

文章编号: 0253-2239(2005)01-30-5

基于弯曲不敏感光纤的长周期光纤光栅 可调谐增益均衡器*

胡爱姿 饶云江 牛永昌

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

摘要: 对高频 CO₂ 激光脉冲方法在弯曲不敏感光纤中写入的长周期光纤光栅的弯曲特性进行了研究, 发现其谐振峰幅值对弯曲相当敏感, 为普通光纤中写入的长周期光纤光栅的 2.8 倍, 并且谐振波长和谐振峰幅值在圆周方向上呈现的对应规律与普通光纤不同, 即谐振峰幅值最敏感方向所对应的谐振波长对弯曲不敏感。根据该现象, 提出了一种利用调节其弯曲度来实现增益控制的可调增益均衡器方案, 并进行了实验验证, 该方法实用、简单。

关键词: 光学器件; 光纤放大器; 弯曲不敏感光纤; 长周期光纤光栅; 高频 CO₂ 激光器; 增益均衡器

中图分类号: TB96; TN253 文献标识码: A

A Novel Tunable LPFG Gain Equalizer Based on a Bend Insensitive Fiber

Hu Aizi Rao Yunjiang Niu Yongchang

(Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: The bending characteristics of the long period fiber grating (LPFG) induced by high-frequency CO₂ laser pulses in a bend insensitive fiber is reported. The experimental results show that the peak resonant amplitude of the LPFG written in a bend insensitive fiber has a higher sensitivity than that written in a standard telecommunication fiber. Furthermore, LPFG has different bending characteristics at circular orientation, i. e. the peak resonant amplitude of the LPFG is the most sensitive to bending but the resonant wavelength is insensitive at some circular orientations. Based on this finding, a gain equalizer is proposed to flat the gain of an erbium-doped fiber amplifier (EDFA) by bending directly. Such a system is shown to be a practical and simple approach to realize gain flattening of an EDFA with high precision for gain control.

Key words: optical devices; fiber amplifier; bend insensitive fiber; long-period fiber gratings; high frequency CO₂ lasers; gain equalizers

1 引 言

信息时代人们对通信的容量提出了越来越高的要求。而尽可能地利用光纤的带宽资源是提高通信系统容量的一个有效解决办法。现在人们已经可以将通信带宽从传统的 C 波段, 扩展到 S, L 波段, 而扩大带宽后的通信系统就必然要求在需要的传输带宽范围内传输谱线平坦度要高(一般为 1.0 dB), 很显然, 这就需要有相应输出谱线平坦度较高的光放

大器与之相对应, 而现在使用最广泛的掺铒光纤放大器(EDFA), 由于掺铒光纤本身的原因, 它所能提供的 C 波段各波长信号的增益程度也是不同的, 增益谱不平坦就会大大制约光放大器在波分复用(WDM)以及密集波分复用(DWDM)系统中的应用, 所以, 开展对光纤放大器增益谱线的增益均衡器的研究就尤为必要。

目前报道的增益均衡器件有很多^[1~5]。光纤光

* 国家杰出青年科学基金(60025515)资助课题。

作者简介: 胡爱姿(1979~), 江西婺源人, 重庆大学电子工程学院在读硕士。主要研究方向为新型长周期光纤光栅的基础特性研究及应用。E-mail: aicy@auo.com。

收稿日期: 2004-01-20; 收到修改稿日期: 2004-05-13

栅是近些年飞速发展起来的一种新型光纤无源器件,由于长周期光纤光栅(LPFG)具有附加损耗小、无后向反射、不受电磁干扰、全兼容于光纤等优点,得到了人们越来越广泛的重视^[6,7]。本文研究高频 CO₂ 激光脉冲方法^[8]制作的长周期光纤光栅(LPFG),提出了用弯曲的方法来实现增益平坦的方案,并进行了可调谐增益均衡实验。

2 弯曲不敏感光纤中写入的长周期光纤光栅的弯曲实验

实验所用光纤为 Stockeryale 公司提供的 BIF-1550-L2 型弯曲不敏感光纤,这种光纤通过减小纤芯直径来提高弯曲性能。同时 BIF-1550 系列光纤的数值孔径要比普通标准单模光纤大,提高了在 1550 nm 的弯曲性能,参量由 Stockeryale 公司提供。光纤和光纤光栅是完全不同的两个概念,对在这种弯曲不敏感的光纤中写入的长周期光纤光栅进行弯曲特性研究,对探索光纤类型对长周期光纤光栅的特性影响具有实际意义。

