

文章编号 : 0253-2239(2002)11-1331-05

新型双波长激光增益控制掺铒光纤放大器

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: 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。提出了一种新颖简单的结构,利用自由光谱范围为 26.7 nm 的法布里-珀罗可调谐滤波器和由长周期光纤光栅制成的波长选择性可调谐的衰减器,有效地调整不同波长处的腔内损耗,可以实现不同强度的双波长激射。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,同时双波长激射有效地抑制了信号光的弛豫振荡。

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

在波分复用(WDM)系统中,各通道的光功率之和将随时发生变化(特别在波分复用分组交换光网络中),这导致功率瞬态波动和低频交叉调制。在实际的波分复用系统和网络中,要求在发信端和网络节点处上下话路时不影响系统和网络的正常运行。由于掺铒光纤放大器(EDFA)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^[1-4]。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)、链路增益控制(LAGC)、光自动增益控制(OAGC)。

典型的光自动增益控制可通过单反馈环路得到激光激射实现掺铒光纤放大器的增益控制,由于光增益控制可以实现快速的自动控制,并可实现全光集成,因此成为首选方案^[2-7]。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^[6-8]。这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,Wang等^[7]在反馈环中加入饱和吸收体动态调整反馈环的损耗,来降低强控制激光引起的空间烧孔。Liu等^[8]等则采用两个反馈环路,由两个不同波长的激光共同承担增益控制的任务,在减弱控制激光引起的空间烧孔的同时,有效抑制信号光的弛豫振荡。

本文提出一种新颖简单的结构,利用自由光谱范围为 26.7 nm 的法布里-珀罗可调谐滤波器和由长周期光纤光栅(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效应及弛豫振荡。与Liu等^[8]的试验方案相比,结构大大简化,所用器件较少,而效果一样。本文详细介绍了这种新颖的双波长激光增益控制掺铒光纤放大器的结构特点及其静态、动态工作特性。

2 试验装置

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耦合进掺铒光纤,抽运功率约为 100 mW。产生控制激光的谐振腔主要包括光环行器、掺铒光纤、可调谐法布里-珀罗滤波器和由长周期光纤光栅制成的波长选择性可调谐衰减器等基本器件构成。放大器输入端和输出端的环行器一方面可防止放大器的自激振荡及传输光路中的光反馈,同时可保证控制激光在腔内的单向运转。耦合器 10% 输出端用来监测控制激光的情况。控制激光的波长

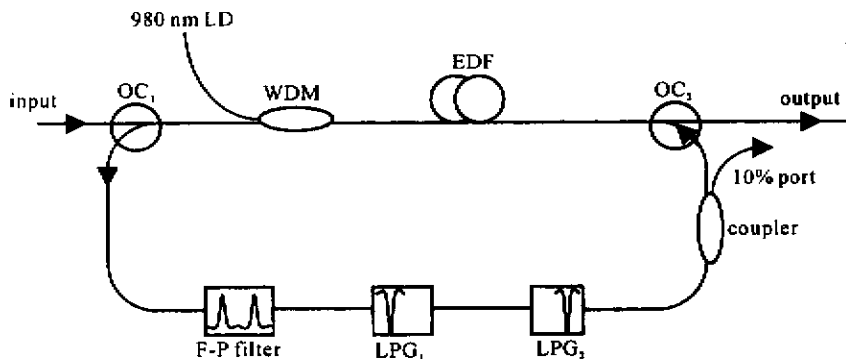


Fig.1 Schematic diagram of the dual laser wavelength gain controlled EDFA

由法布里-珀罗滤波器的透射峰决定。实验中通过调节 LPG1 和 LPG2 衰减器,有效地调整不同波长处的腔内损耗,可以实现双波长激射或单波长激射,并可控制激光的强度。信号光从输入端口(Input)输入,经掺铒光纤放大器放大的信号从输出端口(Output)输出,在光谱仪上进行观测,与信号光进行比较后,光谱仪自动给出掺铒光纤放大器的增益(Gain)和噪声特性(NF)。

