

低噪声、高增益的 L-band EDFA 的实验研究*

秦山 强则焯 何赛灵

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室,光及电磁波研究中心,杭州 310027)

摘要 针对传统的 L-band EDFA 的工作效率低,提出了一种基于单根光纤光栅、泵浦分配、两段级联的 EDFA 的新结构,其中的光纤光栅用来反射无用的后向 C-band ASE. 系统地研究了泵浦比例和光纤光栅波长对增益噪声指数的影响关系. 最后经实验验证,得到了低噪声、高增益的 L-band 的 EDFA. 其在输入信号光(1570 nm)功率为 -30 dBm 及泵浦功率为 70 mW 时,增益为 22.26 dB,增益噪声指数为 4.96 dB.

关键词 L-band;掺铒光纤放大器;噪声;增益

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

掺铒光纤放大器(erbium doped fiber amplifier, EDFA)由于具有高增益、低噪声、偏振不敏感及透明传输等优点,已被广泛地应用在密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexed, DWDM)系统中. 随着通信信息容量的不断增加,传统的 C-band(1520 ~ 1560 nm)增益带宽已不能满足系统的要求. L-band(1570 ~ 1605 nm)的 EDFA 不仅可以和 C-band 的 EDFA 并行使用,有效增加信号带宽,还能降低限制色散位移光纤(dispersion shifted fiber, DSF)传输信号带宽的非线性失真,已引起了人们的广泛兴趣^[1-8]. 但是,传统的 L-band 的 EDFA 由于工作在掺铒光纤(erbium doped fiber, EDF)增益谱的尾部,转换效率很低,存在输出增益不高、噪声指数大等缺点.

针对 L-band 的 EDFA 存在的问题,人们提出了各种各样的改善方法,主要有泵浦波长调谐法^[6];使用辅助的 1550 nm 光源与泵浦光(980 nm 或 1480 nm)共同泵浦法^[4];基于来自 EDF 的 C-band ASE 的 ASE 泵浦法^[3,5,7,8]. 泵浦波长调谐法固然可以提高增益效率,但其增加了噪声指数;选用 1550 nm 的泵浦源需要增加额外的泵浦源成本;而 ASE 泵浦方法却没有这样的缺点,但基于 ASE 泵浦法报道的结构有些过于复杂,比如基于双程技术^[5],它要用到两个光环形器,增加了产品的成本;文献[3,8]提出的结构固然可以提高泵浦转换效率,但却增加了噪声指数. 因此,如何设计性能优越、结构简单、成本较低的 L-band EDFA 依然是一个十分有意义的问题.

本文在文献[8]的基础上,提出了在两端级联的 EDF 中间插入一个光隔离器的 EDFA 结构. 为了提高泵浦的利用效率,文中对泵浦功率进行分配,并实验研究了泵浦分配比例和光栅反射波长对这种新结构的增益噪声指数的影响.

1 实验装置

在设计 L-band EDFA 时,人们通常采用 1480 nm

A

泵浦光泵浦 EDF,主要是因为这样能够获得高于 980 nm 泵浦光泵浦时所获得的功率转换效率^[9,10,13],但同时也产生了更大的噪声指数^[11,13]. 其实,只要合理设计 L-band 的 EDFA 结构,980 nm 泵浦光完全可以获得高增益与低噪声的 L-band 的 EDFA^[7,12]. 由于正向泵浦时噪声指数最小,因此,我们在实验中选取 980 nm 的正向泵浦光路结构,具体装置如图 1. 为了更好的与文献[8]提出的结构进行比较,实验中始终保证输入的泵浦总功率为 70 mW(对于图1(a)的新结构则有 $P_1 + P_2 = 70$ mW), EDF1 和 EDF2 的长度始终保持不变,即分别取 20 m 和 5 m. 图中掺铒光纤为商用 La/Al 的掺铒光纤,其芯径为 1.79 μ m,数值孔径为 0.25,截止波长约为 950 nm,1.53 μ m 附近的吸收峰值约为 19.2 dB/m. 整个实验中光谱的测量均采用 Agilent 86142B 光谱仪(OSA)测量,光谱测量精度带宽(RBW)设置为 0.5 nm,光谱灵敏度设置为 -65 dBm.

