

基于包层旋转折变型光纤光栅的动态增益均衡器^{*}

朱 涛^{1,2)} 饶云江^{2)†} 王若 1) 王久玲¹⁾

1) 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

2) 电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术教育部重点实验室, 成都 610054)

(2005 年 11 月 28 日收到, 2006 年 1 月 10 日收到修改稿)

提出并利用高频 CO₂ 激光脉冲在普通单模通信光纤上写出了包层旋转折变型长周期光纤光栅(R-LPFG). 在分析 R-LPFG 波导结构和双折射特性的基础上, 对光栅周期数和折变旋转度分别为 50 和 7.2°/周期的 R-LPFG 进行了实验研究. 结果表明, 这种类型的光栅可极大地降低其谐振波长对横向负荷不同作用方向所表现出的方向相关性, 并且其谐振峰幅度横向负荷灵敏度在任意方向下均高达 0.37dB/(g·mm⁻¹), 是普通 LPFG 横向负荷灵敏度的 9 倍左右. 利用 R-LPFG 的温度线性响应特性和独特的横向负荷特性, 设计并实验研究了一种动态增益均衡器, 用其平坦掺铒光纤放大器增益谱, 在 C 波段 32nm 范围内, 其平坦度小于 ±0.5dB, 可满足实际环境对通信系统的平坦应用要求.

关键词: 光纤通信技术, 长周期光纤光栅, 动态增益均衡, 旋转折变

PACC: 4280S, 4281W

1. 引 言

近年来, 随着人们对光通信系统容量和通信质量要求的逐步提高, 密集波分复用(DWDM)系统开始大规模走向商用. 为满足 DWDM 系统长距离信息传输信号中继的要求, 各种类型光放大器如掺铒光纤放大器(EDFA), Raman 放大器、半导体光放大器等得到了迅猛发展, 但是由于光放大器本身增益谱的不平坦, 以及 DWDM 系统中信号的上/下线路、通信线路信道的增减、环境参量变化等因素的影响, 在长距离 DWDM 系统中, 各信道增益的不均衡严重影响了系统的通信质量, 因此研究动态增益均衡器尤为必要. 目前有学者提出基于热光效应^[1]、微机电系统^[2-3]、光声光可调谐滤波器^[4]、波导光栅^[5]等动态增益均衡的方法, 但都具有成本较高、系统结构较大、插入损耗大、不是全光纤型器件等缺点. 前不久作者所在课题组报道了基于长周期光纤光栅(LPFG)横向负荷特性^[6]和弯曲特性^[7]的动态增益均衡方法, 但由于其横向负荷具有较低的灵敏度和明显的方向相关性^[6], 从而导致在实际应用时装配

工序和控制结构复杂, 限制了它的进一步应用. 本文提出一种利用高频 CO₂ 激光脉冲在普通单模通信光纤包层上写出旋转折变结构的新型长周期光纤光栅, 即沿着光栅的轴向, 虽然每个光栅周期横截面折射率分布不对称, 但光栅各个周期位置的包层折射率变化则呈旋转分布状态, 这就克服了高频 CO₂ 激光脉冲单侧写入时光纤光栅的折射率变化只发生在靠近激光入射一侧而导致形成后的光栅具有较大的原始双折射这种现象, 这种波导结构可以极大地降低 R-LPFG 谐振峰方向相关性和谐振波长随横向负荷增加的漂移量, 还可提高 R-LPFG 谐振峰横向负荷的灵敏度和谐振波长的温度灵敏度. 文中利用 R-LPFG 的横向负荷特性和温度特性设计并实验研究了一种动态增益均衡器, 在用其动态平坦 C 波段 EDFA 的增益谱时, 可达到小于 ±0.5dB 的动态平坦度. 由于 R-LPFG 具有较小的谐振波长方向相关性和较高的谐振峰幅度横向负荷灵敏度, 这可大大简化动态均衡器的控制机构和装配过程, 因此这种新型 R-LPFG 在光纤通信系统, 特别是光放大器的动态增益均衡中具有极大的潜在应用价值.

