

文章编号: 0253-2239(2003)08-0970-4

一种新颖的长周期光纤光栅可调增益均衡器*

王义平 饶云江 冉曾令 朱 涛 曾祥楷 胡爱姿

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

摘要: 发现高频 CO₂ 激光脉冲写入的新型长周期光纤光栅的谐振波长对特定圆周方向的横向负载不敏感, 谐振峰幅值随横向负载而线性变化; 而且这种长周期光纤光栅的谐振波长随温度变化而线性变化, 谐振峰幅值对温度变化不敏感。由此设计而成的可调增益均衡器可实现谐振波长和幅值的动态独立调节, 能很好地满足均衡掺铒光纤放大器增益谱的需要。

关键词: 可调增益均衡器; 长周期光纤光栅; 光纤放大器; 温度; 横向负载

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

近年来, 随着光栅理论研究和写入技术的完善和成熟, 周期为几十到几百微米的长周期光纤光栅(Long-period fiber grating, LPFG)得到了人们越来越广泛的重视。由于长周期光纤光栅具有附加损耗小、无后向反射、不受电磁干扰、全兼容于光纤等优点, 并且是一种很好的带阻滤波器^[1], 因此在光纤通信领域得到了广泛应用。长周期光纤光栅在光纤通信中最令人瞩目的应用是作为掺铒光纤放大器(EDFA)的增益均衡器^[2,3], 然而实际的长周期光纤光栅一般不可能恰好满足均衡增益谱的需要, 并且掺铒光纤放大器的增益谱可能因外界条件的变化而变化, 因此通常需要对长周期光纤光栅的输出光谱进行动态调节以满足实际需要。近来, 人们已提出了多种调谐方法^[4,5], 然而用这些方法对长周期光纤光栅调谐时, 其谐振波长和幅值将同时发生变化, 即一个量的调节会影响另一个量, 因此很难使谐振波长和幅值同时满足需要, 所以寻找一种能对长周期光纤光栅的谐振波长和幅值进行独立调节以便同时满足掺铒光纤放大器增益均衡需要的器件就极为必要。

长周期光纤光栅的写入方法很多, 不同方法写入的长周期光纤光栅因其形成机理不同以致其横向负载、弯曲、扭曲、应变等特性可能不同^[6,7], 因此特定方法写入的长周期光纤光栅可能有特殊的应用。

本文发现高频 CO₂ 激光脉冲写入的新型长周期光纤光栅具有与紫外光写入的长周期光纤光栅不同的独特的性能——谐振波长对特定圆周方向的横向负载不敏感, 谐振峰幅值随横向负载而线性变化; 谐振波长随温度变化而线性变化, 谐振峰幅值对温度变化不敏感。

动态负载实验表明这种长周期光纤光栅的谐振峰幅值对横向负载的响应速度很快。由此本文提出了一种可实现谐振波长和幅值动态独立调节的可调增益均衡器, 其调节速度快, 方法简单易行。

2 实验和结果

采用如图 1 所示的实验装置测量高频 CO₂ 激光脉冲在氢载单模光纤中写入的长周期光纤光栅的横向负载特性(周期 $\Lambda = 450 \mu\text{m}$, 周期数 $N = 50$, 自由状态下谐振波长 1531.23 nm , 谐振峰幅值 -8.322 dB , 3 dB 带宽为 8 nm)。宽带光源作为输入, 用光谱分析仪(HP 86140A)测量光栅透射光谱的变化。长周期光纤光栅和同种类型的匹配光纤被

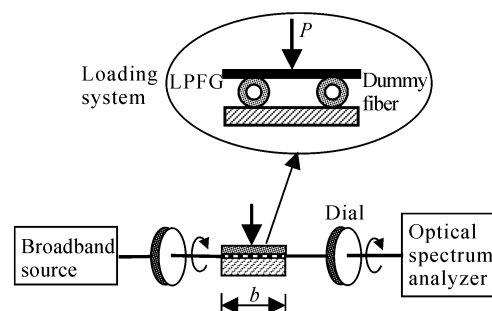


Fig. 1 Experimental set-up for load test of LPFG

* 国家杰出青年科学基金(60025515)资助课题。

E-mail: ypwang@china.com

收稿日期: 2002-07-03; 收到修改稿日期: 2002-08-19

平行地放置于底座和薄平板之间。实际施加在长周期光纤光栅上的横向负载为 $(P+G)/2b$, P 为施加的砝码重量, $G=150\text{ g}$ 为薄平板的重量, $b=20\text{ mm}$ 为被压的长周期光纤光栅的长度。压力每次增加 400 g , 总计施加 4800 g 的砝码。长周期光纤光栅两端的光纤分别位于左右两个转盘的轴线上, 转动转盘可以带动长周期光纤光栅沿光纤轴旋转以便测量不同圆周方向上的横向负载特性。

