

文章编号: 0253-2239(2003)04-0417-05

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

赵春柳^{1,2} 关柏鸥² 董新永^{1,2} 谭华耀² 袁树忠¹ 董孝义¹

(¹ 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)
(² 香港理工大学电机系, 九龙 香港)

摘要: 控制激光的弛豫振荡和空间烧孔现象的存在,对全光增益控制掺铒光纤放大器(EDFA)的性能产生劣化影响。采用一种新颖简单的利用两对光纤光栅对形成谐振腔结构,实现双波长增益控制掺铒光纤放大器。由两个不同波长的激光共同承担增益控制的任务,降低了控制激光引起的空间烧孔现象和瞬态输出变化。在动态工作条件下,双波长激光增益控制掺铒光纤放大器显示出优越的特性,适用范围扩展为普通单波长增益控制掺铒光纤放大器的两倍,能够适应 0~43 kHz 的上下载频率。

关键词: 掺铒光纤放大器; 空间烧孔现象; 弛豫振荡; 增益控制

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

波分复用系统由传统的点到点传输系统向光传送网发展,它的基本思想是将点到点的波分复用系统用光交叉互连节点(OXC)和光分插复用节点(OADM)连接起来,组成光传送网。在波分复用光传送网中,各通道的光功率之和将随时发生变化,这导致功率瞬态波动和低频交叉调制^[1~4]。由于掺铒光纤放大器通常工作在饱和状态,信道数增加时其增益将下降,各信道的输出光功率会降低;信道数减少时,各信道的输出光功率会增大,导致光纤的非线性效应加强。因而掺铒光纤放大器的增益控制在未来光网络中尤为重要。目前主要有三种增益控制的方法:电路自动增益控制(EAGC)^[5,6]、光自动增益控制(OAGC)^[7,8]和链路增益控制(LAGC)^[9,10]。

典型的光自动增益控制可通过单反馈环路得到激光激励实现掺铒光纤放大器的增益控制。通常,对均匀展宽的增益介质,只要单个波长激光起振,达到激光阈值,就可以控制粒子数反转水平,因此单个波长激光就足以控制放大器的增益。然而,实际情况中,掺铒光纤非均匀展宽引起的空间烧孔现象(SHB)导致单波长激光并不能完全控制放大器增益,当输入信号功率变化时,放大器增益仍有变

化^[11~15]。1997年,Lou等^[13]实验观察并分析了弛豫振荡和空间烧孔现象对全光增益控制掺铒光纤放大器性能劣化的影响。当控制激光波长远离信道波长时,可以在一定程度上抑制剩余信道的瞬态现象,剩余信道的增益变化主要来自空间烧孔现象当控制激光与信道波长接近时,空间烧孔现象可有效抑制,瞬态现象成为引起增益变化的主要因素,不可忽视。这些情况将影响光自动增益控制技术在波分复用光网络系统中的应用。为了解决这个问题,Liu等^[14]采用两个反馈环路,由两个不同波长的激光共同承担增益控制的任务,在降低控制激光引起的空间烧孔现象的同时,有效抑制了信号光的弛豫振荡。在文献^[15]中,则利用法布里-珀罗可调谐滤波器及由长周期光纤光栅(LPG)制成的波长选择性可调谐衰减器,在一个反馈环路中即可得到双波长的控制激光,同样有效地降低了空间烧孔现象效应及弛豫振荡。

本文提出了另一种结构简单的双波长增益控制掺铒光纤放大器。利用两对光纤光栅对形成谐振腔,得到双波长增益控制激光,实现增益控制。此种结构紧凑,所用器件较少,易于集成,而增益控制效果一致。在详细介绍这种新颖的双波长激光增益控制掺铒光纤放大器的工作特性的同时,更进一步研究了双波长增益控制掺铒光纤放大器的频率响应特性。

