

文章编号 : 0253-2239(2002)01-0085-04

非本征型法布里-珀罗干涉仪光纤布拉格光栅 应变温度传感器及其应用*

饶云江¹⁾ 曾祥楷¹⁾ 朱 永¹⁾ 王义平¹⁾ 朱 涛¹⁾ 冉曾令¹⁾ 袁慎芳²⁾ 梁大开²⁾

(1), 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)
(2), 南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要: 介绍了光纤布拉格光栅非本征型法布里-珀罗干涉仪集成复用传感器的结构、应变和温度同时监测的原理, 观察到光纤布拉格光栅反射谱和非本征型法布里-珀罗干涉仪干涉谱间的串扰, 用 3 dB 带宽平均波长法减小了该串扰, 提高了测量精度, 将该传感器应用于三维编织复合材料的应变及温度同时监测。实验结果表明温度精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$, 应变精度为 $\pm 20\ \mu\epsilon$, 可满足实际应用的要求。

关键词: 光纤光栅; 非本征型法布里-珀罗干涉仪; 应变; 温度

中图分类号: TN247 文献标识码: A

1 引 言

在静态应变测量中, 温度和应变的分离及热应变误差校正正是极其重要的。近几年来, 基于光纤传感器的应变及温度同时传感技术是一个非常活跃的研究领域^[1,2]。这类传感器主要用于复合材料、大型建筑结构、宇航飞行器、军工产品等的结构健康自诊断、环境自适应、损伤自愈合, 以实现所谓的智能材料与结构及在线检测与分析^[3]。目前, 将布拉格光纤光栅(FBG)和其他光纤传感器结合起来实现温度与应变测量的光纤传感方法包括^[1]: 双波长布拉格光纤光栅法、布拉格光栅基频与二次谐波波长法、不同包层尺寸的布拉格光纤光栅法、布拉格光纤光栅与偏振滤波器法、布拉格光纤光栅和长周期光纤光栅法等。这些方法各有优缺点。

事实上, 非本征型法布里-珀罗干涉仪可用于应变监测^[4,5], 布拉格光纤光栅可用于温度和应变监测, 将这两种形式的传感器集成在同一个石英毛细管中便可构成光纤光栅/法布里-珀罗集成复用结构的温度及应变传感器, 通过一定的数据处理, 可同时监测温度及应变这两种参数。该结构传感器温度稳定性好, 测量精度高, 系统成本低, 体积小, 具有很好的应用前景。本文论述了该传感器的结构、测量原

理、串扰消除方法, 并将其应用于新一代三维编织复合材料的温度及应变监测。

2 传感器结构

布拉格光纤光栅/非本征型法布里-珀罗干涉仪集成复用传感器结构如图 1 所示。传感器由均匀的石英毛细管、光导入导出单模光纤及其中的布拉格光栅、用作反射端的多模光纤构成。多模光纤的作用是使透射入多模光纤的光在另一反射端的反射光模式与单模光纤的模式不匹配, 难以形成干涉。峰值波长为 827 nm、长度约为 5 mm 的布拉格光栅被写入单模光纤, 在离光栅中心 5 mm 处的一端切断; 单模和多模光纤均插入内外直径分别为 128 μm 、300 μm 、长为 50 mm 的石英管中, 两光纤端面相距约为几百微米, 光纤光栅和由光纤端面构成的非本征型法布里-珀罗干涉腔位于中间位置; 在石英管两端, 光纤和石英管熔接在一起。光纤光栅在石英管中处于自由状态, 不受应力作用, 可用于温度监测; 单模、多模光纤端面构成的法布里-珀罗干涉仪腔长在应力作用下将产生相应变化, 可用于轴向应变监