实验对象是高频 CO₂ 激光脉冲在弯曲不敏感光纤中写入的长周期光纤光栅。其透射谱如图 1,带宽为 13 nm 左右,比普通长周期光纤光栅的带宽(一般为 20 nm 左右)要窄得多,这也是一个做增益平坦器用的一个优点,例如掺铒光纤放大器的增益输出谱线不平坦部分在 12 nm 左右。

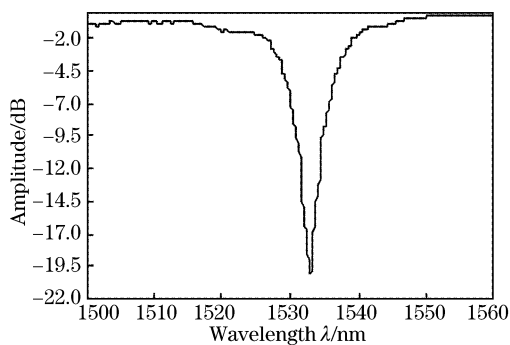


图 1 弯曲不敏感光纤中写入的长周期光纤光栅的透射谱

Fig. 1 Transmission spectrum of LPFG based on a band insensitive fibre

用如图 2 所示实验装置对长周期光纤光栅进行了弯曲特性实验研究。实验结果见图 3 和图 4,可以看出其谐振峰幅值对弯曲非常敏感,最敏感方向的灵敏度为 +17.292 dB/m,而普通长周期光纤光栅的最敏感方向的灵敏度为 +6.20 dB/m^[10]。此外,

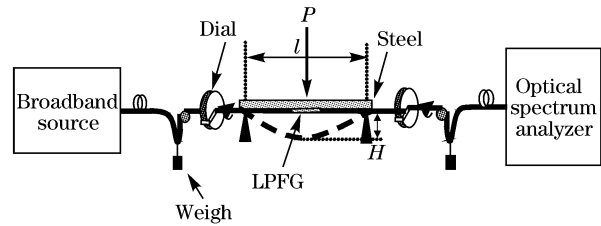


图 2 长周期光纤光栅弯曲实验装置

Fig. 2 Experimental set-up for bend test of the LPFG

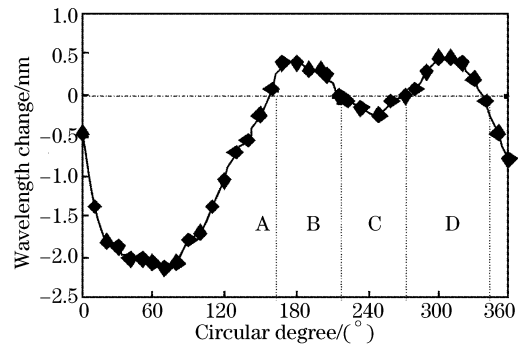


图 3 弯曲不敏感光纤中写入的长周期光纤光栅的谐振波长的弯曲特性

Fig. 3 Bending characteristics of resonant wavelength of the LPFG written in a bend insensitive fibre

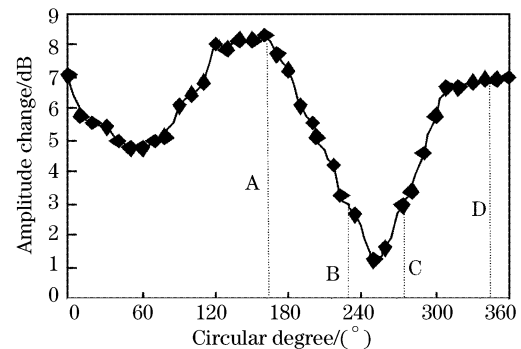


图 4 弯曲不敏感光纤中写入的长周期光纤光栅的谐振峰幅值的弯曲特性

Fig. 4 Bending characteristics of resonant peak amplitude of the LPFG written in a bend insensitive fibre