E-mail: zhchunliu@eyou.com

收稿日期:2002-05-22; 收到修改稿日期:2002-07-17

2 结构装置

双波长激光增益控制的掺铒光纤放大器结构如图 1 所示。掺铒光纤放大器主要由 20 m 掺铒光纤构成,980 nm 半导体激光器(LD)所提供的抽运光经波分复用器耦合进掺铒光纤,抽运功率约为 80 mW。产生控制激光的谐振腔由两对光纤光栅(FBG)构成。其中一对的反射峰在 1532.5 nm;另一对的反射峰在 1555 nm 附近。四只光纤光栅的峰值反射率均为 8 dB。通过光纤光栅调谐技术可以调节每对光栅的重叠程度,改变激光腔镜的反射率,仔细调整两个可调谐光栅可以得到双波长激光增益控制的掺铒光纤放大器功率特性,如图 2。试验中控制激光波长分别为 1533.7 nm 和 1555.5 nm,强度相等。有输入信号光时,两增益控制激光将减弱。输入信号强度较小时,两增益控制激光强度较强;输入信号强度增大时,两增益控制激光将减弱;当输入信号继续增大,两控制激光强度将下降为 0。

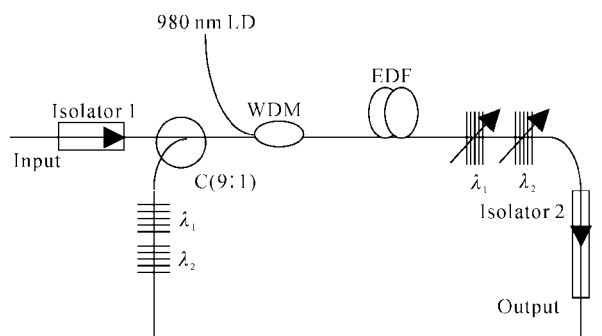


Fig. 1 Schematic diagram of the dual-control lasers EDFA

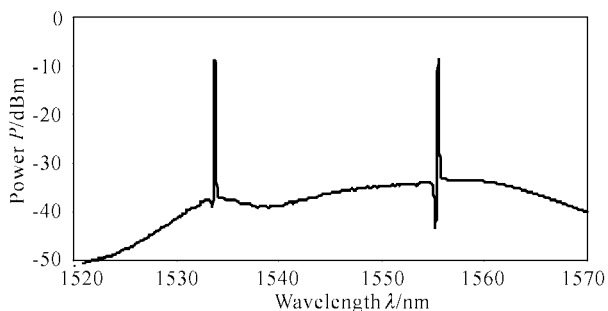


Fig. 2 Dual-control lasers by adjusting overlap of FBGs

3 利用光纤光栅对实现双波长增益控制掺铒光纤放大器的工作特性

图 3 给出了双波长激光增益控制的掺铒光纤放大器在不同腔内损耗条件下的增益特性。输入信号光波长为 1551 nm,强度可在 -35~0 dBm 范围内变化。增益控制光的引入,使得控制激光与信号光共同

消耗上能级粒子数,使小信号增益降低,在一定输入功率范围内,信号增益保持一定值,如图 3。输入信号光功率小时,控制激光将消耗更多的上能级粒子数,控制激光输出功率变大。经反馈腔反馈后控制激光重新注入到掺铒光纤放大器,此时控制激光的输入功率增强,进一步消耗铒离子上能级粒子数,由于光反馈调整过程非常迅速,系统很快达到平衡,使小信号增益降低。输入信号增大时,控制激光对上能级粒子数的消耗相对减少,输出功率减小,重新反馈到掺铒光纤放大器输入端的功率减小,因此当信号光功率增大时,仍可保持与小信号相同的确定增益。但是当输入信号强度继续增大,上能级粒子数严重消耗,控制激光获得的增益不足以抵消反馈环内的损耗时,控制激光工作在阈值以下,不能形成激光,放大器内只有信号光获得增益放大。此时信号光获得的增益与没有增益控制时获得的增益相同。调节每对光栅的重叠程度,改变激光腔镜的反射率,可以得到不同的增益。实验获得的增益可调谐范围为 15~22 dB。不同增益处的噪声系数在 5~6.5 dB(没有增益控制的掺铒光纤放大器噪声系数约为 4 dB)。