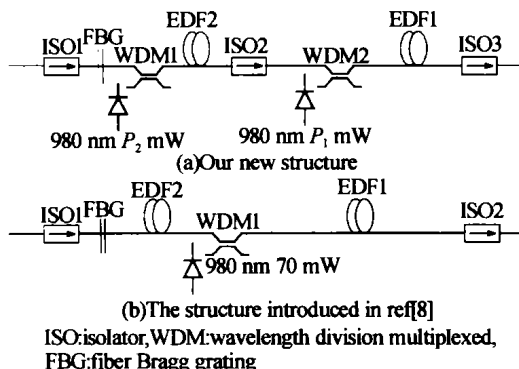


图 1 L-band EDFA 实验装置
Fig. 1 Experimental set-up for L-band EDFAs

2 实验结果与讨论

按图1,我们接入一根布拉格波长 λ_B 为 1549.43 nm、光栅的反射率 r 为 93.4% 的光纤光栅,并选取 EDF1 对应的泵浦功率 P_1 为 53 mW,EDF2 对应的泵浦功率为 17 mW. 因为对于以均匀展宽为主的 EDFA,小信号增益谱可以近似由 ASE 谱线来描述,因此,在实验中将通过观察 ASE 谱来判断结构的优劣. 图 2 是图 1 所示结构(a)和结构(b)的 ASE 谱. 显然,结构(a)的 ASE 功率高于结构(b)的 ASE 功率,这表

明采用结构(a)后,L-band EDFA 的增益大大提高.

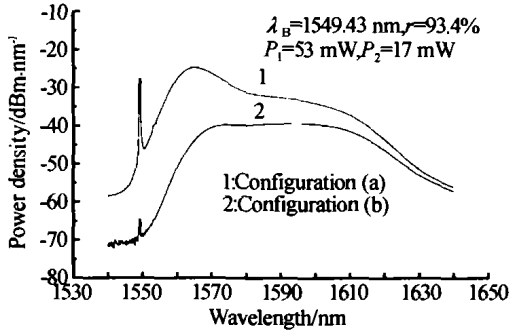


图2 两种不同结构的 ASE 谱
Fig. 2 ASE spectra corresponding to the two different configurations in Fig. 1(a) and (b)

图3是两种结构在上述条件下得到的增益噪声指数与输入信号光功率的关系. 由图3可以看出, 结构(a)得到的增益大于结构(b)得到的增益, 结构(a)的噪声指数小于结构(b)的噪声指数, 如在输入功率 -40 ~ -15 dBm 范围内, 两种结构的增益最少相差 3.3 dB, 噪声指数最少相差 1.7 dB. 这种改善首先是由于在 EDF1 和 EDF2 间插入了光隔离器 ISO2, 抑制了两段 EDF 各自产生的 ASE 的相互干扰, 从而改善了 EDFA 整机的噪声性能; 其次是由于泵浦功率的有效分配, 使得 EDF2 部分产生的 C-band ASE 功率要远大于没有 980 nm 泵浦时所产生的 ASE 功率, 也就是增强了 ASE 泵浦(二级泵浦)的效果.

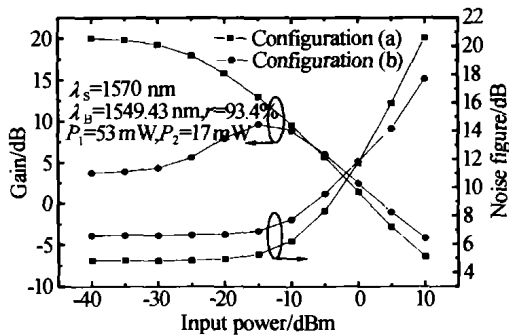


图3 两种不同结构下增益噪声指数与输入功率的关系
Fig. 3 The gain and noise figure as the input signal power increases for the two different configurations

2.1 不同泵浦功率比例对下增益噪声的影响

上述讨论中, 泵浦比例是随意选取的. 文中首先在保持布拉格波长 λ_B 、光栅反射率 r 相同条件下, 通过改变泵浦功率比例 $R = P_2 / (P_1 + P_2) \times 100\%$, 研究了增益噪声指数随泵浦功率比例的变化关系, 如图4. 其中输入信号光波长 λ_S 为 1570 nm, 输入功率 $P_{s,in}$ 为 -30 dBm.

