

# WDM 系统中 EDFA 饱和增益谱特性的 实验研究\*

崔景翠 刘小明 袁 伟 唐平生 彭江得

(清华大学电子工程系 北京 100084)

**提要** 对 WDM 光纤传输系统中 EDFA 的增益谱特性的研究表明: 在饱和工作状态下, 多个信道同时输入时各信道的增益低于相同总输入功率的单个信道的增益, 且增益谱宽变窄, 增益谱峰值随饱和程度的加深向长波长方向偏移。

**关键词** 掺铒光纤放大器, 增益谱, 饱和状态

## 1 引 言

采用掺铒光纤放大器(EDFA)的波分复用(WDM)传输技术已成为高速率、大容量光通信发展的主流方向<sup>[1]</sup>。但由于掺铒光纤本征增益谱的不平坦及其均匀展宽性质, 通常用单路信号逐(波长)点测得的静态增益谱并不能真实反映 WDM 系统中多路信号的动态增益分布; 在级联放大的 WDM 系统中, EDFA 增益谱的微小不平坦会逐级累积放大<sup>[2]</sup>; 在干线及分布网络中, 上/下话路或信道功率的随机涨落会引起信道间功率的失调<sup>[3]</sup>。这种信道增益动态失衡最终将导致整个系统不能正常工作。近年来, 对 EDFA 增益均衡的研究较多集中于实现增益谱的平坦化<sup>[4]</sup>, 但单纯的静态增益平坦并不能保证 WDM 系统中信道增益恒定。采用全光增益锁定的 EDFA 是实现动态增益均衡的有效途径之一<sup>[5]</sup>, 但激光振荡的引入又将使 EDFA 增益谱的平坦度变坏。因此, 研究 WDM 系统中 EDFA 增益谱演变的规律并实现动态增益均衡, 是 WDM 工程系统中 EDFA 实用的关键所在。

本文着眼于饱和工作状态下 WDM 系统中 EDFA 的增益谱特性, 对多路信号同时输入和逐(波长)点输入测量的 EDFA 增益谱进行了比较, 对在不同饱和深度工作状态和不同波长-功率配置下 EDFA 增益谱的演变进行了模拟实验研究。

## 2 实验装置

采用图 1 所示的多路放大实验系统。在 EDFA 的输入端连一个  $N \times N$  的光纤复用器 ( $M$ ), 根据实验需要分别选用  $8 \times 8$  与  $2 \times 2$  两种器件。信号源  $S_1, \dots, S_n$  采用 DFB LD 和在 1532 ~ 1565 nm 波长范围内连续可调、且线宽小于 0.2 nm 的可调谐掺铒光纤激光器。在 EDFA 输

\* 国家 863 计划资助项目。

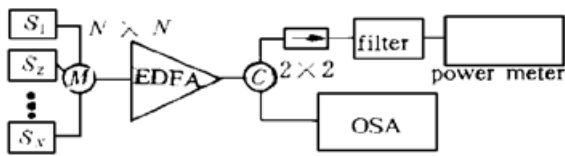


图 1 多路放大的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of multi-channel amplification

出端连一个  $1 \cdot 1$  的光纤耦合器 (C), 其一个输出端经带宽  $0.8 \text{ nm}$  的可调谐 F-P 滤波器(Filter)后通入光功率计, 用来测量 EDFA 的功率。为消除光反馈, 在滤波器前接有光隔离器(ISO)。耦合器另一输出端通入光谱分析仪(OSA), 以观测 EDFA 输出光谱的变化。实验中对 EDFA 输入和输出光路中因耦合器、隔离器、滤波器及光纤接头引进的插入损耗分别进行了标定, 本文中所测增益均折合为 EDFA 的净增益。