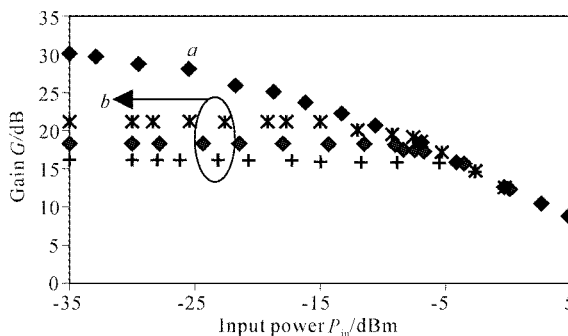


Fig. 3 Gain characteristics of 1551 nm signal with different overlap degree of FBGs. (a) Without gain control; (b) With gain control and with different overlap degree of FBGs

图 4 给出了信号增益随输入信号波长的变化情况

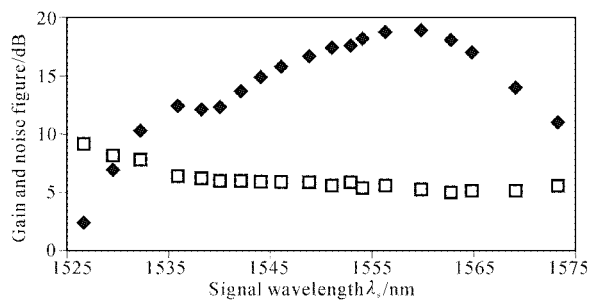


Fig. 4 Gain and Nfdistributions for various input signal wavelength in dual-control EDFA. ■: gain; □: noise figure

况。增益控制对掺铒光纤放大器的增益分布有很大的影响,普通掺铒光纤放大器在 1532 nm 附近的高增益不见了,增益控制后的增益仅 10 dB 左右。1550 nm 增益较平坦部分,增益控制后不平坦程度增大。噪声系数在 1530 nm 附近较大,为 7~8 dB;在 1550 nm 范围,噪声系数较低,为 5 dB 左右。

4 单波长与双波长激光增益控制掺铒光纤放大器特性比较

图 5 比较了单波长激光增益控制和双波长激光增益控制掺铒光纤放大器的光增益特性。测量信号波长为 1551 nm,两种情况下的小信号增益均保持

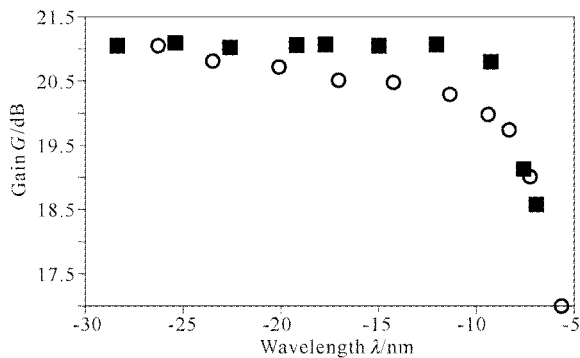


Fig.5 Optical gain characteristics for various input power. ■: Dual control lasers OAGC; ○: Single control laser OAGC

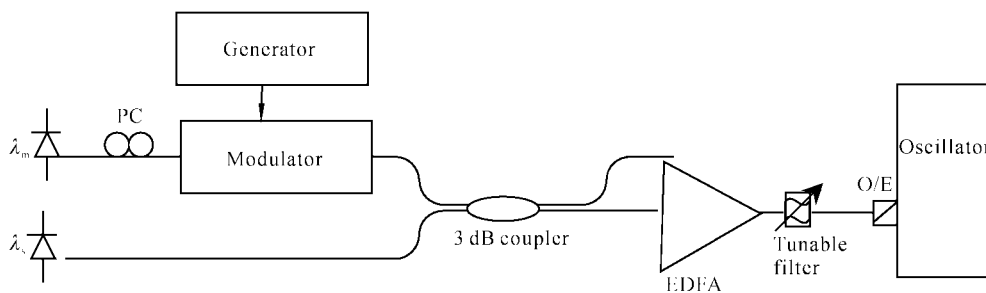


Fig. 6 Setup for testing the surviving channel transient output from EDFA

为了表征上下载信号对剩余信号光的影响程度,我们定义剩余信号光最大瞬态输出变化率 K

$$K = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{(P_{\max} + P_{\min})/2}$$

