

文章编号: 0258-7025(2009)09-2388-05

# 用单一倾斜光纤光栅实现曲率和温度的同时测量

苗银萍 刘波\* 赵启大 田爽 孙华

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要** 基于单个倾斜光纤光栅(TFBG)提出了一种实现双参量曲率和温度同时测量的方法。研究发现,当弯曲方向与光栅栅面成一定角度时,倾斜光纤光栅的纤芯模谐振波长对弯曲不敏感而随外界温度变化线性漂移;低阶包层模谐振峰透射功率随曲率的增加而线性减小且对温度变化不敏感。由此特性提出了用单个倾斜光纤光栅的纤芯模谐振波长和低阶包层模谐振峰透射功率,分别实现对两个参量温度和曲率进行同时独立测量的传感器设计方案,该方法有望解决光纤光栅在测量中存在的温度和弯曲之间的交叉敏感问题。

**关键词** 光纤传感;弯曲传感;温度传感;倾斜光纤光栅

中图分类号 TN253; TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2388

## Simultaneous Measurement of Bending-Curvature and Temperature Using Single Tilted Fiber Bragg Grating

Miao Yinping Liu Bo Zhao Qida Tian Shuang Sun Hua

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

**Abstract** A novel application of tilted fiber Bragg gratings (TFBG) for measuring the bending curvature and temperature simultaneously and independently is reported. The coupling-strength variations of the lower cladding modes provide information on the curvature as they are responsive to curvature changes but unresponsive to temperature, whereas the wavelength shifts of the core-mode peaks facilitate measurement of temperature because the core mode is unresponsive to curvature changes but responsive to temperature. Therefore, those features allow using a single TFBG for simultaneous measurements of temperature and bending curvature. The proposed scheme can be used to solve temperature-cross problem in the real applications.

**Key words** optical fiber sensor; bending sensor; temperature sensor; tilted fiber Bragg grating

### 1 引 言

在目前的结构质量检测中,对于结构变形的估测是一个十分重要的因素。形变的认知不仅可以提供关于如飞机、船只等上可变形结构的形状信息,而且可以对安全状况进行检验并有益于结构诊断。光纤光栅传感系统在检测工程系统和结构等方面(如:温度、应力、压力以及弯曲等物理参量)有潜在的应

用能力并且本身具有高精度等优点,该系统已经得到了广泛的研究。一些研究人员提出基于长周期光纤光栅的传感系统,他们通过波长的漂移或者谐振模式的分裂实现弯曲的测量<sup>[1,2]</sup>。由于温度交叉敏感效应的存在,同时测量两个或多个参数成为光纤传感领域的一个重要研究课题。然而,这些传感器在对多个参数的同时测量(如:应力和温度或弯曲和温度等)仍然有其局限性的一面。针对如何区别这

收稿日期: 2008-12-01; 收到修改稿日期: 2008-12-19

基金项目: 国家 863 计划(2006AA01Z217)、国家自然科学基金(60736039,60572018)和天津市科技计划项目科技攻关项目(07ZCKFGX00200,05YFGPGX04900)资助课题。

作者简介: 苗银萍(1980—),女,博士研究生,主要从事光纤通信与光纤传感技术方面的研究。E-mail: kikosi@126.com

导师简介: 赵启大(1942—),男,教授,主要从事声光信息处理、光纤通信与光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: zhaoqd@nankai.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: liupipi@nankai.edu.cn

两种效应,也提出多种方法:不同包层直径的光纤光栅、特种长周期光纤光栅、相移长周期光纤光栅以及取样光纤光栅等<sup>[3~7]</sup>。在这些方案中,弯曲的信息仍然是通过解调波长获得,由于复杂的解调装置,其成本限制了它的实际应用。因此,一个能够将波长的解调转化为光功率检测的传感系统将具有重要的研究意义。

倾斜光纤光栅(TFBG)作为一种新型的光纤光栅在传感等领域引起了很大的研究兴趣<sup>[8,9]</sup>。它属于短周期光纤光栅,其光栅波矢方向与光纤轴线方向有一定的夹角。由于光纤光栅的栅面发生倾斜,使得其中存在两种耦合。前向传导的入射光除了部分耦合为满足布拉格条件的后向传输的纤芯模外,部分还将耦合为一系列后向传输的包层模,从而在其透射谱中有纤芯模和大量的包层模谐振峰;同时由于低的倾斜角度的存在,位于纤芯模的左边有一个低阶包层模的幻影模出现,它有很强的耦合强度。这些模式的耦合依赖于外界的不同环境:纤芯模只对温度和应力敏感,而包层模对应力、温度、弯曲和折射率等参量敏感<sup>[10~12]</sup>,纤芯模与包层模不同的敏感特性使得相关的研究更为方便。

