

组合光纤光栅掺铒光纤放大增益平坦器研究

布音嘎日迪¹ 张甲笑² 潘赫赫² 柳春郁¹ 杨九如^{1*}

(¹ 黑龙江大学黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)
² 黑龙江大学电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 相比与 L 波段, 掺铒光纤放大器(EDFA)在 C 波段的增益谱平坦必须借助光学滤波器实现。由于带宽非适配, 传统的长周期光纤光栅(LPFG)无法有效压缩增益起伏。为改善 EDFA 的增益平坦度, 将 LPFG 与弱反射率光纤布拉格光栅对(FBG-P)结合构成组合光栅增益平坦器, 利用 FBG-P 的弱谐振特性进一步抑制 EDFA 的增益谱起伏。通过仿真分析优化了相关重要参数, 并实验测试了对应方案的增益平坦特性。数值结果表明, 所提方案将 EDFA 在 1520~1560 nm 区域内的增益起伏限制在 ± 0.45 dB, 与单 LPFG 结构相比, 增益平坦改善达 49.31%。

关键词 光纤光学; 掺铒光纤放大器; 增益平坦; 长周期光纤光栅; 光纤布拉格光栅

中图分类号 TN913.7 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.s206002

Gain-Flattening Erbium Doped Fiber Amplifier Based Composite Fiber Gratings

Garidi Buyin¹ Zhang Jiexiao² Pan Hehe² Liu Chunyu¹ Yang Jiuru¹

(¹ Key Laboratory of Electronic Engineering of Heilongjiang Province, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China
² College of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Heilongjiang, Harbin 150080, China)

Abstract Compared with L band, the gain flattening of erbium doped fiber amplifier (EDFA) in C band should be conducted by optical filter. Due to unmatched bandwidth, the conventional long-period fiber grating (LPFG) cannot efficiently reduce the fluctuation of gain spectrum. Aiming to improve gain flatness of EDFA, a novel scheme named composite fiber grating is proposed which combining LPFG and fiber Bragg grating-pair (FBG-P) with weak reflectivity. Moreover, the key parameters of CFG are optimized by simulation, and its performance of gain flattening is also experimentally tested. The numerical results show that, the proposed scheme achieves controlling the fluctuation within ± 0.45 dB in the range from 1520 nm to 1560 nm, and the improvement on gain flattening reaches 49.31% comparing with the scheme based single LPFG.

Key words fiber optics; erbium doped fiber amplifier; gain flattening; long-period fiber grating; fiber Bragg grating

OCIS codes 060.2320; 060.3735; 230.2285; 120.2440

1 引 言

以铒光纤为增益介质的掺铒光纤放大器(EDFA)具有高增益、宽带宽范围、低噪声等系列优点, 自问世以来, 始终是光纤通信、光纤传感等领域中的核心器件^[1-4]。近期, 由于光传感/通信网络内部信道容量激增, 使得人们对于 EDFA 的带宽性能提出更高要求。基于铒离子(Er^{3+})的发射谱特性, EDFA 的输出增益在 1530 nm 和 1558 nm 处出现峰值。实验证明, 通过优化抽运及铒光纤(EDF)长度/铒离子浓度, 可较容易地消除 1558 nm 峰值。然而, 对于 1530 nm 峰值则需设计增益平坦滤波器(GFF)使输出增益谱平坦化^[5]。

收稿日期: 2014-05-10; 收到修改稿日期: 2014-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61302075)、中国博士后基金资助(2012M520779)

作者简介: 布音嘎日迪(1975—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事光纤技术方面的研究。E-mail: hd_adi@126.com

