

基于新型长周期光纤光栅的低成本应变传感系统*

李景义 饶云江 牛永昌 聂玲

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

摘要 首次利用高频 CO₂ 激光脉冲写入的长周期光纤光栅的边缘滤波效应, 实现了静态与动态应变的测量. 使用单波长输入光, 光信号经过长周期光纤光栅衰减后进入光电探测器, 最终输出电压信号. 当对光栅施加应变时, 其中心波长将发生漂移, 由于光栅阻带的边缘滤波效应, 光电探测器接收的光强会随之变化, 测量其输出的电信号, 可以得出光栅发生的应变大小与频率. 对于静态应变测量, 可分辨的最小应变小于 10 $\mu\epsilon$, 精度为 $\pm 10 \mu\epsilon$; 在动态实验中, 发现光栅能够响应 5 kHz 以上的动态应变. 这种传感系统结构简单, 成本低, 响应快.

关键词 长周期光纤光栅; 边缘滤波器; 光纤传感器; 应变传感器

中图分类号 TB1 **文献标识码** A

0 引言

近年来, 光纤光栅传感技术^[1-3]有了长足的进步, 在这个领域逐步涌现出很多种新型传感器系统. 其中基于长周期光纤光栅 (LPFG: long-period fiber grating) 的传感器因为用途广泛, 所以特别引人注目. LPFG 无后向反射, 谐振波长因应变、温度、浓度、压力等外界环境的变化而发生漂移, 因此, 可以用来做传感元件检测此类环境参数的变化^[4-8]. 已有的实验结果表明, 当对光栅施加轴向应力时, LPFG 的中心波长连同整个带阻区域将发生定向漂移, 在一定的应变范围内, 谐振波长位移量的大小与应变成线性关系. 可以利用这一特性在水坝、桥梁等大型建筑工程的健康检测中测量静态或者动态应变. 在已有的利用光纤光栅进行应变测量的报道中, 大多是使用宽带光源做输入, 光敏光纤制作的光栅做传感, 利用光谱仪直接观测波长漂移位移量大小, 成本较高.

本文首次报道了一种基于新型 LPFG 的低成本应变传感器. 这种传感器系统利用 LPFG 的边缘滤波效应^[9-11], 使用单波长输入光, LPFG 做探测及解调, 最后经过光电转换采集电压信号, 从而实现应变测量. 实验中使用的 LPFG 是用高频 CO₂ 激光脉冲在普通光纤中曝光生成的, 这种新型的光纤光栅具有优良的应变特性^[5]. 在制作过程中, 不需要使用掩模板, 因此可以灵活改变光栅周期, 制作简单; 不需要用价格昂贵的光敏光纤. 此外, 传感系统的输入可以选择一般的 DFB 激光器, 接收信号端可以使用普通的光电探测器, 因此整个系统的成本比较低.

1 静态轴向应变实验和结果

实验中使用的 LPFG 传输谱线如图 1, 中心波长为 1548.1 nm, 幅值为 -21.52 dB, 3 dB 带宽大约为

8 nm, 谱线具有较好的斜率. 使用的单波长输入光光强为 1 dbm, 波长为 1550 nm, 刚好处于光栅的带阻区域内. 如图 2, 由于边缘滤波效应, 对 LPFG 施加应变, 其阻带将向短波方向发生定向漂移, 输入光波长位置的光栅衰减率会随之降低, 从而导致光电探测器接收到的光强发生变化. 实验系统如图 3, 使用单波长光源做输入, 光先通过 LPFG, 又经由光电探测器, 变成电信号后直接用电压表进行测量. 实验过程中, 将 LPFG 的一端固定, 拉紧后将另外一端固定在微动平台上, 两个固定点的距离设置为 500 mm, 通过调整微动平台来给光栅施加应变. 旋