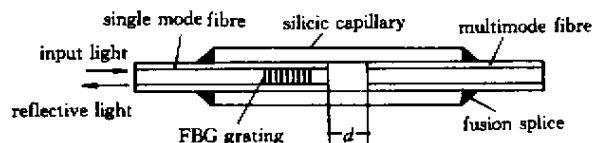


Fig.1 Structure of FBG/EFPI sensor

* 国家杰出青年科学基金(60025515)及重庆大学博士后基金资助课题。

测,这样就构成了可同时监测温度和轴向应变的光纤传感器。

3 测量原理

用布拉格光纤光栅/非本征型法布里-珀罗干涉仪复用传感器同时监测温度及应变的实验系统如图 2 所示。宽带光源(中心波长为 825 nm,带宽约为 20 nm)的光通过一个 2×2 耦合器进入布拉格光纤光栅/非本征型法布里-珀罗干涉仪传感器的单模光纤,在 825 nm 附近的一个窄带光被单模光纤中的布拉格光纤光栅反射;其余波长的光透过布拉格光栅,在单模光纤端面反射一部分能量,透过部分能量在多模光纤端面又反射一部分,两光纤端面反射的光产生干涉条纹。布拉格光纤光栅的反射光和非本征型法布里-珀罗干涉仪的干涉条纹混合在一起,通过同一耦合器进入光谱分析仪,其典型光谱如图 3 所示。用光谱分析仪就可测量出布拉格光纤光栅反射光的中心波长 λ_0 及非本征型法布里-珀罗干涉仪干涉条纹的两极值点波长 λ_1 、 λ_2 。该测量值送入计算机计算处理,可得到温度和应变监测结果。下面首先讨论没有串扰时的测量原理。

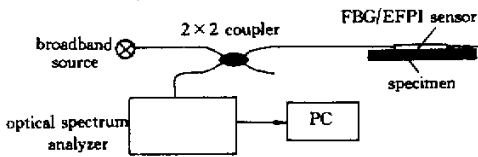


Fig. 2 System of simultaneous strain and temperature measurement

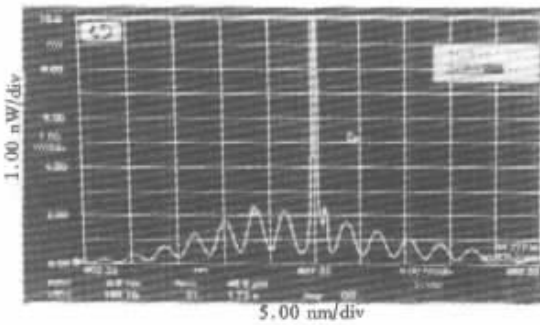


Fig. 3 Reflective spectra of both the FBG and the EFPI
光谱仪的布拉格光纤光栅相对反射光强分布为

$$I_{\text{FBG}}(\lambda) = \alpha_{\text{F}} \alpha_{\text{B}} R(\lambda), \quad (1)$$

式中 α_{F} 、 α_{B} 分别为耦合器的前向和后向耦合系数; $R(\lambda) = \tan^2(\gamma)$ 是布拉格光纤光栅的反射系数, $\gamma = \pi n(L_{\text{G}}/\lambda) \Delta n/n$, $\gamma(\nu) = 1 - 1/\nu^2$, $\nu \geq 2.4$ 为归一化频率, n 为纤芯折射率, L_{G} 为长度 λ

为光栅波长 $\Delta n/n$ 为相对折射率差。

上式决定了光栅中心频率 λ_0 (在本实验的传感器中为 827 nm) 处有一尖锐的较大反射峰。通过光谱仪,可测量该布拉格光纤光栅峰值波长的漂移变化量 $\Delta\lambda$ 。由于布拉格光纤光栅处于自由状态,不受应变作用,其峰值点波长变化量不受应变影响,温度 T 与波长变化量 $\Delta\lambda$ 的关系为

$$T = k_1 \Delta\lambda, \quad (2)$$

式中 k_1 为布拉格光纤光栅的温度系数。

布拉格光纤光栅中心波长周围的光谱是非本征型法布里-珀罗干涉仪的干涉谱,光谱仪上的非本征型法布里-珀罗干涉仪干涉条纹相对分布为

$$I_{\text{F-P}}(\lambda) = \alpha_{\text{F}} \alpha_{\text{B}} R_{\text{f}} T(\lambda [1 + S(\lambda) \cos(2kd)]), \quad (3)$$