实验结果如图 2 和图 3 所示。

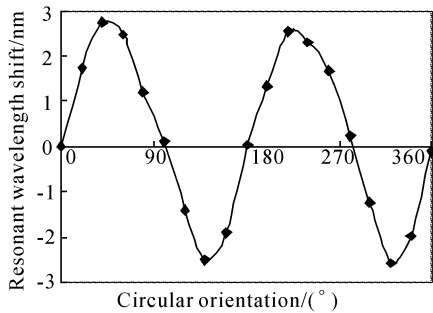


Fig. 2 Relationship between resonant wavelength shift and circular orientation while load on LPFG is $80\text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$

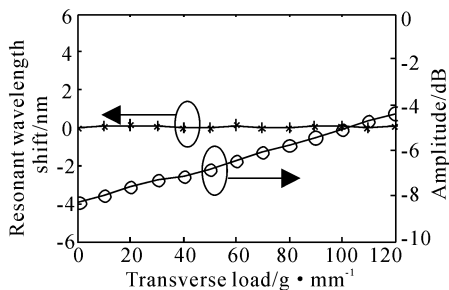


Fig. 3 Transverse-load characteristics of LPFG at the load-insensitive orientation

图 2 表明这种新颖的长周期光纤光栅的谐振波长对横向负载的灵敏度具有很强的方向相关性。在不同圆周方向上, 虽然对长周期光纤光栅施以同等的负载 ($80\text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$) 但其谐振波长的变化量不同; 在圆周 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内存在一个谐振波长发生‘红’移最敏感的方向和发生‘蓝’移最敏感的方向, 以及两个对横向负载不敏感的方向。图中横轴表示圆周的不同方向, 即横向负载的方向, 纵轴表示谐振波长的漂移量。此实验还发现虽然长周期光纤光栅谐振波长对横向负载的灵敏度具有明显的方向相关性, 但其谐振峰幅值对横向负载的灵敏度却相差不大, 即方向相关性较弱。图 3 表示在长周期光纤光栅的谐振波长对横向负载不敏感的方向上 (对应图 2 中的 0° 或 100°), 谐振波长和共振峰幅值与横向负载的关系。

由图 3 可知, 这种长周期光纤光栅的谐振波长对特定圆周方向的横向负载不敏感 (最大变化仅为 $\pm 0.1\text{ nm}$), 而谐振峰幅值随横向负载的增加而线性地减小, 灵敏度约为 $0.03\text{ dB} \cdot (\text{g} \cdot \text{mm}^{-1})^{-1}$ 。

在长周期光纤光栅静态横向负载实验的基础上利用压电陶瓷做了动态负载实验。压电陶瓷的一个面固定, 另一个面紧贴长周期光纤光栅。改变压电陶瓷的输入电压使其产生不同的变形量从而对长周期光纤光栅施加不同的横向负载。改变压电陶瓷输入电压的频率可以对长周期光纤光栅施加不同频率的动态横向负载。实验结果表明当输入电压的频率高达 4 kHz 时长周期光纤光栅谐振峰幅值仍与输入电压呈同步变化, 几乎没有延迟, 而且幅值变化的灵敏度与静态实验时相同。

温度实验表明这种长周期光纤光栅的谐振波长随温度变化而线性漂移, 其灵敏度为 $-0.33\text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 远大于其它方法写入的长周期光纤光栅的温度灵敏度^[8]; 而谐振峰幅值几乎不变, 最大变化仅为 $\pm 0.1\text{ dB}$, 如图 4 所示。图 5(a) 表示在谐振波长对横向负载最不敏感的方向上, 随着负载量的增加, 长周期光纤光栅的输出光谱的变化, 图中的三条谱线分别表示长周期光纤光栅处于自由状态、负载为 $60\text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、负载为 $120\text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时的输出光谱。图 5(b) 表示温度变化时长周期光纤光栅输出光谱的变化, 图中曲线从左到右依次表示温度分别为 120°C , 100°C , ..., -40°C 时的输出光谱。