在谐振峰幅值最敏感方向,长周期光纤光栅的谐振波长对弯曲却不太敏感,灵敏度只有 +0.50 nm/m,而普通长周期光纤光栅在该方向上谐振波长要发生较大的漂移,达 -6.40 nm/m^[10]。普通光纤中写入的长周期光纤光栅在弯曲过程中的透射谱变化如图 5^[11]所示,弯曲不敏感光纤中写入的长周期光纤光栅在幅值对弯曲最敏感的方向,其透射谱在弯曲实验过程中的变化如图 6 所示。

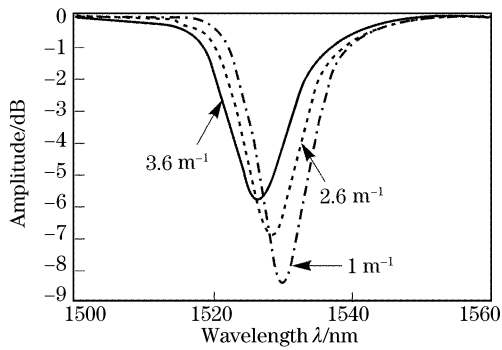


图 5 普通光纤中写入的长周期光纤光栅在不同弯曲度下的透射谱

Fig. 5 Measured transmission spectra of the LPFG for different curvature radiuses using a standard telecommunication fiber

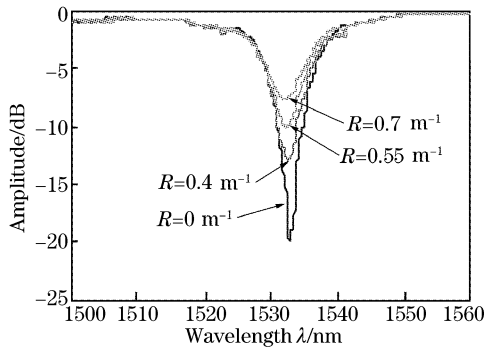


图 6 弯曲不敏感光纤中写入的长周期光纤光栅在不同弯曲度下的透射谱

Fig. 6 Measured transmission spectra of the LPFG based on a bend insensitive fibre for different curvature radiuses

3 理论分析

在高频 CO_2 激光脉冲的照射下, 光纤纤芯及包

层中残余应力释放, 导致折射率发生变化^[12], 由于在加工长周期光纤光栅的过程中, 只是光纤的一侧受照射, 导致了光纤横截面上残余应力释放的不均匀, 因而长周期光纤光栅的透射峰中心波长及幅值随圆周方向角的变化而变化。在标准单模光纤中写入的长周期光纤光栅透射峰的谐振波长与幅值和方向角呈近似的正(余)弦关系, 如图 7 所示^[10]。

在图 7 中, 若某一方向角使得中心波长“蓝”移最大, 则在此角度透射峰的幅值变化将为最小。这种关系近似成立, 波长与幅值不呈标准的等幅变化是由于光纤横截面残余应力释放不完全对称而引起的, 这种特性仅仅与光纤参量有关, 如内应力分布、纤芯与包层半径等。

本文主要讨论可调谐增益均衡器的制作, 弯曲不敏感光纤的弯曲特性原理还在研究当中, 本文只作定性分析。将具有复杂折射率剖面的弯曲不敏感光纤近似等效为阶跃光纤, 如图 8 所示, 具体方法可以参考文献[13]。图中 O 为纤芯和包层的形心, CLD1 、 COR1 分别为包层、纤芯在曝光后的折射率标准重心, 而 CLD2 、 COR2 分别为包层、纤芯在不明因素的影响下的折射率重心。

对于长度为 L 的光栅, 据文献[11]求得预置弯曲量 $d = L \times K_{\text{bend}} \times l^2 / 12$, 其中 l 为钢尺的长度。当折射率重心均在 y 方向时, 即为 CLD1 、 COR1 情况时, 在图 8(b) 中, 由于在 y' 方向与 x' 方向均有弯曲, 在 $\alpha' = \alpha - \arctan[d \sin \alpha / (h + d \cos \alpha)]$ 方向, 总偏移为 $h_{\text{general}} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} = \sqrt{h^2 + 2hd \cos \alpha + d^2}$ 。由于周期性 $\cos \alpha$ 的引入, 导致了谐振峰偏移及幅值的周期性变化。这种变化如图 7 所示。