^{*} 教育部重点基金(批准号:104210)、重庆市自然科学基金(批准号:8415)、国家自然科学基金重点基金(批准号:60537040)和重庆大学优秀博士论文风险基金资助的课题.

[†] E-mail: yjrao@cqu.edu.cn

2. R-LPFG 的写入及光学特性

R-LPFG 的写入装置如图 1 所示. 通过调节三维微动台三个方向的控制器, 可以使微动台上表面待放入光纤区域位于 CO₂ 激光脉冲的焦平面上; 左右两个转盘各加工有一个与转盘同轴的半圆柱结构, 将光纤穿过转盘后用强化磁铁可将其固定在半圆柱的中轴线上, 并确保待写入光栅的光纤部分位于 CO₂ 激光脉冲的焦平面内. 实验中, 先将光纤以拉直状态固定在左右转盘上, 然后固定左转盘, 而将右转盘逆时针旋转 θ 后固定. 这样图中长度为 L 的光纤就发生了扭曲率为 $R = \theta/L$ 的扭曲过程. 通过计算机控制即可以利用单侧写入法在该扭曲光纤上写出设计周期为 Λ 的 LPFG, 由高频 CO₂ 激光脉冲写入 LPFG 的原理可以知道^[8], 写成后的 LPFG 折变主要发生在激光入射一侧. 如果激光能量控制合适, 则折变可只发生在光纤包层. 对于在扭曲光纤上写成的 LPFG, 当重新将右转盘旋回原位置时(即释放光栅使其处于自由状态)新形成的光栅每个周期的折变在光纤轴向就形成了旋转折变结构, 这时的光纤光栅即为 R-LPFG, 如果定义 $C = R \cdot \Lambda$ 为 R-LPFG 的旋转度, 则光栅单位周期折变的旋转角度即为 C .

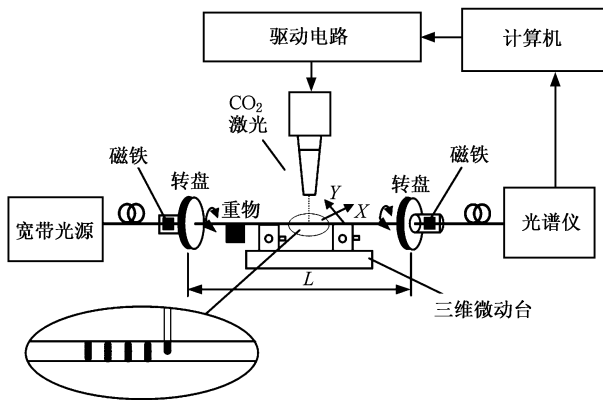


图 1 高频 CO₂ 激光脉冲制作 R-LPFG 装置图

实验中使用的是康宁 SMF-28 普通通信单模光纤, $L = 100\text{mm}$, $\Lambda = 0.5\text{mm}$, 光纤旋转角度 $\theta = 1440^\circ$, 光栅周期数为 50, 则写出的 R-LPFG 折变旋转度为 $7.2^\circ/\text{周期}$, 其波导结构如图 2 所示, 图 2(a) 中黑实线表示在光纤包层发生折变的区域, 可见沿光纤轴线方向, 黑实线发生顺时针旋转, 到位置 B, C, D 分别旋转了 7.2° , 180° 和 360° , 图 2(b) 为在 A, B, C 和

D 位置光栅横截面折射率变化的示意图, 可见折变主要发生在光纤包层. 考虑到光栅每个周期折射率变化最大覆盖角度为 180° , 因此, 折变旋转 360° 即形成一个完整的旋转折变光栅周期. 图 3 为这种波导结构对应的典型透射谱, 其谐振波长依次约为 1643nm , 1530.5nm 和 1475nm , 相应的谐振峰幅度依次为 -15.1dB , -12.9dB 和 -6.7dB , 并且这种光栅的插入损耗很低, 一般小于 0.3dB .

