

全光增益控制的增益平坦型高功率光纤放大器

杜洋 胡贵军 柏松 杨亚婷 魏敬波

(吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要 采用两级放大结构,利用光纤环形镜(FLM)并结合两根光纤光栅(FBG)进行增益平坦和增益控制,搭建了全光增益控制的增益平坦型高功率光纤放大器,实验测试了放大器的输出性能。放大器最大输出功率为1.399 W。在1535~1547 nm范围内,增益不平坦度为 ± 0.75 dB。研究了信道在小功率和大功率信号输入条件下,放大器的增益控制特性,当信道2的功率在 -33.7 dBm~ -2.5 dBm和 -14.8 dBm~ 16.4 dBm范围内变化时,剩余信道1的增益漂移范围可以分别达到0.04 dB和0.06 dB。

关键词 激光器; 两级放大; 增益控制; 增益平坦; 波分复用; 光纤环形镜

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1205003

High Power All-Optical Gain-Clamped and Gain-Flattened Fiber Amplifier

Du Yang Hu Guijun Bai Song Yang Yating Wei Jingbo

(College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract With the configuration of two-stage amplifying, the high power fiber amplifier with gain clamping and gain flattening is constructed. It makes gain flattened and gain clamped using fiber loop mirror (FLM) combined with two fiber Bragg gratings (FBGs). The output performance of the amplifier is tested, which shows that the maximum output power is 1.399 W and the gain fluctuation is reduced to ± 0.75 dB in the range from 1535 nm to 1547 nm. Under the conditions of inputting small power and high power signals, the gain control characteristics of amplifier are researched, respectively. As the input power of channel 2 changing from -33.7 dBm to -2.5 dBm or -14.8 dBm to 16.4 dBm, the excursion ranges of channel 1 can be 0.04 dB and 0.06 dB, respectively.

Key words lasers; two-stage amplifying; gain clamping; gain flattening; wavelength division multiplexing; fiber loop mirror

OCIS codes 140.4480; 140.5560; 060.2320

1 引言

随着长距离、高速率和大容量的密集波分复用系统(DWDM)的商用化以及光纤到户(FTTH)和有线电视(CATV)系统的大规模普及,通信系统对于光纤放大器提出了新的要求^[1-4]。首先,随着波长数目的增多,单根光纤总功率增大,要求光纤放大器要有高的饱和输出功率^[5-6];其次,由于通常的光纤放大器工作在饱和状态,其总的输出功率几乎不随输入信道数目的变化而改变,因此,当信道数增加或减少时,其

余信道的增益将下降或增大,即其余各信道的增益不恒定^[7-9];再次,为实现多波长的超长距离传输,需要放大器对不同波长信道产生的增益是平坦的^[10-11]。因此,兼具增益控制和增益平坦功能的高功率光纤放大器是DWDM技术发展和普及所必需的。

目前主要存在三种增益控制的方法^[12-15]:电路自动增益控制(EAGC)、链路自动增益控制(LAGC)和光自动增益控制(OAGC)。其中,光自动增益控制技术由于其控制结构简便、系统稳定性

收稿日期: 2014-06-02; 收到修改稿日期: 2014-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(61177066)、吉林省科技发展计划(20120761)、长春市科技局国际合作项目(2011105)

作者简介: 杜洋(1989—),女,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器与放大器等方面的研究。

E-mail: dy19890322@163.com

导师简介: 胡贵军(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信技术和器件等方面的研究。

E-mail: hugj@jlu.edu.cn(通信联系人)