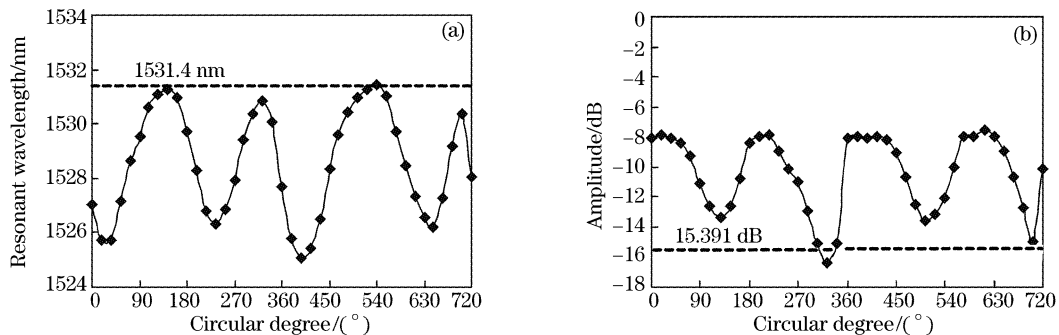


图 7 普通光纤写入的长周期光纤光栅在圆周方向的弯曲特性(a)谐振波长的弯曲特性, (b)谐振峰幅值的弯曲特性

Fig. 7 Relations between (a) resonant wavelength, (b) amplitude of loss peak, and axial rotation angle for LPFG respectively

当折射率重心有所偏离, 即为 CLD2 、 COR2 情况时, 纤芯及包层的折射率重心不在 y 方向, 纤芯、

包层中的模场将会随着折射率重心的偏移而偏移, 且偏移量与 β 、 γ 两个角度有关, 其定量关系有待于

进一步的研究,从而最终造成图 3 和图 4 所示的实验结果。在图 3 中,A、B、C、D 四个方向,谐振波长随着弯曲并不偏移,而仅仅发生振幅变化,因此可以利用这些方向来实现增益动态调节,即根据增益的

变化,只要增益均衡用长周期光纤光栅的谐振波长符合要求,就通过实时调节长周期光纤光栅的弯曲度,从而使增益平坦度达到要求。

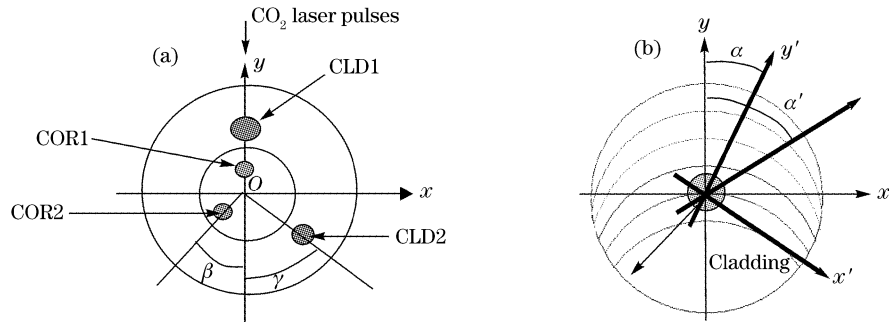


图 8 (a)光纤纤芯与包层的折射率重心示意图,(b)光纤横截面折射率变化图

Fig. 8 (a) A profile of a step-index fiber and index centers of the core and cladding, (b) refractive index variation on the transverse cross-section of fiber

4 可调增益均衡实验

光放大器的增益会随着信号的强弱发生变化。从图 3 和图 4 可以看出,在弯曲不敏感光纤中写入的长周期光纤光栅若做可调谐增益均衡器用的话,可避免谐振波长漂移带来的影响,因此本文提出了应用弯曲不敏感光纤中写入的长周期光纤光栅,并通过弯曲实现动态增益均衡的方法。根据上述实验结果,本文进行了增益均衡实验,实验中以掺铒光纤放大器的增益输出谱线为平坦对象。根据实际增益谱线要求,用弯曲不敏感光纤制作一个相近带宽,谐振峰幅值大于待平坦部分的长周期光纤光栅,并找出其谐振峰幅值对弯曲最敏感的方向,通过弯曲使其谐振峰幅值产生类似图 6 所示的变化,达到平坦增益谱线的要求,从而对实际的掺铒光纤放大器增益输出谱线进行动态增益均衡。实验结果如图 9 所

