

全光增益控制高功率光纤放大器

魏敬波 胡贵军 杜 洋 李公羽 李 莉

(吉林大学通信工程学院, 长春 吉林 130012)

摘要 采用一种简单的双光栅级联结构,通过不同波长的两束控制激光进行增益控制;同时采用两级放大结构,实现全光增益控制光纤放大器高增益和高功率输出。当可调光衰减器功率衰减量分别为 33.2 dB 和 3.8 dB,输入光功率在 -5.1 dBm~ 2.0 dBm 范围变化时,增益控制光纤放大器的最大输出功率为 1.55 W,平均增益和噪声系数分别约为 30.3 dB 和 6.4 dB,增益漂移小于 0.27 dB。同时,改变环形腔损耗得到不同的增益,在增益漂移允许范围内(小于 0.3 dB),增益钳制范围为 24.5 dB~31.3 dB。另外,在双信道情况下,当剩余信道功率为 0.74 mW 和 1.57 mW 时,其增益漂移范围分别小于 0.08 dB 和 0.16 dB。

关键词 光纤光学;光纤放大器;高功率;两级放大;增益控制

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706012

High Power All-Optical Gain-Clamped Fiber Amplifier

Wei Jingbo Hu Guijun Du Yang Li Gongyu Li Li

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

Abstract With the configuration of double-grating and two-stage amplifying, the optical fiber amplifier realizes high gain-clamped and high output power, controlled by two controlling lasers of different wavelengths. As input power ranging from -5.1 dBm to 2 dBm with the power attenuations of optical attenuators as 33.2 dB and 3.8 dB, the maximum output power comes to 1.55 W, while the average gain and noise figure of the gain-clamped fiber amplifier are approximately 30.3 dB and 6.4 dB, respectively. Furthermore, the gain's excursion is limited in 0.27 dB. The range of clamped gain can be 24.5 dB~31.3 dB, while the gain's excursion is less than 0.3 dB. As the powers of remaining channels are 0.74 mW and 1.57 mW respectively, the ranges of excursions are less than 0.08 dB and 0.16 dB with double channels existing in the gain-clamped amplifier.

Key words fiber optics; fiber amplifier; high power; two-stage amplifying; gain-clamped

OCIS codes 140.4480; 140.5560; 060.2320

1 引 言

掺铒光纤放大器(EDFA)和低损耗传输光纤的研制成功以及波分复用(WDM)技术尤其是密集波分复用技术(DWDM)的广泛应用极大地增加了光纤通信传输的信息容量并延长了光纤通信的传输距离。而随着单根光纤传输速率超过 1 Tb/s 这样的 DWDM 光纤传输系统的商用化,为了确保整个通信系统的光信噪比(OSNR)和单信道功率,单根光纤总功率必须随着波长数目的增加而不断增大,这对

光纤放大器提出更高功率、更高增益的要求^[1-6]。

在 DWDM 系统中,各通道的传输功率之和随时间变化,引起功率的瞬态波动和低频交叉调制。由于 EDFA 通常工作在饱和状态,而工作在饱和状态的 EDFA 的输出功率几乎不随输入信道数目的变化而改变。因此,信道数增加时各信道增益将下降,各信道输出光功率也随之降低;反之,各信道的输出光功率会增大,导致光纤的非线性增加^[7-12]。因此,在不断有信道上下下载的光网络中,剩余信道的

收稿日期: 2013-03-25; **收到修改稿日期**: 2013-05-14

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

作者简介: 魏敬波(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤器件方面的研究。E-mail: yanzhaojushi1987@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方面的研究。E-mail: hugj@jlu.edu.cn

(通信联系人)

功率波动必须得到有效的控制,这就要求光纤放大器具有增益控制功能。目前主要存在三种增益控制的方法:电路自动增益控制(EGC)、链路自动增益控制(LAGC)和光自动增益控制(LAGC)^[13-14]。其中,光自动增益控制结构简单、稳定性好以及增益钳制范围大而得到广泛关注。