在单反馈环中实现双波长控制激光的关键器件是波长选择性衰减器——长周期光纤光栅(LPG)。长周期光纤光栅是一种新型的光纤光栅,其栅格周期一般大于 $100 \mu\text{m}$,一般可以通过振幅掩模法制作。长周期光纤光栅可以将一个前导模耦合到另一导模中,由于这种耦合是波长选择性的,长周期光纤光栅可作为依赖波长的损耗元件,试验中用到的两个长周期光纤光栅拉直时的透射位置分别为 1534.02 nm 和 1555.48 nm 。串接的两个长周期光纤光栅可以构成双通道波长选择性衰减器。由于长周期光纤光栅具有高弯曲灵敏性,当光栅所在位置处的光纤发生弯曲时,长周期光纤光栅的透射峰形状及其中心波长都将发生变化。图 2 给出了串接的两个长周期光纤光栅弯曲时,光栅透射谱的变化。

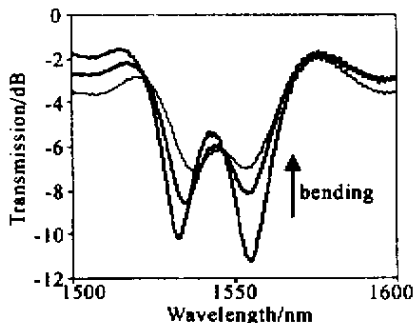


Fig.2 Transmission of LPGs in different bending degree (bending becomes large along arrow divection)

因此,通过调节长周期光纤光栅的弯曲程度可以改变不同波长处的透射率,分别调整两个波带内的损耗,从而得到不同强度及不同相对强度的双波长激光,使得整个结构非常灵活。试验中,两个控制激光波长分别为 1530.6 nm 和 1557.2 nm ,如图 3 所示,选择两控制激光的强度基本相同,系统的稳定性好,掺铒光纤放大器引入的噪声相对较小。

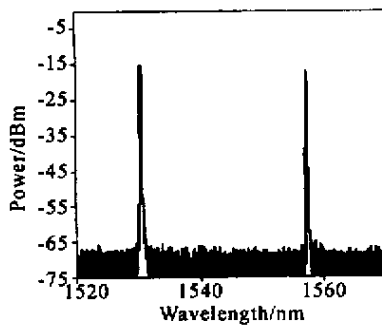


Fig.3 Two wavelengths of control lasers by adjusting LPGs

3 双波长激光增益控制的掺铒光纤放大器工作特性

图 4 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和噪声特性。输入信号波长为 1552.6 nm ,输入信号的强度由可调谐衰减器控制,强度可在 $-35 \text{ dBm} \sim 0 \text{ dBm}$ 范围内变化。改变长周期光纤光栅的弯曲程度,可改变反馈环内的损耗,得到不同强度的控制激光。当控制激光强度增大,即反馈环的损耗减小时,控制激光将消耗掺铒光纤更多的上能级粒子,使掺铒光纤粒子数反转程度降低,信号光获得的增益变小。随着反馈环内损耗的增大,控制激光强度减小,掺铒光纤粒子数反转程度升高,信号光获得的增益变大。改变反馈环内的损耗,可以得到不同的信号增益,因此

可以作为增益可调谐的掺铒光纤放大器。另外,选用的增益不同,增益控制的范围也不同,小增益可获得大的增益控制范围。如 21 dB 增益对应的增益控制范围可大到 -5 dBm,而 31 dB 增益获得的增益范围最大到 -16 dBm。图 4(b)给出了掺铒光纤放大器的噪声特性,当输入信号强度小于 -8 dBm 时,不同增益处的噪声系数在 5 dB~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)。一方面由于增益控制放大系统引入更多的器件,增加了附加噪声;另一方面,由于噪声系数与增益成反比例关系,增益越小,噪声越大。因此,增益控制掺铒光纤放大器的噪声系数通常要比没有增益的大。

从图 5 可以清楚地看到,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 附近的高增益消失,增益控制后的增益仅 15 dB 左右。这为掺铒光纤放大器增益平坦提出了新的问题,同时也提供了新的解决方案,将增益控制和平坦结合起来,利用增益控制激光对掺铒光纤放大器增益分布的影响,选取合适的控制激光(波长和强度)以得到令人满意的控制和平坦效果。

