

混合泵浦两段级联掺铒光纤 放大器实验研究

唐平生 刘小明 刘丹 蔡鸣 彭江得

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 基于内插隔离-耦合环两段级联新结构, 采用 980nm 与 1480nm 激光二极管混合泵浦方式, 研制出在 1.55 μm 波段兼具高增益(42.8dB)、大功率(15.2dBm)、低噪声系数(4.4dB)特性的掺铒光纤放大器。

关键词 掺铒光纤放大器, 两段级联, 混合泵浦.

1 引 言

掺铒光纤放大器(EDFA)是光纤通信系统中理想的光放大器^[1], 现在已广泛应用于强度调制/直接检测(IM/DD)、波分复用(WDM)、光孤子传输及分布网络等技术领域^[2]。对于长距离无中继传输和网络系统应用的线路放大器, 特别希望掺铒光纤放大器同时具有高增益、大功率、低噪声特性。然而, 在单段掺铒光纤构成的常规放大器中, 放大的自发辐射(ASE)限制了性能的提高, 采用内插光隔离器的两段级联结构, 可部分抑制放大的自发辐射的影响, 使掺铒光纤放大器的性能得以改善^[3]; 另外, 从泵浦方式考虑, 980 nm 波长泵浦的掺铒光纤放大器具有增益系数高、噪声系数低的优点, 而 1480 nm 波长泵浦则因其量子转换效率高, 可获得高功率输出^[4]。因此, 采用 980 nm 和 1480 nm 激光二极管(LD)混合泵浦的两段级联结构, 可望实现在 1.55 μm 波段同时具备高增益、大功率和低噪声特性的高性能掺铒光纤放大器。

本文基于内插光隔离-耦合环的光路结构^[5], 有效地抑制了反向放大自发辐射, 提高了掺铒光纤放大器的增益和泵浦光利用效率; 采用 980 nm 与 1480 nm 激光二极管混合泵浦方式, 研制出在 1.55 μm 波段增益高达 42.8 dB、输出功率 15.2 dBm、噪声系数为 4.4 dB 的高性能掺铒光纤放大器。

2 光路结构设计

混合泵浦内插隔离-耦合环的掺铒光纤放大器光路结构如图 1 所示。发射波长为 980 nm 的激光二极管经左端光纤合波器(980/1550 nm WDM₁)对第一段掺铒光纤 L₁ 正向泵浦, 发射

波长为 1480 nm 的激光二极管经右端光纤合波器(1480/1550nm WDM₃)对第二段掺铒光纤 L₂ 反向泵浦; 信号光从光纤接头 FC₁ 经光隔离器 ISO₁ 和 WDM₁ 进入 L₁ 中; 被放大的信号光通过中间合波器(980/1550nm WDM₂) 1 端耦合到 4 端口, 经光隔离器 ISO₂ 后, 从 2 端口耦合到 3 端口进入 L₂ 再次放大; 最后, 经 WDM₃ 和光隔离器 ISO₃ 从光纤接头 FC₂ 输出。

对于单段掺铒光纤结构的放大器, 同时使增益、噪声系数和输出功率三个参量达到最佳是困难的; 而采用两段级联结构, 优化设计每一段掺铒光纤中两个参量, 而使放大器的整体性能相对最佳是可行的, 其中最重要的是抑制放大的自发辐射, 以提高增益并降低噪声系数。

分析两段级联结构的掺铒光纤放大器特性时, 可将其等效为两个独立放大器的级联, 如图 2 所示, EDFA₁ 和 EDFA₂ 分别为掺铒光纤长度为 l_1 和 l_2 所组成的光纤放大器。

$$G = 10 \log (P_3/P_1) = 10 \log (P_2/P_1) + 10 \log (P_3/P_2) = G_1 + G_2 \quad (1)$$

式中 P_1 为输入信号功率, P_2 和 P_3 分别为 EDFA₁ 和 EDFA₂ 的输出信号功率, G_1 和 G_2 分别为两级放大器的增益。根据噪声系数的定义可以证明, 级联 EDFA 总的噪声系数可表示为:

$$N_F = N_{F1} + N_{F2}/G_1 \quad (2)$$

式中, N_{F1} 和 N_{F2} 分别为 EDFA₁ 和 EDFA₂ 的噪声系数。由(2)式可看出, 只要 G_1 足够大, 则系统总的噪声系数主要由 N_{F1} 决定。

