

# 1.48 $\mu\text{m}$ LD 双向泵浦掺铒光纤放大器的研究\*

毛庆和 杨祥林 张明德 刘 铮 章河勇

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

**提要** 研究了 1.48  $\mu\text{m}$  LD 双向泵浦低掺杂铒光纤放大器的增益特性和饱和输出特性, 研制了一种掺铒光纤放大器, 小信号净增益达 26.5 dB, 3 dB 小信号增益下降时的净饱和输出功率为 3 dBm, 最大净输出功率为 9 dBm。

**关键词** 掺铒光纤, 放大器, 增益, 输出功率

## 1 引 言

掺铒光纤放大器(EDFA)具有增益高、噪声低、频带宽和插入损耗小等优点, 是新一代光通信系统中的理想光放大器。自 1986 年以来, 国内外开展了广泛的研究, 发展非常迅速<sup>[1~3]</sup>, 并开始在许多新的通信系统中得到应用<sup>[4,5]</sup>。本文研究了一种 1.48  $\mu\text{m}$  半导体激光器(LD)双向泵浦低掺杂浓度的 Er/Ge/Al 型掺铒光纤(EDF)构成的光纤放大器的设计、增益和饱和输出特性, 并报道了试验结果。

## 2 实验条件

EDFA 的工作特性与掺铒光纤参数、泵浦带以及泵浦方式有关。我们在设计时, 选用低掺杂浓度、低背景损耗的 Er/Ge/Al 型光纤作为放大媒质, 以减少放大的自发辐射(ASE)噪声和避免介质的荧光淬灭; 采用 1.48  $\mu\text{m}$  LD 泵浦, 以提高泵浦效率和转换效率; 采用双向泵浦, 以提高输出信号的信噪比和输出功率, 弥补了单个泵浦 LD 所提供的泵浦光功率的不足。

图 1 为所研究的 EDFA 的结构配置, 由掺铒光纤, 两只泵浦用激光器 LD<sub>1,2</sub>、带尾纤的偏振不灵敏的光隔离器 ISO、两只波分复用器 WDM<sub>1,2</sub>、致冷和控制单元以及活动连接器 FC<sub>1,2</sub> 组成。掺铒光纤为 50 ppm 的低损耗 Er/Ge/Al 型光纤, 芯径 4.9  $\mu\text{m}$ , 长 30 m。两只泵浦 LD 的中心波长分别为 1.470  $\mu\text{m}$  和 1.473  $\mu\text{m}$ 。WDM<sub>1,2</sub> 的插入损耗

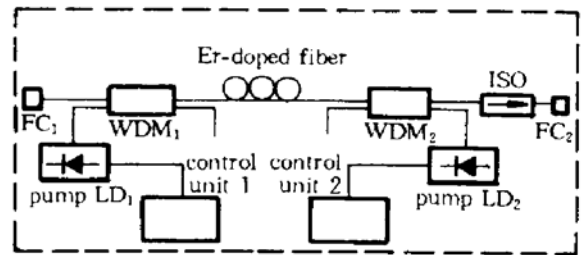


Fig. 1 The schematic diagram of the EDFA module

\* 国家自然科学基金重点基金、通信 863 计划资助课题。

均小于 0.5 dB,对 1.550  $\mu\text{m}$  的信号光的直通率和泵浦光的耦合率均大于 96%,其中 WDM<sub>2</sub> 对同向泵浦光的耦合率大于 98%,可以滤除大部分的剩余同向泵浦光,实验测得经 WDM<sub>2</sub> 后的剩余泵浦光功率小于 40  $\mu\text{W}$ 。光隔离器的插入损耗为 1.2 dB,隔离度大于 40 dB。EDF 与普通单模光纤的熔接损耗为 0.8 dB,这是由于实际熔接时,利用了掺铒光纤中的铒离子的热扩散性质<sup>[6]</sup>,进行多次放电使纤芯中的铒离子沿径向均匀扩散,从而实现了 EDF 和普通单模光纤之间的模场匹配。

### 3 实验结果及讨论

利用图 2 所示的试验方案,我们对图 1 所示的 EDFA 的增益特性和输出特性进行了测试。

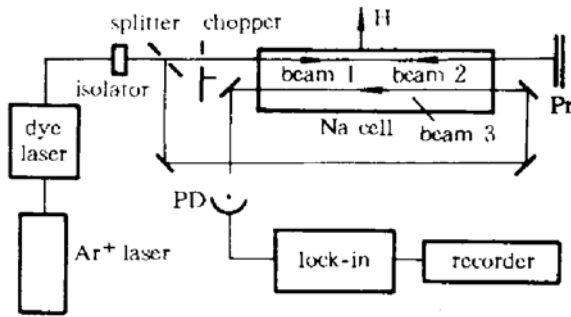


Fig. 2 Experimental setup of EDFA

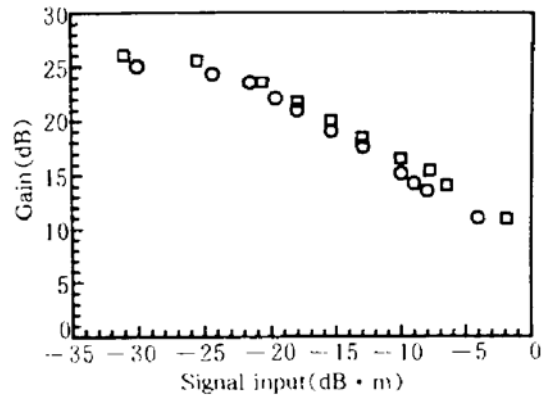


Fig. 3 The gain characteristics of the EDFA  
open holes: pump power is 45 mW;  
open squares: pump power is 55 mW

