

980 nm 和 1480 nm LD 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 彭江得 周炳琨

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 采用两段级联掺铒光纤、980 nm 和 1480 nm LD 混合泵浦方式, 实验分析比较了内插光隔离器和内插光隔离-耦合环光路结构掺铒光纤放大器(EDFA)的增益、噪声系数和输出功率特性。研制出内插光隔离-耦合环的 EDFA, 在信号波长 1553.5 nm 处, 小信号增益为 42.8 dB, 噪声系数为 4.4 dB, 输出功率为 15.2 dBm。

关键词 掺铒光纤放大器, 两段光纤, 混合泵浦

1 引言

工作在 1.55 μm 波段的掺铒光纤放大器(EDFA)是光纤通信系统中理想的光放大器, 现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、有线电视(CATV)及分布网络等技术领域^[1]。对于长距离无中继传输和网络系统应用的放大器, 特别希望 EDFA 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 EDFA 中, 放大的自发辐射(ASE)限制了 EDFA 性能的提高, 因而优化设计 EDFA 光学结构以有效地抑制 ASE 强度, 是改善 EDFA 性能的重要途径^[2]; 另外从泵浦方式考虑, 980 nm 波长泵浦的 EDFA 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^[3,4], 故采用 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 EDFA。

S. Yamashita 等人^[5]理论分析比较了单段和内插光隔离器光路结构的增益和噪声系数, 结果表明内插光隔离器结构的 EDFA 增益和噪声系数都有明显改善。

本文在基于内插光隔离器两段级联光纤的工作基础上, 发展了内插光隔离-耦合环的光路结构^[6], 提高了泵浦光的利用率, 改善了 EDFA 的增益和饱和输出功率特性。文中分析和比较了内插光隔离器和内插光隔离-耦合环两段级联泵浦结构 EDFA 的增益、功率和噪声系数特性, 研制出内插光隔离-耦合环的 EDFA, 在 1.55 μm 波段增益高达 42.8 dB, 输出功率为 15.2 dBm, 噪声系数为 4.4 dB。

2 实验研究

图 1 所示为实验所用的光路结构。

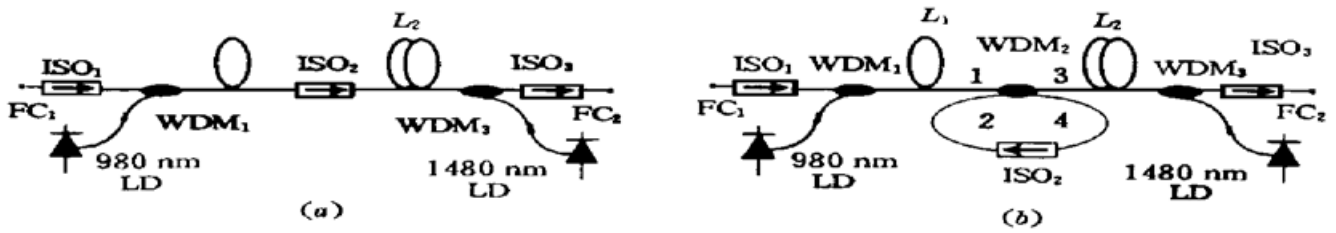


图 1 980 nm 和 1480 nm LD 泵浦两段结构掺铒光纤放大器

(a) 内插光隔离器结构; (b) 光隔离-耦合环结构

Fig. 1 Two-stage EDFA with 980 nm and 1480 nm LD pump

(a) intermediate isolator configuration; (b) loop-coupling configuration with an isolator

图 1 (a) 为内插光隔离器的光路结构。光隔离器 ISO_2 置于两段掺铒光纤 L_1 和 L_2 之间, 第一段光纤采用 980 nm LD 泵浦, 第二段光纤采用 1480 nm LD 泵浦, 光隔离器 ISO_2 能阻断第二段光纤的反向 ASE 进入 L_1 中, 从而提高了放大器增益, 改善了 EDFA 的噪声特性。为保证放大器噪声系数低, 必须充分反转 L_1 段掺铒光纤的粒子数, 这样导致第一段光纤存在剩余 980 nm 泵浦光, 而 ISO_2 为 1550 nm 波段光隔离器, 泵浦光无法通过 ISO_2 而被浪费了。