* 通信联系人。E-mail: yangjr@hlju.edu.cn

理论上,薄膜滤波器、声光调制器(AOM)、高双折射率光纤、光纤环形镜(FLM)等均可用作 GFF,实现增益平坦,但价格昂贵、结构复杂是主要的制约因素^[6]。与之相比,长周期光纤光栅(LPFG)具有大制作容差、低成本、技术成熟度高等特点,成为使用最频繁的 GFF 器件^[7-8]。LPFG 的不足在于,固定的带阻特性(约 10 nm)无法与 EDFA 的非均匀增益谱(大于 40 nm)精确匹配,不平坦度通常达 ± 1 dB 以上。为改善其增益平坦性能,Abramov 等^[9]基于金属镀膜工艺设计了调谐范围达 60 nm 的 LPFG,但工艺难度较大。文献[10-12]采用级联 LPFG 结构拓展了增益平坦器的控制范围,代价是使方案复杂度增加。文献[13]通过结合 LPFG 与可变衰减器(VOA)实现局部增益的动态衰减,但平坦度改善效果不理想。文献[14]在两个 LPFG 间插入布拉格光栅(FBG),利用其反射铒光纤内部的自发辐射,弥补 LPFG 的过度增益衰减,缺点是改进区域仅限于 1530 nm 附近。在文献[15]中,作者通过改变 FBG 的反射率与中心波长,实现精确控制 EDFA 的输出增益。基于此,本文将光纤光栅对(FBG-P)与 LPFG 结合,构成组合光纤光栅增益平坦器,在利用 LPFG 消除 1530 nm 峰值的同时,通过 FBG-P 形成的弱反射腔对 40 nm 范围的增益谱平坦度进一步微调。通过数值仿真优化 EDFA 系统参数,获得 FBG 反射率与输出增益间的量化关系,进而基于级联铒光纤结构组建增益平坦性能测试系统。实验结果表明,当 FBG 的中心波长为 $\lambda_B = 1532.137$ nm、反射率为 $R = 0.308$ 时,EDFA 在 1520~1560 nm 范围内的增益平坦度改善 49.31%,不平坦度低于 ± 0.45 dB。

2 仿真分析与系统优化

2.1 掺铒光纤放大器基本结构参数优化

仿真实验模型如图 1 所示,它由覆盖在 1520~1560 nm 波段的 10 通道连续(CW)信号光、抽运源(980 nm LD)、铒光纤、光谱仪(OSA)和波分复用(WDM)分析仪(其工作波段为 1500~1620 nm)构成。设定信号光的注入功率为 -30 dBm,10 通道信号光中心波长分别为 1525, 1528, 1531, 1534, 1537, 1540, 1543, 1548, 1553, 1558 nm,即信道间隔为 3~5 nm;设定抽运功率 P_{pump} 为 0~200 mW,铒光纤长度 L_{Er} 为 1~40 m,设定最小增益 $G_{\text{min}} = 20$ dB。利用 OptiSystem 参数优化功能,获得 P_{pump} 和 L_{Er} 的最佳值分别为 101.227 mW 和 9.3144 m。方便起见,在以下的研究中,选定 $P_{\text{pump}} = 100$ mW, $L_{\text{Er}} = 9$ m。如图 2 可知,优化后的 EDFA 并未出现理论上的 1558 nm 峰值,且在除 1531 nm (195.81 THz)外的大部分区域平坦度较好。具体地,1531 nm 处增益凸起的幅值为 5 dB~8 dB,宽度约 10 nm,这与文献[10-12]中报道的结果相符。