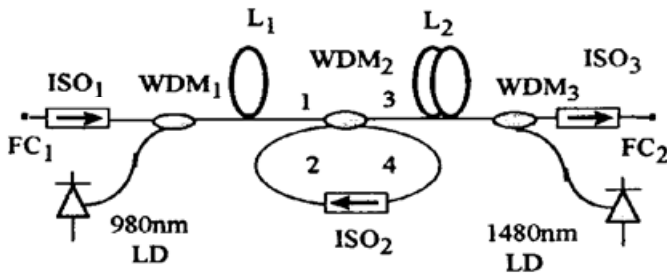


Fig. 1 Two-stage configuration of EDFA with hybrid pumping stage EDFA

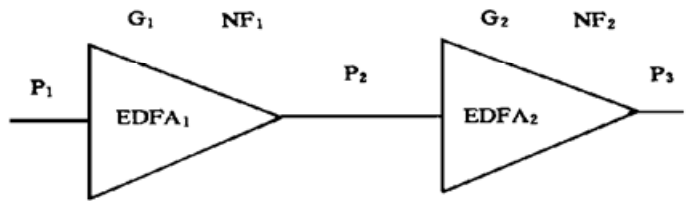


Fig. 2 Equivalent model with two-stage EDFA

在混合泵浦的两段级联放大器中, 第一段掺铒光纤 L₁ 采用 980 nm 激光二极管正向泵浦, 正向放大的自发辐射功率较小, 相应的 N_{F1} 也较低; L₂ 段的反向放大的自发辐射功率从 3 端口耦合到 WDM₂ 的 2 端口后, 受到 ISO₂ 的隔离不能进入 L₁, 从而提高增益 G_1 使噪声系数进一步降低。WDM₂ 的引入可以使第一段掺铒光纤 L₁ 中的剩余 980 nm 泵浦光从 WDM₂ 的端口 1 耦合到端口 3, 而直接进入第二段掺铒光纤 L₂, 提高泵浦光利用率, 另一方面, WDM₂ 能阻断 1480 nm 泵浦光进入第一段掺铒光纤 L₁, 防止 1480 nm 泵浦光影响 N_{F1} ; 由于 L₂ 采用 1480 nm 激光二极管反向泵浦(包括前级剩余 980 nm 光功率正向泵浦), 其增益 G_2 及功率转换效率高, 因而对于此种混合泵浦的级联结构, 在进行光路参数优化设计时, 让 L₁ 工作于低噪声、高增益放大状态, L₂ 工作于功率放大状态, 1480 nm 泵浦光在大信号状态时充分得到利用, 无剩余 1480 nm 泵浦光, 从而在同一光纤放大器中实现高增益、高输出功率和低噪声特性。

3 实验研究

根据上述分析进行结构参量优化设计后, 研制出实用化的台式仪表型掺铒光纤放大器样机, 实验研究了该系统的增益、输出功率和噪声特性。

样机采用 Er³⁺/Al³⁺ 共掺杂光纤, 掺杂浓度为 200 ppm, 数值孔径为 0.21, 截止波长 925

nm, 纤芯直径 $3.3 \mu\text{m}$, L_1 与 L_2 的长度分别为 7 m 和 19 m , 两种泵浦用的激光二极管波长分别为 979 nm 和 1477.5 nm , 泵浦总功率 100 mW ; 合波器插入损耗小于 0.2 dB ; 偏振无关的光隔离器 ISO_1 、 ISO_2 插入损耗分别为 0.8 dB 、 0.8 dB 和 0.9 dB , 隔离度都大于 35 dB , 掺铒光纤放大器的输入和输出端为标准光纤 FC 接头。