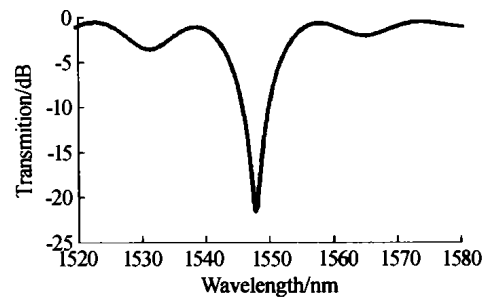


图 1 长周期光纤光栅谱图

Fig. 1 The spectra of the LPFG

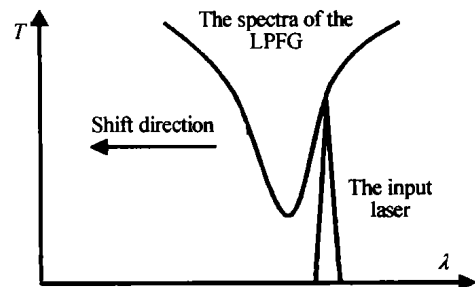


图 2 边缘滤波效应示意图

Fig. 2 The sketch graph of edge filter

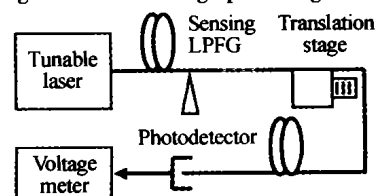


图 3 静态轴向应变实验装置

Fig. 3 Experimental system for static strain response of LPFG

*国家杰出青年科学基金(批准号:60025515)资助
Tel:023-65105543 Email:shshjk@sohu.com
收稿日期:2004-01-19

转微动台的螺旋竿,每增加 10 με(20 με)记录一次数据,共记录 50 组.

将应变变量与探测所得的电压值绘制成关系曲线,如图 4,通过二次曲线拟合的方式可以得到

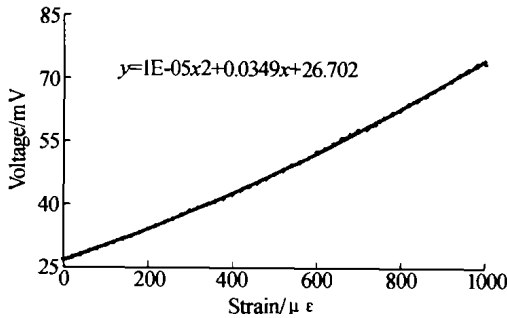


图 4 传感系统的静态轴向应变响应曲线
Fig. 4 The static strain response of the system

$$y = 10^{-5}x^2 + 0.0349x + 26.702 \quad (1)$$

由图 4 中数据可以知道,此传感系统的精度大约为 ±5 με,最小可以分辨 10 με. 在实际应用此应变传感方案的过程中可以将测得的电压数值 y 代入方程,求解相应的应变值 x.

2 动态轴向应变实验和结果

将静态轴向应变实验系统中的微动平台换成压电陶瓷,光栅一端固定,拉紧,给予一定的预应变之后,将另外一端固定在压电陶瓷的活动面 A. 对压电陶瓷施加交流电压,A 面将拉动光栅伸缩,给光栅带来动态的轴向应力,从而实现光栅的动态轴向应变,实验系统如图 5.

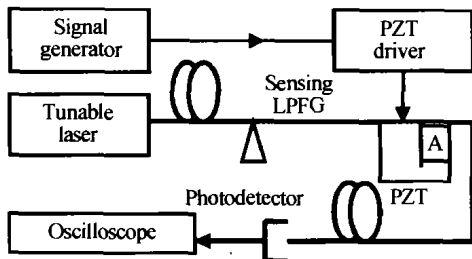


图 5 光栅动态轴向应变实验装置
Fig. 5 Experimental system for the dynamic strain response of LPFG

用示波器采集此应变传感器输出的电信号. 当施加在压电陶瓷上面的交流电压为 1.8 kHz 与 5.5 kHz 时,示波器上输出的图样分别为图 6、图 7. 多次改变