实验用的 EDFA 采用  $980 \text{ nm}$  LD 双泵的级连放大结构, 掺铒光纤数值孔径为  $0.21$ , 对泵浦光和信号光的吸收分别为  $\alpha_{980} = 5.5 \text{ dB/m}$  和  $\alpha_{1550} = 3.2 \text{ dB/m}$ , 根据工程化模拟计算确定的最佳光纤长度为  $25 \text{ m}$ 。测得小信号增益为  $44.5 \text{ dB}$ , 噪声系数为  $4.2 \text{ dB}$ , 最大输出功率为  $16.6 \text{ dBm}$ , 在  $-17 \text{ dBm}$  输入功率下  $-1 \text{ dB}$  增益压缩的带宽为  $20 \text{ nm}$  ( $1535 \sim 1565 \text{ nm}$ )。

### 3 实验结果

考虑到 WDM 系统中的 EDFA 通常工作于饱和状态, 特别是在全光增益锁定情况下, 不管输入信号功率大小, EDFA 中实质上只是放大信号功率与激光功率之间的互相转换, EDFA 总是处于深饱和状态。因此, 对 EDFA 增益谱特性的模拟实验均在大信号条件下进行。

#### 3.1 多路信号同时输入时 EDFA 的增益谱特性

在进行多路放大实验前, 先用可调谐光纤激光器作信号源分别在输入功率为  $-10.56 \text{ dBm}$  和  $-3.57 \text{ dBm}$  两个级别上对 EDFA 的增益带宽特性逐个波长点进行了静态测量, 所得结果如图 2 所示。可以看到, 在大信号输入的饱和工作状态下, 逐点测得的 EDFA 增益谱相当平坦, 在  $1544.4 \sim 1561.0 \text{ nm}$  的波长范围内, 对于输入功率  $-10.56 \text{ dBm}$  和  $-3.57 \text{ dBm}$  的最大增益差  $\Delta G_{\max}$  分别为  $0.6 \text{ dB}$  和  $0.3 \text{ dB}$ 。

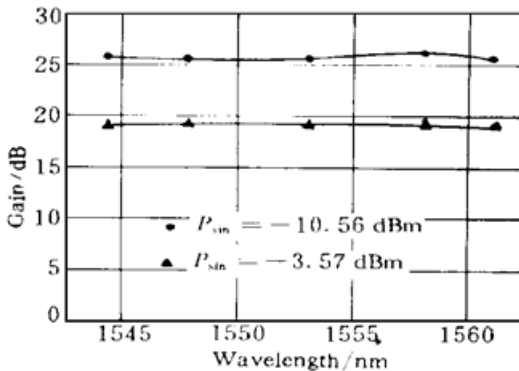


图 2 不同输入功率下逐点测量的增益谱

Fig. 2 Gain spectrum of single channel input

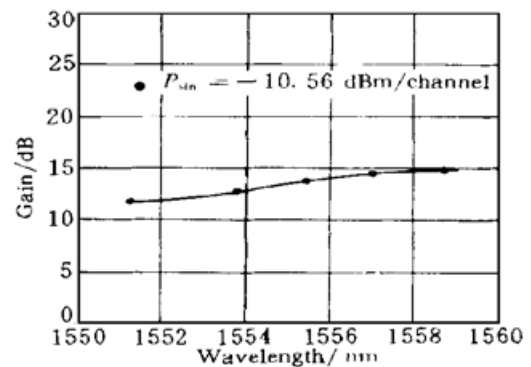


图 3 5路同时输入时的增益谱

Fig. 3 Gain spectrum of five-channel input

多路放大实验以 4 路 WDM 系统为对象, 为便于系统饱和和工作状态的模拟研究, 另引入了一路参考信道, 故图 1 所示系统装置中使用一个  $8 \times 8$  的光纤复用器的 5 个输入端口, 选取中心波长分别为  $1551.3 \text{ nm}$ ,  $1553.8 \text{ nm}$ ,  $1555.4 \text{ nm}$ ,  $1557.0 \text{ nm}$  和  $1558.6 \text{ nm}$  的 DFB LD 作信号光源, 参考实际 4 路 WDM 系统信号源功率电平, 将 5 路信号输入功率都调到  $-10.56$