好和增益控制范围大等优点而得到广泛应用^[16-17]。由于光谱烧孔和弛豫振荡现象的存在,单波长控制激光无法真正实现增益控制^[18-20],为了减小光谱烧孔和弛豫振荡,1999年,Liu等^[21]提出了用两个波长的控制激光实现增益控制的方案;赵春柳等^[22]在2002年设计了一种结构简洁的双波长增益控制方案,输入信号在 $-35\text{ dBm} \sim -8\text{ dBm}$ 范围内,平均增益达 21 dB ,增益波动范围约为 0.3 dB ;2006年,李国玉等^[23]采用高双折射光纤布拉格光栅(FBG)实现双激光的增益控制,当输入信号在 $-40\text{ dBm} \sim -15\text{ dBm}$ 范围内变化,平均增益约为 22.22 dB ,增益漂移钳制范围为 0.69 dB 。增益平坦的方法主要有:光电探测-电路增益监控调节法和插入损耗谱与增益谱相反的光纤光栅法^[24]。然而,如何对高功率光纤放大器同时进行增益平坦和增益控制,这方面的工作还未见报道。

本文采用两级级联放大,实现光纤放大器的高功率输出;利用光纤环形镜(FLM)并结合两根光纤光栅实现增益平坦和增益控制功能,搭建了全光增益控制的增益平坦型高功率光纤放大器,实验研究了放大器的增益平坦特性和增益控制特性。

2 结构装置

图1为全光增益控制的增益平坦型高功率光纤放大器的结构示意图。由激光器(LD)提供的信号光首先在掺铒光纤(EDF)中进行预放大,然后经过波分复用器(WDM)输入到放大模块(AM)中,进行二次放大,以实现高功率输出。二次放大后的信号光通过三端口环形器(OC)1进入FLM中,由FLM透射臂输出的透射光经过两个不同反射波长的光纤光栅(FBG-1、FBG-2)进行选波,产生两束不同波长的控制光,分别经OC2和OC3后,沿逆时针传播,进入环形腔,并通过耦合器与信号光一起输入到放大系统中,进行增益控制。FLM的反射光,由OC1的3端口输出,优化设计FLM的结构参数,使其反射谱与放大系统的增益谱互补,实现增益平坦。

放大模块包括 2.7 m 的铒镱共掺双包层光纤、 $1550/980$ 波分耦合器(WDC)和隔离器,其 1% 输出端用于测量信号光输出光谱。LD1为 980 nm 单模抽运源,最大输出单模激光功率为 600 mW ;LD2为 975 nm 多模抽运源,最大输出功率为 6.5 W ,其功率-电流($P-I$)特性曲线如图2所示。

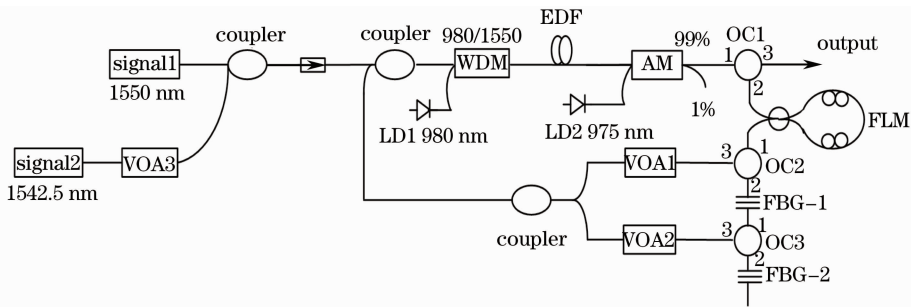


图1 高功率光纤放大系统的实验结构图

Fig. 1 Experimental diagram of high power fiber amplifier system

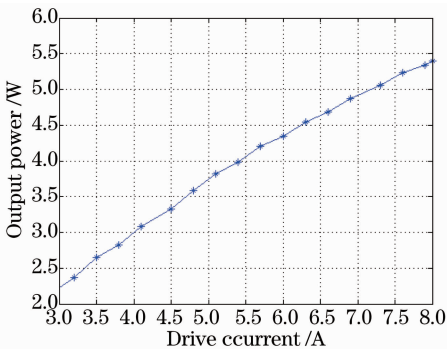


图2 多模抽运源 $P-I$ 特性曲线示意图

Fig. 2 $P-I$ characteristic curve diagram of multi-mode pump source

通过调节衰减器(VOA1和VOA2),可以得到不同的环形腔损耗值。当环形腔损耗与反射光增益相等时,形成激光振荡,进而与信号光共同消耗增益介质中的上能级粒子数。当输入信号光功率减小时,控制激光消耗更多的上能级粒子数,从而导致谐振腔中的控制激光功率增加;相反,当输入信号光功率增大时,控制激光消耗的上能级粒子数减少,从而导致谐振腔中控制激光功率减小。信号光和控制激光形成此消彼长的现象,实现控制激光对信号光的增益钳制效果。