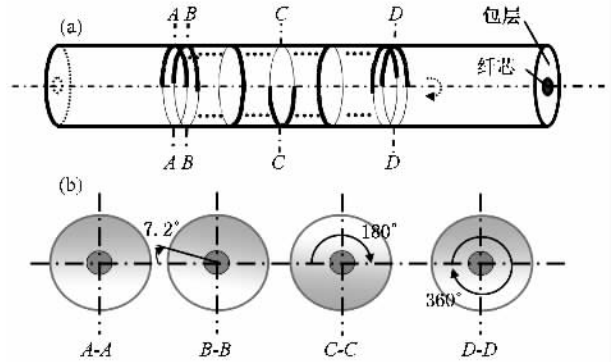


图 2 R-LPFG 折射率分布示意图 (a) 折变轴向分布 (b) 不同位置折变横截面分布

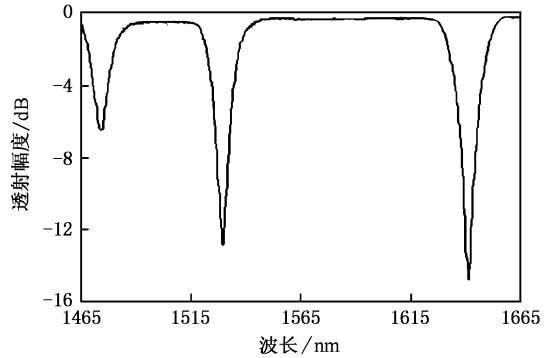


图 3 周期和周期数分别为 0.5mm 和 50 的 R-LPFG 的典型透射谱

不久前作者所在课题组报道了高频 CO₂ 激光脉冲写入的普通 LPFG, 其谐振波长横向负荷特性具有非常明显的方向相关性^[7]. 这里对 R-LPFG 和与其同周期和周期数的 LPFG 在各个方向分别承受 $60\text{g}\cdot\text{mm}^{-1}$ 横向负荷的情况下, 测试了各自谐振波长的方向相关性, 实验结果如图 4 所示, 由图可见, 普通 LPFG 谐振峰具有非常明显的方向相关性, 在 $0-360^\circ$ 的旋转范围内, 具有 4 次波长漂移最大的位置, 如果利用它的横向负荷特性, 则必须克服这种方向相关性. 尽管高频 CO₂ 激光脉冲写入法制作的光纤光栅其折变主要分布在光纤包层, 并且在光栅横截

面呈现一种非对称的分布状态,但通过先扭曲光纤再制作光栅形成的 R-LPFG 则可以改善折变在横截面分布不对称的现象,根据图 2 所示 R-LPFG 的波导结构可知,虽然 R-LPFG 每个光栅周期横截面折射率呈非对称分布,但是在整个光栅长度上,其折射率分布却是旋转对称的,这样就使得光纤的 optical 主轴变化很小,即 R-LPFG 的原始双折射比较小;又由于高频 CO₂ 激光脉冲写入 LPFG 折变主要发生在包层,在临近纤芯或者纤芯区域的折变可以小到 10⁻⁵ 量级,因此在分析双折射时可以忽略^[9],当在任何圆周方向施加横向负载时,压力都会使光纤发生形变,由形变带来的双折射变化几乎一样,因此这种旋转对称结构的 R-LPFG 各个方向受压时其 optical 主轴的变化也几乎一样,并且变化都不大,因此在一定压力范围内谐振波长漂移量都比较小,与自由 LPFG 受到相同横向负荷的状态相比,其漂移量一般都小于 0.5nm. 如果进一步完善折射率变化在 R-LPFG 包层轴向方向的分布均匀性,则可以进一步降低该谐振峰波长的方向相关性. 对于紫外曝光写入的 LPFG,其折射率变化主要发生在纤芯,由于纤芯直径很小,施加横向负载时,即使纤芯直径的细微变化也很容易引起弹光效应而使 optical 主轴旋转,从而引起有效折射率变化较大,导致谐振波长发生分裂,出现双峰现象^[10].

