

文章编号 1004-924X(2007)05-0651-05

可调谐 F-P 腔进行锥形光栅 反射带宽解调的应力测量方法

杨先辉¹, 张秋华², 于永森³, 孙圣和¹

- (1. 哈尔滨工业大学 自动化测试与控制研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 航天学院航天科学与力学系, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 吉林大学 集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130023)

摘要:理论分析和实验验证了通过对锥形光栅反射谱进行带宽解调来获得环境应力/应变的可行性,提出了对锥形光栅反射谱采用可调谐 F-P 腔进行带宽解调的方法,通过应力加载实验对该带宽解调方法进行了验证,并取得了较好的反射带宽解调和应力测量效果。实验证明,该测量系统实现了对温度变化不敏感的应力测量,同时具有较高的灵敏度,应力测量精度为 0.060 N。在进一步进行锥形光栅中心反射波长解调的基础上,该方案可实现温度和应力的同时测量。

关键词:光纤 Bragg 光栅;锥形光栅;反射带宽;应变测量;可调谐 F-P 腔

中图分类号:TN253;TB931 **文献标识码:**A

Measurement of temperature-insensitive strain based on reflected bandwidth demodulation of tapered fiber grating

YANG Xian-hui¹, ZHANG Qiu-hua², YU Yong-sen³, SUN Sheng-he¹

- (1. *Institute of Automatic Test and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*
2. *Department of Astronautic Engineering and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*
3. *State Key Laboratory on Integrated Opto-electronics, Jilin University, Changchun 130023, China*)

Abstract: A temperature-insensitive strain sensor is presented based on a tunable F-P interferometer to measure the bandwidth of the reflected light from tapered fiber grating (TFG) and the bandwidth demodulating method is demonstrated by a strain loading experiment. Experimental results indicate that the stress sensing system has a high delicacy and the precision of stress measurement is 0.060 N. This sensor has a considerable potential, particularly application for strain sensing in the smart structures. Based on the development of the interrogation system that can demodulate both bandwidth and center wavelength of the reflected light from TFG, a novel sensor that can measure strain and temperature simultaneously is presented.

Key words: fiber Bragg grating; tapered fiber grating; reflected bandwidth; strain sensing; tunable F-P interferometer

1 引言

光纤光栅传感器的交叉敏感问题极大地限制了光纤光栅传感技术在实际工程中的应用^[1-3]。针对这一问题国内外已报道了很多解决方案^[4]，主要有参考光栅法，双周期光纤布拉格光栅法，长周期光纤光栅/光纤 Bragg 光栅融合法，不同聚合物封装法，不同包层直径法等。但这些方法有一个共同的缺点，即需要采用两个或两个以上的光栅组合来克服交叉敏感问题，在增大了光栅制作工艺方面难度的同时也增加了成本；另外，某些方案还需要多个解调光源，不利于光纤光栅传感器的工程应用。

本文详细研究了采用锥形光纤光栅实现的温度不敏感的应力/应变测量方法^[5-7]，针对目前普遍采用的锥形光栅反射功率解调法提出了一种对锥形光栅反射谱进行带宽解调以获得环境应力/应变变化的方法，实验证明该方法简单、易实现，并具有较高的精度，为进一步拓展锥形光栅在传感领域中的应用提供了新思路。

2 基于 TFG 的温度不敏感应力的测量

2.1 理论分析

我们知道，沿着反射式光纤光栅轴向的 Bragg 反射波长为^[8]：

$$\lambda_B(z) = 2n_{\text{eff}}(z)\Lambda(z), \quad (1)$$

式中，光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 都是光栅轴向应变 ϵ 的函数：

$$\Lambda(\epsilon) = \Lambda_0(1 + \epsilon), \quad (2)$$

$$n_{\text{eff}}(\epsilon) = n_{\text{eff}0} + \kappa^\epsilon \epsilon, \quad (3)$$