3.1 增益特性

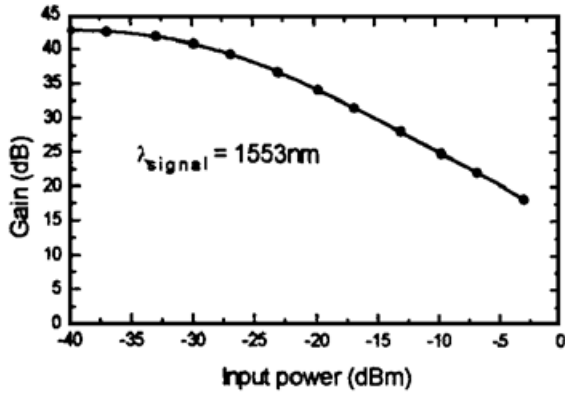


Fig. 3 EDFA gain vs. input power at wavelength 1553 nm

采用中心波长 1553 nm 带尾纤输出的分布反馈激光器作信号源, 用功率计、可调谐窄带法布里-珀罗滤波器和光谱仪进行测试。特别注意的是, 测量小信号增益时, 放大的自发辐射功率很大, 必须加以消除。图 3 为掺铒光纤放大器增益与输入信号功率的关系曲线。输入信号功率小于 -35 dBm 时, 增益基本保持不变, 最大为 42.8 dB , 考虑到输入和输出光隔离器、合波器和焊点等损耗约 1.9 dB , 光纤内净增益达 44.7 dB ; 进入饱和区后, 增益急骤下降, 当输入信号功率为 -3 dBm 时, 增益为 18.2 dB 。

3.2 功率特性

图 4(a) 为系统的增益与输出光功率的关系曲线, 图 4(b) 为输出光功率与输入光功率的关系曲线。当输入功率为 -30 dBm 时, 放大器开始进入饱和工作状态, 由图 4(a) 可见, 增益下降 3 dB 的饱和输出功率为 12.1 dBm 。输入功率为 -3 dBm 时, 输出光功率达 15.2 dBm 。之后, 随着输入功率的增加, 放大器很快达到深饱和工作状态, 增益急骤下降, 输出光功率缓慢增长。这是因为两段结构掺铒光纤放大器的反向放大的自发辐射受到部分抑制, 光信号在第二段光纤 L_2 中迅速放大到较高功率, 当其进入第二段时即处于深饱和放大状态, 在泵浦光功率不变的情况下, 随着输入功率的进一步增大, 输出光功率的增长受到箝制, 这种饱和区的自动功率箝制特性对于距离传输应用的掺铒光纤放大器是十分重要的。

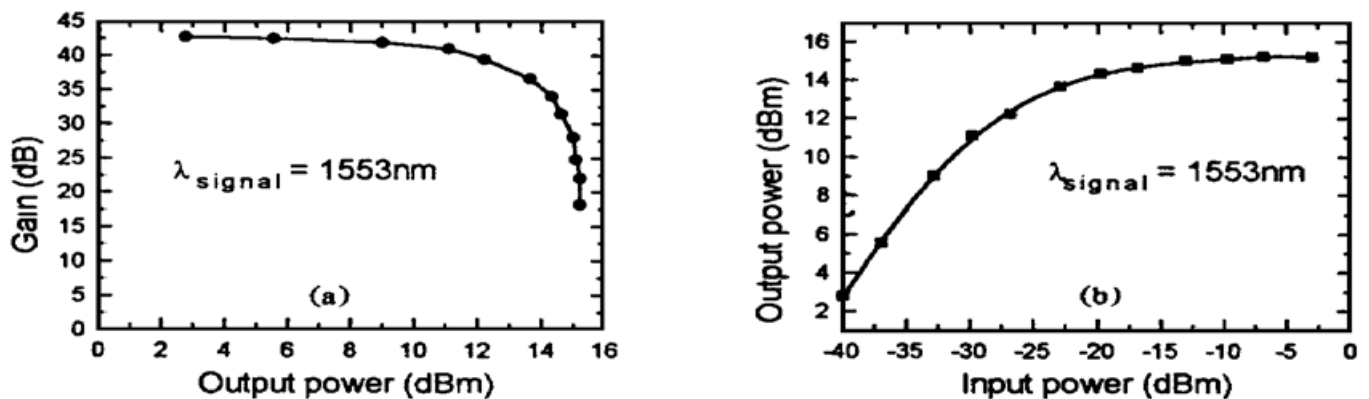


Fig. 4 EDFA power characteristics. (a) gain vs. output power, (b) output power vs. input power

3.3 噪声特性

噪声系数定义为放大器输入信噪比除以输出信噪比, 对于光纤放大器可表示为^[6]:

$$N_F = 10 \log (P_{\text{ase}}/h\nu GB_0) \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