在光自动增益控制中,利用反馈环路得到控制激光从而实现增益钳制是一种比较典型的技术。然而,由于掺杂光纤非均匀展宽引起的空间烧孔效应和控制激光引起的弛豫振荡现象的存在,导致单波长控制激光无法真正地实现光纤放大器的增益控制。1998年,Luo等^[15-16]系统地研究了在增益控制EDFA中由信道数目的改变造成剩余信道的增益瞬态波动效应。实验认为增益控制EDFA的瞬态效应主要是起因于两个因素:光谱烧空和弛豫振荡。为了减小光谱烧空和弛豫振荡,1999年,Liu等^[17]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^[18-19]在2002和2003年提出两种结构新颖的双波长增益控制的方案,输入信号在 $-35\text{ dBm}\sim-8\text{ dBm}$ 范围内,平均增益均达到21 dB,增益波动范围约为0.3 dB和0.25 dB;2006年,李国玉等^[20-21]提出利用高双折射光纤布拉格光栅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。

针对目前主要是对小功率EDFA进行增益控制这一情况,本文对大功率光纤放大器展开增益控

制研究。通过两级放大,实现了增益控制光纤放大器的大功率输出。该系统结构简单、易于操作、稳定性良好,是实现大功率全光增益控制光纤放大器的一种很好选择。

2 结构装置

图1是全光增益控制高功率光纤放大器实验装置图。光纤放大器主要由一段3.7 m的掺铒光纤(EDF)和放大模块(AM)组成,放大模块由5.7 m 铒镱共掺双包层光纤、1550/980 nm波分耦合器(WDC)和隔离器组成。其中,铒镱共掺双包层光纤纤芯直径约为 $(10\pm 1)\mu\text{m}$,数值孔径 $NA=0.20\pm 0.02$,内包层为正六边形的结构,直径为 $(125\pm 3)\mu\text{m}$,数值孔径 $NA>0.45$ 。抽运源1和抽运源2分别是980 nm的激光二极管(980 nm LD)和975 nm的半导体激光器(975 nm LD),最高输出功率分别为120 mW和7 W,通过WDC与增益介质相连接。产生控制激光的双谐振腔主要由双光栅(FBG1和FBG2)、双环形器(OC1和OC2)、可调光衰减器(VOA1和VOA2)、 2×1 耦合器和光纤放大器组成,其中光栅1、2的中心反射波长分别约为1536 nm和1560 nm,反射率均为99%。环形器1、2将双光栅的反射光导入环形腔,同时可作为两个隔离器,防止控制激光沿反方向传输,从而改善整个放大系统的噪声系数(NF)。图2为双光栅级联的反射光谱图。其中,1536 nm和1560 nm处峰值为 -14.46 dBm 和 -23.80 dBm ,波长间隔约为24 nm。

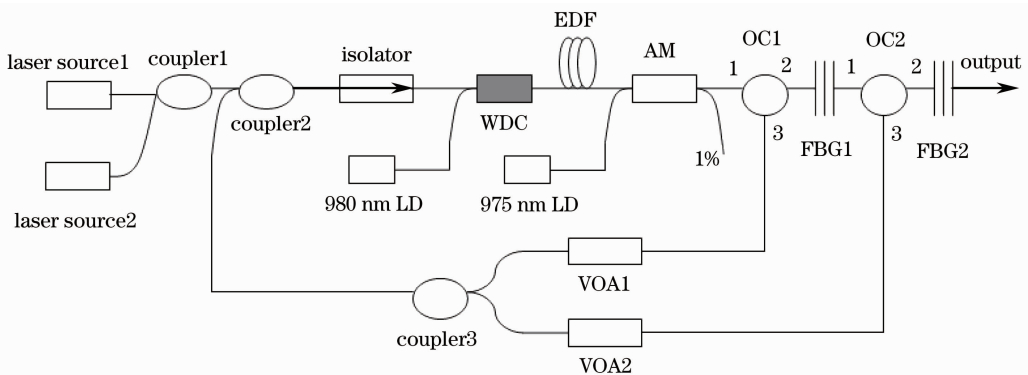


图1 高功率全光增益控制光纤放大器实验结构

Fig. 1 Configuration of high-power all-optical gain-clamped amplifier

双信道输入信号由两台AV38124型单模调制激光光源提供,其中信道1中心波长为1547.5 nm,信道2中心波长为1542.7 nm。输入信号首先输入到掺铒光纤中进行初次放大,放大后的信号经过