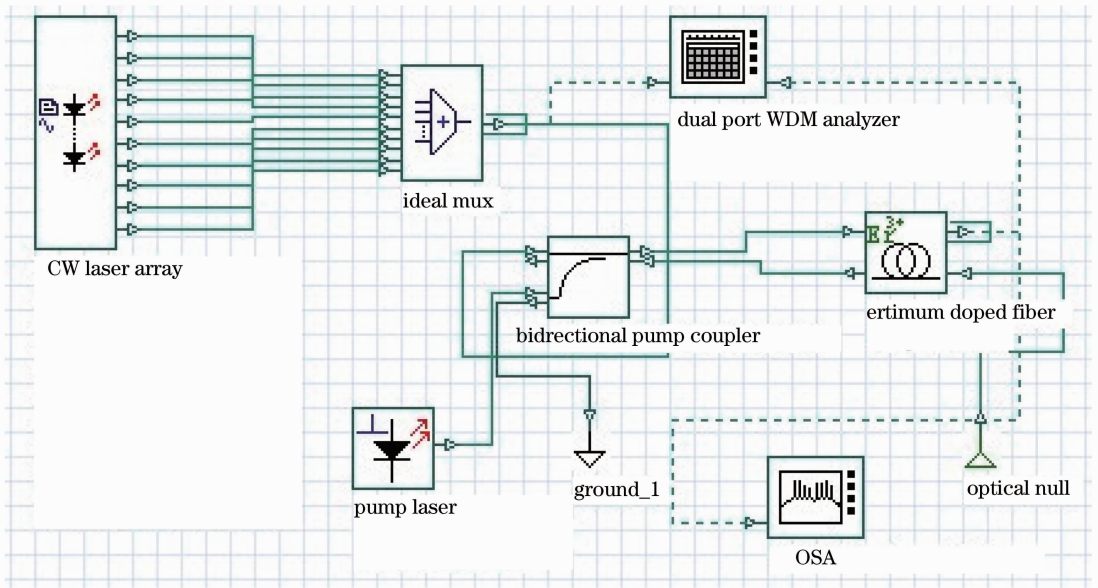


图 1 EDFA 基本结构

Fig. 1 Basic configuration of EDFA

2.2 增益平坦器优化设计

为实现 EDFA 增益谱平坦,对 LPFG 的性能进行评测。LPFG 可视作带阻滤波器,仿真实验中利用理

想光学滤波器代替 LPFG。将其置于 EDF 后,实现对 1531 nm 增益峰值的预平坦。为达到增益平坦目的,滤波器参数配置需与图 2 所示的增益凸起相匹配。经多次调试,确定滤波器的参数配置如表 1 所示,并得到如图 3 所示的信号输出增益谱。

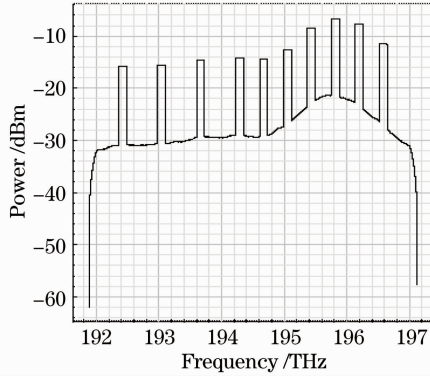


图 2 无平坦器信号光增益谱

Fig. 2 Gain spectrum of EDFA without flattening

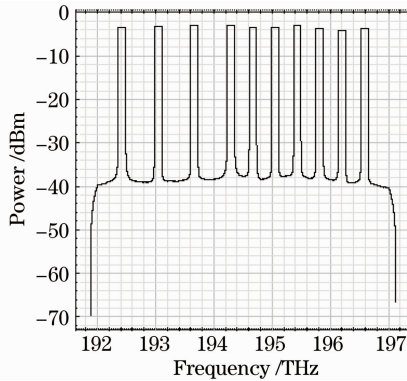


图 3 基于滤波器的信号光增益谱

Fig. 3 Gain spectrum of EDFA with filter

表 1 光学滤波器参数配置

Table 1 Main parameters setting of optical filter

Parameter	Value
Center wavelength /nm	1530
Bandwidth /nm	10
Depth /dB	6.5
Cutoff magnitude /dB	4.7

比较图 2 和图 3 可知,滤波器有效压缩了 EDFA 在 1531 nm 处的凸起,增益谱的平坦度改善明显。基于量化目的,定义增益不平坦度为

$$f_{GF} = \pm \frac{\left| G_{\max} - \frac{1}{n} \sum_i^n G_i \right| + \left| G_{\min} - \frac{1}{n} \sum_i^n G_i \right|}{2}, \quad (1)$$

式中 G_{\max} 和 G_{\min} 分别为最大增益和最小增益, n 为信道数, i 为信道标记, $\frac{1}{n} \sum_i^n G_i$ 为平均增益。进而依据图 3 的数值结果得到,信号光平均增益为 20.6 dB,对应的 f_{GF} 值为 ± 1.25 dB。相比于图 2,其 f_{GF} 值减小约 2.75 dB,增益谱的平坦度改善则达 68.7%。值得注意的是,虽然滤波器成功衰减了 1531 nm 增益峰值,但亦导致 1550 nm 波段增益产生稍许波动。这源于滤波器的吸收谱与 EDFA 的增益谱(1520~1560 nm)间的失配。换言之,基于单光学滤波器(或长周期光纤光栅)的增益平坦器在性能上存在局限性。

