

# 1480 nm LD 泵浦掺铒光纤放大器的增益带宽特性的研究

姜新 彭江得 吴庚生 李京辉 姚敏玉 范崇澄 周炳琨

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**提要** 采用国产 1480 nm LD 及优化的掺铒光纤, 研制成光纤增益达 32 dB、最大输出功率为 10 dBm、带宽大于 25 nm 的掺铒光纤放大器模块(其纤入纤出净增益为 27 dB、输出功率为 7 dBm)。讨论了放大器的增益、带宽特性及 ASE 对放大器测量的影响。

**关键词** 光学放大器, 掺铒光纤, 激光二极管

## 1 引言

掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, 简称 EDFA)是 80 年代末、90 年代初新发展起来的全光放大器件。它具有增益高、噪声低、频带宽、饱和输出功率大的特性, 在系统中具有插入损耗低、信道间串扰小、对传输码率与格式及系统升级透明等一系列优点。

EDFA 主要用于光通信系统。它可用作功率放大器、中继放大器或前置放大器<sup>[1,2]</sup>。由于采用了 EDFA 技术, 强度调制直接检测光通信技术(IM/DD)已成为当今高速、大容量、长距离光纤通信发展的主要方向。此外, EDFA 在超高速率光孤子传输的研究中亦有重要应用。在这些系统应用中, 除要求 EDFA 有足够的增益外, 在中继放大和光孤子应用中还要求有大的输出功率, 在波分或频分(WDM/FDM)系统中, 还要求 EDFA 有足够的带宽。

作者针对波分复用中继放大系统的应用要求, 采用国产 1480 nm 激光二极管和  $\text{Er}^{3+}/\text{Al}^{3+}$  共掺杂光纤, 研制成结构紧凑的实用型 LD 泵浦 EDFA 模块, 着重对饱和工作状态下 EDFA 的增益带宽特性进行了研究, 放大器小信号增益达到 32 dB(模块纤入纤出净增益为 27 dB), 模块 3 dB 饱和输出功率大于 0 dBm, 最大输出功率可达 7 dBm(掺铒光纤输出功率为 10 dBm), 光学带宽大于 25 nm。利用该模块, 新近在国内首次实现了 4 路 622 Mb/s  $\times$  40 km WDM 通信实验和 2.5 GHz  $\times$  50 km 光孤子传输实验<sup>[3,4]</sup>。

## 2 掺铒光纤放大器模块结构

EDFA 模块结构示于图 1。放大器采用双向泵浦结构。泵浦 LD 采用国产新研制的带尾纤输出的大功率激光二极管, 正向泵浦的 LD<sub>1</sub> 中心波长为 1.467  $\mu\text{m}$ , 输出光功率为 25 mW, 反

向泵浦的 LD<sub>2</sub> 中心波长为 1.490 μm, 输出光功率为 14 mW, 谱宽约为 8 nm; 掺 Er<sup>3+</sup> 光纤为国内首次研制的 Er<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup> 共掺杂光纤, 参量经优化设计, 其数值孔径为 0.235, 截止波长为 1.038 μm, 芯径 (2a) 约为 3.38 μm; 合波器 (WDM) 为国产 1.48/1.55 μm 波分复用器, 对信号和泵浦波长的平均插入损耗分别为 0.3 dB 和 0.32 dB; 带尾纤光隔离器 (ISO) 的作用是防止反向传输, 其插入损耗为 1.3 dB。放大器各器件间均由光纤直接焊连, 输入输出端连有标准光纤接头 (FC), 整个光路构成全光纤结构。