1550/980 nm WDC输入到放大模块中,实现信号光的二次放大,最终经环形器和光栅输出。产生于双光栅的两束不同波长的反射光经环形器1、2沿逆时针传播,然后经耦合器2与信号光一起输入到光纤

放大器中。通过调节 VOA1 和 VOA2, 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, 它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, 从而降低信号光的增益; 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, 更多的上能级粒子参与信号光的放大, 从而维持信号光输出增益的稳定。图 3 为控制激光与信号光的增益钳制图。其中, 图 3(a) 和 (b) 中 1547.5 nm 信号光初始输入功率分别为 1.57 mW (2.0 dBm) 和 0.74 mW (-1.3 dBm)。

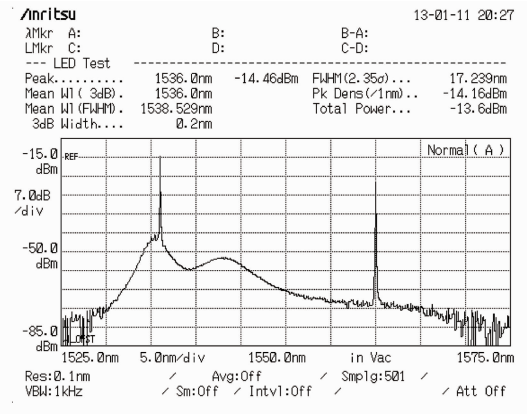


图 2 双光栅反射谱

Fig. 2 Reflection spectrum of double gratings

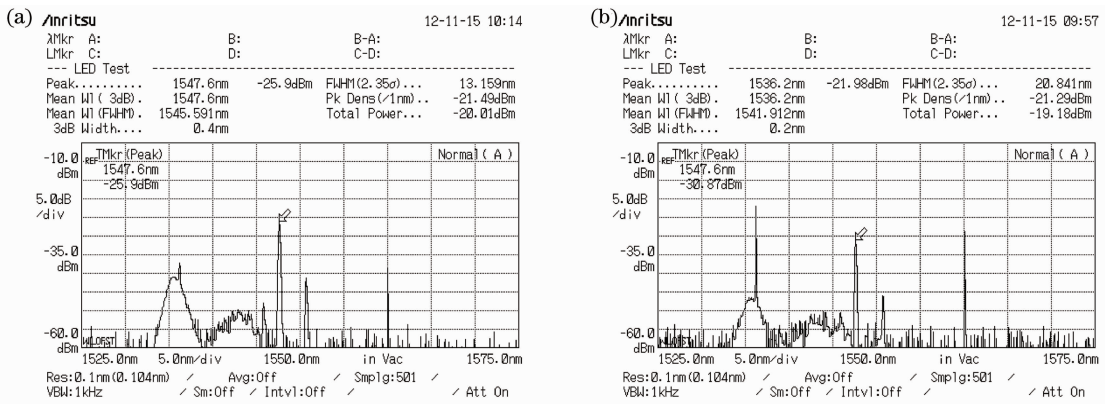


图 3 控制激光与信号光的增益钳制。(a) 1.57 mW; (b) 0.74 mW

Fig. 3 Gain-clamped of control laser and signal laser under different input powers. (a) 1.57 mW; (b) 0.74 mW

从图 3 可以看出, 当输入信号功率从 1.57 mW 减少到 0.74 mW 时, 1536 nm 和 1560 nm 控制激光分别增大 15.1 dB 和 9.8 dB。反之, 当信号光增强时, 控制激光相应减弱。另外, 不同的环形腔损耗可以得到不同的信号增益。但是当输入光功率增大到一定程度时, 严重消耗上能级粒子数, 导致控制激光无法消耗足够多的上能级粒子数, 使其增益小于环形腔的损耗, 无法实现激光振荡, 进而无法实现对信号光的增益控制。

3 结果和分析

3.1 光纤放大器输出功率特性

图 4 为输入信号光中心波长为 1547.5 nm, 抽运电流 I_p 为 5.0 A 时, 光纤放大器输出功率 P_{out} 随输入信号功率 P_m 变化的情况。当输入信号光功率由 -5.1 dBm 增大到 2.0 dBm, 开环条件下, 系统输出功率由 1.15 W (30.6 dBm) 增加到 2.25 W (33.5 dBm), 实现了瓦量级的大功率输出; 加入控制激光后, 由于控制激光消耗部分上能级粒子数, 放大系统输出功