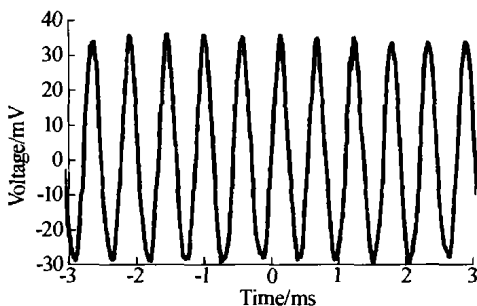


图 6 1.8 kHz 动态输出信号
Fig. 6 The output signal of 1.8 kHz

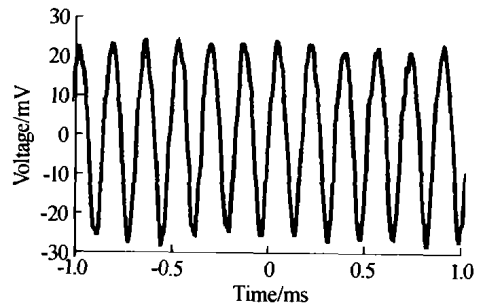


图 7 5.5 kHz 动态输出信号
Fig. 7 The output signal of 5.5 kHz

信号发生器的输出频率,传感系统最终得到的输出信号频率都与其相等.

3 讨论

在本实验系统中,直接利用 LPFG 做传感,并利用光栅的边缘滤波效应来解调探测信号,由于最终是探测光强信号,一旦光路中某处发生扰动,使其整体损耗数值发生变化,就会影响最终的测量精度,因此在实际应用中应实时检测光路的损耗值. 可以选用光栅带阻区域以外的某个波长的单波长光源 Laser2 同时做输入,以便参考. 对实验中的光栅而言,可以选用波长为 1310 nm 的激光做参考,波长为 1550 nm 的激光做测量,用 WDM 将两路光汇合,共同经过整个光路,最终又用 WDM 将其分开,分别探测光强,比较之后得出由应变带来的光强变化. 系统框图如图 8. 在光栅附近的光路中加一个衰减器,

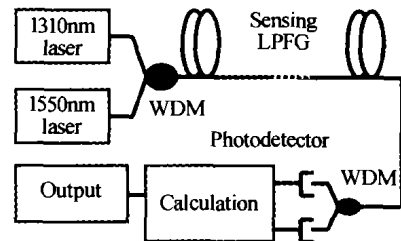


图 8 实用系统
Fig. 8 The practical system

进行实验测试,预先存储探测到的 1310 nm 支路电压 $D_{01} = 130 \text{ mV}$,1550 nm 支路电压 $D_{02} = 30.4 \text{ mV}$,调节衰减器,利用 1310 nm 支路实时探测到的电压 D_1 ,1550 nm 支路实时探测到的电压 D_2 ,求 D_{02} 的计算值 D'_{02}

$$D'_{02} = D_2 D_{01} / D_1 \quad (2)$$

数据如表 1.

表 1 1550 nm 支路探测电压的计算值

D_1/mV	110.4	80.6	54.2	41.8
D_2/mV	25.81	18.85	12.68	9.77
D'_{02}/mV	30.39	30.4	30.41	30.39

由列表中数据可知,使用计算所得的电压数值 D'_{02} ,与 D_{02} 比较,误差大约为 ±0.01 mV,对应的应变误差不足 ±0.5 με,满足测量精度.

此系统用来做实际的静态应变测量时还要考虑温度漂移的问题,这还需要运用一些方法进行补偿,比如附加一个专门检测温度的传感器等等.

当用来做动态测量检测应变频率时,由于是利用光强进行相对检测,以上的两个问题都不会影响检测结果.