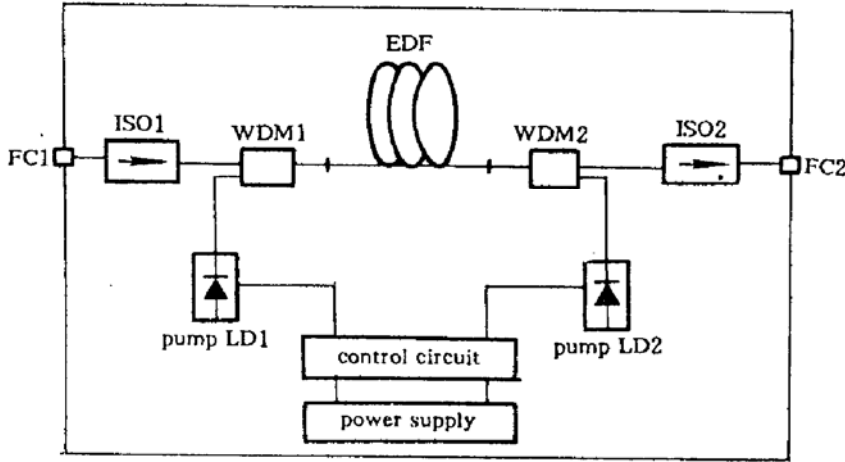


Fig. 1 Configuration of EDFA module

### 3 放大器模块的参数特性

#### 3.1 增益特性

采用中心波长为 1552 nm 的带尾纤输出的 DFB LD 作信号源, 测出放大器的增益与信号功率的关系曲线由图 2、图 3 给出。图 2 为单向泵浦增益曲线, 只有正向泵浦 LD<sub>1</sub> 工作; 图 3 为双向泵浦结果, 两个泵浦 LD 均工作。图中的空心圈表示放大器模块纤入纤出净增益, 实心

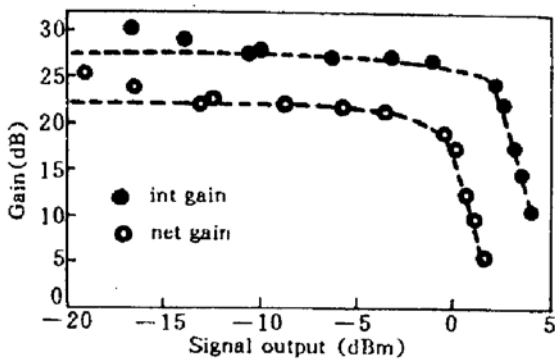


Fig. 2 Gain as a function of signal output power for single pump

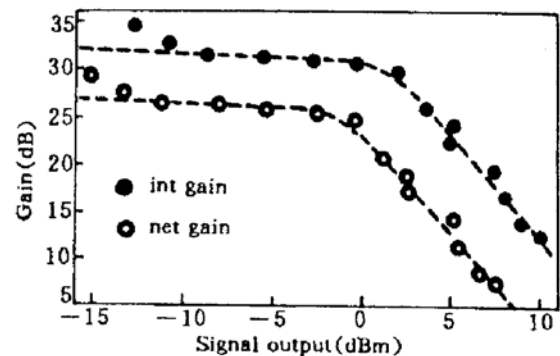


Fig. 3 Gain as a function of signal output power for bidirectional pumps

圈表示掺铒光纤本身产生的内增益, 两者之差为合波器、隔离器、FC 接头等的损耗总和。对单向泵浦情况, 放大器小信号内增益 27 dB (模块净增益 22 dB), -3 dB 饱和输出功率 (增益下降到比小信号增益低 3 dB 时的输出功率) 为 1.3 dBm, 最大输出功率可达 4 dBm (模块本身输出功率为 1.5 dBm); 对双向泵浦, 掺铒光纤小信号内增益为 32 dB (模块小信号净增益是 27 dB), -3 dB 饱和输出功率达 2.5 dBm, 最大输出功率为 10 dBm (模块输出功率 7 dBm)。

### 3.2 带宽特性

采用的信号源为可调谐外腔激光器, 波长调谐范围从 1.52~1.57 nm, 测得放大器的增益带宽曲线如图 4 所示。图中的空心圈对应小信号情况, 输入信号功率为 0.25  $\mu\text{W}$ , 1550 nm 处 3 dB 增益带宽为 20 nm; 实心圈对应大信号情况, 输入信号功率为 40  $\mu\text{W}$ , -3 dB 带宽大于 25 nm。