光纤环形镜中,保偏光纤的长度决定反射谱中反射峰的位置,偏振控制器的状态决定光纤环形镜

的反射峰的深度变化,通过调节 FLM 中偏振控制器的状态,使 FLM 反射谱与放大自发辐射谱(ASE)互补,实现增益平坦功能。

3 结果和分析

3.1 高功率光纤放大器增益平坦特性研究

由于光纤放大器的增益谱近似可由其 ASE 谱线来描述,因此通过测量 ASE 谱线的平坦度来近似实现对光纤放大器增益平坦度的测量。实验中,所用增益光纤的 ASE 谱如图 3 所示,1535~1547 nm 范围内增益谱的不平坦度为 ± 7.5 dB。

实验中,采用 FLM 实现增益平坦。FLM 的

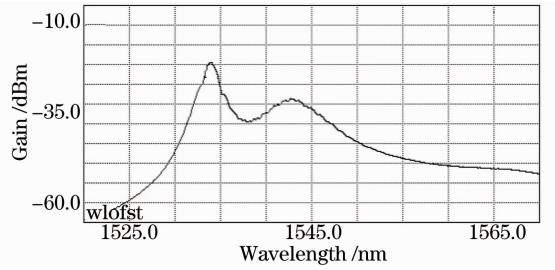


图 3 增益平坦前 ASE 谱

Fig. 3 ASE spectrum before flattening

结构如图 4 所示,该 FLM 由两段保偏光纤(F1 和 F2)、两个三环形偏振控制器(PC1 和 PC2)与一个分光比 50:50 的 2×2 分束器组成。该 FLM 的反射特性^[25]可以表示为

$$|k|^2 = \left| \cos \frac{(\beta_1 + \beta_2)\lambda}{2} \sin(\theta_1 + \theta_3) \cos \theta_2 + \cos \frac{(\beta_1 - \beta_2)\lambda}{2} \cos(\theta_1 + \theta_3) \sin \theta_2 \right|^2, \quad (1)$$

式中 $\beta_i = \frac{2\pi L_i \Delta n_i}{\lambda_0}$, $i = 1, 2$, L_i 为第 i 段保偏光纤的长度, Δn_i 为光在第 i 段保偏光纤中传播的等效折射率差, λ_0 为入射信号光波长; θ_i 为信号光在第 i 段单模光纤和偏振控制器中传输时偏振态旋转的角度 (θ_1 为信号光输入第一段保偏光纤之前的参考角度, $i = 2, 3$), λ 为光波长。

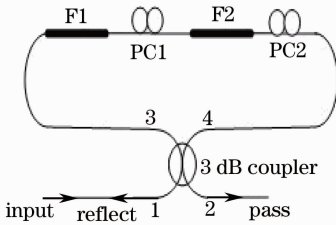


图 4 含两段保偏光纤的光纤环形镜的结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fiber loop mirror with two sections of polarization maintaining fiber

从(1)式可以看出,光纤环形镜的反射谱主要取决于保偏光纤的长度和偏振控制器的状态。实验中,选取 F1 的长度为 0.5 m, F2 的长度为 1.2 m,拍

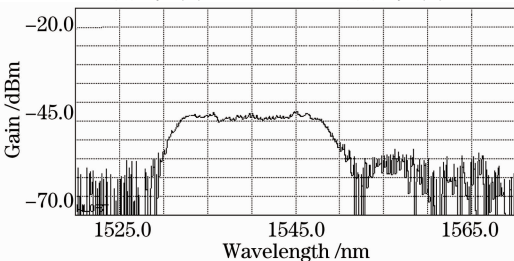


图 5 平坦后增益谱

Fig. 5 Gain spectrum after flattening

长均为 3.9 mm。通过调整偏振控制器的状态,使 FLM 的反射谱与增益光纤 ASE 谱互补,从而实现增益平坦。平坦后的增益谱如图 5 所示。可以看出,在相同波长范围内,增益不平坦度由之前的 ± 7.5 dB减小到 ± 0.75 dB,使增益谱平坦化。