式中， κ^ϵ 表示应变对折射率影响的因子， Λ_0 和 $n_{\text{eff}0}$ 分别为 $\epsilon=0$ 时光栅周期和有效折射率。在光栅轴向 z 点的应变 ϵ 可表示为

$$\epsilon(z) = F/EA(z), \quad (4)$$

式中， F 为加在光栅两端的拉力， E 为光纤杨氏模量， $A(z)$ 为光栅 z 点的横截面积。

由式(2)和(3)知，在应变状态下光栅轴向 z 点的 Bragg 波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}(\epsilon_z)\Lambda(\epsilon_z) \approx 2n_{\text{eff}0}\Lambda_0 + 2(n_{\text{eff}0}\Lambda_0 + \kappa^\epsilon\Lambda_0)\epsilon_z, \quad (5)$$

由此可知光栅的带宽为

$$\Delta\lambda = \lambda_B(L) - \lambda_B(0) + \Delta\lambda(\delta n), \quad (6)$$

式中， $\lambda_B(0)$ 、 $\lambda_B(L)$ 分别是光栅首尾两端的 Bragg 反射波长， $\Delta\lambda(\delta n)$ 是由光栅折射率变化引起的光栅带宽。在光栅制作完成后， $\delta n(z)$ 不再变化，其导致的带宽 $\Delta\lambda(\delta n)$ 也不会发生改变。

当 Bragg 光栅沿轴向被线性腐蚀后，沿光栅方向的横截面积呈线性变化，设其一端为 $A(0)$ ，另一端为 $A(L)$ ，且 $A(L) < A(0)$ 。由式(4)、(5)、(6)可导出，当光栅两端的拉力为 F 时，光栅的带宽为

$$\Delta\lambda = 2[n_{\text{eff}0} + \kappa^\epsilon]\Lambda_0 \frac{F}{E} \left[\frac{1}{A(L)} - \frac{1}{A(0)} \right] + \Delta\lambda(\delta n), \quad (7)$$

由式(7)可知，光栅被线性腐蚀后，其带宽随应力呈线性变化。对于强光栅，光栅腐蚀后受拉力作用时，光栅的带宽展宽，但是光栅上各点的反射功率不变，所以光栅带宽内总反射功率 P 线性增加，那么光栅带宽内总反射功率 P 也随应力呈线性变化，可表示为

$$P = kF + B, \quad (8)$$

式中， k 和 B 是比例常数。

当温度改变时，光栅上各点 Bragg 波长的变化为

$$\Delta\lambda_B = (\xi_s + \alpha_s)\Delta T. \quad (9)$$

其中， ξ_s 和 α_s 分别是光纤材料热光系数 ($-7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) 和热膨胀系数。由式(9)可知，温度改变不会影响光栅反射带宽或功率的变化。

2.2 实验验证

为了验证锥形光纤光栅的反射光带宽对应力变化的线性关系及其对温度变化的不敏感性，设计了如图 1 所示的实验装置。其中宽带光源采用 ASE 光源，其带宽为 1 525~1 560 nm。锥形光栅的反射光经耦合器送入光谱仪，对其反射光的光谱波形进行探测和记录。在实验准备阶段，可先利用相位掩模法在高压载氢的单模光纤上侧写入均匀的 Bragg 光纤光栅，光栅的反射率高于 99%。光栅高温退火后，光栅的带宽和反射率不再随温度和时间改变。将退火后的光栅浸入 HF 酸溶液中，然后匀速地从 HF 酸中拉出，由于腐蚀的速度与时间成正比，所以光栅被腐蚀以后其横

截面积是线性改变的。实验中,将 FBG 的直径从 $D(0) = 125 \mu\text{m}$ 腐蚀到 $D(L) = 90 \mu\text{m}$ 。

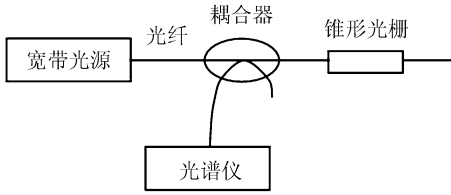


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment setup

首先,将此锥形光栅置入恒温箱中,观察其反射谱随温度变化的变化情形。从 0°C 到 90°C 每隔 15°C 作为一个测量点,记录在温度变化的情况下锥形光栅的反射谱。图 2 所示为不同温度下锥形光栅的反射谱,可见,在温度变化的情况下,反射光的中心波长随着温度的增加向长波方向发生了移动,而光谱形状并未发生大的变化,根据光谱仪测得的带宽值可以看出,反射谱的带宽并未受到温度变化的影响。