本文提出了一种基于倾斜光纤光栅实现双参量弯曲曲率和温度同时独立测量的传感器设计方案。研究了在一定温度下,当光栅弯曲时,纤芯模与包层模谐振波长及其耦合强度的变化情况以及当光栅处于一定弯曲状态时,纤芯模与包层模对外界不同温度的反应情况。

## 2 实验描述

倾斜光纤光栅是用准分子激光器基于相位掩模法写制的。先将纤芯掺锗的光敏光纤置于 13 MPa 氢气环境中 48 h,并对光敏部分进行加热,以增强其光敏性。其写制原理如图 1 所示,采用的相位模板被固定在一个角度可调的光具架上,模板的周期为 1074.67 nm,将相位模板旋转一个小的角度  $\xi_{\text{ext}}$ 。由于紫外光将在模板中发生折射,模板旋转的角度  $\xi_{\text{ext}}$  并不与光栅倾斜角  $\xi$  的相等,如图 2 所示。它们之间的关系表示为

$$\xi_{\text{ext}} = \frac{1}{2} \arcsin[n_{\text{cl}} \sin(\alpha + \xi)] - \frac{1}{2} \arcsin[n_{\text{cl}} \sin(\alpha - \xi)],$$

其中  $\sin \alpha = \left( \frac{n_{\text{eff}}}{n_{\text{cl}}} \right) \left( \frac{\lambda_{\text{uv}}}{\lambda_{\text{Bragg}} \cos \xi} \right)$ ,  $n_{\text{eff}}$  为纤芯模的有效

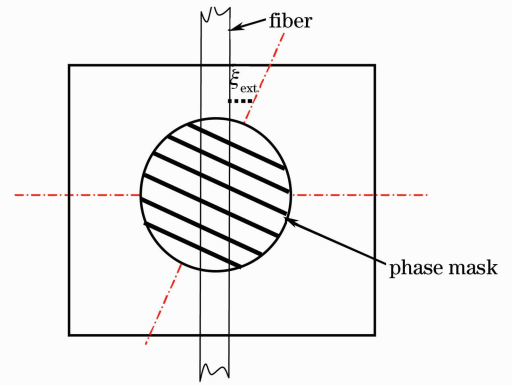


图 1 倾斜光纤光栅写制原理图

Fig. 1 Fabrication of TFBG

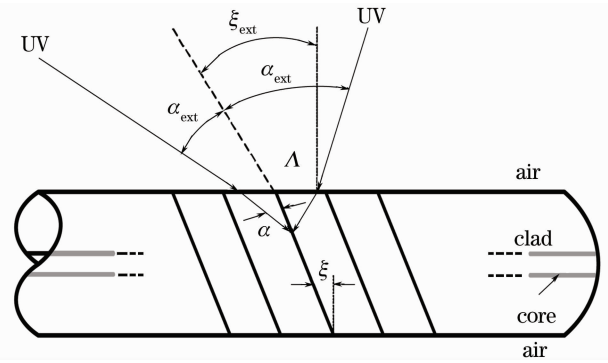


图 2 模板旋转角度  $\xi_{\text{ext}}$  与栅面倾角  $\xi$  的关系

Fig. 2 Relation between tilted angle and phase rotation direction

折射率,  $n_{\text{cl}}$  为包层折射率,  $\lambda_{\text{uv}}$  为写入紫外光的波长,  $\lambda_{\text{Bragg}}$  为光纤光栅相对于纤芯模的谐振波长。因此,可以根据此关系来写制不同倾斜角度的光纤光栅。

实验中所用的倾斜光纤光栅长度为 1.3 cm,有效倾斜角度为  $3^\circ$ ,在图 3 所示的透射谱中有纤芯模、幻影模和包层模。将倾斜光纤光栅放置于 V 形刻槽半圆环中研究其弯曲特性。实验装置如图 4 所示。倾斜光纤光栅的两端处于自由状态以保证光栅弯曲时光纤沿轴向有轻微的滑动以避免轴向拉伸应变,从而实现一种纯弯曲。这些同心半圆环的半径分别为 13.55 cm, 11.5 cm, 8.4 cm, 6.95 cm, 5.65 cm, 4.25 cm, 3.25 cm 和 2.50 cm。用宽带光源有效带宽 40 nm (C 波段) 作为输入,分辨率为 0.01 nm 的光谱分析仪检测在不同曲率情况下透射谱的变化情况,同时透射功率的变化也用光功率计测量,其测量灵敏度为 0.01 dBm/cm;然后将倾斜光纤光栅置于分辨率为 0.1  $^\circ\text{C}$  的温控箱中,对其处于一定弯曲状态时的温度特性进行研究,其测量灵敏度为 10 pm/ $^\circ\text{C}$ ,其中温度的变化范围为 15~60  $^\circ\text{C}$ 。