3.2 高功率光纤放大器增益控制特性研究

3.2.1 输入信号为小功率时放大器的增益控制特性

WDM 系统中,存在不同数目的信道同时上下下载的情况,因此研究放大系统中复用信道数目的变化对剩余信道输出功率的影响具有重要的意义。信道数目的改变实质上是改变了放大器的输入功率,所以可以通过改变输入功率大小来研究信道上下下载时放大器的增益控制特性。如图 1 所示,将信道 2 (波长为 1542.5 nm)和信道 1(波长为 1550 nm)一同输入到光纤放大系统中,通过调节衰减器 VOA3 改变信道 2 的功率大小,测量信道 1 增益的变化情况。

信道 1 的输入功率设置为 -14.6 dBm,信道 2 初始输入功率设置为 -2.5 dBm,单模抽运源 LD1 的抽运功率为 400 mW,多模抽运源的抽运电流 $I_{p2} = 6.5$ A。改变 VOA3 的衰减量,测量放大系统的输出光谱,如图 6 所示。可以看出,当 VOA3 的衰减量 d_{VOA3} 从 0 dB 变化为 24.06 dB 时,信道 1 的输出功率从 -36.86 dBm 增加到 -36.84 dBm,变化很小,而控制激光 1536 nm 和 1560 nm 有不同程度的增加。

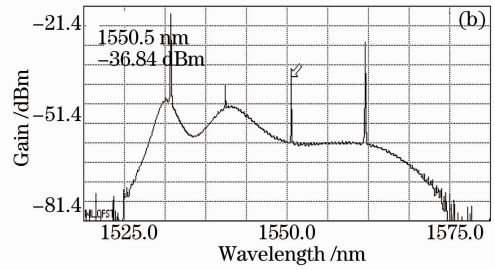
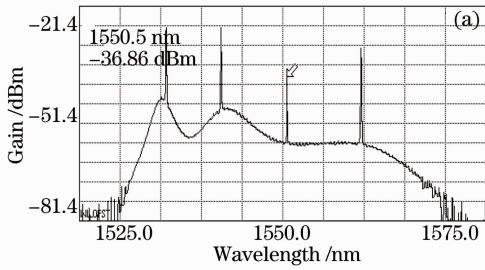


图 6 放大系统输出光谱图。(a) $d_{VOA3}=0$ dB; (b) $d_{VOA3}=24.06$ dB

Fig. 6 Output spectra of amplification system. (a) $d_{VOA3}=0$ dB; (b) $d_{VOA3}=24.06$ dB

连续改变信道 2 的输入功率,测量剩余信道 1 输出增益的变化情况,结果如图 7 所示。可以看出,信道 2 输入功率在 -33.7 dBm ~-2.5 dBm 范围内变化时,调节 VOA1 和 VOA2 的衰减量 d_{VOA1} 和 d_{VOA2} 分别为 29.0 dB 和 23.1 dB 时,增益控制特性最好,剩余信道 1 的增益漂移范围由增益控制前的 0.54 dB 下降为 0.04 dB。与此同时,与增益控制前相比,剩余信道 1 的平均增益由 32.88 dB 下降为 31.86 dB。