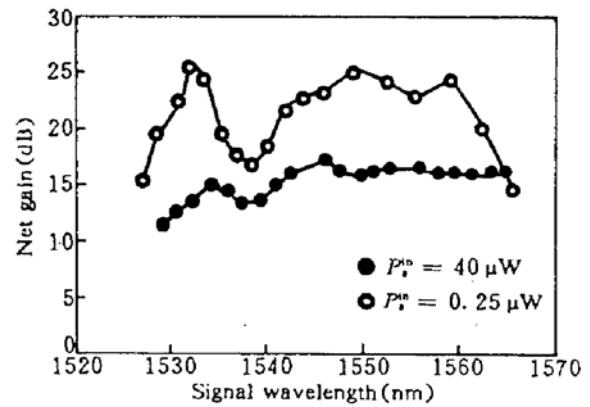


Fig. 4 EDFA module net gain versus signal wavelength

## 4 分析与讨论

### 4.1 小信号增益

根据简化二能级速率方程理论<sup>[5]</sup>, EDFA 的信号增益可由下式给出

$$G [\text{dB}] = 4.34\rho\Gamma_s\sigma_sL \frac{(P_p/P_{\text{pth}} - 1)}{\left(1 + \frac{2P_s}{P_{\text{ssat}}} + \frac{P_p}{P_{\text{pth}}}\right)} \quad (1)$$

其中,  $\rho$  为铒离子浓度,  $L$  为掺铒光纤长度,  $P_s$ ,  $P_p$  分别为信号入纤功率和泵浦入纤功率,  $P_{\text{ssat}}$ ,  $P_{\text{pth}}$  只与掺铒光纤参数有关, 分别由 (2), (3) 式给出

$$P_{\text{ssat}} = h\nu_s A_c / \sigma_s \tau \Gamma_s \quad (2)$$

$$P_{\text{pth}} = h\nu_p A_c / \sigma_p \tau \Gamma_p \quad (3)$$

$h$  为普朗克常数,  $\nu_s$ ,  $\nu_p$  分别为信号光和泵浦光频率,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_p$  分别为掺铒光纤在信号光和泵浦光波长下的吸收截面,  $\Gamma_s$ ,  $\Gamma_p$  分别为掺铒光纤在信号波长和泵浦波长下的模式限制因子,  $A_c$  为铒离子截面积,  $\tau$  为上能级粒子数寿命。小信号情况时,  $P_s/P_{\text{ssat}} \ll P_p/P_{\text{pth}}$ , (1) 式可化简为

$$G [\text{dB}] = 4.34\rho\Gamma_s\sigma_sL \frac{(P_p/P_{\text{pth}} - 1)}{(P_p/P_{\text{pth}} + 1)} \quad (4)$$

当信号光和泵浦光波长一定时, 小信号增益只与泵浦功率有关, 与信号功率无关。泵浦功率一定时, 小信号增益应保持不变。图 2、图 3 在小信号部分的实验曲线平坦, 基本与理论模型吻合。图中最左端的实验点偏离了理论预测, 这是放大自发辐射 (ASE) 造成的。最左端两点对应输入信号光功率在 100 nW 以下, 放大后信号功率与 ASE 可相比拟甚至还要弱, 相应信号波长的 ASE 的参与使输出信号测量值误差偏大, 相应的增益值偏高。当信号功率增大时, 输出信号比 ASE 强得多, 而且大信号又抑制了 ASE, 使 ASE 的强度减小, 这时, ASE 对测量的影响就可以忽略不计了。

### 4.2 饱和增益

虽然小信号增益是放大器的一个重要参数, 但对光纤通信系统应用来说, 输出光功率却更重要。光通信系统中, 功率放大器和中继放大器都需要把十几至上百微瓦的信号放大至毫瓦量级以上<sup>[2~4]</sup>, 基本上都是工作在大信号饱和状态, 所以, 需要研究放大器的饱和增益特性, 提高信号输出功率。由式 (1) 知, 当信号增大时,  $P_s$  一项不可忽略, 增益将随信号功率  $P_s$  增大而减小, 即达饱和工作状态, 利用这一增益饱和特性, 可实现放大系统的自动增益或功率控制, 这使放大器具有稳定系统工作的作用。

