

应用平衡双光纤光栅动态解调技术测量应力的研究

励强华* 李俊庆 李淳飞

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

摘要: 报道了一种基于解调技术使用双光纤光栅测量张力的方法。在外界拉力下一个光纤布拉格光栅反射波长的漂移被转变成从另一个被压电陶瓷片调制的光栅反射的光脉冲间隔的变化。实验表明,当测量一个 40 N 以内的力时,测量精度可达到 2.5 mN。

关键词: 光纤光栅; 传感器; 动态解调; 压电陶瓷调制

中图分类号: TN25 文献标识码: A

1 引 言

光纤光栅在光纤通信及光纤传感领域中的应用越来越引起人们的重视。裸露的光栅,其物理特性如光栅常量会随外界环境发生变化,该特性可被用以构成各种各样的光纤光栅传感器^[1,2],当其感受的应力、温度、压力、电磁场、折射率、转动量等变化时,光栅的反射谱峰位置发生变化。利用光栅测量方法多种多样,如可将光纤光栅构成马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪来测量温度^[3],也可利用压电陶瓷(PZT)调制光纤光栅常量以测量外界物理特性变化^[4]。可使用一些调制方法,使光纤光栅光谱反射峰移动,得到可调谐滤波,如可用悬臂梁的方法拉伸光栅^[5],或采用非对称弯板方法^[6]等。值得一提的是,上述方法都必须使用宽带光源及昂贵的光谱分析仪对反射光的光谱进行测量。在检测光纤光栅波长移动的技术中,有多个报道涉及滤波调谐技术,如用法布里-珀罗滤波器对光纤光栅的反射波进行滤波调谐^[7,8],用多个光纤光栅波长匹配进行滤波调谐等等^[9~11]。而应用动态调制的方法周期性拉伸光纤光栅,造成光纤光栅反射谱峰的周期移动,亦可用作传感方法^[12,13],本文应用的也是该动态调制方法。

本文提出了一个通过测量时序脉冲间隔变化测量出外应力的原理方法,用实验验证了该方法的可靠性,并分析了实验的测量精度。同时讨论了该传感原理的优越性和潜在的应用前景。

2 基本原理

实验装置如图 1 所示。作为传感光栅,光栅 FBG₁ 反射从宽带光源(BBS)经过隔离器 Iso 发出的光,形成的窄带反射光经循环器 Circ₁ 和 Circ₂ 入射到光栅 FBG₂ 中。理想情况下,当入射光波长与光栅 FBG₂ 的反射波长完全相符时,反射光达到最大值,经循环器 Circ₂ 后,光电探测器 PD 接收最强;当部分相符时,光被部分反射;完全不相符时,没有反射。在交变电压调制下,PZT 可周期性拉伸光栅 FBG₂,使得该光栅反射波长位置成周期变化,因此在探测器 PD 上将形成脉冲序列。当被测应力加在光栅 FBG₁ 上时,光栅 FBG₁ 的反射光波长产生漂移,两光栅反射光谱反射峰相对位置发生移动,进而影响经光栅 FBG₂ 反射形成的脉冲,如形状、脉冲间隔等。光电探测器 PD 转化的电信号以及电控制器(EC)产生的施加在 PZT 上的调制信号都可由示波器(Oscilloscope)显示。可由示波器得到(脉冲)信号的时间间隔的变化得出被测应力值。

两个参量完全相同的单模光纤光栅,当受温度和应力同时作用时,其反射波长 λ 将发生漂移,漂移量 $\Delta\lambda$ 可由下列关系式描述^[13]:

$$\Delta\lambda/\lambda = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 + p_e)\epsilon, \quad (1)$$

式中 ϵ 为轴向应变, ΔT 为温度差, p_e 为有效弹光系数, α 和 ξ 分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。在光栅 1 上施加静态(或准静态)张力 f ,其在光纤光栅上产生的应变为

$$\epsilon_1 = k_1 f; \quad (2)$$

$k_1 = (Cs)^{-1}$ 为弹性系数,其中 C 为弹性模量, s 为光纤横断面面积。光栅 2 受 PZT 周期调制,其感受的应变变化为

* 通讯地址: 哈尔滨师范大学物理系, 150080; E-mail: lqh0118@public.hr.hl.cn

收稿日期: 2002-08-05; 收到修改稿日期: 2002-10-03

$$\epsilon_2 = k_2 V(1 + \sin \omega t), \quad (3)$$

k_2 为与压电陶瓷的压电系数和拉伸结构有关的常量, V 为加在 PZT 上的电压的幅值, ω 为调制电压的角频率。在假定两个光纤光栅受温度影响完全相同且波长漂移不大的情况下, 初始波长同为 λ 的两光