式中 $h\nu$ 为信号光子能量, G 为光放大器增益, B_0 为法布里-珀罗滤波器带宽, P_{ase} 为信号波长处滤波器带宽内放大的自发辐射功率。采用功率计、窄带光纤法布里-珀罗滤波器和光谱仪可精确测出不同信号光功率时的 P_{ase} , 因此, 根据(3)式及测出的增益可算出噪声系数 N_F 。图

5 所示为增益、噪声系数与输入信号光功率的关系曲线。小信号增益 42.8 dB 时, 噪声系数为 4.4 dB, 考虑输入光隔离器、合波器和焊点的损耗 1.0 dB, 光纤内部噪声系数约 3.4 dB, 接近量子极限 3 dB。从图中可看出, 在小信号情况下, 噪声系数基本不变, 进入饱和区后, 随着输入信号功率的增大, 噪声系数也增大, 其原因是, 尽管在饱和区输出信号光功率增大且放大的自发辐射受到压缩, 但此时增益 G 下降更快, 因而总趋势是噪声系数随输入信号功率的增大而增大。

结 论 采用经参量优化设计的 980 nm 和 1480 nm 混合泵浦的内插隔离-耦合环两段级联放大光路结构, 同一掺铒光纤放大器在 1.55 μm 波段实现了高增益(44.8 dB)、高功率(15.2 dBm)和低噪声(4.4 dB)特性。掺铒光纤放大器性能的进一步改善, 可考虑选取第一段掺铒光纤为低掺杂浓度光纤, 达到高增益、低噪声目的; 第二段选用高掺杂浓度光纤, 以实现高功率输出, 此研究正在进行之中。

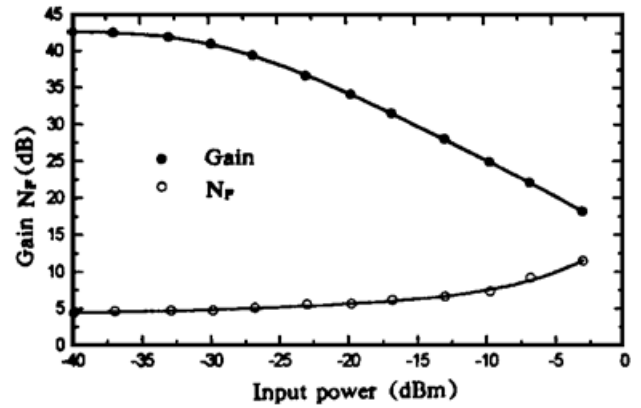


Fig. 5 EDFA gain and noise figure (N_F) vs. input power at wavelength 1553 nm

参 考 文 献

- [1] B. Pedersen, Power requirements for erbium-doped fiber amplifiers pumped in the 800, 980 and 1480 nm bands. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(1): 46~49
- [2] J. L. Zyskind, Advances in erbium-doped fiber amplifiers for optical communications. *Proc. SPIE, Fiber Laser Sources and Amplifiers*, 1990, **1373**: 80~83
- [3] 唐平生, 刘小明, 刘丹, 新型两段光纤双向泵浦掺铒光纤放大器. *高技术通讯*, 1996, **6**(8): 7~10
- [4] M. Shimizu, Highly efficient integrated optical fibre amplifier module pumped by a 980 nm laser diode. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(20): 1641~1643
- [5] Xin Jiang, Xiaoming Liu, Jiangde Peng *et al.*, Wide-band EDFA with 41 dB gain and 28 W power output at 1550 nm. *IOOC1995 Technical Digest Series*, HongKong, 1995: 18~19
- [6] O. Lumholt, Fundamental limit at ions in EDFA-based AM-VSB CATV systems. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(8): 1344~1352

Experimental Study of Two-Stage Erbium Doped Fiber Amplifier with Hybrid Pumping

Tang Pingsheng Liu Xiaoming Liu Dan
Cai Ming Peng Jiangde

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

(Received 16 May 1996; revised 12 August 1996)

Abstract Based on two-stage erbium fiber and optical loop coupling configuration, 980 nm and 1480 nm LD pumped erbium doped fiber amplifier (EDFA) has been developed. The characteristics of EDFA have investigated experimentally at wavelength of 1553 nm. Results show that the small signal gain, noise figure and maximum output power are of 42.8 dB, 4.4 dB and 15.2 dBm, respectively.

Key words EDFA, two-stage, hybrid pumping.