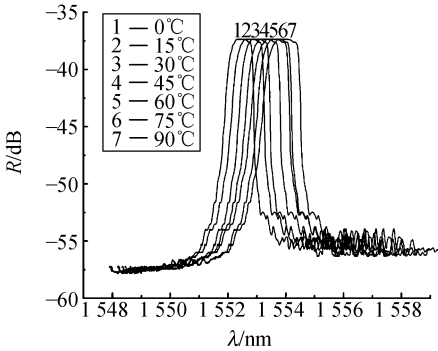


图 2 温度变化时锥形光栅的反射谱变化

Fig. 2 Changes of the reflected spectra of TFG in varying temperature

在进行了上一步实验之后,将此锥形光栅的一端固定,对其另一端施加应力,在不同应力处测其反射光光谱。受力后该锥形光栅的反射谱变化过程如图 3 所示。从图中可看出,随着应力的增大,光栅的中心波长向长波长方向发生了移动,带宽也随之变大。根据不同应力时 TFG 的反射谱计算出其反射带宽,并以此时所对应的中心反射波长(可等价为应力值)为横坐标做出图 4,由图可见反射带宽与应力的变化呈良好的线性关系。综合以上的分析可得出结论:通过对锥形光栅的反射谱进行带宽解调可实现对温度变化不敏感的应力测量。

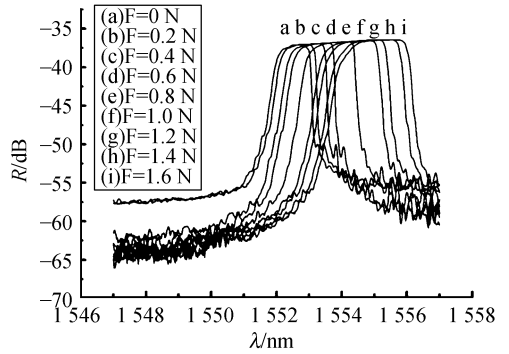


图 3 应力作用下锥形光栅的反射谱变化

Fig. 3 Changes of the reflected spectra of TFG in varying strain

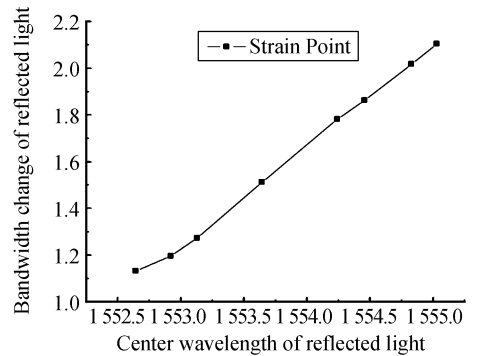


图 4 锥形光栅反射谱带宽与应力变化关系

Fig. 4 Relationship between the reflected bandwidth of TFG and the strain

3 采用可调 F-P 腔的 TFG 反射带宽解调

根据以上思路,提出了一种采用可调谐 F-P 腔对锥形光栅反射光进行带宽解调的应力传感方案,系统结构如图 5 所示。从宽带光源发出的光经隔离器传送至锥形光栅传感器,从传感器反射回来的具有一定带宽的光经过一个 3 dB 耦合器引入 F-P 腔,F-P 腔的腔长通过 PZT 进行控制。当 F-P 腔的透射波长与反射光的波长成分存在重合的时候,PD 探测器将能探测到透射光。通过对 PZT 施加扫描电压使 F-P 腔的腔长发生周期性变化,F-P 腔的透射波长将对锥形光栅的反射带宽进行扫描。在压电陶瓷的伸长量与驱动电压近似为线性关系时,用压电陶瓷的驱动电压代表其伸长量,即默认 F-P 的腔长变化同 PZT 的驱

