  波段实现了在  $-40 \sim -17 \text{ dBm}$  的输入范围内(即:增益锁定动态范围  $23 \text{ dB}$ )增益恒定为  $33 \text{ dB}$ ,该动态范围内的噪声系数小于  $6 \text{ dB}$ , $-1 \text{ dB}$  带宽为  $14 \text{ nm}$ ( $1547 \sim 1561 \text{ nm}$ ),最大输出功率达  $16 \text{ dBm}$ 。均衡放大器性能的进一步改善,可以考虑进一步优化滤波器特性和位置,以改善增益带宽;考虑选择第一段掺铒光纤为低掺杂光纤,以达到低噪声目的。进一步研究仍在进行之中。

## 参 考 文 献

- 1 Alan E. Willner, Syang-Myau Hwang. Transmission of many WDM channels through a cascade of EDFA's in long-distance links and ring networks. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5): 802~ 816
- 2 M. Tachibana, R. I. Laming, P. R. Morkel. Erbium-doped fibre amplifier with flattened gain spectrum. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(2): 118~ 120
- 3 C. R. Giles, E. Desurvire, J. R. Simpson. Transient gain and cross talk in erbium-doped fiber amplifiers. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(16): 880~ 882
- 4 Hongxing Dai, Jinyi Pan, Chinlon Lin. All-optical gain control of in-line EDFA for hybrid AM/digital WDM system. *Optical Fiber Communication, Tech. Dig., Texas*, 1997, **6**: 133~ 134
- 5 Tang Pingsheng, Liu Xiaoming, Liu Dan. Experiment study of two-stage erbium-doped fiber amplifier with hybrid pumping. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(4): 472~ 475 (in Chinese)

## All-optical Gain-clamped in-Line Fiber Amplifier for Dynamic Gain Equalization of WDM Networks

Cui Jingcui Liu Xiaoming Chen Zhihao Gu Donghua Peng Jiangde  
(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** An all-optical gain-clamped and flattened fiber amplifier is reported. This technique is applicable for WDM networks with dynamic gain equalization of high-gain, high-power EDFAs. The dynamic range reaches  $23 \text{ dB}$  ( $-40 \sim -17 \text{ dBm}$ ) for a constant  $33 \text{ dB}$  gain, while the  $-1 \text{ dB}$  gain bandwidth is  $14 \text{ nm}$  ( $1547 \sim 1561 \text{ nm}$ ). The output signal power is  $16 \text{ dBm}$ .

**Key words** fiber amplifier, gain-clamped, dynamic equalization