式中 R_{f} 为光纤端面反射率, $T(\lambda) = 1 - R(\lambda)$, $S(\lambda)$ 为干涉条纹对比度, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, d 为非本征型法布里-珀罗干涉仪的腔长。该式说明非本征型法布里-珀罗干涉仪的光谱为余弦分布,在其干涉光谱中任取余弦分布的两个峰值点波长 λ_1 、 λ_2 , 并由此可计算出 d 为

$$d = \frac{m\lambda_1\lambda_2}{2|\lambda_1 - \lambda_2|}, \quad (4)$$

式中 m 为 λ_1 到 λ_2 间的干涉条纹数。

由于石英管和光纤的热膨胀系数相同,长度仅相差一个腔长,故非本征型法布里-珀罗干涉仪腔长受温度影响较小。温度在 25 °C ~ 85 °C 变化时,腔长变化量小于 1 μm 。在测量精度要求不高时,可忽略温度对非本征型法布里-珀罗干涉仪腔长的影响。传感器的石英管埋入或表面粘附于被测物,受到应变作用时,非本征型法布里-珀罗干涉仪腔长将发生变化。通过(4)式,可测量出在不受应变和受到应变 ϵ 作用时的非本征型法布里-珀罗干涉仪腔长变化量 Δd , 则应变值 ϵ 为

$$\epsilon = \Delta d/L, \quad (5)$$

式中 L 为石英管长度。

但在高精度测量中,要考虑温度 T 对非本征型法布里-珀罗干涉仪腔长或轴向应变测量的影响。根据(2)式测量出温度 T 后,按下式修正计算应力

$$\epsilon = k_{11} \Delta d + k_{12} T, \quad (6)$$

式中 k_{11} 为非本征型法布里-珀罗干涉仪腔长应变系数, k_{12} 为非本征型法布里-珀罗干涉仪的温度应变系数。这两个系数通过标定来确定。

根据(2)式、(5)式或(6)式,通过光谱分析仪测量波长即可同时监测温度和应变,且是绝对测量。

4 串扰的发现和消除

布拉格光纤光栅反射带内的反射率按准高斯分布且小于 100% 其反射光和非本征型法布里-珀罗干涉仪干涉光谱重叠在一起,由(1)式、(3)式可得传感器在光谱仪上的总光谱分布为

$$I_{total} = \alpha_f \alpha_B [R(\lambda) + R_f T(\lambda) + R_f S(\lambda) T(\lambda) \cos(2kd)] \quad (7)$$

由(7)式知,除了布拉格光纤光栅本身的光谱外,在 $0 < R(\lambda) < 1$ 的区域内还另有两项因子影响布拉格光纤光栅的光谱,即第二项是非本征型法布里-珀罗干涉仪反射光的直流分量对布拉格光纤光栅的影响,其本身具有对称性,不产生布拉格光纤光栅的非

对称性变形,第三项为非本征型法布里-珀罗干涉仪干涉谱的余弦周期性变化,导致了布拉格光纤光栅反射光谱的非对称性变形。

实验发现,随着应变、腔长 d 和温度的变化,这种非对称性变形是随机的,如图 4 所示,布拉格光纤光栅峰值点偏离中心位置,其偏离量取决于布拉格光纤光栅和非本征型法布里-珀罗干涉仪干涉谱的相对量和周期大小。实验证明,若仍用常规的峰值点法确定布拉格光纤光栅中心波长,将引起较大的测量误差(图 5)。为了减小信号变形对温度测量的影响,可在 3 dB 带宽处取其平均波长作为布拉格光纤光栅中心波长,因为 3 dB 带宽处的变形较小。3 dB 带宽平均波长法的数据线性度很好。