为提高信号输出功率, 采用了双向泵浦结构。图 3 与图 2 相比, 最大输出信号光功率明显

增大,但是,图 2 所示单向泵浦的饱和曲线下降得更快,其相应的增益自动控制能力更强。图 3 双向泵浦的饱和曲线下降得之所以缓慢,是因为双向泵浦实验时采用了与单向泵浦同一长度的掺铒光纤。该光纤长度是对单向泵浦进行最佳设计的,但对双向泵浦来说,光纤长度偏短,适当增长双向泵浦时的光纤长度,既可增大功率输出,又可使增益饱和曲线变陡峭。

#### 4.3 增益带宽

对于一般掺铒光纤,荧光谱在  $1.53 \mu\text{m}$  和  $1.55 \mu\text{m}$  处呈现两个峰值。为改善 EDFA 的带宽特性,在光纤中同时掺  $\text{Al}^{3+}$ ,可使  $1.55 \mu\text{m}$  处的荧光谱展平。从图 4 所示放大器净增益随信号波长变化的情况可见,采用  $\text{Er}^{3+}/\text{Al}^{3+}$  共掺杂光纤已使  $1.55 \mu\text{m}$  处的小信号增益谱获得改善,但  $1.54 \mu\text{m}$  处增益仍有一凹陷;而在大信号情况下增益普遍降低, $1.53 \mu\text{m}$  处峰值增益降低得更多, $1.55 \mu\text{m}$  处带宽明显展宽。由于 EDFA 一般都工作在  $1.55 \mu\text{m}$  波段,实验表明两种情况下的增益带宽均大于  $20 \text{ nm}$ ,可以满足四路以上波分复用系统的要求。进一步改善掺  $\text{Al}^{3+}$  工艺,可完全消除  $1.54 \mu\text{m}$  处的荧光凹陷,放大器大信号时带宽可扩充到  $30 \text{ nm}$  甚至  $40 \text{ nm}$ 。

### 参 考 文 献

- 1 Y. K. Park, S. W. Granlund, T. W. Cline *et al.*. 318 km repeaterless transmission using erbium-doped fiber amplifiers in a 2.5 Gbit/s IM/DD system. in OFC 1992 Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D. C.) San. Jose. California, 1992. 242
- 2 H. Taga, N. Edagawa, G. Tanaka *et al.*. 10 Gbit/s, 9000 km IM-DD Transmission Experiments using 274 Er-doped Fiber Amplifier Repeaters. in OFC/IOOC 1993 Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D. C.) San. Jose. California, 1993; Postdeadline paper. 9
- 3 Jiang Xin, Huang Shouhua, Huang Dongmei *et al.*. EDFA as signal amplifier in WDM system, proceedings of International Conference on Communication Technology (ICCT '94), 1994. 545~547
- 4 Zhong Shan, Yao Minyu, Xu Baoxi *et al.*. 2.5 GHz soliton transmission over 50 km using erbium-doped fiber amplifiers, *ibid*, 1994. 1336~1338
- 5 J. L. Zyskind. Advances in Erbium-doped fiber amplifiers for optical communications. *SPIE*, Fiber Laser Sources and Amplifiers II, 1990, 1373 : 80~83

## Study on Gain and Bandwidth Characteristics of 1480 nm LD Pumped EDFA Module

Jiang Xin Peng Jiange Wu Gengsheng Li Jinghui Yao Minyu  
Fan Chongcheng Zhou Binkun

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

**Abstract** A co-pumped Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) which consists of home-made 1480 nm pigtailed LD's and erbium doped fiber (EDF) has been developed. A small-signal gain of 32 dB of the EDFA has been obtained (fiber to fiber net gain is 27 dB). The saturation power and maximum power of fiber are 2.5 dBm and 10 dBm, respectively, while the gain bandwidth is greater than 25 nm. The gain and bandwidth characteristics of the EDFA are studied. Effects of Amplified Spontaneous Emission (ASE) on measurement are discussed.

**Key words** optical amplifier, erbium-doped fiber, laser diode