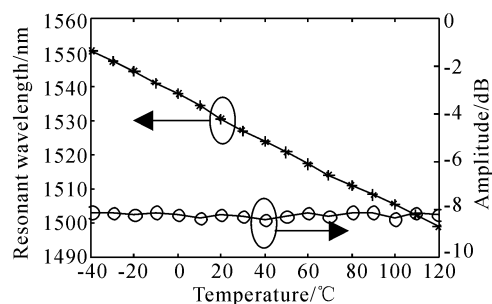


Fig. 4 Temperature characteristics of LPFG

3 讨 论

我们研究的长周期光纤光栅是用聚焦的高频 CO_2 激光脉冲在单模光纤中写入的^[7]。单侧入射的 CO_2 激光, 在光纤表面同时产生反射和透射。由于二氧化硅对 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 波长处的激光吸收较强, 使得透射光的能量沿激光入射方向逐渐减弱, 以致在光纤面向激光入射的一侧激光能量较强, 而在背向入

射方向的一侧激光的能量较弱,从而导致在光纤横截面上因 CO_2 激光加热而引起的折射率调制不均匀^[6]。在光纤面向激光入射的一侧,激光能量较强,温度较高,纤芯中的残余应力释放较多,因此折射率增加较大;而在光纤背向激光入射方向的一侧,激光能量较弱,温度较低,纤芯中的残余应力释放较少,因此折射率增加较小。长周期光纤光栅横截面折射率分布不均匀性的外在表现就是其谐振波长对横向负载的灵敏度具有方向相关性,其机理有待进一步研究。实验中当把负载增加到 8000 g 也未发现紫外光写入的长周期光纤光栅横向负载实验中随着负载量的增加原始损耗峰分裂为双峰的现象^[9],这可能与我们的长周期光纤光栅的横截面折射率分布不均匀有关。

根据这种新型长周期光纤光栅的谐振波长对特定圆周方向上的横向负载不敏感而谐振峰幅值随横向负载的增加而线性减小以及谐振波长随温度变化线性漂移而谐振峰幅值对温度变化不敏感的独特特性,可以实现对长周期光纤光栅的谐振波长和谐振

峰幅值的独立调节,从而形成一种能同时满足谐振波长和幅值需要的可调增益均衡器。调节方法如下:首先在谐振波长对横向负载不敏感的圆周方向上对长周期光纤光栅施压使谐振峰幅值满足需要;然后调节温度使谐振波长也满足需要,从而使长周期光纤光栅的谐振波长和幅值都满足增益均衡的需要。由图 5 可知这种长周期光纤光栅横向负载前后输出光谱的损耗和 3 dB 带宽无明显变化而且温度调节只是使输出光谱发生平移而形状几乎不变,因此通过这种方法对由高频 CO_2 激光脉冲写入的长周期光纤光栅形成的增益均衡器进行分步独立调节是可行的。为了使长周期光纤光栅的温度不受外界环境变化的影响而只由温度调节装置调节,温度调节装置应具有恒温作用,即温度调节装置和恒温装置合为一体。一旦调节温度使谐振波长满足需要就使长周期光纤光栅的温度保持恒定。动态负载实验表明长周期光纤光栅谐振峰幅值对负载的响应极快,因此用这种方法可实现对长周期光纤光栅谐振峰幅值的快速动态调节。

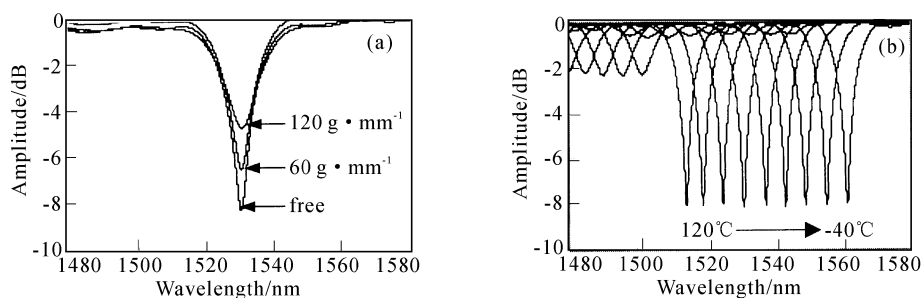


Fig. 5 Transmission spectra of LPFG while (a) transverse-load at load-insensitive orientation is free, $60 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$, $120 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$, respectively, (b) temperature is $120 \text{ }^\circ\text{C}$, $100 \text{ }^\circ\text{C}$, ..., $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, respectively