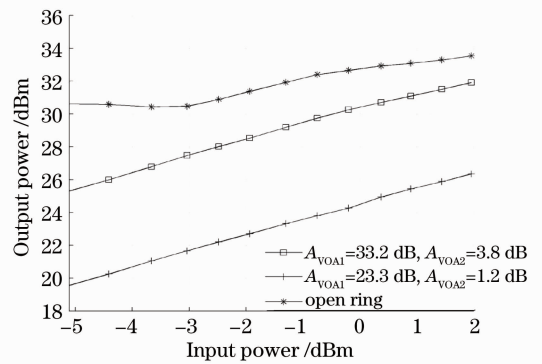


图 4 光纤放大器的输出功率特性

Fig. 4 Output power of fiber amplifier

率出现不同程度的下降。当 VOA1 和 VOA2 的功率衰减量 A_{VOA1} 和 A_{VOA2} 分别为 33.2 dB 和 3.8 dB 时, 系统输出功率下降到 338.8 mW (25.3 dBm) ~ 1.55 W (31.9 dBm); $A_{VOA1} = 23.3$ dB, $A_{VOA2} = 1.2$ dB 时, 输出功率下降到 90.4 mW (19.6 dBm) ~ 431.5 mW (26.4 dBm)。可以看出, 一方面, 环形腔损耗不同, 增益控制光纤放大器的输出功率则不同; 另一方面, 输出光功率随输入光功率的增加而不断增

大,最大功率可达 1.55 W,实现了增益控制光纤放大器高功率的输出。另外,其增加幅度接近于线性。

3.2 高功率光纤放大器增益控制的实验结果与分析

在光纤放大器输出高功率的基础上,主要通过输入单信道和双信道方式对其进行增益控制的相关研究。

3.2.1 单信道实验结果与分析

图 5 和图 6 给出了单信道情况下全光增益控制高功率光纤放大器的增益和噪声系数特性。其中,输入信号光波长为 1547.5 nm。如图 5 所示, A_{VOA1} 和 A_{VOA2} 分别为 23.3 dB、29.6 dB、33.2 dB、33.9 dB、 ∞ (开环)和 1.2 dB、3.3 dB、3.8 dB、4.3 dB、 ∞ (开环),当输入信号光功率在 $-5.1 \text{ dBm} \sim 2.0 \text{ dBm}$ 范围内变化时,放大系统的输出增益漂移范围依次为 0.16 dB、0.26 dB、0.27 dB、0.30 dB、2.08 dB。可以看出,放大系统的增益漂移范围由控制前的 2.08 dB 下降到控制后的 0.16 dB,有效地实现了放大系统增益钳制的目的。但是,随着 A_{VOA1} 和 A_{VOA2} 的增加,环形腔损耗逐渐增大,双波长控制激光强度不断减弱,使增益漂移的范围从 0.16 dB 增大到 0.3 dB。与此同时,由于控制激光消耗了部分上能级粒子数,降低了整个放大系统的输出增益,使其平均增益从控制前的 33.2 dB 下降到控制后的 24.5 dB~31.3 dB,并且随着 A_{VOA1} 和 A_{VOA2} 的不断减小,1536 nm 和 1560 nm 控制激光强度不断增加,整个系统的输出增益损耗也不断增大。

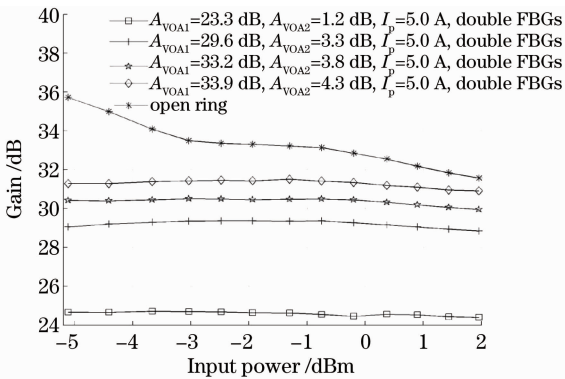


图 5 双波长增益控制光纤放大器的增益特性

Fig. 5 Gain of dual-laser gain-clamped fiber amplifier

噪声系数同样是衡量全光增益控制高功率光纤放大器的重要参数。主要采用线性内插法进行测量。如图 6 所示,当环形腔损耗较大时,增益控制光纤放大系统的噪声系数较小,其中 $A_{VOA1} = 29.6 \text{ dB}$, $A_{VOA2} = 3.3 \text{ dB}$ 时,噪声系数最小 (5.4 dB~6.1 dB)。随着输入信号功率的增加,噪声系数也略