示,其增益平坦度可达 0.7dB,达到了实际应用的要求。

5 结 论

实验结果表明长周期光纤光栅的谐振峰幅值对弯曲非常敏感,并且与普通光纤中写入的长周期光纤光栅不同的是,在长周期光纤光栅的谐振峰幅值对弯曲最敏感的方向,其谐振波长对弯曲却不敏感。此外,弯曲不敏感光纤中写入的长周期光纤光栅的带宽较窄,具有和掺铒光纤放大器的待平坦谱线宽度天然匹配的优点。虽然长周期光纤光栅对温度、应变等也相当敏感,但是这些外界环境的影响在工程实用中将有相应的处理方法。在本弯曲方案中,其应力非常小,所引起的实验影响可以忽略不计。本方法在调节过程中具有波长漂移影响小、灵敏度高优点,只需要通过弯曲度调整就可以实现任意增益均衡,所以是一种简单、可靠、高精度的方法,具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Rochette M, Guy M, LaRochelle S. Gain equalization of EDFA's with Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, 11(5): 536~538
- 2 Liaw S K, Ho K P, Chi S. Dynamic power-equalized EDFA module based on strain tunable fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, 11(7): 797~799
- 3 Wysocki P F, Judkins J B, Espindola R P. 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
- 4 Pandit M K, Chiang K S, Chen Z H. Tunable long-period fiber gratings for EDFA gain and ASE equalization[J]. *Microwave and*

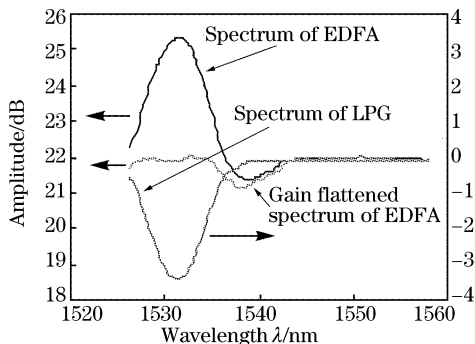


图 9 长周期光纤光栅透射谱及掺铒光纤放大器平坦前、后谱线

Fig. 9 Spectra of LPFG, EDFA and gain flattened EDFA

- Opt. Technol. Lett.*, 2000, **25**(3): 181~184
- 5 Wang Yiping, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. A novel tunable gain equalizers based on a long-period fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(8): 970~973 (in Chinese)
王义平, 饶云江, 冉曾令等. 一种新颖的长周期光纤光栅可调增益均衡器[J]. 光学学报, 2003, **23**(8): 970~973
- 6 Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~65
- 7 Chen Gengxiang, Liu Chunling, Li Tangjun *et al.*. Study on long-period fibre gratings[J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(5): 624~628 (in Chinese)
陈根祥, 刘春宁, 李唐军等. 长周期光纤光栅的研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(5): 624~628
- 8 Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L *et al.*. Characteristics of novel long-period fibre gratings written by focused high-frequency CO₂ laser pulses[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4581**: 327~331
- 9 Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L *et al.*. Bend-insensitive long-period fiber grating sensors[C]. *Opt. Lasers in Engng.*, 2003, **21**(10): 233~239
- 10 Wang Y P, *Characteristics Study of Novel Long-Period Fiber Gratings* [D]. Chongqing University, 2003. 92~95 (in Chinese)
王义平. 新型长周期光纤光栅特性研究[D]. 重庆大学博士学位论文, 2003. 92~95
- 11 Rao Y J, Zhu T, Ran Z L *et al.*. An all-fibre dynamic gain equalizer based on a novel long-period fibre grating written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(12): 1822~1824
- 12 Hyung S R, Park Y W, Oh S T *et al.*. Effect of asymmetric stress relaxation on the polarization-dependent transmission characteristics of a CO₂ laser-written long-period fiber grating [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(3): 155~157
- 13 Li L, Huang Y Q. *Fundament of Optical Fiber Communication* [M]. Beijing: National Defence Industry Publish Company, 2000. 75~82 (in Chinese)
李玲, 黄永清. 光纤通信基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 75~82