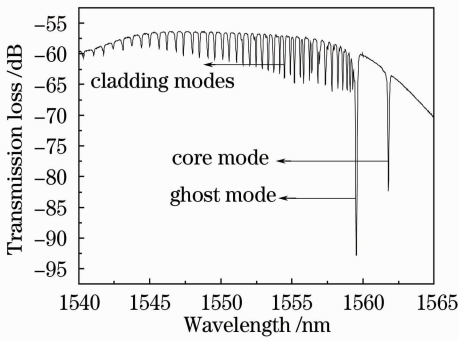


图 3 倾斜光纤光栅的透射谱图

Fig. 3 Transmission spectrum of TFBG

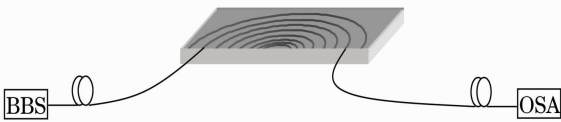


图 4 倾斜光纤光栅弯曲与温度特性的实验装置

Fig. 4 Experimental set-up of TFBG with the bending and temperature characteristic

### 3 结果和讨论

图 5 给出了一定温度时倾斜光纤光栅在不同弯曲情况下透射谱的变化趋势。从图中可以看出,随着圆环半径的减小也就是弯曲曲率的增大,透射谱发生了明显的变化,所有包层模与纤芯模谐振峰展现了不同的变化趋势。这是因为当光栅弯曲时,有效倾斜角度也发生了相应的变化,因此入射光线经历了不同的倾斜角度进行传输。有效倾斜角度的改变使得包层模式的耦合强度发生了变化。

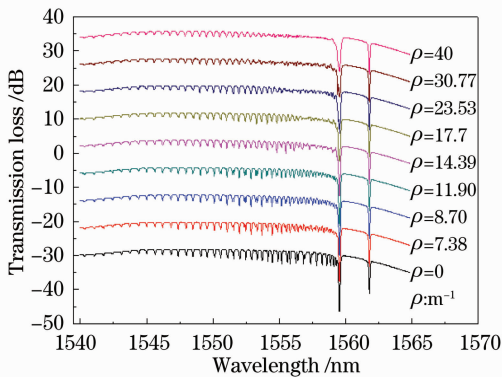


图 5 在一定温度下不同弯曲情况时透射谱的变化情况

Fig. 5 Transmission spectrum under different curvatures

从包层模式的变化规律可以发现,透射功率从低阶包层模式开始逐渐减小。在实验中弯曲半径为 2.5~13.55 cm 的探测范围,低阶包层模式耦合强度几乎成线性关系而逐渐降低,而高阶包层模式却没有受到外界的影响。同时,可以从透射谱的图 5

中发现,当曲率从 0 增加到  $40 \text{ m}^{-1}$  时纤芯模的耦合强度几乎没有发生变化。曲率的变化主要影响了幻影模及其附近的低阶包层模的耦合强度。但是在整个弯曲的过程中,包层模、幻影模以及纤芯模的谐振波长没有发生漂移,也即曲率的变化对谐振波长的漂移几乎没有影响。

图 6 和图 7 分别给出温度从  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  增大到  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  时透射谱以及透射功率的变化情况。其中,倾斜光纤光栅的曲率  $\rho$  为  $23.53 \text{ m}^{-1}$ 。