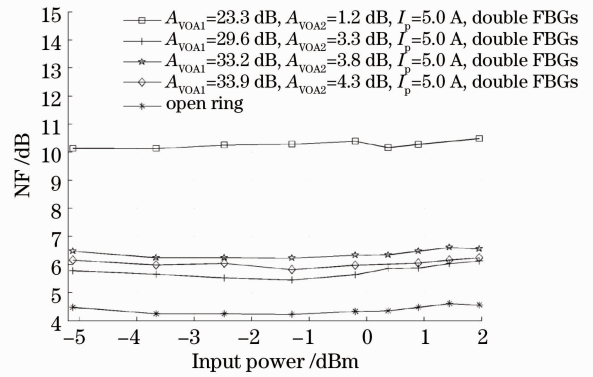


图 6 双波长增益控制光纤放大器的噪声特性

Fig. 6 Noise figure of dual-laser gain-clamped fiber amplifier

有增加。相对于控制前(即开环)放大系统的噪声系数(为 4.2 dB~4.6 dB),增益控制后的噪声系数都有不同程度的增加。一方面由于额外器件的加入,不可避免地引入新的噪声;另一方面,放大系统的噪声系数与增益存在一定的关系,增益增加,噪声系数下降。因此,在高功率输出的基础上,确定 VOA1 和 VOA2 值时,必须从输出增益、增益漂移范围和噪声系数三个方面进行综合考虑,认为 $A_{VOA1} = 33.2 \text{ dB}$ 和 $A_{VOA2} = 3.8 \text{ dB}$ 是最佳值,既保证了系统要求的高增益(30.3 dB),又有效地控制了增益漂移的范围(小于 0.27 dB)和噪声系数的大小(6.2 dB~6.6 dB)。

3.2.2 双信道实验结果与分析

为了研究 WDM 系统中复用信道数目的改变对于剩余信道输出增益的影响,采用双信道的方式进行模拟实验,如图 7 所示,将信道 2(1542.7 nm)和信道 1(1547.5 nm)一同输入到全光增益控制高功率光纤放大器中,通过改变信道 2 的输入功率来观察对信道 1 输出增益的影响。其中,信道 2 初始输入功率为 0.49 mW,衰减范围为 0 dB~6 dB;图 7(a)和(b)中信道 1 的输入功率分别为 0.74 mW 和 1.57 mW。如图 7(a)所示,当信道 2 输入功率在 0 dB~6 dB 范围内变化时,放大系统由控制前的 1.44 dB 下降为控制后的 0.08 dB~0.27 dB,其中 $A_{VOA1} = 33.2 \text{ dB}$, $A_{VOA2} = 1.8 \text{ dB}$ 时,信道 1 的增益漂移仅为 0.08 dB,这表明在 WDM 系统中,双波长控制方案能够有效控制复用信道数目的改变对剩余信道输出增益造成的影响。但是,由于信道 2 和控制激光均消耗了部分上能级粒子数,导致信道 1 的输出增益由控制前的 31.5 dB 下降为控制后的 23.2 dB~29.2 dB,增益损失达到 2.3 dB~8.3 dB。