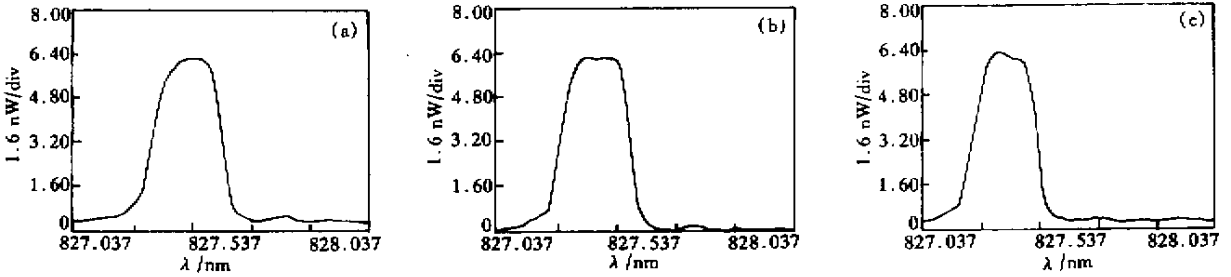


Fig. 4 Distorted spectra of the FBG with temperature decrease

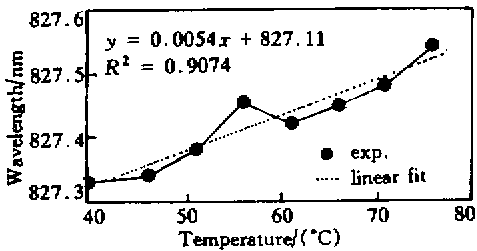


Fig. 5 Temperature response of the FBG with the peak position method

5 应用实例

这里介绍将布拉格光纤光栅/非本征型法布里-珀罗干涉仪传感器应用于三维编织复合材料的应变和温度同时监测的实验。本实验的三维编织复合材料由南京玻璃纤维研究所提供。布拉格光纤光栅/非本征型法布里-珀罗干涉仪传感器和电阻应变片并排地粘贴于三维编织复合材料试件样本的表面,按照图 2 所示的测量系统实现该复合材料的温度和应变同时监测。实验装置如图 6 所示,试件样本装夹在材料试验机上,电阻应变片接入应变计,布拉格光纤光栅/非本征型法布里-珀罗干涉仪传感器的光信号接入光谱仪,分别标定和测定试件的应变值,并将

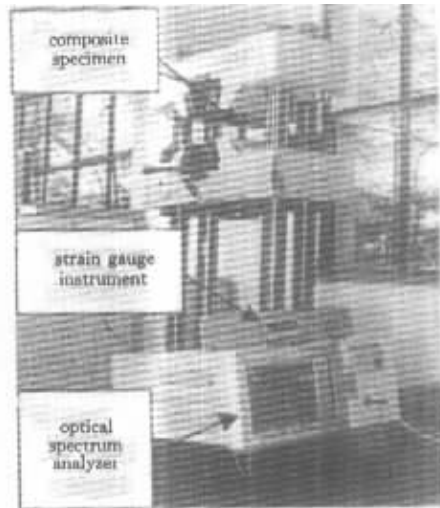


Fig. 6 Photograph of experimental setup

样本放入恒温箱进行温度标定和测量。布拉格光纤光栅/非本征型法布里-珀罗干涉仪传感器的温度与布拉格光纤光栅中心波长间关系的实验曲线如图 7 所示,其应变测量值与电子应变片测量值的对比结果如图 8 所示。