#### 3.1 增益特性

图 3 为测试所得的 EDFA 的增益特性,小信号净增益为 26.5 dB,相应 EDF 的互作用增益为 31.5dB。图 4 是在不同输入信号光功率下,测得的 EDFA 净增益与泵浦光功率之间的关系。可见 EDFA 的阈值约为 7 mW,它反映了 EDFA 本身的放大特性,不随输入信号光的大小变化。对于一定大小的输入信号光,增益随泵浦功率的增加而增加,渐渐趋于饱和,泵浦光一定时,增益随输入信号光功率的增加而减小。

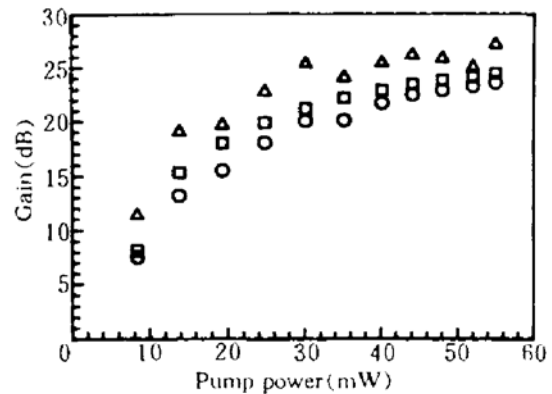


Fig. 4 The signal gain versus the pump power for different input signals  
open holes: -18 dBm input signal;  
open squares: -20 dBm input signal;  
open triangles: -30 dBm input signal

在增益,特别是小信号增益的测量时,ASE 和剩余泵浦光将使测量产生误差,因此,测量时必须消除这种不利因素。考虑到 ASE 基本不受调制和泵浦光未加调制,在信号增益测量时,采用图 2 所示的测试系统,对信号源 DFB-LD 进行调制,利用调制信号光测量 EDFA 的增益。图 2 中 1.550  $\mu\text{m}$  的单纵模 DFB-LD 信号源受频率为 50 kHz、占空比为 1:1 的方波信号调制,输出消光比大于 40dB 的调制方波信号光,经光隔离

器由  $\text{FC}_1$  输入至 EDFA 放大, 放大后的调制信号光由 PIN/FET 检测。为了防止 PIN/FET 的饱和而影响测试精度, 利用可变衰减器调节 PIN/FET 接受的光功率的大小使其工作于线性区, PIN/FET 的输出信号由锁相放大器测量, 同时利用示波器对放大的调制信号光的波形实时观察。整个测量系统预先利用信号光校准, 由衰减器和锁相放大器测得的调制信号大小通过校准曲线得出信号的增益。

图 5 是利用图 2 所示的实验装置, 在示波器上观察到的平均光功率为 20 dBm、调制频率为 50 kHz 的信号光在通过 EDFA 前和通过 EDFA 放大经衰减器衰减后的波形, 可见 EDFA 没有引起信号波形的变化, 说明由 PIN/FET 检测的调制光信号的信噪比较高, 受未调制的剩余泵浦光和 ASE 的影响很小, 这也表明了图 2 所示的测试系统和测试方法是可行的, 测试结果是可信的。

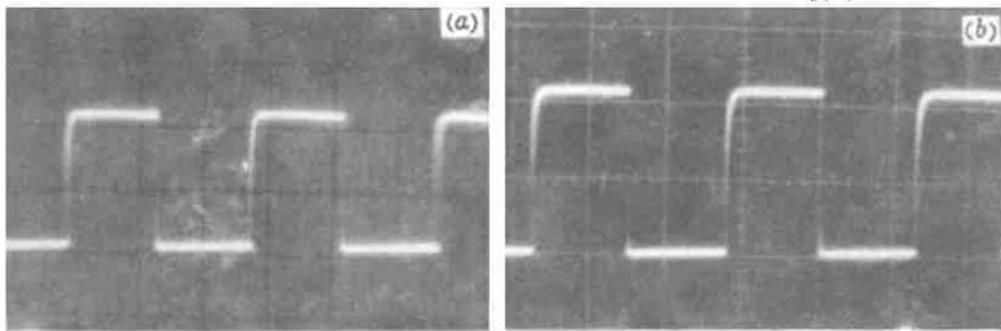


Fig. 5 The photographs of signal waveforms  
(a) without the EDFA; (b) with the EDFA