纤光栅反射波长变化的差可写为

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 =$$

$$(1 - p_e) \cdot (k_2 V \sin \omega t + k_2 V - k_1 f) \cdot \lambda, \quad (4)$$

λ_1, λ_2 为两光纤光栅变化后的反射波长。

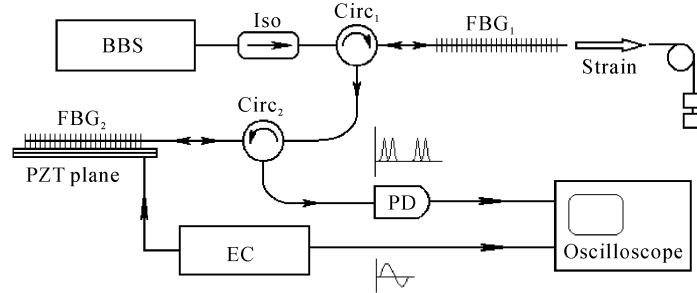


Fig. 1 Experimental setup

可以认为两光纤光栅的反射光强随波长的变化是高斯分布的^[14~16]。其反射率可以写成如下函数形式:

$$R_{1,2}(\lambda) = R_0 \exp \left\{ - \left[4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{1,2})^2}{\Delta\sigma^2} \right] \right\}, \quad (5)$$

其中 R_0 为光纤光栅的峰值反射率, $\Delta\sigma$ 为光纤光栅反射峰的半峰全宽。光纤光栅的反射光强随波长的

分布为

$$I(\lambda) = I_0 \exp \left\{ - \left[4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{1,2})^2}{\Delta\sigma^2} \right] \right\}, \quad (6)$$

其中, I_0 为反射峰值光强。最终, 光电探测器 PD 接受到的激光光强是两个光纤光栅两次反射的结果。光强功率值 P 为对 $I(\lambda) \cdot R_2(\lambda)$ 在频域上的积分:

$$P_R = \int_{-\infty}^{\infty} I(\lambda) \cdot R_2(\lambda) d\lambda = I_0 R_0 \frac{\sqrt{\pi}}{2 \sqrt{2 \ln 2}} \Delta\sigma \exp \left[- 2 \ln 2 \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{\Delta\sigma^2} \right], \quad (7)$$

将(4)式代入(7)式中得到

$$P_R = P_0 \Delta\sigma \exp \left[- 2 \ln 2 (1 - p_e)^2 \frac{(k_2 V \sin \omega t + k_2 V - k_1 f)^2}{\Delta\sigma^2} \lambda^2 \right]. \quad (8)$$

模拟结果显示, 由于 FBG_2 上的周期调制, P_R 信号周期仍是 FBG_2 调制周期, 信号在时间轴上将呈现双脉冲型周期变化(如图 2 所示), 其间隔会

随第一个光栅上施加张力的不同而变化。通过(8)式可计算出张力 f 与一个周期内两次光脉冲的时间间隔 τ 的关系:

$$f = \frac{k_2 V}{k_1} \left[1 - \cos \left(\frac{1}{2} \omega \tau \right) \right]. \quad (9)$$

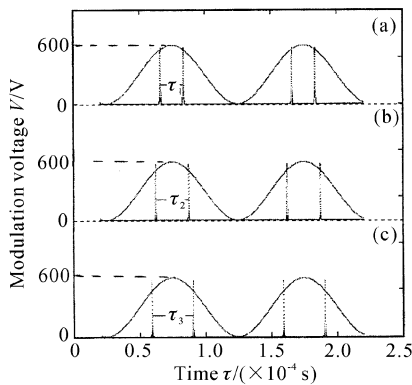


Fig. 2 The calculated distribution of strain sensor with PZT modulation

3 实验结果及分析

实验中宽带光源中心波长为 1545 nm, 谱线平坦区间为 1530~1560 nm, 满足了检测光纤光栅波长移动的要求。光纤光栅的初始反射波长(即不加应力时的波长)为 1546.71 nm, 线宽 0.24 nm, 反射率 90%。实验测得当外加拉力为 6 N 时, 反射波长移到了 1551.75 nm, 线宽为 0.28 nm。和初始值相比, 波长偏移了 5.04 nm, 线宽增大 0.04 nm。以此求得

$$k_1 = 2.45 \times 10^{-3} \text{ N}^{-1}, \quad k_2 = 9.8 \times 10^{-5} \text{ V}^{-1}.$$