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

实验中通过调节 LPG1 和 LPG2 衰减器,调整不同波长处的腔内损耗,可以实现双波长激射或单波长激射(波长选为 1530.5 nm),并使两种情况下的小信号增益均为 21 dB。从图 6 可以看出,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 dBm~-8 dBm 范围内,信号增益基本保持在 21 dB,增益变化小于 0.3 dB。单波长激光增益控制掺铒光纤放大器的增益变化达 0.8 dB。

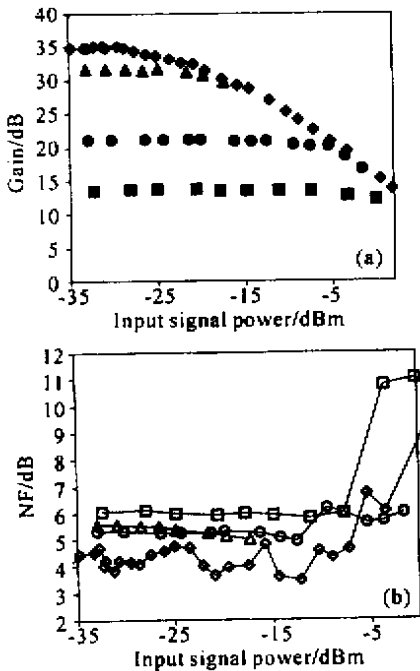


Fig.4 Gain and noise figure(NF) characteristics with different cavity loss. ◆: without gain control; ▲: cavity loss equal to 40 dB; ●: cavity loss equal to 20 dB; ■: cavity loss equal to 3 dB

图 5 显示了增益随输入信号波长的变化情况。

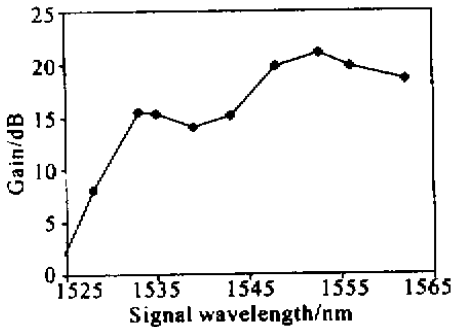


Fig.5 Gain distributions for various input signal wavelength in dual laser wavelength gain controlled EDFA

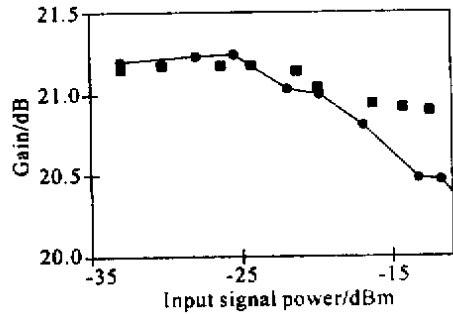


Fig.6 Optical gain characteristics for various input power of OAGC-EDFA. ■: OAGC by dual laser wavelength; ●: OAGC by single laser wavelength

为了进一步了解双波长激光增益控制掺铒光纤放大器的瞬态响应特性,实验中将一个调制速率 1 kHz 的新信道(波长 1546 nm,强度为 -7.4 dBm)与 1552.6 nm(强度 -19.1 dBm)的信号光一起输入到掺铒光纤放大器中,来模拟 16 信道波分复用上下下载复用(Add/Drop)中最差的情况:16 信道中 15 个信道同时上下下载。在不同增益控制的掺铒光纤放大器中,1552.6 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 1552.6 nm 的信号光(剩余信道),由快速响应的光电控制器探测。图 7 给出了上下下载复用时三种增益控制方案下 1552.6 nm 剩余信道的瞬态输出特性。图 7(a)为单波长 1530.5 nm

激光增益控制下的瞬态特性,图 7(b)为单波长 1557.2 nm 激光增益控制下的瞬态特性,图 7(c)为双波长 1530.5 nm 和 1557.2 nm 激光共同控制下的瞬态特性。