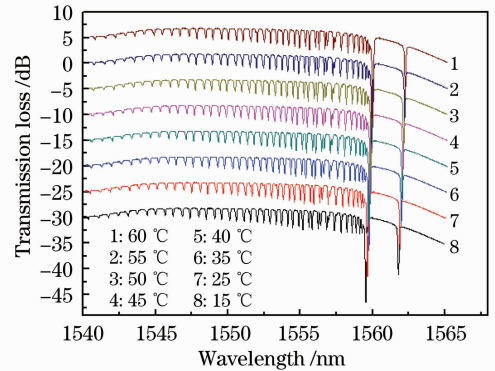


图 6 在一定曲率下不同温度时透射谱的变化情况

Fig. 6 Spectral response of TFBG at constant curvature and different temperature

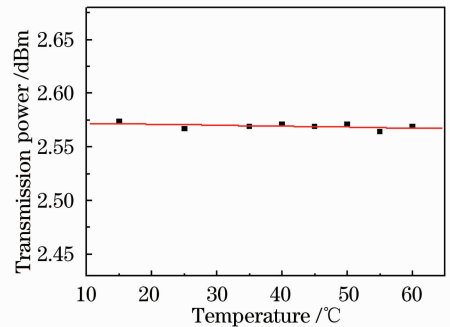


图 7 透射功率随温度的变化情况

Fig. 7 Transmission power of all cladding modes versus the temperature

理论上,当环境温度发生变化  $\Delta T$  时,由于光纤光栅的热光效应和热膨胀( $dn/dT$  和  $d\Lambda/dT$ ),光纤光栅中心波长的漂移量为<sup>[13~16]</sup>

$$\Delta\lambda = \lambda_0(\alpha_0 + \zeta_0)\Delta T,$$

其中  $\alpha_0$  和  $\zeta_0$  分别为光纤的热膨胀系数(约  $5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ )和热光系数(约  $6.67 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )。

当温度升高时,  $\Delta T > 0$ , 倾斜光纤光栅的各模式谐振峰将向长波方向漂移;由于  $\alpha_0$  与  $\zeta_0$  很小,因此可以近似认为当温度变化时倾斜光纤光栅的各模式谐振峰具有相同的波长漂移量。

从图中得出,随着温度的上升,纤芯模与包层模

的谐振波长同时向长波方向漂移,但是它们的耦合强度不随温度的变化而变化。所以温度的变化只影响谐振波长的漂移而不会引起各模式耦合强度的变化。

图 8 给出了包层模透射功率与弯曲曲率的变化关系。其中点为实验数据,线为拟合结果。从图中可以看出,随着倾斜光纤光栅弯曲曲率的增加,透射功率从 2.603 dBm 到 2.51 dBm 成线性减小。一阶拟合可以得到直线方程

$$y = 2.6249 - 0.0027x,$$

其中,  $x$  为曲率的变化,线性拟合度达到 0.998。实验表明在曲率减小的过程中,透射谱变化的重复性很好。

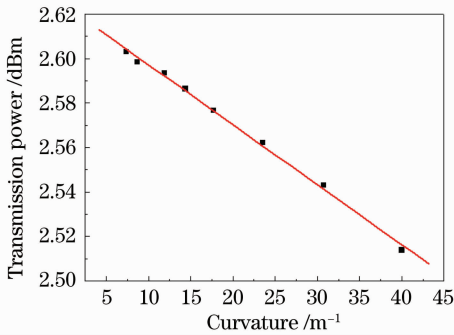


图 8 包层模透射功率与曲率的关系

Fig. 8 Transmission power of all cladding modes versus the curvatures of TFBG

图 9 给出了纤芯模和低阶包层模的谐振波长漂移与温度变化的线性关系。当温度变化  $\Delta T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,纤芯模谐振峰与包层模谐振峰均向长波方向漂移接近  $\Delta\lambda = 0.48\text{ nm}$ 。线性拟合后的温度敏感度约为  $10.7\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ,与布拉格光栅的温度特性相似。二者的拟合结果分别为

$$y_{\text{core}} = 1566.16 + 0.01076x,$$

$$y_{\text{clad}} = 1556.98 + 0.01085x,$$

其中  $x$  为温度坐标,  $y_{\text{core}}$  和  $y_{\text{clad}}$  分别为纤芯模与包层模的波长漂移量。拟合度分别达到 0.9993 和 0.9996。

## 4 结 论

报道了一种用单个倾斜光纤光栅实现同时测量曲率和温度的简单方法。根据倾斜光纤光栅的纤芯模谐振波长对弯曲不敏感,不同的弯曲程度会使得包层模谐振峰透射功率与曲率成线性关系变化;纤芯模与包层模的谐振波长随着温度变化而线性漂移且与布拉格光栅的温度特性相似,包层模透射功率对温度变化不敏感。用单个这种倾斜光纤光栅分别