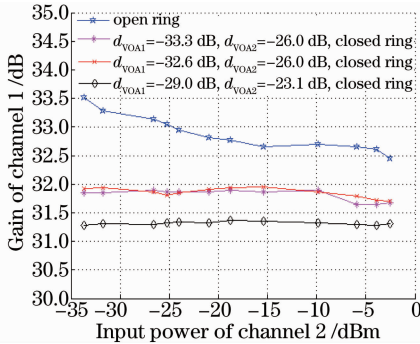


图 7 放大系统信道 1 输出增益的变化示意图

Fig. 7 Sketch map of change on the gain of channel 1

由图 7 可知,光纤放大器增益控制前的增益漂移范围偏小。这主要是由于整个放大系统的抽运功率尤其是多模抽运源的抽运功率大,导致上能级粒子数相对较为充足,当相邻信道功率发生改变或者复用信道数目改变时,对剩余信道输出功率的影响有限。但是,实际的 WDM 系统中,由于光纤放大器一般处于饱和和输出状态,当复用信道不断上下下载时,剩余信道输出增益漂移范围较大。因此,针对文中设置的抽运功率,有必要增加信道 1 和信道 2 的输入功率,研究大功率输入时放大器的增益控制特性。

3.2.2 输入信号为大功率时放大器的增益控制特性

为研究输入信号为大功率时放大器的增益控制情况,将信源 1 输入功率设置为 4.6 dBm;信源 2 初始输入功率为 16.4 dBm。单模抽运源 LD1 的抽运功率为 400 mW,多模抽运源的抽运电流 $I_{p2} =$

6.5 A。改变信道 2 的输入功率,测量剩余信道 1 的增益变化情况,如图 8 所示。

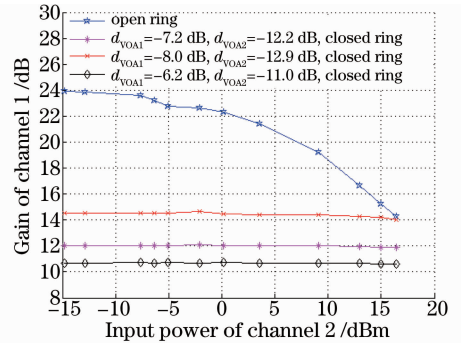


图 8 放大系统信道 1 输出增益的变化示意图

Fig. 8 Sketch map of change on the gain of channel 1

由图 8 可知:增益控制前,当信道 2 输入功率在 -14.8 dBm ~ 16.4 dBm 范围内变化时,剩余信道 1 的平均输出增益和增益漂移范围分别为 20.75 dB 和 4.84 dB,其平均增益和增益漂移范围均远远劣于图 7 中的 32.88 dB 和 0.54 dB,这说明当输入信号功率尤其是信道 2 的输入功率增大到一定程度后,放大系统的增益控制的复杂性将会大大增加;增益控制后,系统增益漂移范围达到 0.06 dB,这表明双波长控制机制在这种大功率输入的条件下,仍然能有效地发挥增益钳制的作用。但是由于信道 2 的输入功率远远大于信道 1,导致大部分上能级粒子数被信道 2 中的信号光所消耗,信道 1 的输出增益远远低于图 7。

3.3 大功率光纤放大器的输出特性研究

图 9 为增益控制型大功率光纤放大器的输出功率与输入功率之间的关系曲线,其中单模抽运源 LD1 的抽运功率为 400 mW,多模抽运源的抽运电流 $I_{p2} = 6.5$ A,信道 2 输入功率为 0 mW。当信道 1 输入光功率由 -25.5 dBm ~ 4 dBm 范围内变化时,增益控制前放大系统的最大输出功率为 33.2 dBm (2.089 W),实现超过 2 W 的大功率输出;引入双波长控制激光后,控制激光与信号光共同消耗增益光

纤中的上能级粒子数,导致输出功率有不同程度地降低。当 $d_{\text{VOA}1}=24.2$ dB、 $d_{\text{VOA}2}=15.9$ dB时,放大系统的最大输出光功率为31.46 dBm(1.399 W);当 $d_{\text{VOA}1}=22.7$ dB、 $d_{\text{VOA}2}=13.9$ dB时,放大系统的最大输出光功率为30.68 dBm(1.169 W)。可以发现,当 $d_{\text{VOA}1}$ 和 $d_{\text{VOA}2}$ 不同时,放大系统输出功率则不同;同时输出功率随输入功率的增大而逐渐增加,其曲线近似线性。