为进一步改善 EDFA 增益谱的平坦度,在光学滤波器(或长周期光纤光栅)的基础上引入 FBG-P,开展基于组合光纤光栅的增益平坦器设计。与 LPFG 不同,FBG 的栅距约为 500 nm,属于短周期光栅。在 EDFA 中,通常依赖 FBG 的强反射特性构成谐振腔,并实现增益控制/稳定功能^[16]。基于 FBG 的窄带滤波特性,FBG-P 最佳稳定性与其中心波长 λ_B 重合,并沿 λ_B 向两侧依次梯度递减。同时,增益稳定以牺牲信号光幅度作为代价:强反射条件下(FBG 反射率 $R > 0.99$),增益幅度下降近 50%^[15]。上述结果表明,FBG-P 可在宽波带范围内实现信号光的增益调谐,但需细致考虑 λ_B 和 R 的具体数值。依据 EDFA 增益谱,设定 $\lambda_B = 1531$ nm,令 FBG-P 与滤波器共同抑制该波段增益峰值,进而构建如图 4 所示的仿真模型,探究反射率 R 与增益之间的量化关系。

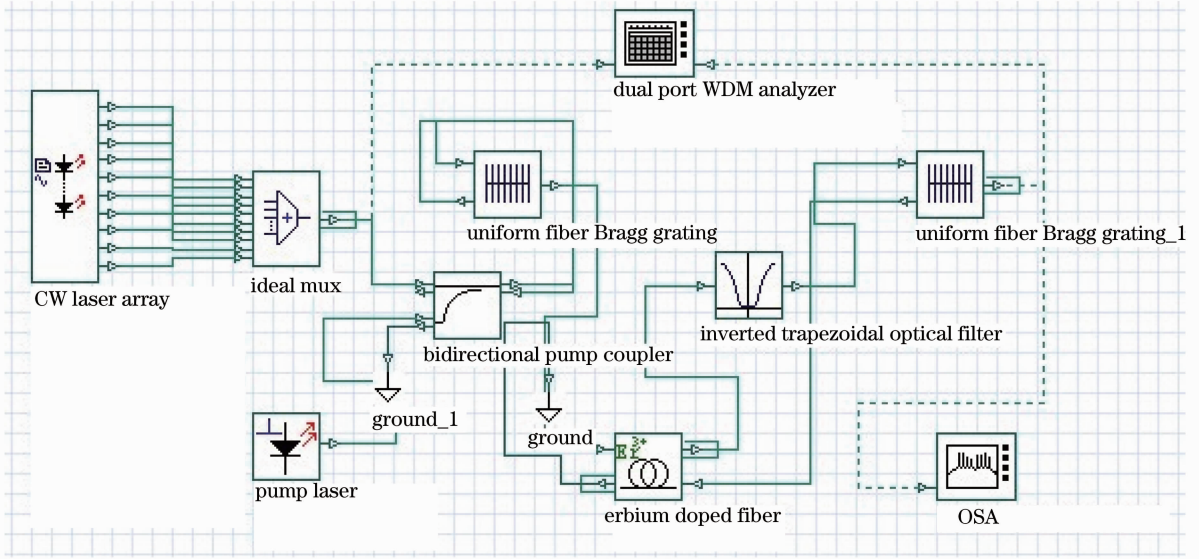


图 4 组合光纤光栅结构 EDFA 仿真模型

Fig. 4 Simulation model of EDFA with composite fiber gratings

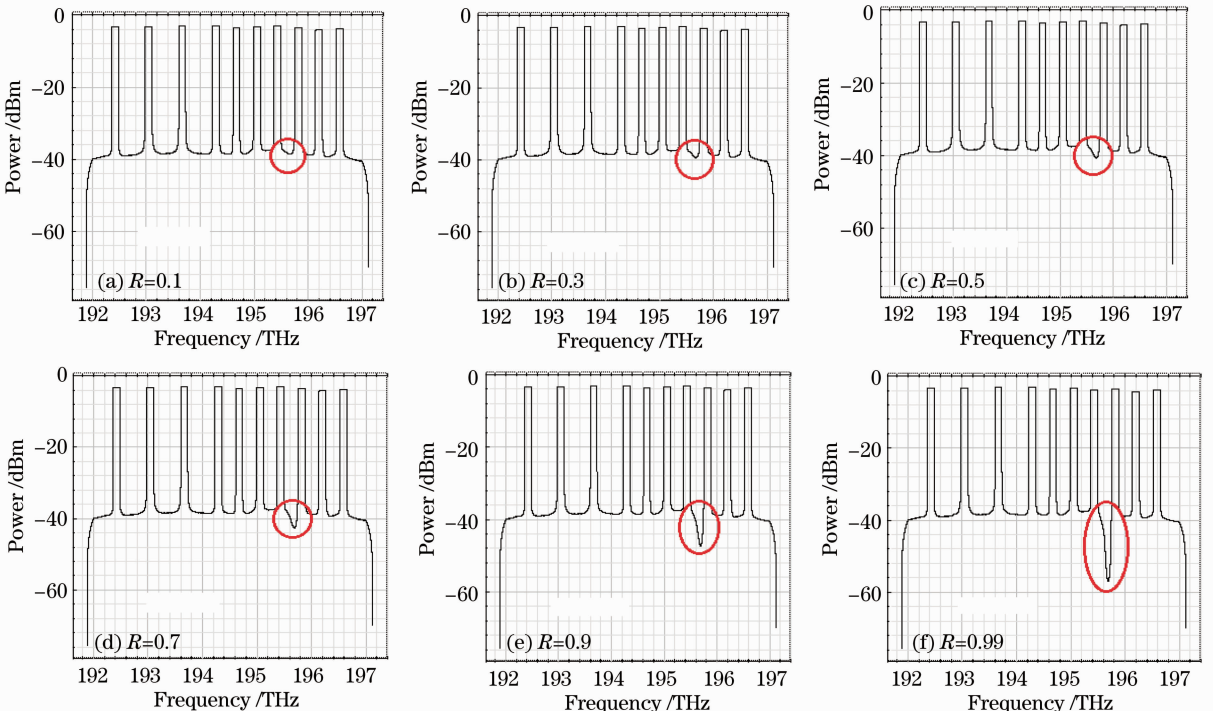


图 5 变反射率条件 EDFA 增益谱

Fig. 5 Gain spectra of EDFA by varying reflectivity of FBGs