图 1 (b) 为内插光隔离-耦合环的光路结构。信号光首先在第二段掺铒光纤 L_2 中得到放大, 然后从 980/1550 nm WDM_2 的 1 端口耦合到 4 端口, 经光隔离器 ISO_2 后, 从 2 端口耦合进入第一段掺铒光纤 L_1 中。在此光路结构中, 由于引入了 WDM_2 从而使 980 nm 剩余泵浦光直接从 WDM_2 的 1 端口耦合到 3 端口得到充分利用, 而对于第二段掺铒光纤的反向 ASE, 从 WDM_2 的 3 端口耦合到 2 端口后, 受到光隔离器 ISO_2 隔离作用而不能从端口 4 进入到第一段掺铒光纤中, 因而此种光路结构, 不仅能抑制 L_2 段的反向 ASE, 同时能充分利用 980 nm 剩余泵浦光, 将会进一步改善 EDFA 的特性。

实验采用 Er^{3+}/Al^{3+} 共掺杂光纤, 掺铒浓度为 200 ppm, 数值孔径为 0.21, 截止波长为 925 nm, 纤芯直径为 3.3 μm , L_1 与 L_2 的长度分别为 7 m 和 19 m, 泵浦 LD 中心波长分别为 979 nm 和 1477.5 nm, 谱宽分别为 0.2 nm 和 2.5 nm, 泵浦总功率为 100 mW; WDM_1 和 WDM_2 为 980/1550 nm 合波器, WDM_3 为 1480/1550 nm 合波器, WDM 对泵浦光和信号光的插入损耗都小于 0.2 dB; 偏振无关的光隔离器 ISO_1 , ISO_2 和 ISO_3 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; EDFA 的输入和输出端为标准 FC 接头。

采用中心波长为 1553.5 nm 的带尾纤输出的 DFB 激光器作信号源, 实验研究了内插光隔离器结构与光隔离-耦合环结构 EDFA 的增益、噪声系数和输出功率特性。

图 2 所示为 EDFA 的增益与输入功率的关系曲线, 其中 (a) 对应于图 1 (a) 所示的内插光隔离器结构; (b) 对应于图 1 (b) 所示的光隔离-耦合环结构, 以下各图类同。当输入信号功率为 -40 dBm 时, 两者增益分别为 37.7 dB 和 42.8 dB, 后者比前者大 5.1 dB。随着输入信号的增加, 两者增益差别减小, 并趋于一致。

图 3 为 EDFA 的噪声系数与输入信号功率的曲线, 由图可见, 在误差范围内, 两者的噪声系数是一致的。在小信号情况下, 噪声系数都为 4.4 dB, 随着输入信号功率增加, 噪声系数增加。