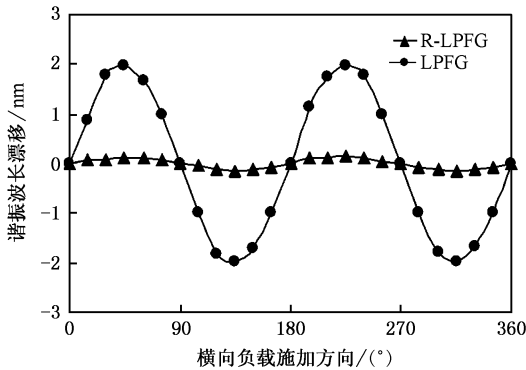


图 4 LPFG 和 R-LPFG 在不同圆周方向受到相同横向负载(60 g·mm⁻¹) 时对谐振波长漂移的关系

我们进一步测试了普通 LPFG 在谐振峰不敏感方向和 R-LPFG 在任意方向所具有的横向负荷实验特性. 实验结果如图 5 所示,由图可见,在 0—120 g·mm⁻¹ 的横向负荷范围内,普通 LPFG 和 R-LPFG 谐振峰幅度与横向负荷的大小呈良好的线性关系,但是 R-LPFG 具有更大的横向负荷灵敏度,其值可达

0.3748dB/g·mm⁻¹,是自由 LPFG 灵敏度的 9 倍左右^[7].