考虑到 FBG-P 将损耗一部分光增益,图 4 中滤波器的调制深度和截止幅度分别变为 4.5 dB 和 3.9 dB。图 5 展示了不同 R 值条件下的增益谱变化。容易发现,引入 FBG-P 使得 EDFA 增益谱在 1531 nm 出现了明显凹陷,且凹陷深度与 R 值呈正比例关系。当 $R=0.99$ 时,增益的衰减量接近 20 dB。反之,当 $R<0.5$ 时,增益谱的平坦度则得到部分改善。比较数值结果可知, $R=0.3$ 时的平坦度最佳, $f_{GF}=\pm 0.61$ dB。与单滤波器情况相比,增益平坦度改善达 52%。进而设定 $R=0.3$,仿真比较了 FBG-P 分别置于“EDF 和滤波器”的前端、两端及中间三种结构下 EDFA 增益谱变化。数值结果表明,基于弱反射率的 FBP-P 灵活性较好,其位置变化所引起的 EDFA 平坦度改变在 ± 0.03 dB 以内。

3 实验与结果

基于上述分析结果,搭建如图 6 所示的 EDFA 增益平坦测试系统。抽运源采用上海 Dare DFB-980 型半导体激光器,中心波长 979.8 nm, $P_{\text{pump}}=100$ mW。信号光由可调谐激光器(HP 8617B)提供,覆盖 1520~1560 nm 带宽区域,输出功率 -20 dBm (0.01 mW)。选用 EDF 型号为 DF1500F 980,其长度 $L_{\text{Er}}=9$ m。信号接收端包含光谱仪(OSA, Agilent 86142B,最小精度 0.06 nm)和功率计[New Port 16173A,噪声等效功率(NEP)为 1 nW]。增益平坦器则由 LPFG 和 FBG-P 组成,定制参数主要依据仿真结果,具体见表 2。