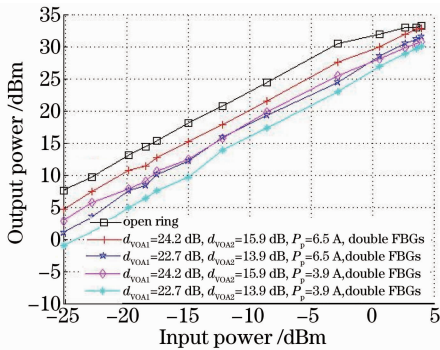


图9 高功率光纤放大系统输出功率特性

Fig.9 Output power of high power fiber amplifier system

4 结 论

采用级联放大、光纤环形镜、双激光控制的结构方案,利用光纤环形镜并结合两根光纤光栅实现增益平坦和增益控制功能。当输入信号光功率在 -25 dBm~ 4 dBm范围内变化时,光纤放大器的最大输出功率为1.399 W。在 $1535\sim 1547$ nm范围内放大器的增益不平坦度为 ± 0.75 dB。在不同输入功率条件下,当信道2输入功率在 -33.7 dBm~ -2.5 dBm和 -14.8 dBm~ 16.4 dBm范围变化时,剩余信道1的增益漂移范围分别达到 0.04 dB和 0.06 dB。结果表明,放大器具有高输出功率和增益控制及增益平坦功能。

参 考 文 献

- 1 Y Sun, J W Sulhoff, A K Srivastava, *et al.*. A gain-flattened ultra wide band EDFA for high capacity WDM optical communications systems[C]. IEEE 24th European Conference on Optical Communication, 1998, 1: 53-54.
- 2 Ricky Anthony, Sambhunath Biswas. Gain flattening and noise figure analysis of a dual stage bowtie WDM EDFA configuration in C-band[J]. Int J Sci & Eng Res, 2012, 3(4): 1-7.
- 3 Liu Lisong, Ren Wenhua, Chen Weiguo, *et al.*. Research on fabrication and characteristic of twin-core erbium-doped fiber[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0805001.
刘利松,任文华,陈卫国,等.双芯掺铒光纤的研制及其增益均衡特性的研究[J].中国激光,2011,38(8):0805001.
- 4 Zhao Zisen. Past, present and future of optical fiber communications[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900109.
赵梓森.光纤通信的过去、现在和未来[J].光学学报,2011,31

(9): 0900109.