实验中,在 FBG_2 上的调制电压最大值 V 为 600 V,最大调制频率为 10 kHz。当在光纤光栅 1 上施加拉力时,示波器上显示光脉冲时间间隔发生明显的变化(如图 3 所示)。可用砝码作为定标标准计量加在光纤光栅 1 上的拉力 f 。改变砝码重量,可得出实

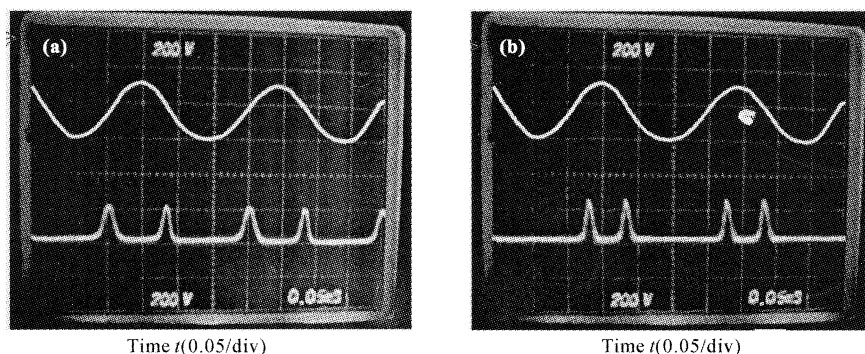


Fig. 3 The photograph of the result curve shown on oscilloscope

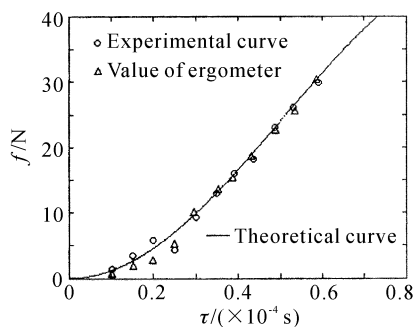


Fig. 4 Relationship between the variation of the time and force

实验的测量精度主要取决于示波器的读数精度、光脉冲时间扫描宽度、光栅 FBG_1 反射波长的中心位置以及光栅 FBG_2 的扫描范围。在光脉冲时间扫描宽度很小时,我们可以仅考虑示波器的读数精度对测量结果的影响。由(9)式得到仅考虑脉冲时间读数误差时的误差传递关系为

$$\Delta f = -\frac{k_2 V \omega}{2k_1} \sin\left(\frac{1}{2}\omega\tau\right) \Delta\tau. \quad (10)$$

由(10)式可计算出,当示波器选用 0.02 μs 档位时,该方法的测量误差至少为 2.0 mN,综合考虑其它造成误差的因素,可估计得此方法的拉力测量精度为 2.5 mN。光脉冲时间扫描宽度大于示波器读数精度时必须用脉冲的半峰全宽 $\Delta\tau$ 计算拉力的偏差。它可由(8)式导出为

$$\Delta\tau = \frac{\sqrt{2}\Delta\sigma}{\lambda\omega(1-p_c)\sqrt{k_1 f(2k_2 V - k_1 f)}}. \quad (11)$$

在同一张力下,不同的电压对应光脉冲半峰全宽不同,差异较大。图 5 给出了 PZT 上加不同电压值

验定标曲线(如图 4 所示)。同时从示波器上测量出不同拉力时的脉冲间隔,计算出拉力值。经过实验分析在 0~40 N 的范围内,两种结果都与直接算得的理论曲线吻合得很好。因此我们完全可以通过测量脉冲间隔 $\Delta\tau$ 间接而又准确地测量外加拉力 f 。

时,半峰全宽与外加拉力之间的关系。经(11)式计算得, $V > 320$ V 且外拉力为 14 N 时光脉冲半峰全宽小于 0.5 μs 。

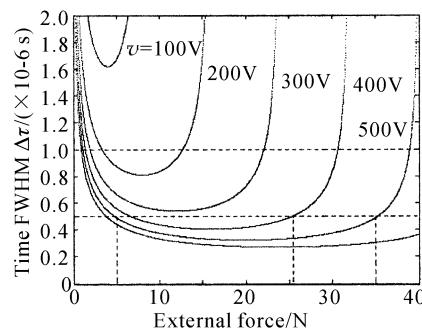


Fig. 5 The curve of the time FWHM $\Delta\tau$ vs external force in different voltage

外拉力超过 40 N 时,光纤光栅在强外力作用下拉伸光栅常量产生非线性变化,实验结果出现明显偏差。因此,本实验的测量范围在 0~40 N 之间。

该系统的传感灵敏度是指拉力变化时对应的光脉冲时间间隔变化值。由(10)式分析可得传感灵敏度为

$$\frac{d\tau}{df} = \frac{2k_1}{\omega} \frac{1}{\sqrt{k_1 f(2k_2 V - k_1 f)}}. \quad (12)$$