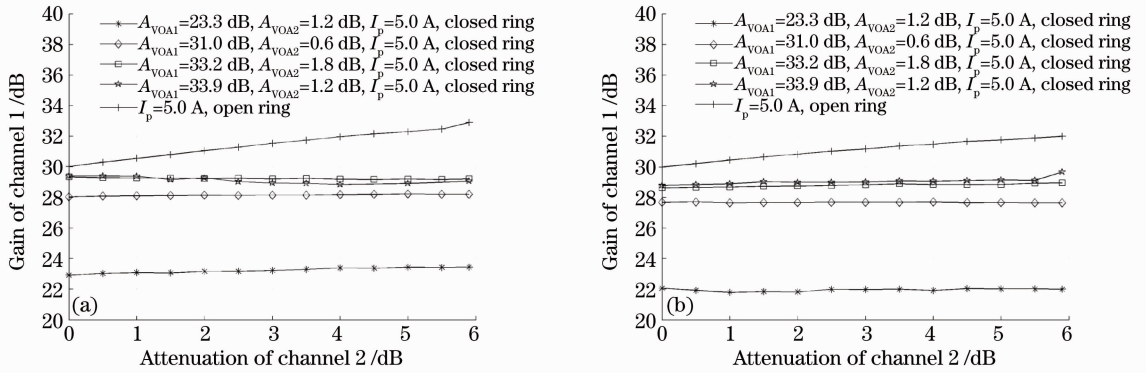


图 7 双信道下,信道 2 输入功率变化对信道 1 增益的影响。(a)信道 1 输入功率为 0.74 mW;
(b)信道 1 输入功率为 1.57 mW

Fig. 7 Effect of input power of channel2 upon gain of channel1 under dual channels. (a) Input power of channel1 is 0.74 mW; (b) input power of channel1 is 1.57 mW

为了进一步研究信道 2 对信道 1 的输出增益影响,图 7(b)中将信道 1 的输入功率增大到 1.57 mW。与图 7(a)相比,控制前系统输出增益漂移下降了 0.43 dB,控制后输出增益漂移下降了 0.06 dB~0.13 dB,输出增益下降了 0.2 dB~1.2 dB。一方面,在一定范围内增加信道 1 输入功率,可以在信道 2 和控制激光的竞争中获得更多的上能级粒子数,降低由信道 2 功率变化带来的输出增益影响;另一方面,由于其功率增加,信道 1 获得的输出增益有所降低。

另外,还研究了全光增益控制高功率光纤放大器中信道 2 的上下路对信道 1 输出功率及放大自发辐射(ASE)功率谱的影响,进一步研究 WDM 系统中复

用信道数目的改变对于剩余信道输出功率的影响,如图 8(a)和(b)所示。信道 1(1547.5 nm)输入功率为 0.74 mW,信道 2(1542.7 nm)输入功率为 0.49 mW,闭环条件下 A_{VOAI} 和 A_{VOAI2} 分别为 33.2 dB 和 1.8 dB。从图 8(a)明显看出,开环条件下,由于信道 2 的上路,导致 1530~1565 nm 范围内 ASE 功率谱密度平均比信道 2 下路时下降了约 3.5 dB,1547.5 nm 信号光功率下降了约 4.06 dB。而图 8(b),由于控制激光的引入,信道 2 的上下路对 1530~1565 nm 范围内 ASE 谱几乎没有影响,并且信道 1(1547.5 nm)功率仅仅变化了 0.17 dB。

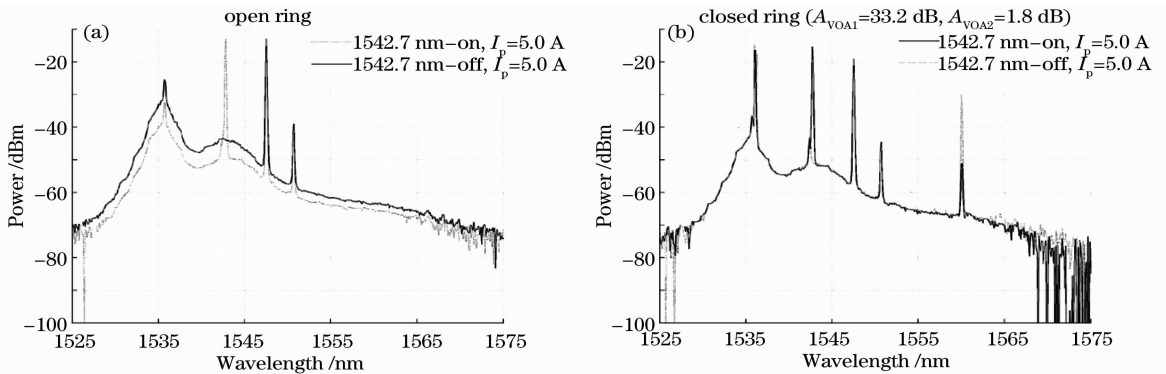


图 8 双信道情况下,信道 1542.7 nm 的有无对信道 1547.5 nm 的影响。(a)开环;(b)闭环

Fig. 8 Effect of presence or absence of channel 1542.7 nm on channel 1547.5 nm under dual channels.