dBm, 取耦合器的一路合成输出光通入 EDFA 进行放大, 测出各信道的增益如图 3 所示。与图 2 比较可看出: 在 5 路信号同时输入时, 各信道(- 10.56 dBm) 的增益比单点测试的增益低 12 ~ 14 dB, 这是因为 5 路信号的总功率比单路功率要高得多, 使 EDFA 处于更深的饱和状态所致。然而, 在总功率(- 3.57 dBm) 相同的情况下, 5 路信号同时输入的各信道(- 10.56 dBm) 增益比单点测试(- 3.57 dBm) 的增益还要低 4~ 7 dB, 且随波长的增长而增长, 最大增益差  $\Delta G_{max}$  在 3 dB 以上, 与逐点测试的增益谱有很大差别。

### 3.2 在不同饱和深度工作状态下 EDFA 的增益谱特性

为进一步研究 EDFA 的饱和程度对多路信号动态增益的影响, 设想在 4 路总输入功率保持不变的情况下, 观测不同波长信道的增益随输入功率的变化。为此, 实验系统中 EDFA 的输入端换用一个 2×2 的光纤复用器, 其一个输入端选取波长  $\lambda_{REF} = 1553.8 \text{ nm}$  的 DFB LD 作参考信道, 使其输入功率等于 4 路功率之和(- 4.53 dBm); 其另一个输入端接可调谐掺铒光纤激光器, 用作实验信道光源, 将激光波长先后准确调到除参考波长以外与前述 5 路系统其他 4 路相同的波长上, 即 1551.3 nm, 1555.4 nm, 1557.0 nm 和 1558.6 nm, 并分别调节各路输入功率从- 33 dBm 变到- 10.56 dBm, 分别测量在大功率参考信道存在情况下这 4 路波长信道的增益变化。所得结果如图 4 所示。由图可见, 当每路波长为小信号(- 33 dBm) 时, EDFA 的饱和程度由大功率的参考波长信道决定, 测得的短波长(1551.3 nm) 信道增益比长波长(1558.6 nm) 信道增益高出近 10 dB。随着 4 路波长信号功率的增大, 饱和程度逐渐加深, 长、短波长信道的增益差减小, 以致逐渐演变到长波长信道增益高于短波长信道增益。当每路波长信号功率达到- 10.56 dBm 时, 测得的各信道增益随波长的增长而增大, 最大增益差  $\Delta G_{max}$  约 3 dB, 这一规律与相同总输入功率下图 3 所示 5 路信号同时输入时测得的增益变化趋势相同, 但相应各信道的增益值要高出 6~ 8 dB, 而与图 2 所示单路大信号(- 3.57 dBm) 逐点测得的增益值(> 18 dB) 相近。