其中, P_{\max} 和 P_{\min} 分别为剩余信号光瞬态输出的最大值和最小值。

由于导致上下载对剩余信号光的影响的根本原因是掺铒光纤放大器,因此, K 同时可以表征上下载复用情况下,掺铒光纤放大器的动态增益响应特性。

如图 7 所示,当控制激光波长为 1533.7 nm 时,

持在 21 dB(没有增益控制的掺铒光纤放大器波长 1551 nm 的小信号增益为 29.7 dB)。两种增益控制情况下的增益控制范围最大输入信号强度为 -9 dBm,噪声指数(NF)约为 5.5 dB。从图 5 可以看出,当输入信号强度达到 -9.3 dBm 时,单波长激光增益控制掺铒光纤放大器的增益变化达 1.07 dB。而双波长激光增益控制掺铒光纤放大器,增益控制的效果很好,在 -35~-9.3 dBm 范围内,信号增益基本保持在 21 dB,增益变化仅仅 0.25 dB。

为了了解双波长激光增益控制掺铒光纤放大器的瞬态特性,我们将一个调制速率 1 kHz 的新信道(波长 1546 nm,强度为 -11.55 dBm)与 1551 nm (强度 -20 dBm)的信号光一起输入到掺铒光纤放大器中,来模拟 8 信道波分复用上下下载复用中 7 个信道同时上下载。在不同增益控制掺铒光纤放大器中,1551 nm 信号光单信道输入时获得的增益均控制在 21 dB。掺铒光纤放大器放大后的信号,经波长可调谐滤波器滤出 1551 nm 的信号光(剩余信道),由快速响应的光电探测器探测,如图 6 所示。

图 7 给出了上下下载复用三种增益控制方案下,1551 nm 剩余信道的瞬态输出特性。图 7(a)为单波长 1533.7 nm 激光增益控制下的瞬态特性,图 7(b)为单波长 1555.5 nm 激光增益控制下的瞬态特性,图 7(c)为双波长 1533.7 nm 和 1555.5 nm 激光共同控制下的瞬态特性。

由于掺铒光纤非均匀展宽引起的空间烧孔现象导致单波长激光并不能完全控制放大器增益,剩余信道的增益变化主要来自空间烧孔现象,最大功率变化达 8.86%。当控制激光为 1555.5 nm 时,空间烧孔现象可有效抑制,但弛豫振荡变得非常严重,成为引起增益变化的主要因素,剩余信道的功率变化可超过 7.5%。这说明,不论控制激光与信号光比是长波还是短波,利用单波长激光不可能完全实现掺铒光纤放大器的增益控制。与此相对,双波长激光增益控制下,剩余信道的增益变化被有效地控制,一方面双波长激

光共同承担增益控制的任务,由于减小了控制激光的强度,降低了空间烧孔效应。另一方面,双波长激光共同消耗掺铒光纤上能级粒子数,此消彼长,破坏了控制激光引起的弛豫振荡,因此大大降低了剩余信道的增益变化。在双波长激光增益控制方案中,剩余信号光最大瞬态输出变化率仅 4.65%。

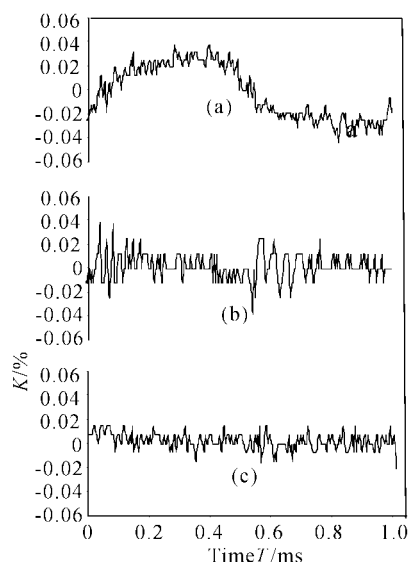


Fig. 7 Output transients of the surviving channel (1551 nm) in the presence of 1546 nm channel add/drop at 1 kHz frequency