4 结论

当对 LPFG 施加应变时,其中心波长连同整个阻带将向短波方向移动,因此可以使用波长在其阻带范围内的单波长光源做输入,利用光栅的边缘滤波效应,通过探测光强来实现应变测量. 基于上述原理,本文首次报道了一种使用新型 LPFG 的低成本应变传感器. 该传感器使用单波长光源做输入,高频 CO₂ 激光脉冲写入的长周期光纤光栅做传感及解调元件,最后用光电探测器接收信号. 此方案突出的优点是构造简单,成本低,响应快. 在实际的实验测试中,利用此传感系统成功的实现了光栅的静态应变测量,发现输出电压值与静态应变值成二次关系. 在给光栅施加一定的预应变后,可用来检测动态应变. 实验中多次改变信号发生器提供的交流信号频率,最终得到的传感器输出频率都与其相等,由此可得,系统输出的交流电压信号能够真实的反映光栅承受的动态应变频率.

相信这种构造简单、低成本的传感器会有广阔的应用前景.

参考文献

1 胡爱姿,饶云江,聂知理,等. 腐蚀后的新型长周期光纤

- 光栅特性研究. 光子学报,2004,33(8):916~919
Hu A Z, Rao Y J, Nie Z L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(8):916~919
- 2 詹亚歌,陆青,向世清,等. 优化光纤光栅传感器匹配光栅解调方法的研究. 光子学报,2004,33(6):711~715
Zhan Y G, Lu Q, Xiang S Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(6):711~715
- 3 傅海威,乔学光,傅君眉. 基于平面膜片的光纤光栅传感研究. 光子学报,2004,33(9):1119~1122
Fu H W, Qiao X G, Fu J M. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(9):1119~1122
- 4 Bhatia V, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors. *Opt Lett*, 1996,21(9):692~694
- 5 Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, et al. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses. *J of Lightwave Technology*, 2003,21(5):1320~1323
- 6 Liu Y, Zhang L, Whllams J A R, et al. Optical bend sensor based on measurement of resonance mode splitting of long-period fiber grating. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2000,12(5):531~533
- 7 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. *Asia-Pacific Optical and Wireless Communications 2001, Proc SPIE*, 2001,4581:327~333
- 8 Patrick H J, William G M, Kersey A D, et al. Hybrid fiber bragg grating/long period fiber grating sensor for stain/temperature discrimination. *Photonics Technology Letters*, 1996,8(9):1223~1225
- 9 Melle S M, Liu K, Measures R M. A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors. *IEEE Photon Techno Lett*, 1992,4(5):516
- 10 Liu Y, Zhang L, Bennion I. Arbitrary spectral response fibre edge filters based on tilted chirped grating structures. *CLEO '99, Lasers and Electro-Optics*, 1999:297
- 11 Cooper D J F, Smith P W E. Simple and highly sensitive method for wavelength measurement of low-power time-multiplexed signals using optical amplifiers. *Lightwave Technology*, 2003,21(7):1612~1620

A Strain Sensing System Based on the Novel Long-period Fiber Grating

Li Jingyi, Rao Yunjiang

Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044

Received date:2004-01-19

Abstract Based on the effect of edge-filter, it is for the first time that a novel long-period fiber grating is used as sensor to measure static and dynamic strain. The input signal from a light source of single wavelength is attenuated by the long-period fiber grating, and then received by a photodetector. The loss band of the LPFG will shift in the direction to shorter wavelength when the grating is strained. Due to the effect of edge-filter, the light intensity received by the photodetector will change in response. As a result, the electrical output of the photodetector can be used to reflect the strain forced on the grating. In the static measurement, the result shows that the relation between the electrical output of the sensor and the strain forms a conic. The resolution of this sensing system is better than 10 $\mu\epsilon$, and the error is about $\pm 10 \mu\epsilon$. This system can response dynamic strain over 5 kHz too. This sensor system is low-cost and fast.

Keywords Long-period fiber grating; Edge filter; Fiber sensor; Strain sensor

Li Jingyi achieved his bachelor degree from Optoelectronic Engineering Department of Chongqing University in 2002, now he is pursuing master degree in the optical fiber sensing field at the same academy. His research is focused on the novel sensing technology.