由图4可见, 泵浦比例 R 约为 24%, 即 $P_1 = 53$ mW, $P_2 = 17$ mW 时, 增益和噪声指数都是最大, 分别是 19.27 dB 和 4.83 dB; 在分配比例 62% 时, EDFA 的增益和噪声指数随着泵浦分配比例的增加, 即随着功率的逐渐增大而逐渐减小, 增益变化明显, 噪声指数不是十分明显, 如比例约为 24% 时的增益和 62% 时的增益相差约为 3.9 dB, 相应的噪声指数仅相差

0.16 dB; 在 $R > 62\%$ 时, 增益随着泵浦分配比例的增加而增加, 但其获得的数值依然小于比例约为 24% 时获得的增益, 相应的噪声指数则随着比例的增加而迅速减小. 这是因为随着 P_2 功率的逐渐增加, EDF2 处于更高的粒子数反转状态, 产生的噪声指数逐渐减小, 由于对于多段级联的 EDFA 的噪声特性主要由第一段 (EDF2) 决定, 因此, 这种结构的 EDFA 噪声指数逐渐减小. 而增益变小的原因是由于 P_2 的增大, 在总功率不变条件下, P_1 逐渐减小, 其不足以放大 EDF1.

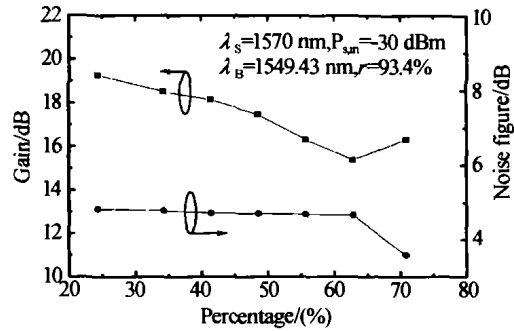


图4 不同泵浦功率比例下增益噪声指数与输入功率的关系
Fig. 4 The gain and noise figure as the power ratio of the two pump LDs varies

综上所述, 泵浦比例 R 约为 24% 时得到的 EDFA 性能最好, 因此, 这种泵浦比例将用于下面的其他参量讨论.

2.2 布拉格反射波长对增益噪声的影响

实验中, 泵浦功率 $P_1 = 53$ mW, $P_2 = 17$ mW, 光栅反射率均约为 93.4%, 信号光波长 λ_S 为 1570 nm, 信号光功率 $P_{s,in}$ 为 -30 dBm, 布拉格波长分别为 1545.05 nm, 1549.43 nm, 1560.08 nm 时他们对应的增益/噪声指数分别是 22.26137 dB/4.96426 dB, 19.27161 dB/4.82743 dB, 18.84798 dB/5.02177 dB, 增益最大差值为 3.4134 dB, 噪声最大差值为 0.1943 dB. 这种差异是由于 EDF 的增益系数 $g^*(1545 \text{ nm}) > g^*(1550 \text{ nm}) > g^*(1560 \text{ nm})$, 使得经光栅反射回的 ASE 光功率(这些 ASE 光作为二级泵浦源) $P_{ASE}^+(1545 \text{ nm}) > P_{ASE}^+(1550 \text{ nm}) > P_{ASE}^+(1560 \text{ nm})$.

综上, 在布拉格波长 λ_B 为 1545.05 nm 时 EDFA 的性能是最好的, 因此在下面的讨论中, 将选取 λ_B 为 1545.05 nm.

2.3 增益噪声与输入光波长的关系

通过上面讨论, 当 $R \cong 24\%$, $r = 93.4$, $\lambda_B = 1545.05$ nm 时结构(a)的综合性能最好. 图5是结构(a)和结构(b)在此条件下, 同时保持总泵浦功率不变和总 EDF 长度相同(20 m + 5 m)及上述测得增益噪声指数改变量随输入信号光波长的变化曲线, 其中信号光输入功率 $P_{s,in}$ 为 -30 dBm. 由图可以看出, 随着输入光波长的增加, 增益和噪声改善效果逐渐减小, 增益最大改善量达到约 23 dB, 噪声改善最大达到约 5.1 dB.

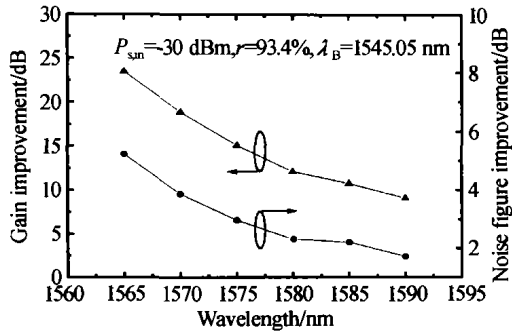


图5 增益噪声改善量随输入信号光波长的关系
Fig. 5 The improvement of the gain and noise figure at different input signal wavelengths

3 结论

本文提出了一种基于单根光纤光栅泵浦分配两段级联的 L-band EDFA 的结构, 实验研究结果表明, 这种结构不仅可以改善 L-band EDFA 的转换效率和噪声指数, 还可以通过合理的安排泵浦功率分配比例和选取合适的布拉格波长来获得这种 EDFA 结构的最佳性能, 如在输入信号光波长为 1570 nm、输入功率为 -30 dBm 时, 其增益为 22.26 dB、噪声为 4.96 dB.