5 双波长激光增益控制掺铒光纤放大器频率响应特性的研究

在激光增益控制掺铒光纤放大器中存在着固有弛豫振荡效应,这将导致瞬态效应对上下载频率非常敏感。为了进一步了解激光增益控制掺铒光纤放大器的瞬态响应特性,我们连续改变上下载频率,考察其对剩余信道的影响。上下载信道波长仍为 1546 nm,强度 -11.55 dBm;剩余信号光波长仍为 1551 nm,强度 -20 dBm。在双波长增益控制和单波长增益控制掺铒光纤放大器中,1551 nm 信号光单信道输入时获得的增益均控制在 21 dB。

图 8 给出了上下载复用时三种增益控制方案下,1551 nm 剩余信道随上下载频率变化的瞬态响应输出特性。曲线的横坐标为上下载频率,纵坐标为剩余信号光最大瞬态输出变化率。图 8(a)为单波长 1533.7 nm 激光增益控制,图 8(b)为单波长 1555.5 nm 激光增益控制,图 8(c)为双波长 1533.7 nm 和 1555.5 nm 激光共同控制。

随着上下载频率的增加,在某些特定的频率点

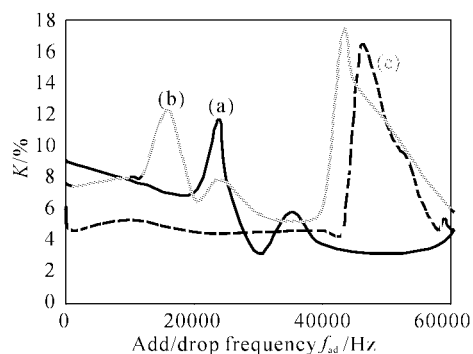


Fig. 8 Output max transient amplitude ratio K of the surviving channel vs the frequency of the modulated channel add/drop

上剩余信道的瞬态变化突然增大。在单波长 1533.7 nm 激光增益控制下,1551 nm 剩余信号光最大瞬态输出变化率在约 23.9 kHz 频率时增加到 11.7%。之后,剩余信号光最大瞬态输出变化率减小,当上下载频率增大到 ~35 kHz 和 ~65 kHz 时,剩余信号光最大瞬态输出变化率再次增加。在单波长 1555.5 nm 激光增益控制掺铒光纤放大器情况下,剩余信号光最大瞬态输出变化率的极值出现在 15.9 kHz, 24 kHz, 和 43 kHz。在双波长激光增益控制掺铒光纤放大器中,剩余信号光最大瞬态输出变化率很小,很平,一直保持到 ~43.1 kHz (峰值 46 kHz)。这是由于双波长增益控制激光共同消耗掺铒光纤上能级粒子数,此消彼长。更重要的是:不同增益控制激光的弛豫振荡频率不同。弛豫振荡频率与控制激光的波长,反馈腔内的损耗,掺铒光纤提供的增益等参量有关。弛豫振荡频率的不同,在一定程度上破坏了单波长控制激光引起的弛豫振荡。这说明双波长增益控制掺铒光纤放大器的频率响应特性远远好过单波长增益控制掺铒光纤放大器。由于频率响应的限制,单波长 1533.7 nm 增益控制掺铒光纤放大器仅仅适用于上下载频率低于 20 kHz (单波长 1555.5 nm 激光增益控制掺铒光纤放大器,则低于 12 kHz)。双波长增益控制的使用范围扩大了一倍,可达 43 kHz。