经温度计和电阻应变片标定后,由实验实测值与理论值相比较可知,该布拉格光纤光栅/非本征型法布里-珀罗干涉仪温度及应变传感器的线性度好,

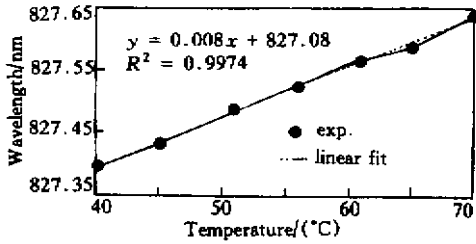


Fig.7 Results of temperature FBG measurement with the averaged wavelength method

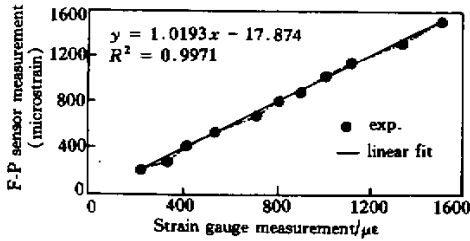


Fig.8 Results of strain EFPI measurement compared with electrical gauge measurement

精度较高,其中温度误差约为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 、应变误差约为 $\pm 20 \mu\epsilon$ 。

结论 将布拉格光纤光栅和非本征型法布里-珀罗干涉仪集成在同一个石英毛细管中构成复用传感

器,用于温度和应变的同时监测,观测到传感器光纤光栅反射谱的非对称性畸变,采用 3 dB 带宽平均波长法确定布拉格光纤光栅中心波长,基本消除了非本征型法布里-珀罗干涉仪干涉谱引起的畸变和串扰对温度测量的影响。实验表明,传感器的应变测量精度可达 $\pm 20 \mu\epsilon$,温度测量精度达 $\pm 1^\circ\text{C}$,能满足实际应用(如三维编织复合材料)中温度和应变同时监测的要求。该传感器还可编织入复合材料内部实现工艺过程的在线监测和构成智能结构等。

参 考 文 献

- [1] Rao Y J. Review article: In-fibre Bragg grating sensors. *Meas. Sci. & Technol.*, 1997, **8**: 355 ~ 375
- [2] Guan Baiou, Tam H Y, Ho S L *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating. *Acta Optica Sinica*(*光学学报*), 2000, **20**(6): 827 ~ 830 (in Chinese)
- [3] Udd E ed.. *Fibre Optic Smart Structures*. New York: John Wiley & Sons, 1995. 2 ~ 9
- [4] Bhatia V, Murphy K A, Claus R O *et al.*. Optical fibre based absolute extrinsic Fabry-Perot interferometric sensing system. *Meas. Sci. & Technol.*, 1996, **7**: 58 ~ 61
- [5] Liu T, Fernando G F, Zhang L *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurements using a multiplexed fibre Bragg grating sensor and an extrinsic Fabry-Perot sensor. *J. Smart Structures and Materials*. 1998, **7**: 550 ~ 556

EFPI/FBG Strain-Temperature Sensor and Application

Rao Yunjiang¹⁾ Zeng Xiangkai¹⁾ Zhu Yong¹⁾ Wang Yiping¹⁾ Zhu Tao¹⁾
Ran Zengling¹⁾ Yuan Shenfang²⁾ Liang Dakai²⁾

(1), College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)
(2), Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

(Received 24 October 2000; revised 27 December 2000)

Abstract: The structure and principle of a novel sensor with in-fibre Bragg grating (FBG) and extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) in series, used for simultaneous strain and temperature measurement, are presented. The cross-talk between the reflective spectra of the FBG and the EFPI interference spectra is observed which has been reduced by the method of averaging the wavelengths at the two points of 3 dB bandwidth to improve the accuracy for temperature measurement. This sensor has been applied to simultaneous strain and temperature measurement for 3-D braided composite materials. The experimental results show that this method has a strain accuracy of $\pm 20 \mu\epsilon$ and a temperature accuracy of 1°C , which can meet the requirements for practical applications.

Key words: fibre Bragg grating; extrinsic Fabry-Perot interferometer; strain; temperature