### 3.2 饱和输出特性

图 6 给出了实际测试的 EDFA 的增益与输出信号光功率之间的关系。在泵浦光功率不变时, 增益随输入信号光功率的增大而减小。通常将小信号增益下降 3 dB 时的输出功率定义为 EDFA 的饱和输出功率。由图可见, EDFA 的饱和输出功率与泵浦光功率的大小有关, 当泵浦光功率从 45 mW 增加到 55 mW 时, 饱和输出功率从 1.8 dBm 增加到 3 dBm, 这是由于泵浦光功率的增加提高了 EDFA 中  $\text{Er}^{3+}$  的粒子数反转度, 从而提高了饱和输出功率。此外, 在 55 mW 的泵浦光功率下, 小信号增益下降 10 dB 时的输出功率为 7.5 dBm, 最大输出功率达 9 dBm。

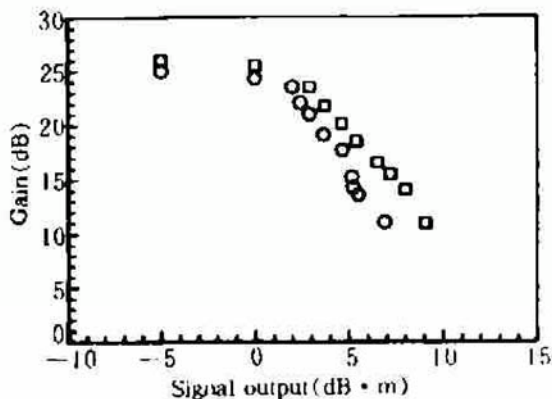


Fig. 6 The saturation characteristics of the EDFA.  
open holes; pump power is 45 mW;  
open squares; pump power is 55 mW

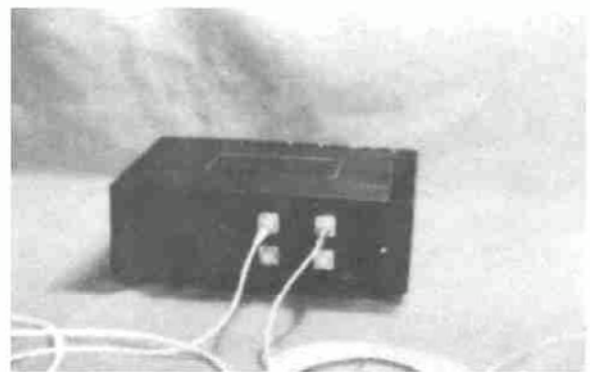


Fig. 7 The photograph of the EDFA module

在以上 EDFA 的设计和测试结果的基础上,我们对图 1 所示的 EDFA 进行了模块化包装,如图 7 所示。模块的外包装尺寸为  $18\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ ,两泵浦 LD 的温控及控制单元的能量补偿利用两个电端口实现,采用 FC 作为信号光的输入、输出端口,使用极为方便,对模块的测试结果表明,其增益和输出特性未发生变化。

### 参 考 文 献

- 1 E. Desurvire, C. R. Giles, J. R. Simpson *et al.*. Efficient erbium-doped fiber amplifier at a  $1.53\text{ }\mu\text{m}$  wavelength with a high output saturation power. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(22): 1266~1268
- 2 R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifier. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, **9**(2): 271~283
- 3 彭江得,李京辉,姚敏玉等. 带宽 $>40\text{ nm}$ 的  $980\text{ nm}$  LD 泵浦掺铒光纤放大器模块. 高技术通讯, 1994. **2**: 5~7
- 4 T. Taga, M. Suzuki, N. Edagawa *et al.*. 5 Gbit/s optical soliton transmission experiment over 3000 km employing 91 cascaded erbium-doped fiber amplifier repeaters. *Electr. Lett.*, 1992, **28**(24): 2247~2248
- 5 P. A. Andrekson, N. A. Olsson, M. Haner *et al.*. 32 Gb/s optical soliton data transmission over 90 km. *IEEE-Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(1): 76~79
- 6 H. Y. Tam. Simple fusion splicing technique for reducing splicing loss between standard singlemode fibers and erbium-doped fiber. *Electr. Lett.*, 1991, **27**(17): 1597~1599

## Studies of an Erbium-doped Fiber Amplifier Bidirectionally Pumped by two $1.48\text{ }\mu\text{m}$ LDs

Mao Qinghe Yang Xianglin Zhang Mingde Liu Zheng Zhang Heyong

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

**Abstract** Studies on gain and saturation output characteristics of an erbium-doped fiber amplifier are presented in this paper. The amplifier is designed and constructed with low concentration EDF and bidirectionally pumped by two  $1.48\text{ }\mu\text{m}$  LDs. Net small signal gain of 26.5 dB and the maximum net output power of 9 dBm have been achieved.

**Key words** erbium-doped fiber (EDF), amplifier, gain, output power