图 4 为 EDFA 的输出功率特性, 其中, 图 4 (a) 为 EDFA 的输出功率与输入功率的关系曲

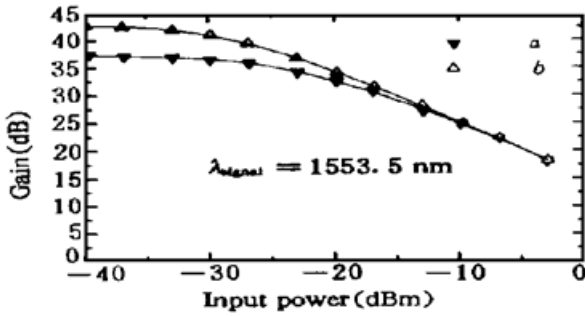


图 2 EDFAs 的增益特性

a: 内插光隔离器结构; b: 光隔离-耦合环结构

Fig. 2 Gain characteristics of EDFAs

a: intermediate isolator configuration of Fig. 1

b: loop-coupling configuration with an isolator of Fig. 1

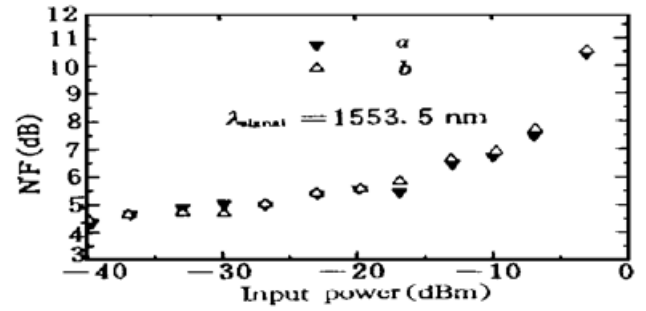


图 3 EDFAs 的噪声系数特性

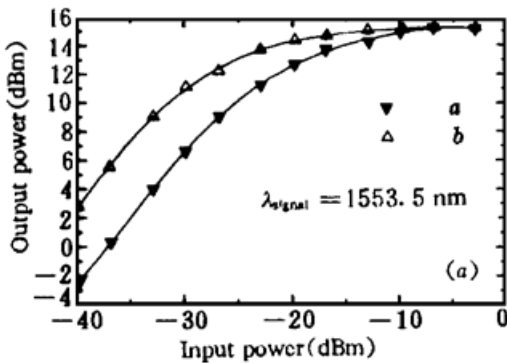
a: 内插光隔离器结构; b: 光隔离-耦合环结构

Fig. 3 Noise figure (NF) of EDFAs

a: intermediate isolator configuration of Fig. 1

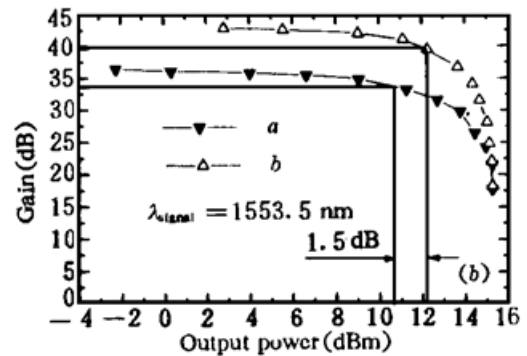
b: loop-coupling configuration with an isolator of Fig. 1

线;图 4 (b) 为 EDFA 的增益与输出功率的关系曲线。由于内插隔离-耦合环的放大器小信号增益大,因而在小信号情况下,信号输出功率较大,随后两者趋于一致。当信号输入功率为-3 dBm 时,输出功率都为 15.2 dBm,此时增益为 18.2 dB,如图 4 (a) 所示。但是内插光隔离-耦合环的 EDFA 的 3 dB 饱和输出功率比内插光隔离器结构 EDFA 的饱和输出功率大 1.5 dB,如图 4 (b) 所示。



(a) 输出功率与输入功率关系

(a) Output power vs input power



(b) 增益与输出功率特性关系

(b) Gain vs output power

图 4 EDFAs 的输出功率特性

a: 内插光隔离器结构; b: 光隔离-耦合环结构

Fig. 4 Output power characteristics of EDFAs

a: intermediate isolator configuration of Fig. 1, b: loop-coupling configuration with an isolator of Fig. 1

3 结果分析

分析两段级联结构的 EDFA 特性时,可将其等效为两个独立放大器的级联,如图 5 所示,EDFA₁ 和 EDFA₂ 分别为掺铒光纤长度 L₁ 和 L₂ 所组成的光放大器。

EDFA 的总增益和输出功率可表示为:

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

$$P_3 = P_1 \times (G_1 + G_2) \quad (2)$$

式中 P₁ 为输入信号功率, P₂ 和 P₃ 分别为 EDFA₁ 和 EDFA₂ 的输出信号功率, G₁ 和 G₂ 分别为

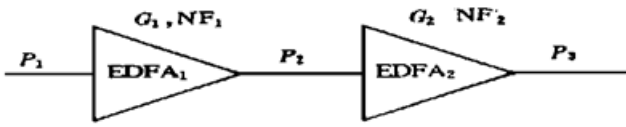


图5 两段结构EDFA 等效模型

Fig. 5 Equivalent model with two-stage EDFA

随着输入信号功率的增加, 980 nm 剩余泵浦光减小, 进入图 1 (b) 所示结构的剩余泵浦光减小, 两种结构的泵浦状态趋于一致, G_2 的差别变小, 最后总的增益和输出功率趋于一致, 如图 2, 图 4 所示。

根据噪声系数的定义可以证明, 级联放大器的总噪声系数可表示为:

$$NF = NF_1 + NF_2/G_1 \tag{3}$$

其中, NF_1 和 NF_2 分别为 EDFA₁ 和 EDFA₂ 的噪声系数。

在图 1 所示两种光路结构中, 第一段掺铒光纤 L_1 为 980 nm LD 正向泵浦, 相应的 NF_1 也较低, 由式(3) 知, 在 NF_1 一定情况下, 只要 G_1 足够大, 则 EDFA 总噪声系数主要由 NF_1 决定。