(a) Open ring; (b) closed ring

4 结 论

利用双波长控制激光实现放大器的增益控制,通过两级放大结构实现全光增益控制光纤放大器的高功率输出。当输入光功率在 -5.1 dBm~2.0 dBm 范围内变化时,最大输出功率可达 1.55 W,平均增益

达到 30.3 dB,增益漂移小于 0.27 dB。这说明提出的实验结构初步实现了高功率光纤放大器的增益控制。另外采用双信道的方式来模拟 WDM 系统中信道数目的改变对于剩余信道输出增益的影响,对进一步研究不断上下路的 WDM 系统中保持剩余

信道输出功率的稳定具有重要的参考价值。

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 R Anthony, S 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 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.
- 4 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.
- 5 Wu Zhuoliang, Zhao Shanghong, Chu Xingchun, *et al.*. Experimental research on external cavity-based spectral beam combining of three- $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped fiber lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0214001. 吴卓亮, 赵尚弘, 楚兴春, 等. 三路 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的外腔谱组束实验研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0214001.
- 6 Xu Tuanwei, Li Fang, Liu Yuliang. Spectral characteristics of fiber Bragg gratings in large-mode-area double-clad fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0523006. 徐团伟, 李芳, 刘育梁. 大模场双包层光纤光栅的光谱特性[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0523006.
- 7 H J Kim, O J Kwon, S Chu, *et al.*. All-FBG-based switchable dual wavelength EDF laser with high tunability of lasing wavelength [C]. Opto-Electronics and Communications Conference, 2008, 1—2.
- 8 A A Bakar, M A Mahdi, M H Al-Mansoori, *et al.*. Single-stage gain-clamped L-band EDFA with C-band ASE saturating tone [J]. Laser Physics, 2009, 19(5): 1026—1029.
- 9 J M Lin, W J Ho. Dynamic-performance characterization of C-band EDFA using ASE-power peak-selective feedback gain-clamping [J]. Laser Physics, 2012, 22(4): 765—769.
- 10 J C Dung, B S Wu, Y R Jian, *et al.*. Dispersion-compensated Raman/erbium-doped fiber hybrid amplifier with all-optical gain-clamped for wavelength-division multiplexing systems [J]. Opt Engng, 2012, 51(1): 015002.
- 11 R Malik, M E Marhic. Experimental study of all-optical gain-clamped fiber optical parametric amplifier [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(8): 664—666.
- 12 B J Puttnam, B C Thomsen, A Lopez, *et al.*. Experimental investigation of optically gain-clamped EDFAs in dynamic optical-burst-switched networks [J]. J Opt Networking, 2008, 7(2): 151—159.
- 13 S W Harun, T Subramaniam, N Tamchek, *et al.*. Gain and noise figure performances of L-band EDFA with an injection of C-band ASE [J]. Jurnal Teknologi, 2004, 40(D): 9—16.
- 14 J F Massicott, S D Willson, R Wyatt, *et al.*. 1480 nm pumped erbium-doped fiber amplifier with all optical automatic gain control [J]. Electron Lett, 1994, 30(12): 962—964.
- 15 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.
- 16 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.
- 17 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.
- 18 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.
- 19 Zhao Chunliu, Guan Baiou, Dong Xinyong, *et al.*. Optical automatic dual-laser gain control EDFA by using double pairs of FBGs [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(4): 417—421. 赵春柳, 关柏鸥, 董新永, 等. 利用光纤光栅对实现双波长增益控制掺铒光纤放大器特性的实验研究[J]. 光学学报, 2003, 23(4): 417—421.
- 20 Li Guoyu, Dou Qingying, Liu Yangge, *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.
- 21 Cao Ying, Gu Zhengtian. Optical properties of cascaded long-period and fiber Bragg gratings [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0405003. 曹莹, 顾铮先. 级联长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅的光学特性[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0405003.

栏目编辑: 王晓瑛