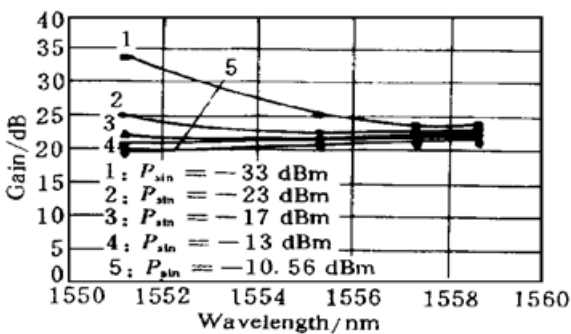


图 4 不同输入功率下 EDFA 的增益谱

Fig. 4 Gain spectrum of an EDFA at different input powers

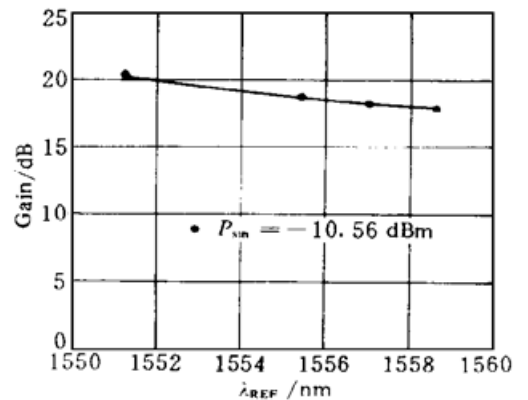


图 5 实验信道存在时不同信道的饱和增益

Fig. 5 Saturated gain of different channels

### 3.3 不同波长-功率配置下的 EDFA 饱和增益谱特性

在 3.2 系统中, 选取波长为 1553.8 nm 的 DFB LD 作实验信道光源, 将其输入功率固定为- 10.56 dBm, 而用可调谐光纤激光器作参考信道光源, 且将激光波长先后准确调到除实验信道光源波长以外与前述 5 路系统其它 4 路相同的波长  $\lambda_{REF}$  上, 并分别调节其输出功率为- 4.53 dBm, 测量大功率参考信道位于不同波长  $\lambda_{REF}$  位置时实验信道的增益  $G_{1553.8 \text{ nm}}$ 。所得结果

如图 5 所示。可以看到,随着恒定大功率的参考信道向长波长方向偏移,短波长信道的增益逐渐下降,越来越多的反转粒子能量转换向参考信道,表明长波长信道的增益占有优势。

## 4 讨 论

从上述实验可以得到 WDM 系统中 EDFA 动态饱和增益谱的两点基本特性:

第一,多个信道同时输入时各信道增益低于相同总输入功率的单个信道的增益,且单个信道逐(波长)点测得的增益谱较为平坦,而在多信道同时放大时增益带宽变窄。

第二,EDFA 的增益谱峰值随饱和程度的加深而向长波长方向偏移。

EDFA 的这种饱和增益谱特性是由于石英玻璃中三能级铒离子辐射跃迁谱的均匀展宽性质所引起的。EDFA 的增益可用下式来表示

$$G_{dB}(\lambda) \sim \int_0^L [\sigma_e(\lambda) N_2(z) - \sigma_a(\lambda) N_1(z)] dz$$

式中  $N_2(z)$ ,  $N_1(z)$  分别为沿光纤长度( $L$ )的  $z$  点处铒离子上能级和下能级的粒子数密度,  $\sigma_e(\lambda)$ ,  $\sigma_a(\lambda)$  分别为与波长有关的发射截面和吸收截面。上式积分表明增益  $G(\lambda)$  是波长的函数。注意到在饱和工作状态时,掺铒光纤中的上、下能级粒子数之差减小,因而  $[\sigma_e(\lambda) N_2(z) - \sigma_a(\lambda) N_1(z)]$  的值及其对不同波长的相对差值相应减小。在单信道逐(波长)点放大时,虽然在各波长处该差值稍有不同,但由于辐射谱的均匀展宽性质,不同波长的单个信道都将因整个谱宽范围内全部反转粒子数可能的贡献而获得较高的、且近乎相等的增益。然而,在多信道同时放大情况下,不同波长的各个信道只能分享部分反转粒子能量而获得相对较低的增益,且因  $[\sigma_e(\lambda) N_2(z) - \sigma_a(\lambda) N_1(z)]$  的波长非均匀性以及信道间的竞争,差值大的信道将占据优势而获得较高的增益,致使增益带宽变窄;而且,随着饱和程度的加深,使得  $N_2 \approx N_1$ , 增益主要由  $[\sigma_e(\lambda) - \sigma_a(\lambda)]$  决定,而研究表明比值  $\sigma_e(\lambda)/\sigma_a(\lambda)$  随波长的增长趋于增大,因而长波长信道的增益随着饱和程度的加深而占优势,导致增益谱峰值向长波长方向偏移。

## 5 结 论

对 WDM 放大系统中 EDFA 的饱和增益谱特性的实验研究表明:多个信道同时输入时各信道的增益低于相同总输入功率的单个信道的增益,且增益谱宽变窄,增益谱峰值随饱和程度的加深向长波长方向偏移。因此,设法展宽动态增益带宽是 EDFA 在 WDM 系统中实用的关键。在用光反馈或电反馈进行自动增益控制的 EDFA 中,采用重掺 Al 或 Al/P 共掺的铒光纤和外加滤波器的方法可能是实现这一目标的途径。