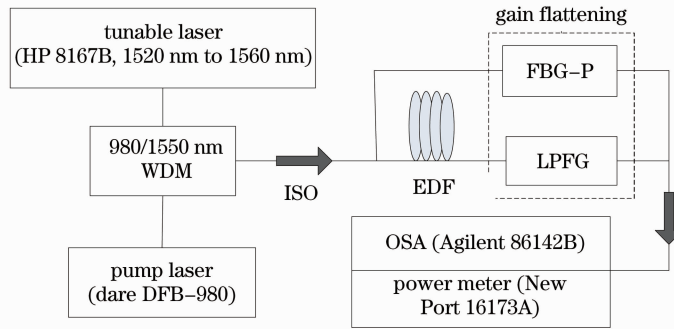


图 6 组合光纤光栅 EDFA 实验系统结构

Fig. 6 Experimental configuration of EDFA with composite fiber gratings

表 2 增益平坦器主要参数配置

Table 2 Main parameters setting of gain flattening

Parameter	LPFG	FBG1	FBG2
Wavelength /nm	1530.419	1531.137	1531.281
Bandwidth /nm	10	1.0	1.0
Depth /dB	4.5	—	—
Reflectivity	—	0.307	0.303

在诸多实验测试及应用中,EDF 多采用级联方式连接。实验亦采用两段 EDF 级联结构,如图 7 所示。为提高 EDFA 增益效率,需对级联 EDF 的长度进行优化。针对不同的长度配比,可调谐激光器以扫描方式获得如图 8(a)所示的增益关系曲线。由数值结果可知,级联结构可有效提高 EDFA 的增益效率,且当两段 EDF 的长度配比为 1:2 时效果最佳。此外,级联结构下,信号光的增益及平坦度性能均会得到一定程度地改善,但亦与信号光的注入功率大小有关。由图 8(b)可知,-20 dBm 时所对应的增益谱平坦度较好。基于此,上述参数在以下的实验测试中被采用。

所设计的增益平坦器由 LPFG 和 FBG-P 构成,其与级联 EDF 间的组合方式可有多种形式。实验测量发现,当将 FBG-P 放置于 LPFG 末端时,无增益平坦效果。因此,重点研究“对称配置”[图 7(b)]与“串联配置”[图 7(c)]两种方案的增益平坦性能。根据表 3 的测试结果可知,两种组合光纤光栅结构对于 EDFA 增益谱平坦度的改善效果明显,对应的 f_{GF} 值分别为 ± 0.51 dB 和 ± 0.45 dB。尽管与无平坦器情况相比,其平均增益降低 7 dB~8 dB,但平坦度的改善则高达 84.71%。在增益方面,针对“对称”和“串联”两种方案,其在 1540~1560 nm 区域的增益变化几乎相同,但在 1531 nm 峰值区域,“对称”结构的部分增益低于 20 dB。综上,串联组合光纤光栅方案的增益平坦性能最佳,比单 LPFG 方案的光谱起伏低约 0.43 dB,平坦度改善达 49.31%。

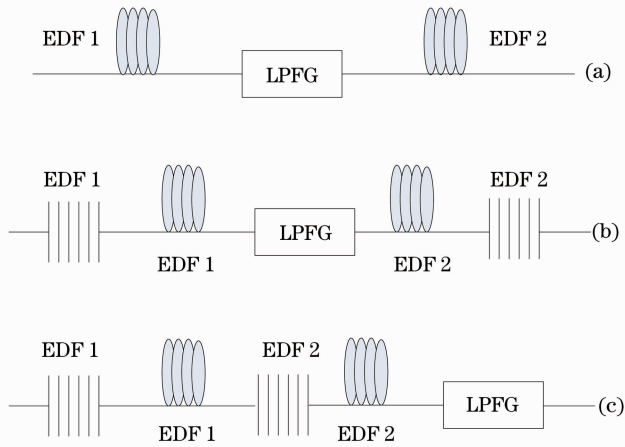


图 7 基于级联 EDF 的增益平坦器方案。(a)仅 LPFG; (b)对称配置; (c)串联配置

Fig. 7 Schemes for gain flattening with cascaded EDF. (a) LPFG only; (b) symmetric arrangement; (c) series arrangement