- 5 Shen Qihao, Wu Bo, Zhou Dingfu, *et al.*. Amplified spontaneous emission of Yb^{3+} -doped fiber laser based on MOPA[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 071402.
沈琪皓,伍波,周鼎富,等.掺 Yb^{3+} 光纤激光器MOPA工作方式中的放大自发辐射[J].激光与光电子学进展,2013,50(7):071402.
- 6 Wu Wuming, Yang Weiqiang, Xiao Hu, *et al.*. High efficiency inband core-pumped erbium/ytterbium-codoped fiber amplifier[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 060605.
吴武明,杨未强,肖虎,等.高效率纤芯同带抽运铒镱共掺光纤放大器[J].激光与光电子学进展,2012,49(6):060605.
- 7 A K Srivastava, Y Sun, J L Zyskind, *et al.*. EDFA transient response to channel loss in WDM transmission system[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(3): 386-388.
- 8 G Luo, J L Zyskind, J A Nagel, *et al.*. Experimental and theoretical analysis of relaxation-oscillations and spectral hole burning effects in all-optical gain-clamped EDFA's for WDM networks[J]. J Lightwave Technol, 1998, 16(4): 527-533.
- 9 Li Ping, Liang Yue, Xu Bing, *et al.*. Study on gain stability of main amplifier in high power laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0102007.
李平,梁越,徐冰,等.高功率激光装置主放大器的增益稳定性研究[J].中国激光,2012,39(1):0102007.
- 10 N Md Yusoff, M H Abu Bakar, S J Sheih, *et al.*. Gain-flattened erbium-doped fiber amplifier with flexible selective band for optical networks[J]. Laser Phys, 2010, 20(8): 1747-1751.
- 11 Zhou Weijun, Xu Ming, Wang Rongbo. The design on gain flatness of distributed broadband fiber Raman amplifier[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 030602.
周维军,绪明,王荣波.分布式宽带光纤拉曼放大器增益平坦化设计[J].激光与光电子学进展,2012,49(3):030602.
- 12 A D Ellis, R M Percival, A Lord, *et al.*. Automatic gain control in cascaded erbium doped fibre amplifier systems[J]. Electron Lett, 1991, 27(3): 193-195.
- 13 K W Na, J T Choi, W J Lee, *et al.*. A cost-effective gain control using pump modulation for erbium-doped fiber amplifiers[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2000, 12(4): 383-385.
- 14 A Bononi, L A Rusch, M Menif. Gain stabilization in gain clamped EDFA cascades fed by WDM burst-mode packet traffic[J]. J Lightwave Technol, 2000, 18(3): 308-313.
- 15 E Delevaque, T Georges, J F Bayon, *et al.*. Gain control in erbium-doped fibre amplifiers by lasing at 1480 nm with photoinduced Bragg gratings written on fibre ends[J]. Electron Lett, 1993, 29(12): 1112-1114.
- 16 J F Massicott, S D Willson, R Wyatt, *et al.*. 1480 nm pumped erbium doped fibre amplifier with all optical automatic gain control[J]. Electron Lett, 1994, 30(12): 962-964.
- 17 S YongKim, C JoonChae. All-optical gain-clamped EDFAs with different feedback wavelengths for use in multiwavelength optical networks[J]. Electron Lett, 1996, 32(23): 2159-2161.
- 18 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.
- 19 G Luo, J L Zyskind, Y Sun, *et al.*. Performance degradation of all-optical gain-clamped EDFAs due to relaxation oscillations and spectral-hole burning in amplified WDM networks[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(10): 1346-1348.
- 20 G Luo, J L Zyskind, J A Nagel, *et al.*. Experimental and theoretical analysis of relaxation-oscillations and spectral hole burning effects in all-optical gain-clamped EDFA's for WDM networks[J]. J Lightwave Technol, 1998, 16(4): 527-533.
- 21 Y Q Liu, M F Krol. Transient gain control in EDFA's by dual-

- cavity optical automatic gain control[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1999, 11(11): 1381-1383.
- 22 Zhao Chunliu, Guan Baiou, Dong Xinyong, *et al.*. A novel gain control EDFA by dual-control lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(11): 1331-1335.
- 赵春柳, 关柏鸥, 董新永, 等. 新型双波长激光增益控制掺铒光纤放大器[J]. 光学学报, 2002, 22(11): 1331-1335.
- 23 Li Guoyu, Dou Qingying, Liu Yange, *et al.*. Optical automatic gain-clamped erbium-doped fiber amplifier based on a high-birefringence fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(9): 1308-1312.
- 李国玉, 窦清影, 刘艳格, 等. 基于高双折射光纤布拉格光栅的自动增益控制掺铒光纤放大器[J]. 光学学报, 2006, 26(9): 1308-1312.
- 24 Paul F Wysock, J B Judkin, R P Espindola, *et al.*. Broad-band erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(10): 1343-1345.
- 25 Zhou Guang, Zhao Qida, Liu Yange, *et al.*. Filtering characteristics of fiber loop mirror filter composed of multi-stage high birefringent fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(3): 341-345.
- 周 广, 赵启大, 刘艳格, 等. 多段双折射光纤构成环形镜滤波器的滤波特性[J]. 光学学报, 2004, 24(3): 341-345.

栏目编辑: 王晓球