## 参 考 文 献

- 1 Alan E. Willner, Syang-Myau Hwong. Transmission of many WDM channels through a cascade of EDFA's in long-distance links and ring networks. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5): 802~ 816
- 2 B. M. Desthieux, M. Suyama, T. Chikama. Self-filtering characteristics of concatenated erbium-doped fiber amplifier. *Optical Amplifier and Their Applications*, 1993, **14**: 100~ 103
- 3 H. Chou, J. Stimple. Inhomogeneous gain saturation of erbium-doped fiber amplifiers. *Optical Amplifier and Their Applications*, 1995, **18**: 92~ 95
- 4 A. R. Chraplyvy, J. A. Nagel, R. W. Tkach. Equalization in amplified WDM lightwave transmission systems. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **8**(4): 920~ 922

- 5 M. Zirngibl. Gain control in erbium-doped fibre amplifiers by an all-optical feedback loop. *Electron. Lett.*, 1991, 27(7): 560~ 561

## Experimental Study of the Saturated Gain Spectrum of EDFA in WDM

Cui Jingcui Liu Xiaoming Yuan Wei Tang Pingsheng Peng Jiande  
(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** The characterization of the saturated gain spectrum of an EDFA in a WDM system was investigated experimentally. It is proposed that the gain of a single channel is higher than that of each channel when multi-channels exist simultaneously if the input power is the same; when saturated, the gain of the EDFA shows that the longer the wavelength, the higher the gain.

**Key words** EDFA, gain spectrum, saturation condition

## 钛宝石激光器泵浦 Yb·YAG 晶体薄片产生连续激光输出

目前,惯性约束核聚变(ICF)激光驱动器前端系统中使用  $1.053\ \mu\text{m}$  激光波长。掺  $\text{Yb}^{3+}$  激光介质由于  $\text{Yb}^{3+}$  离子的吸收带位于  $0.9\sim 1.1\ \mu\text{m}$  波长范围,能与 InGaAs 二极管泵浦源有效耦合,可获得  $1.053\ \mu\text{m}$  的激光输出,并具有较高的提取效率和长的荧光寿命等特点,将成为未来核聚变激光驱动器前端系统选择的最佳增益介质之一。其中 Yb·YAG 由于优异的热力学性能,可进行高浓度掺杂,生长工艺成熟,成为掺  $\text{Yb}^{3+}$  材料的最佳候选者。

用引上法(CZ)沿  $\langle 111 \rangle$  方向生长了  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂浓度为 10at-% 的 Yb·YAG 晶体,经  $1400^\circ\text{C}$  退火,获得了无色心、低位错密度的高质量单晶。用  $\text{Ar}^+$  离子激光泵浦的钛宝石激光器作为泵浦源。激光腔设计为平-平腔。940 nm 的泵浦光经过一个焦距为 4 cm 的透镜和腔镜,聚焦在  $8\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$  的 Yb·YAG 晶体薄片上。腔镜紧贴晶体并固定在热沉板上,热沉板通循环水冷却。腔镜的一面镀 940 nm 增透膜,另一面镀 940 nm 增透膜和  $1.053\ \mu\text{m}$  的高反膜。晶体的输入面镀  $1.053\ \mu\text{m}$  和 940 nm 的增透膜,另一面镀  $1.053\ \mu\text{m}$  和 940 nm 的高反膜。在室温下,当输入功率为 1410 mW 时,晶体实际吸收的泵浦功率为 792 mW,得到 320 mW  $1.053\ \mu\text{m}$  的高效连续激光输出,晶体的阈值功率约为 203 mW,斜率效率为 54%。

下一步我们将采用 LD 泵浦,平-凹腔设计以获得更高功率的激光输出,有关工作正在进行中。

此项工作得到国家自然科学基金(69578026)和国家高技术 863-416 项目资助。

中国科学院上海光机所

邓佩珍 杨培志 陈伟 刘玉璞 张影华 谢兴龙 徐军

1998-11-9 收稿