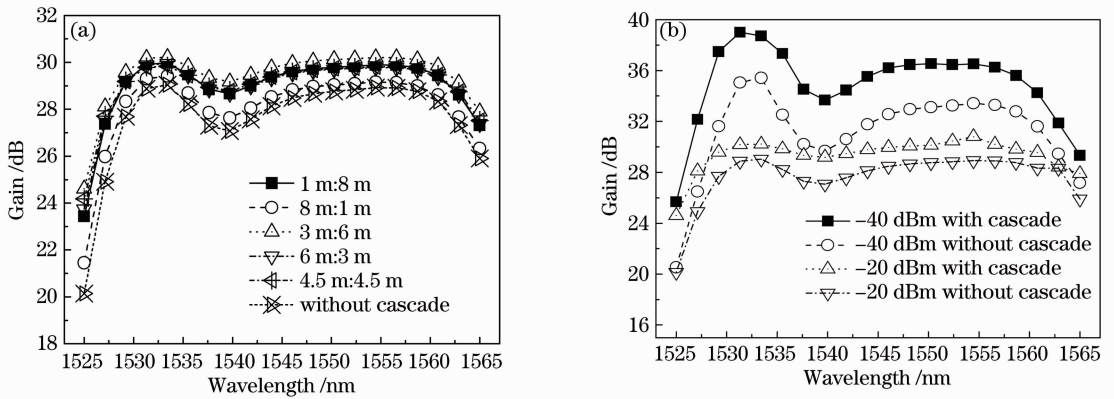


图 8 在(a)不同长度和(b)不同信号光功率情况下级联 EDF 参数优化

Fig. 8 Parameters optimization of cascaded EDF under different (a) lengths and (b) input powers of signals

表 3 增益平坦性能测试

Table 3 Performances of gain flattening

Wavelength /nm	Gain with cascaded EDF /dB			
	Unflattened	LPFG only	Symmetric arrangement	Series arrangement
1525	24.5	20.4	20.2	20.1
1528	30.4	22.6	20.6	20.4
1531	30.9	22.8	19.8	20.7
1534	29.1	21.5	19.8	20.6
1537	28.1	21.2	20.5	20.7
1540	29.3	20.8	20.4	20.5
1543	29.4	21.4	20.8	20.9
1548	29.2	21.8	21.1	21.1
1553	28.7	21.2	20.8	20.7
1558	27.8	20.9	20.7	20.6

6 结 论

基于弱反射率的 FBG-P 可实现 EDFA 增益谱的非均匀控制,可有效弥补单 LPFG 在带阻特性方面的不足。结合 FBG-P 与 LPFG,提出基于组合光纤光栅结构的增益平坦器,通过仿真分析与实验测试证实了所提方案对于 EDFA 增益谱平坦度改善的有效性,EDFA 增益谱不平坦度小于 ± 0.45 dB。开展变波长、宽