结论 高频 CO_2 激光脉冲写入的新型长周期光纤光栅的谐振波长对横向负载的灵敏度具有很强的方向相关性,即在圆周的不同方向对长周期光纤光栅施加横向负载其谐振波长对负载的灵敏度不同,在有的圆周方向谐振波长发生‘红’移,而在有的圆周方向却发生‘蓝’移,并且在特定的方向上对横向负载不敏感。在谐振波长对横向负载比较敏感的圆周方向上,谐振波长随负载量的变化而线性漂移。在圆周 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内有一个谐振波长对横向负载发生‘红’移最敏感的方向 $[+0.03 \text{ nm} \cdot (\text{g} \cdot \text{mm}^{-1})^{-1}]$ 和一个发生‘蓝’移最敏感的方向 $[-0.03 \text{ nm} \cdot (\text{g} \cdot \text{mm}^{-1})^{-1}]$ 以及两个对横向负载不敏感的方向(最大变化仅为 $\pm 0.1 \text{ nm}$)。在圆周的各个方向上,谐振峰幅值都随着负载量的增加而线性减小且其灵敏度几乎相同,约为

$0.03 \text{ dB} \cdot (\text{g} \cdot \text{mm}^{-1})^{-1}$ 。这种长周期光纤光栅的谐振波长对温度非常敏感,灵敏度高达 $-0.33 \text{ nm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;而谐振峰幅值对温度的变化不敏感,在 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内谐振峰幅值最大变化仅为 $\pm 0.1 \text{ dB}$,即温度变化只是使输出光谱发生平移而形状几乎不变。根据这种新型长周期光纤光栅具有的这些独特特性设计而成的动态可调增益均衡器可实现谐振波长和幅值的快速独立调节,方法简单易行,能很好地满足均衡掺铒光纤放大器增益谱的需要且动态调节范围大,从而在波分复用系统中有望获得广泛应用。随着研究的深入,这种新型长周期光纤光栅表现出来的独特的横向负载和温度特性必将在光纤通信和传感领域中有着重要应用。

参 考 文 献

- 1 Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1):58~65
- 2 Vengsarkar A M, Pedrazzani J R, Judkins J B *et al.*. Long-period fiber-grating-based gain equalizers. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(5):336~338
- 3 Rao Y J, Zhu T, Ran Z L *et al.*. Applications of CO₂-induced long-period fiber gratings in Er-doped fiber amplifiers. *Proc. SPIE*, 2001, **4581**:319~326
- 4 Costantini D M, Muller C A P, Vasiliev S A *et al.*. Tunable loss filter based on metal-coated long-period fiber grating. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(11):1458~1460
- 5 Sohn I, Kim J, Lee N *et al.*. Tunable gain-flattening filter using long-period fiber grating based on periodic core deformation. *Proc. SPIE*, 2001, **4594**:110~117
- 6 VanWiggeren G D, Gaylord T K, Davis D D *et al.*. Axial rotation dependence of resonances in curved CO₂-laser-induced long-period fibre gratings. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(16):1354~1355
- 7 Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L *et al.*. Characteristics of novel long-period fiber gratings written by focused high-frequency CO₂ laser pulses. *Asia-Pacific Optical and Wireless Communications 2001, Proc. SPIE*, 2001, **4581**:327~333
- 8 Bhatia V, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9):692~694
- 9 Liu Y, Zhang L, Bennion I. Fibre optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fibre. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(8):661~662

A Novel Tunable Gain Equalizer Based on a Long-Period Fiber Grating

Wang Yiping Rao Yunjiang Ran Zengling Zhu Tao Zeng Xiangkai Hu Aizi

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

(Received 3 July 2002; revised 19 August 2002)

Abstract: A novel tunable gain equalizer based on the long period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses was demonstrated. The resonant wavelength and resonant peak amplitude of the gain equalizer can be tuned by means of adjusting the temperature and transverse load independently. In addition, the wavelength and the peak amplitude have a good linearity with temperature and transverse load respectively, showing that this tunable equalizer is a practical approach to realize dynamic gain equalization in Erbium doped fiber amplifier systems.

Key words: tunable gain equalizer; long-period fiber grating; optical fiber amplifier; temperature; transverse loading