动电压成线性关系^[9]。此时在压电陶瓷上所施加的驱动电压 V 就对应着从 F-P 腔透射的锥形光栅反射波长所包含的成分^[10]。通过分析光电探测器的输出与压电陶瓷驱动电压之间的对应关系,可获得锥形光栅反射光谱的带宽信息,进而得到反射带宽的变化,计算出所测量的应力值,其原理分析如图 6。从图中可以看出,通过分析光电探测器的输出波形所得到的锥形光栅反射光谱的带宽与原光谱相比产生了展宽,这是由于可调谐 F-P 的透射谱本身具有一定的宽度所造成的,实际上本文所测量的应力信息包含在锥形光栅反射谱带宽的变化之中,这个展宽将在进一步的运算中被抵消,不会对测量结果造成影响。

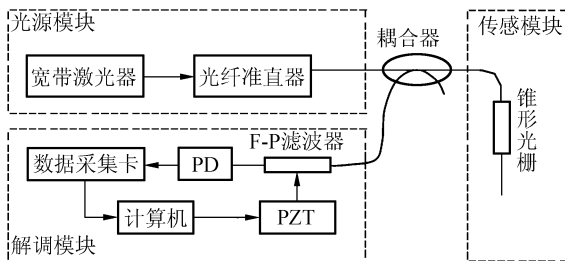


图 5 可调 F-P 滤波器解调锥形光栅反射光带宽原理框图

Fig. 5 Schematic diagram of the stress/strain sensing system based on reflected bandwidth demodulation of TFG with a tunable F-P

按照图 5 所示结构搭建实验平台。实验中使用 TB2500 型可调 F-P 滤波器,其自由光谱范围为 45.24 nm, 3 dB 带宽为 0.37 nm;使用 HP811A 型信号发生器驱动可调谐 F-P 滤波器的 PZT 进行腔长扫描,控制信号采用锯齿波信号,电

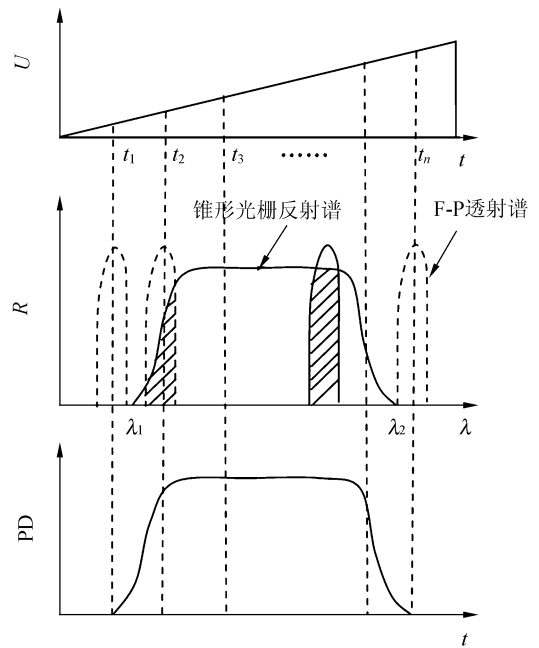


图 6 解调原理分析

Fig. 6 Principle diagram of demodulating process

压幅值为 11 V, 频率为 1 Hz(尽管可调 F-P 腔可达到较高的控制频率和精度,但考虑到系统中所包含的运动机构,所以还是对其驱动频率进行了控制,实际上此频率最高可设为 100 Hz)。光电探测器探测到的光信号经放大后由 12 位数据采集卡 PCI-7422 输入计算机,通过 LABVIEW 对采集到的信号进行处理,进一步计算出锥形光栅反射光的带宽变化。

在实验之前,我们对所采用的锥形光栅进行了应力标定,其反射带宽与应力间的对应关系大致为 0.019 nm/(0.1 N)。实验结果见表 1。

表 1 应力测试实验结果

Tab. 1 Results of experiment and stress sensing

实际应力值 (N)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	2.0
反射带宽 (nm)	3.014	3.046	3.088	3.125	3.167	3.209	3.245	3.398
反射带宽变化值 (nm)	—	0.032	0.074	0.111	0.153	0.195	0.231	0.384
测量应力值 (N)	—	0.168	0.389	0.584	0.805	1.026	1.216	2.021
测量误差 (N)	—	0.032	0.011	0.016	0.008	0.026	0.016	0.021
平均误差 (N)					0.019			
应力测量精度 3σ (N)					0.060			