带宽 FBG-P 结构增益平坦及控制研究将是未来工作的重点。

参 考 文 献

- 1 Zhang Kewei, Zhao Wei, Xie Xiaoping, *et al.*. Experimental research of high gain and low noise figure optical amplifier based on erbium-doped fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506003.
张珂卫, 赵卫, 谢小平, 等. 基于掺铒光纤的高增益低噪声光放大器实验研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0506003.
- 2 Zhou Kejiang, Pan Shuming, Nam Quoc Ngo, *et al.*. Gain equalization of EDFA using a loop filter with a single polarization controller [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(7): 070604.
- 3 Wang Yan, Li Hongzuo, Hao Ziqiang. Research of anti-radiation technology for the EDFA systems in space environment [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 070601.
王岩, 李洪祚, 郝子强. 空间通信中的 EDFA 的抗辐射技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 070601.
- 4 Zhang Zhiguo, Cao Zhihui, Chen Xue, *et al.*. Remotely pumped EDFA-based 40-Gb/s downstream and 10-Gb/s upstream long-reach WDM PON employing RSOA and FBG equalizer [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(12): 120602.
- 5 Du Yang, Hu Guijun, Xiao Jian. Gain-flattening of an Er³⁺/Yb³⁺ co-doped double-cladding fiber amplifier using a fiber loop mirror [J]. *Journal of Optoelectronics•Laser*, 2013, 24(5): 878-886.
杜洋, 胡贵军, 肖健. 基于光纤环形镜的 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤放大器的增益平坦化[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(5): 878-886.
- 6 Meng Hongyun, Zhao Chunliu, Yang Shiquan, *et al.*. Gain-flattening of an erbium-doped fiber amplifier using fiber loop mirror [J]. *Chinese J Lasers*, 2002, A29(9): 805-807.
蒙红云, 赵春柳, 杨石泉, 等. 基于光纤环形镜的掺铒光纤放大器增益平坦化[J]. *中国激光*, 2002, A29(9): 805-807.
- 7 Zhang Li, Ruan Shuangchen, Liu Chengxiang. Application of gain flattening filters in erbium-doped fiber source [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2008, 16(5): 613-617.
张力, 阮双琛, 刘承香. 增益平坦滤波器在掺铒光纤光源中的应用[J]. *中国惯性技术学报*, 2008, 16(5): 613-617.
- 8 Wang Chaohui, Zheng Kerong. Application of phase-shifted long period grating in EDFA gain flattening [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(2): 7-13.
王朝晖, 郑克荣. 相移长周期光栅在 EDFA 增益平坦中的应用[J]. *光电工程*, 2012, 39(2): 7-13.
- 9 A A Abramov, B J Gleton, J A Rogers, *et al.*. Electrically tunable efficient broad band fiber filter [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, 11(4): 445-447.
- 10 Xie Zenghua, Chen Genxiang, Li Tangjun, *et al.*. EDFA gain flattening equalizer based on long period fiber gratings [J]. *Chinese J Lasers*, 2001, A28(6): 553-555.
谢增华, 陈根祥, 李唐军, 等. 运用长周期光纤光栅实现 EDFA 的增益平坦化[J]. *中国激光*, 2001, A28(6): 553-555.
- 11 Jiang Li, Zhang Dongsheng, Yuan Shuzhong, *et al.*. Control of LPG's spectral structure and its application in EDFA gain-flattening equalizer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7): 810-813.
姜莉, 张东生, 袁树忠, 等. 长周期光纤光栅光谱控制及其在 EDFA 增益平坦中的应用[J]. *光子学报*, 2004, 33(7): 810-813.
- 12 Ran Yang, Liu Weiping, Huang Hongbin, *et al.*. EDFA gain-flattening based on cascade of step-changed LPGs [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008, 4: 43-45.
冉洋, 刘伟平, 黄红斌, 等. 基于阶跃长周期光栅级联的 EDFA 增益平坦[J]. *仪器技术与传感器*, 2008, 4: 43-45.
- 13 Zeng Lizhu. Research on Gain Flattening of EDFA Based on VOA+ GFF [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. 34-54.
曾丽珠. 基于 VOA+GFF 的 EDFA 增益平坦研究[D]. 天津: 天津大学, 2007. 34-54.
- 14 Guan Qing. Theory and Application Analysis of Fiber Grating and Tandem Gratings [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. 44-56.
官庆. 光纤光栅及级联光栅增益平坦滤波器的理论与应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006. 44-56.
- 15 G Buyin, Y OuYang, Y Ma, *et al.*. Tradeoff on gain-flatness and gain-stabilization of erbium doped fiber amplifier with FBGs [C]. *SPIE*, 2014, 9233: 92331I.
- 16 Wei Jingbo, Hu Guijun, Du Yang, *et al.*. High power all-optical gain-clamped fiber amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706012.
魏敬波, 胡贵军, 杜洋, 等. 全光增益控制高功率光纤放大器[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706012.

栏目编辑: 王晓球