参考文献

- Massicott J F, Wyatt R, Ainslie B J, et al. Efficient, high power, high gain, Er^{3+} doped silica fiber amplifier. *Electron Lett*, 1990, **26**(14): 1038 ~ 1039
- Massicott J F, Wyatt R, Ainslie B J. Low noise operation of Er^{3+} doped silica fibre amplifier around 1.6 μm . *Electron Lett*, 1992, **28**(20): 1924 ~ 1925
- Lee J, Ryu U C, Ahn S J, et al. Enhancement of power conversion efficiency for a L-band EDFA with a secondary pumping effect in the unpumped EDF section. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, **11**(1): 42 ~ 44
- Mahdi M A, Adikan F R, Poopalan P, et al. Long-wavelength EDFA enhancement through 1550 nm band signal injection. *Opt Commun*, 2000, **176**(3): 125 ~ 129
- Harun S W, Poopalan P, Ahmad H. Gain enhancement in L-Band EDFA through a Double-pass technique. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, **14**(3): 296 ~ 297
- Flood F A, Wang C C. 980 nm pump-band wavelengths for long-wavelength-band erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, **11**(10): 1232 ~ 1234
- 强则焯, 张徐亮, 沈林放, 等. L-Band 掺铒光纤放大器的优化设计. *光子学报*, 2003, **32**(12): 1470 ~ 1473
Qiang Z X, Zhang X L, Shen L F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1470 ~ 1473
- 强则焯, 张徐亮, 金如翔, 等. L-波段掺铒光纤放大器的优化设计. *光电子·激光*, 2003, **14**(12): 1284 ~ 1287
Qiang Z X, Zhang X L, Jin R X, et al. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(12): 1284 ~ 1287
- Ono H, Yamada M, Kanamori T, et al. Low-noise and high-gain 1.58 μm band Er^{3+} -doped fibre amplifiers with cascade configurations. *Electron Lett*, 1997, **33**(17): 1477 ~ 1479
- Yamada M, Mori A, Kobayashi K. Low-noise, broadband Er^{3+} -doped silica fibre amplifiers. *Electron Lett*, 1998, **34**(15): 1490 ~ 1491
- Ono H, Yamada M, Sudo S, et al. 1.58 μm band Er^{3+} -doped fibre amplifier pumped in the 0.98 and 1.48 μm bands. *Electron Lett*, 1997, **33**(10): 876 ~ 877
- Chung H S, Lee M S, Lee D, et al. Low noise, high efficiency L-band EDFA with 980 nm pumping. *Electron Lett*, 1999, **35**(13): 1090 ~ 1100
- 刘艳格, 张昊, 蒙红云, 等. WDM 用增益平坦的高增益低噪声双段级联掺铒光纤放大器. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1196 ~ 1200
Liu Y G, Zhang H, Meng H Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1196 ~ 1200
- 马晓明. 两段级联掺铒光纤放大器的优化研究. *光子学报*, 2003, **32**(6): 688 ~ 692
Ma X M. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 688 ~ 692

Experimental Study of an L-band Erbium Doped Fiber Amplifier With Low-noise and High Gain

Qin Shan, Qiang Zexuan, He Sailing

Centre for Optical and Electromagnetic Research, State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Joint Laboratory of Optical Communications of Zhejiang University, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date: 2004-02-03

Abstract A new two-stage L-band erbium doped fiber amplifier (EDFA) structure with a single fiber grating is introduced to solve the problem of poor power conversion efficiency of a conventional L-band EDFA. A mid-way isolator is used in the structure to improve the noise figure. The fiber grating is used to reflect the wasted C-band backward amplified spontaneous emission (ASE). The influence of the pump power ratio and the Bragg wavelength to the characteristics of this EDFA is studied experimentally. For such an EDFA structure with a pump power of 70 mW, 22.26 dB gain and 4.96 dB noise figure is obtained for a 1570 nm signal with an input power of -30 dBm.

Keywords L-band; Erbium doped fiber amplifier (EDFA); Noise figure; Gain

Qin Shan is currently a graduate student of the Joint Laboratory of Optical Communications of Zhejiang University. His main research interest is optical fiber amplifiers.