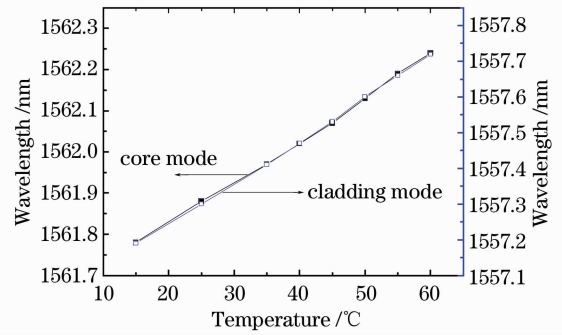


图 9 纤芯模与低阶包层模谐振波长的漂移与温度变化的关系

Fig. 9 Temperature characteristics both core mode and lower-order cladding modes

测量纤芯模谐振波长和包层模幅值的变化实现了对温度和弯曲曲率的同时独立测量;该传感器具有成本低、体积小、简单易行以及能埋入智能材料等优点,从而可实现对工程结构的温度和曲率的实时监控。该研究是当弯曲方向与光栅栅面成一定角度时进行的,进一步的工作将研究关于弯曲特性对光栅栅面方向的依赖性以及不同倾斜角度时的弯曲特性等。

## 参 考 文 献

- Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long-period fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1681~1685
- 赵洪霞,鲍吉龙,陈莹. 长周期光纤光栅弯曲传感特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1681~1685
- Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Effect of bending curvature on transmission spectra of long-period fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 722~725
- 赵洪霞,鲍吉龙,陈莹. 弯曲曲率对长周期光纤光栅透射特性的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 722~725
- Young-Geun Han, Ju Han Lee, Sang Bae Lee. Discrimination of bending and temperature sensitivities with phase-shifted long-period fiber gratings depending on initial coupling strength[J]. *Opt. Express.*, 2004, **12**: 3204~3209
- C. C. Ye, S. W. James, R. P. Tatam. Simultaneous temperature and bend sensing with long-period fiber grating[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**: 1007~2009
- Younggeun Han, Xinyong Dong, J. H. Lee et al.. Simultaneous measurement of bending and temperature based on a single sampled chirped fiber Bragg grating embedded on a flexible cantilever beam[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**: 2839~2841
- M. J. Günder, W. N. Mxclherson, R. Mcnridc. Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**: 120~121
- S. W. James, M. L. Dockney, R. P. Tatam. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors[J]. *Electron. Lett.* 1996, **32**: 1133~1134
- G. Laffont, P. Ferdinand. Tilted short-period fibre-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**: 765~770
- K. S. Lee, T. Erdogan. Fiber mode coupling in transmissive and reflective tilted fiber gratings [J]. *Appl. Opt.*, 2000,

- 39: 1394~1404
- 10 Caucheteur, P. Mgret. Demodulation technique for weakly tilted fiber Bragg grating refractometer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**: 2703~2705
- 11 C. Chen, L. Xiong, A. Jafari *et al.*. Differential sensitivity characteristics of tilted fiber Bragg grating sensors[C]. *SPIE*, 2005, **6004**: 600413
- 12 Miao Jinping, Liu Bo, Zhao Qida. Refractive index sensing characteristic of tilted fiber Bragg gratings with different cladding-diameters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2072~2076  
苗银萍, 刘 波, 赵启大. 不同包层直径的倾斜光纤光栅折射率传感特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2072~2076
- 13 Guan Baiou, Liu Zhiguo, Kai Guiyun *et al.*. Temperature sensor based on fiber Brag grating[J]. *J. Translucution Technology*, 1999, **12**(6): 89~93  
关柏鸥, 刘志国, 开桂云 等. 光纤光栅温度传感器[J]. *传感技术学报*, 1999, **12**(6): 89~93
- 14 Jia Zhenan, Qiao Xueguang, Fu Haiwei. Study on temperature sensitivity coefficient of fiber bragg gratings [ J ]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(5): 453~456  
贾振安, 乔学光, 傅海威. 光纤光栅温度灵敏度系数研究[J]. *光电子 • 激光*, 2003, **14**(5): 453~456
- 15 Hu Shuyang, Zhao Qida, Zhang Ning *et al.*. A novel high-sensitivity fiber bragg grating temperature sensor [ J ]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(2): 147~149  
胡曙阳, 赵启大, 张 宁 等. 一种高灵敏度光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. *光电子 • 激光*, 2004, **15**(2): 147~149
- 16 Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing *et al.*. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 83~86  
詹亚歌, 蔡海文, 向世清 等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 83~86