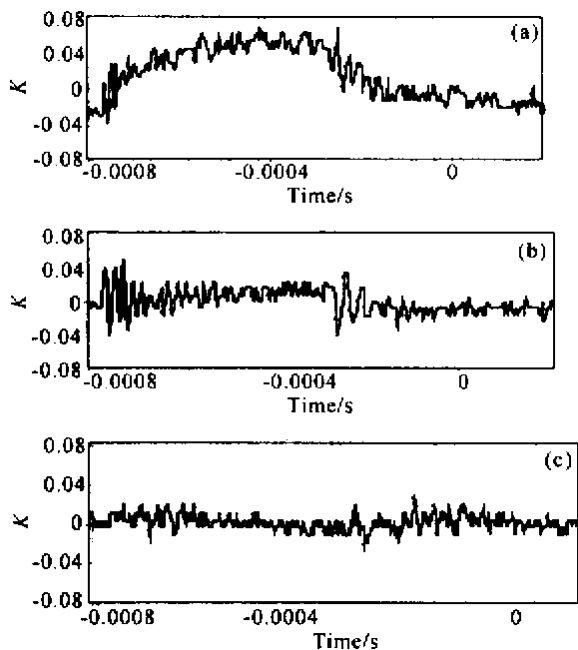


Fig. 7 Output transients of the surviving channel(1552.6 nm) in the presence of 1546 nm channel add/drop modulation. $K = (P_{\max} - P_{\min}) / [(P_{\max} + P_{\min}) / 2]$, P_{\max} and P_{\min} are max output and min output, respectively

当控制激光波长(1530.5 nm)远离信道波长时,由于掺铒光纤非均匀展宽引起的空间烧孔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,最大功率变化达 10.9%。当控制激光(1557.2 nm)与信道波长接近时,空间烧孔可有效抑制,但弛豫振荡变得非常严重,瞬态效应不可忽视,成为引起增益变化的主要因素,剩余信道的功率变化超过 9.3%。这说明,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,不论控制激光与信号光相比是长波还是短波。

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,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,最大增益变化仅 5.7%。

结论 本文提出了一种新颖简单的结构,利用自由光谱范围为 26.7 nm 的法布里-珀罗可调谐滤波器以及由长周期光纤光栅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,因此,通过调节长周期光纤光栅的弯曲程度就可以改变不同波长处的透射率,分别调整两个波带内的损耗,从而可以得到不同强度及不同相对强度的双波长激光,使得整个结构非常灵活。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。输入信号强度在 -40 dBm ~ -8 dBm 范围内变化时,掺铒光纤放大器的增益变化控制在 0.3 dB。增益控制掺铒光纤放大器的动态工作特性在波分复用系统网络节点处上下话路时,尤为重要。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,最大增益变化仅为 5.7%。

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] Kim S Y, Chung J, Lee B. Dynamic performance of the all-optical gain controlled EDFA cascade in multiwavelength optical networks. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(17):1475~1477
- [3] Song Kai, Malin P, Richard L. An analytical formulation of the transient response of gain-clamped EDFA's. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(11):1378~1380
- [4] Miroslav K, Juan V. 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
- [5] Bryce J, Yoffe G, Zhao Y *et al.*. Tunable, gain-clamped EDFA incorporating chirped fiber Bragg grating. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(17):1680~1681
- [6] 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
- [7] Wang C C, Cowle G J. Optical gain control of erbium-doped fiber amplifiers with a saturable absorber. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(5):483~485
- [8] Liu Yongqian, Krol M F. Transient gain control in EDFA's by dual-cavity optical automatic gain control. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(11):1381~1383

A Novel Gain Control EDFA by Dual-Control Lasers

Zhao Chunliu¹⁾²⁾ Guan Baiou²⁾ Dong Xinyong¹⁾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 13 November 2001 ; revised 14 January 2002)

Abstract : A novel method for automatic gain control of optical amplifiers is presented. It uses a F-P filter with 26.7 nm free spectral span and two long-period gratings (LPGs) for oscillating dual lasers in a single feedback loop. By bending the LPGs, the cavity losses at different wavelengths are varied individually and the dual lasers feedback are varied too. The technique significantly reduces surviving channel steady-state and transient power excursion by automatic reduction of relaxation oscillations and spectral hole burning. Properties of this novel optical gain control EDFA with dual-control lasers were studied in detail.

Key words : EDFA ; inhomogeneity ; optical gain control ; spectral-hole burning ; relaxation oscillations