(12)式与(11)式相比可知增大系统的灵敏度会降低测量的精确度。因此,在保证最大测量精度的前提下系统的灵敏度为 $d\tau/df = 2/\omega f$,取外力为 20 N 时,系统传感灵敏度为 10^{-5} s/N。

4 小结与讨论

该文提出了基于 PZT 解调技术,使用双光纤光

栅实现测量外应力的方法。测量原理的基本点在于,它将在外界拉力下一个光纤布拉格光栅反射波长的漂移转变成从另一个被压电陶瓷片调制的光栅反射的光脉冲间隔的变化。测量一个 40 N 以内的张力,可估计到该方法给出的测量精度可达 2.5 mN。

该方法用于测量应力有许多优点。首先,由于采用传感光纤光栅和受 PZT 调制的检测光栅物理参量相同,在一定条件下,就消除了温度变化对测量结果的影响;该系统具备检测静态应变和动态(准静态)应变的能力,有利于对外应力进行实时跟踪测量;还需指出的是,在实验中可用普通示波器进行信号分析,该实验对工作环境要求不高,仪器相对简便,避免了昂贵的仪器如光谱分析仪;另外,如果将接受的信号进行数字化处理,与标准的序列脉冲比较可制作成数字光纤光栅测量仪,可广泛应用于科研、工业物理量的测量中。该结构的传感器符合数字化、小型化和集成化的发展趋势。

参 考 文 献

- 1 Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors. *Proc. SPIE*, 1990, **1169**:98~107
- 2 Ball D A, Morey W W. Standing-wave monomode erbium fiber laser. *Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(7):613~615
- 3 Bellil H, Abushagur M A G. Heterodyne detection for Fiber Bragg Grating sensors. *Opt. Laser Technol.*, 2000, **32**:297~300
- 4 Pacheco M, Mendez A *et al.*. Analysis of the spectral characteristics of piezoelectrically driven dual and triple-period optical fiber Bragg gratings. *Opt. Commun.*, 1999, **167**:89~94
- 5 Guan Baiou, Liu Zhiguo, Kai Guiyun *et al.*. Fiber Bragg grating displacement sensor based on cantileverbeam. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1999, **28**(11):983~984 (in Chinese)
- 6 Set S Y, Dabarsyah B, Goh C S *et al.*. A widely tunable fiber Bragg grating with a wavelength tunability over 40 nm. *OFC2001, MC4-1*. Anaheim, California USA
- 7 Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16):1370~1372
- 8 Davis M A, Bellemore D G, Putnam M A *et al.*. Interrostrain of 60 fiber Bragg grating sensor with microstrain resolution capability. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10):822~823
- 9 Davis M A, Kersey A D. Matched-filter interrogation technique for fiber Bragg grating arrays. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10):822~823
- 10 Brady G P, Hope S, Ribeiro A B L *et al.*. Demultiplexing of fiber grating temperature and strain sensors. *Opt. Commun.*, 1994, **111**(1/2):51~54
- 11 Jackson D A, Robeiro A B L, Reekie L *et al.*. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14):1192~1194
- 12 Pacheco M, Mendez A *et al.*. Analysis of the Spectral characteristics of piezoelectrically driven dual and triple-period optical fiber Bragg gratings. *Opt. Commun.*, 1999, **167**:89~94
- 13 Pietro Ferraro, Giuseppe De Natale. On the possible use of optical fiber Bragg grating as strain sensors for geodynamical monitoring. *Opt. & Laser in Engng.*, 2002, **37**:115~130
- 14 Ribeiro A B L, Ferreira L A, Santos J L *et al.*. Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(4):934~939
- 15 Limberger H G, Fonjsllaz P Y, Salathe R P. Spectral characterization of photoninduced high efficient Bragg gratings in standard telecommunication fibers. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1):47~49
- 16 Lo Y L, Huang H F, Yang M D. Intensity effects in Bragg grating sensors scanned by a tunable filter. *Proc. SPIE*, 1999, **3670**:65~73

Study on Strain Measurement Using Dynamic Demodulation Technique with Two Fiber Gratings

Li Qianghua Li Junqing Li Chunfei

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 5 August 2002; revised 3 October 2002)

Abstract: Based on dynamic demodulation technique, a method of strain measurement using two fiber Bragg gratings is reported. The shift of reflective wavelength of one FBG under external strain is translated into a change in time interval of the optical pulse from another FBG driven by a PZT plate. Experiment demonstrates that the measurement accuracy can reach 2.5 mN with the range of 0~40 N.

Key words: fiber Bragg grating; sensor; dynamic demodulation; modulation with PZT