结论 利用两对光纤光栅对形成谐振腔,得到双波长增益控制激光,实现双波长增益控制掺铒光纤放大器。由两个不同波长的激光共同承担增益控制的任务,降低了控制激光引起的空间烧孔现象和瞬态输出变化。双波长激光增益控制掺铒光纤放大器在动态工作条件下,显示出优越的特性,增益变化幅度大大减低,适用范围扩展为普通单波长增益控制掺

铒光纤放大器的两倍,能够适应 0~43 kHz 的上下载频率。

非常感谢香港 Research Grants Council 提供的 PolyU5142/97E 和 PolyU5123/97E 两个项目的支持。

参 考 文 献

- 1 Song Kai, Fan Chongcheng. Frequency response and transient gain of erbium-doped fiber amplifier. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(5):616~620 (in Chinese)
- 2 Song Kai, Premaratne M, Lauder R D T. An analytical formulation of the transient response of gain-clamped EDFA's. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(11): 1378~1380
- 3 Maeda M. Operations and management of WDM optical networks. *OFC '96*, FD4: 318~319
- 4 Zyskind J L, Sun Y, Srivastava A K *et al.*. Fast power transients in optically amplified multiwavelength optical networks. *OFC '96*, PD31-1
- 5 Tancevski L, Rusch L A, Bononi A. Gain control in EDFA's by pump compensation. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(9):1313~1315
- 6 Ellis A D, Percival R M, Lord A *et al.*. Automatic gain control in cascaded erbium doped fiber amplifier systems. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(3):193~194
- 7 Bryce J, Yoffe G, Zhao Y *et al.*. Tunable, gain-clamped EDFA incorporating chirped fiber Bragg grating. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(17):1680~1681
- 8 Subramaniam T, Mahdi M A, Poopalan P *et al.*. All-optical gain-clamped erbium-doped fiber-ring lasing amplifier with laser filtering technique. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(8):785~787
- 9 Seo Yeon Park, Hyang Kyun Kim, Dong Ho Lee *et al.*. Feasibility demonstration of 10 Gbit/s/channel WDM network using dynamic gain-controlled EDFAs. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(5):482~484
- 10 Karasek M, Bononi A, Rusch L A *et al.*. Gain stabilization in gain clamped EDFA cascades fed by WDM burst-mode packet traffic. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(3):308~313
- 11 Wang Chia-Chi, Cowle G J. Optical gain control of erbium-doped fiber amplifiers with a saturable absorber. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(5):483~485
- 12 Karasek M, Valles J A. Analysis of channel addition/removal response in all-optical gain-controlled cascade of erbium-doped fiber amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(10):1795~1803
- 13 Lou G, Zyskind J L, Sun Y *et al.*. Performance degradation of all-optical gain-clamped EDFA's due to relaxation-oscillations and spectral-hole burning in amplified WDM networks. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(10):1346~1348
- 14 Liu Yongqian, Krol Mark F. Transient gain control in EDFA's by dual-cavity optical automatic gain control. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(11):1381~1383
- 15 Zhao Chunliu, Guan Baiou, Dong Xinyong *et al.*. Properties of a novel gain control EDFA by dual-control lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(11): 1331~1335

Optical Automatic Dual-Laser Gain Control EDFA by Using Double Pairs of FBGs

Zhao Chunliu^{1,2} Guan Baiou² Dong Xinyong^{1,2} Tam Hwa-Yaw²
Yuan Shuzhong¹ Dong Xiaoyi¹

(¹ Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071

(² Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

(Received 22 May 2002; revised 17 July 2002)

Abstract: A simple configure for automatic gain control of optical amplifiers is presented, in which two pairs of FBGs are used to form dual-oscillating lasers. The experimental results suggest that the configure can be employed to significantly reduce surviving channel steady-state and transient power excursion. Moreover, the effects of the gain control EDFA on surviving channel at different add/drop frequency are discussed. Experimental results show that the dual-oscillating laser gain controlled EDFA operates satisfactory with channel's add/drop frequency up to 43 kHz which is significantly higher than that with single-oscillating laser control.

Key words: Erbium-doped fiber amplifier (EDFA); inhomogeneity; optical gain control; spectral-hole burning; relaxation oscillations