表 1 给出了锥形光栅在不同应力变化点反射

带宽的测量值及相应的应力计算值。由结果可以

看出,测量结果与实际应力值之间的误差较小,且十分稳定,测量精度达到 0.060 N。实验证明,基于可调谐 F-P 的反射带宽解调方案能够很好地对锥形光栅的反射光带宽进行解调,据此实现的应力测量达到了很好的精度和较高的灵敏度。整个系统具有结构简单、容易实现的特点,适合实际应用。

4 结 论

本文分析并验证了对锥形光栅反射谱进行带

宽解调以获得环境应力/应变的可行性,提出了一种利用可调谐 F-P 腔对锥形光栅反射光进行带宽解调实现温度不敏感的应力/应变测量方案,解决了光纤 Bragg 光栅在传感应用中的应力、温度交叉敏感问题。通过实验表明,该方案的应力测量精度为 0.060 N,测量系统还具有较高的和灵敏度。该方案在锥形光栅的传感应用方面极具前景。同时,若在此传感方案的基础上进一步采取适当手段对锥形光栅的中心反射波长进行解调,则可实现温度和应力的同时测量,这将是我们的进一步的研究重点。

参考文献:

- [1] LEE B. Review of the present status of optical fiber sensors [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2003,(9): 57-79.
- [2] 唐炜, 史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J]. *光学精密工程*, 2002,10(1):79-83.
TANG W, SHI Y K. Optical fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(1):79-83. (in Chinese)
- [3] 郭玉彬, 葛璜. 光纤 Bragg 光栅的研究[J]. *光学精密工程*, 1999,7(1):31-38.
GUO Y B, GE H. The study of optical fiber Bragg grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(1):31-38. (in Chinese)
- [4] MAGNE S. State-of-strain evaluation with fiber Bragg grating rosettes; Application to discrimination between strain and temperature effects in fiber sensors [J]. *Appl. Opt.*, 1997,36:9437-9447.
- [5] XU M G, DONG L, REEKIE L, *et al.*. Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in a tapered optical fiber [J]. *Electron. Lett.*, 1995, 31(10):823-825.
- [6] 于志辉, 余重秀, 王葵如, 等. 直流切趾对光纤光栅特性的影响[J]. *光学精密工程*. 2006,14 (6):936-939.
YU ZH H, YU CH X, WANG K R, *et al.*. Effect of direct current apodization on fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):936-939. (in Chinese)
- [7] MORA J, VILLATORO J, DIEZ A, *et al.*. Tunable chirp in Bragg gratings written in tapered core fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2002, (210):51-55.
- [8] 于永森, 赵志勇, 卓仲畅, 等. 一种基于啾啾光纤光栅温度不敏感的应力传感器[J]. *半导体光电*, 2005,26(4): 353-355.
YU Y S, ZHAO ZH Y, ZHUO ZH CH, *et al.*. Temperature-insensitive strain sensor based on chirped fiber Bragg grating [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005,26(4):353-355. (in Chinese)
- [9] 刘建芳, 杨志刚, 范尊强, 等. 压电直线精密驱动器研究[J]. *光学精密工程*. 2005, 13(1): 65-72.
LIU J F, YANG ZH G, FAN Z Q, *et al.*. Precise PZT linear step actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13 (1):65-72. (in Chinese)
- [10] 庄其仁, 龚冬梅, 曾永西. 啾啾效应对 Bragg 波长匹配解调精度的影响与消除[J]. *光学精密工程*. 2005, 13(3): 364-370.
ZHUANG Q R, GONG D M, ZENG Y X. Influence of chirp effects on FBG wavelength-matched demodulation precision and its elimination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(3):364-370. (in Chinese)

作者简介:杨先辉(1972—),男,黑龙江齐齐哈尔人,现在哈尔滨工业大学攻读博士学位,主要从事光纤光栅传感技术及光通信器件的研究。E-mail: miaomiaohit@hit.edu.cn