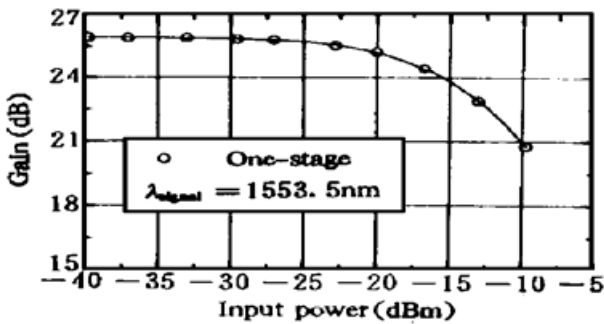


图6 在波长为 1553.5 nm 处, 第一段掺铒光纤的增益与输入信号功率的关系

Fig. 6 The first stage EDF (L_1) gain as a function of input signal power at the wavelength 1553.5 nm

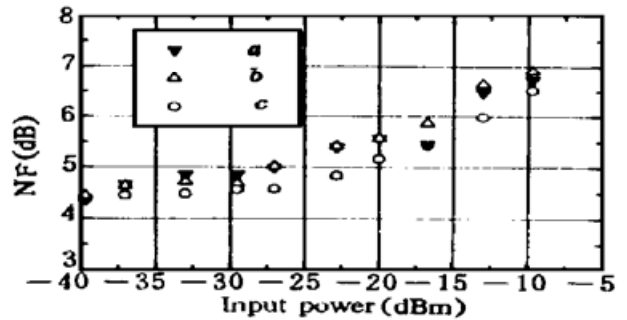


图7 不同结构 EDFAs 的噪声系数特性
a: 内插光隔离器结构; b: 光隔离-耦合环结构;
c: 第一段掺铒光纤的噪声系数

Fig. 7 Noise figure (NF) characteristics of different EDFAs' configurations

a: intermediate isolator configuration; b: loop-coupling configuration with an isolator; c: the first stage EDF (L_1) NF

图 6 所示为 980 nm LD 泵浦第一段掺铒光纤 L_1 的增益特性, 在小信号状态下 (< -30 dBm), 增益为 26 dB。图 7 为两种结构 EDFA 的噪声系数及泵浦第一段掺铒光纤的噪声系数和输入功率的关系。从图中看出, 小信号状态下 (< -30 dBm), EDFA 的总噪声系数 NF 比 NF_1 只约大 0.2 dB, 说明 EDFA 的噪声系数在 G_1 大于 26 dB 情况下, NF_2 对总噪声系数 NF 影响较小, 即 $NF \approx NF_1$; 随着输入信号光功率增加, G_1 下降, NF_2 对 NF 的影响增加, 但 NF 比 NF_1 也约大 0.5 dB。以上表明, 只要 G_1 足够大, 尽管 NF_2 较大, 但对放大器噪声系数影响是较小的, 这样就可充分发挥 1480 nm LD 的高量子转换效率的特点, 弥补 1480 LD 泵浦掺铒光纤高噪声系数的不足, 从而在 EDFA 中同时实现低噪声系数、高增益和高输出功率, 达到最优化设计。

参 考 文 献

- 1 J. L. Zyskind. Advances in Erbium-doped fiber amplifiers for optical communications. *SPIE, Fiber Laser Sources and Amplifiers*, 1990, **1373**, : 80~ 83
- 2 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
- 3 M. Shimizu. Highly efficient integrated optical fibre amplifier module pumped by a 980 nm laser diode. *Electr. Lett.*, 1990, **26**(20) : 1641~ 1643
- 4 唐平生, 刘小明, 刘 丹 等. 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
- 5 Shinji Yamashita, Takanori Okoshi. Performance improvement and optimization of fiber amplifier with midway isolator. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(11) : 1276~ 1278
- 6 Xin Jiang, Xiaoming Liu, Jiangde Peng *et al.*. Wide-band EDFA with 41 dB gain and 28 mW power output at 1550 nm. in IOOC 1995 Technical Digest Series, Hong Kong, 1995 : 18~ 19

Experimental Study of Two-stage Erbium Doped Fiber Amplifiers Pumped by 980 nm and 1480 nm LD

Tang Pingsheng Liu Xiaoming Liu Dan Peng Jiangde Zhou Bingkun
(*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract Based on a two-stage fiber, Erbium doped fiber amplifiers (EDFAs) pumped by 980 nm and 1480 nm laser diodes (LD) are investigated. Experimental comparisons of gain, noise figure and output power between the intermediate isolator configuration and the loop-coupling configuration are discussed. A small signal gain of 42.8 dB of EDFA has been obtained for the loop-coupling configuration. The minimum noise figure and maximum output power at wavelength of 1553.5 nm are 4.4 dB and 15.2 dBm, respectively.

Key words EDFA, two-stage, pump