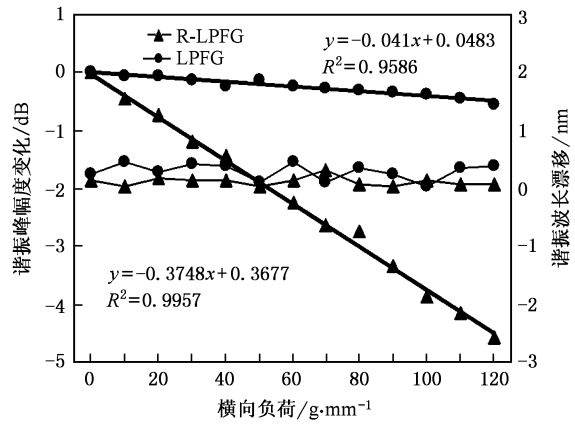


图 5 LPFG 谐振波长不敏感方向和 R-LPFG 任意方向谐振峰幅度和波长与横向负荷的关系

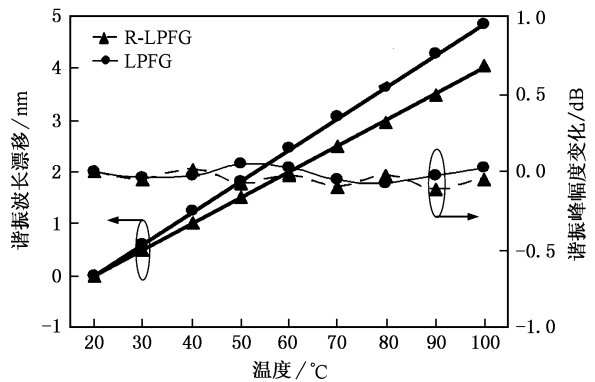


图 6 LPFG 和 R-LPFG 的温度响应

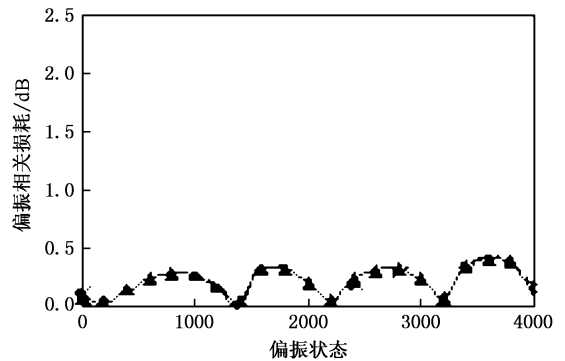


图 7 R-LPFG 的偏振相关损耗

图 6 给出了相同周期自由 LPFG 和 R-LPFG 对应谐振波长的温度响应实验结果,在 20℃—100℃ 的温度范围内,谐振峰波长漂移和温度的变化呈良

好的线性关系,LPFG 温度灵敏度约为 $0.05\text{nm}/^\circ\text{C}$,而 R-LPFG 由于在写入过程中因光纤的扭曲而引入了剪应力,所以其温度灵敏度比普通 LPFG 要略大一些,为 $0.06\text{nm}/^\circ\text{C}$. 随温度的变化,LPFG 和 R-LPFG 的谐振峰幅度变化都很小. 在具体应用中,可以通过选择温度比较敏感的光纤材料来制作 R-LPFG 从而得到较大温度灵敏度系数的 R-LPFG.

3. 动态增益平坦实验

从上面的分析和实验结果可以看出,相比普通 LPFG, R-LPFG 具有更大的横向负荷灵敏度,更小的谐振波长方向相关性和较大的温度灵敏度,因此通过动态调节 R-LPFG 任意方向所受的横向压力和所处环境的温度即可以分别调节它的谐振峰幅度和位置. 这也就达到了任意改变 R-LPFG 透射谱形状的目的. 这种 R-LPFG 可用作 EDFA 的动态增益均衡,并具有较大的动态幅度调节范围和更容易装配等优点.

实验测出 R-LPFG 偏振相关损耗的结果如图 7 所示,其值均小于 0.5dB ,因此可以用于实际光纤通信系统中掺铒光纤放大器的动态增益均衡器. 利用前面进行实验研究的 R-LPFG 和实验室已有的控温和横向负荷控制装置,我们针对 980nm 抽运的 C 波段 EDFA 进行了动态增益平坦实验,将 EDFA 的增益谱改变后(图 8(a)所示),通过控制 R-LPFG 的环境温度和所受的横向压力可得到图 8(b)所示的透射谱,经过平坦之后的 EDFA 增益谱如图 8(c)所示,可见在 32nm 范围内达到了小于 $\pm 0.5\text{dB}$ 的平坦度. 如果再次改变 EDFA 的增益谱,仍然可以通过控制 LPFG 的环境温度和所受的横向压力来调整 R-LPFG 的透射谱,让 R-LPFG 透射谱与 EDFA 增益谱相匹配,从而达到平坦 EDFA 增益谱的目的. 很明显,可先通过实时探测 EDFA 增益谱的变化来计算出 R-LPFG 需要得到的温度变化量和压力变化量,再通过控制装

置改变环境温度和其所受的压力,这样就可以实现 EDFA 的全自动动态增益均衡. 需要说明的是,目前在国内外通过快速而低成本的获取较宽的增益谱是非常困难的.

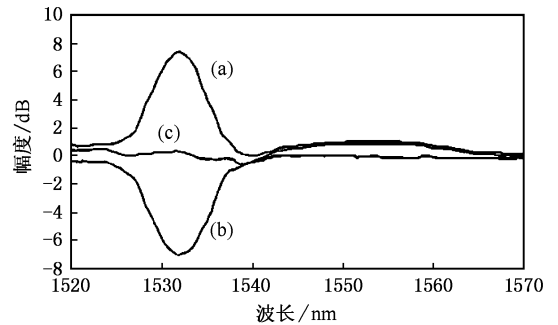


图 8 增益平坦过程 (a)变化后 EDFA 增益谱 (b)调整后 R-LPFG 的透射谱 (c)平坦后 EDFA 增益谱

4. 结 论

文中提出包层旋转折变型光纤光栅(R-LPFG)的概念,并利用高频 CO_2 激光脉冲写入法写出了该光栅. 理论和实验表明,该光栅谐振波长具有更高的温度灵敏度系数和对横向负荷更低的方向相关性,同时谐振峰幅度对横向负荷的灵敏度得到大幅度提高. 基于 R-LPFG 的横向负荷特性和温度特性,文中提出了一种利用 R-LPFG 实现 EDFA 增益谱动态均衡的新方法. R-LPFG 克服了普通 LPFG 谐振峰波长漂移具有强烈的方向相关性和谐振峰幅度横向负荷灵敏度比较低的缺点,为实现 EDFA 增益均衡的动态平坦提供了更大的动态调节范围和更容易的装配方法. 文中利用 R-LPFG 实现了 EDFA 在 C-波段 32nm 范围内小于 $\pm 0.5\text{dB}$ 的动态平坦度,可满足实际光通信系统的应用要求,因此 R-LPFG 在光通信系统的动态增益均衡中具有极大的潜在应用价值.

- [1] Maru K, Tanaka K, Chiba T, Nonen H, Uetsuka H 2004 *Journal of Lightwave Technology* **22** 1523
- [2] Suzuki K, Kitoh T, Suzuki S, Inoue Y, Hibino Y, Shibata T, Mori A, Shimizu M 2002 *Electronics Letters* **38** 1030
- [3] Barge M, Battarel D, de Bougrenet de la Tocnaye J L 2005 *Journal of Lightwave Technology* **23** 2531
- [4] Feced R, Alegria C, Zervas M, Lamming R I 1999 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **5** 1278

- [5] Wang Y P, Chen J P, Li X W *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4782 (in Chinese) [王义平、陈建平、李新碗等 2005 物理学报 **54** 4728]
- [6] Rao Y J, Zhu T, Ran Z L 2004 *Optics Communications* **229** 209
- [7] Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, Zhu T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1432 (in Chinese) [王义平、饶云江、冉曾令、朱 涛 2003 物理学报 **52** 1432]
- [8] Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, Zhu T 2001 *Asia-Pacific Optical*

and *Wireless Communications* 2001 , *Proc. SPIE* **4581** 327

Technology **20** 1463

[9] Dossou K , LaRochelle S , Fontaine M 2002 *Journal of Lightwave*

[10] Liu Y , Zhang L , Bennion I 1999 *Electronics Letters* **35** 661

All fiber dynamic gain equalizer based on a fiber grating with rotary refractive index change^{*}

Zhu Tao^{1,2)} Rao Yun-Jiang²⁾† Wang Ruo-Kun¹⁾ Wang Jiu-Ling¹⁾

1) Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems (Education Ministry of China) , Chongqing University , Chongqing 400044 , China)

2) Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technologies (Education Ministry of China) ,

University of Electronics Science & Technology of China , Chengdu 610054 , China)

(Received 28 November 2005 ; revised manuscript received 10 January 2006)

Abstract

An all-fiber dynamic gain equalizer for flattening Er-doped fiber amplifiers based on a long period fiber grating (LPFG) with rotary refractive index change induced by high-frequency CO₂ laser pulses is reported , for the first time to our knowledge. Experimental results show that its transverse load sensitivity is up to 0.37dB/(g · mm⁻¹) , which is 9 times higher than that of a normal LPFG induced by the same method. In addition , it is found that the strong orientation-dependence of the transverse load sensitivity of the normal LPFG reported previously has been weakened considerably. Therefore , such a dynamic gain equalizer based on the transverse load and temperature characteristics of this novel LPFG provides a much larger adjustable range and makes packaging of the gain equalizer much easier. A demonstration has been carried out to flatten an Er-doped fibre amplifier to ± 0.5dB over a 32nm bandwidth.

Keywords : optical communications , long-period fiber grating , dynamic gain equalizing , rotary refractive index change

PACC : 4280S , 4281W

^{*} Project supported by the Key Projects Program of Ministry of Education of China(Grant No. 104210) , the Key Project of Natural Science Foundation of Chongqing(Grant No. 8415) , the Key Project of Natural Science Foundation of China(Grant No. 60537040) and the Venture Fund of Excellent Doctor Thesis of Chongqing University.

† E-mail : yjrao@cqu.edu.cn