

文章编号: 0258-7025(2005)02-0232-04

# 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器

黄 锐, 蔡海文, 瞿荣辉, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 报道了一种新型实用的用单根光纤布拉格光栅(FBG)实现温度和应变分离传感的技术。当光纤光栅一部分包层直径变小时,整个光栅可以看成由两个周期相同但直径不同的子光栅连接而成。理论分析和实验都证实了这两个子光栅具有相同的温度敏感性和不同的应变敏感性,由此实现光纤光栅传感器中温度和应变两参数的分离测量,而且这两个子光栅的中心波长间距可以直接测量应变大小,温度变化不影响所测量的应变值。实验中光栅的一部分包层直径被 HF 酸腐蚀到  $82\ \mu\text{m}$ ,获得了两子光栅应变响应系数分别为  $0.00201\ \text{nm}/\mu\epsilon$ ,  $0.000858\ \text{nm}/\mu\epsilon$ ,二峰间距的应变响应系数为  $0.00116\ \text{nm}/\mu\epsilon$ ,二峰的温度响应系数均为  $0.01\ \text{nm}/^\circ\text{C}$  的测量结果,依据这些结果可以对温度和应变进行同时分离测量。

**关键词** 光纤光学;光栅传感器;应变传感;腐蚀;温度传感

中图分类号 TP 212.14 文献标识码 A

## Separately Measurement of Strain and Temperature Using a Single Fiber Bragg Grating

HUANG Rui, CAI Hai-wen, QU Rong-hui, FANG Zu-jie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** A new practical technology for separately sensing of strain and temperature using a single fiber Bragg grating (FBG) is proposed and demonstrated. The FBG can be think to be a grating composed of two inner FBGs with the same period but different diameter when a part cladding diameter of the FBG is decreased. Theoretical analysis and experiment data show that the two inner FBGs have the same temperature response but different strain response. So the strain and temperature responses can be measured separately and the span between the two inner FBGs can be used to measure the temperature-independent strain. In experiment, a part of cladding diameter of a FBG is decreased to  $82\ \mu\text{m}$  by etching it in HF acid. The strain responses of two inner FBGs are  $0.00201\ \text{nm}/\mu\epsilon$  and  $0.000858\ \text{nm}/\mu\epsilon$ , respectively, the strain response of the span between two inner FBGs is  $0.00116\ \text{nm}/\mu\epsilon$ , and the temperature responses of two inner FBGs both are  $0.01\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ . Based on these experiment data, the strain and temperature can be simultaneously measured using a single FBG.

**Key words** fiber optics; fiber grating sensor; strain sensing; etching; temperature sensing

## 1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)本身具有体积小、高灵敏度、易于制造、成本低、不受电磁干扰、可以利用波分复用、时分复用、空分复用等技术组成分布传感网络等特点,因而在光纤传感领域中得到了极大的重视<sup>[1]</sup>。光纤光栅传感最基本的方法是采用所谓波长

编码,即以光纤光栅峰值波长为传感参量。但由于光纤光栅中心波长对温度和应变同时敏感,即温度和应变同时引起光纤光栅的峰值波长变化,通过检测单个光纤光栅峰值波长的变化无法对温度和应变加以分离。为了解决这个问题,人们提出了一些方案,其中大部分方案是利用多个光纤光栅来实现温度和应变分离传感<sup>[2~6]</sup>。也有方案是利用特殊结构

收稿日期:2003-10-14;收到修改稿日期:2003-11-21

作者简介:黄 锐(1976—),男,湖南省永顺县人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光纤通信技术和光纤传感技术的研究。E-mail: rhuang\_cas@sina.com

光纤光栅的带宽只对应变敏感对温度不敏感的特性实现应变独立传感,如 M. G. Xu 等提出利用在递减光纤上的啁啾光纤光栅其带宽只与应变有关而与温度无关的特性来制作应变传感器<sup>[7]</sup>,这种方案的缺点在于对光栅需要进行特殊的递减处理。S. Kim 等提出利用一个一半固定在石英套管上的啁啾光纤光栅来制作应变传感器<sup>[8]</sup>,这种方法的缺点是固定在石英套管上的啁啾光纤光栅体积变大,因而在工程应用中受到很大限制。

S. W. James 等提出将两段不同种类,直径不一样的光纤熔接,而后在熔接处写光栅,利用这两个不同光纤上的光纤光栅具有不同的应变温度响应系数来同时测量温度和应变<sup>[5]</sup>。这种方法的缺点是熔接质量的好坏将影响传感器的寿命和可测应变大小,且因两段不同种类光纤芯径不同而会引入耦合损耗<sup>[5]</sup>。本文相对 S. W. James 等的方案提出了一种更简便实用的新技术,使一部分光纤光栅的外径变小(整个光栅的一半),这样整个光栅变为直径大小不同的两个光栅。这两个光栅具有相同的温度响应系数。但在外应力的作用下,这两个光栅由于横截面积不同而发生不同的应变。因而光栅光谱将分裂成两个反射峰,这两个峰具有不同的应变响应系数,它们的间距随应变增加而扩大,但是与温度无关,从而实现了温度和应变传感的分离。

## 2 原 理

实验研制的新型传感光纤光栅的结构如图 1 所示。光纤初始横截面积为  $S_2$ 。一部分光纤外径通过腐蚀工艺变小,横截面积为  $S_1$ ,长度为  $l_1$ 。光栅的一部分位于包层直径变小的区域。这样整个光栅可以看成由两个周期相同但直径不同的光栅 1 和 2 连接而成。

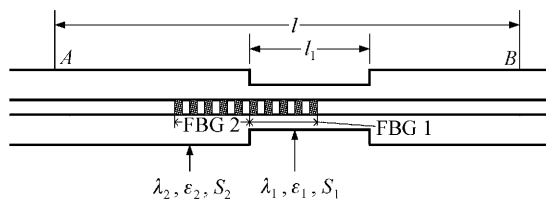


图 1 传感光栅的结构图

Fig. 1 Structure of the sensing FBG

当整个光纤光栅区域发生应变  $\epsilon$ (图 1 中 A, B 两点之间发生应变  $\epsilon$ ) 时,由于光栅 1 和光栅 2 所处光纤的横截面积不同,这两个光栅产生的应变是不

同的,由材料力学知有如下关系

$$\epsilon_1/\epsilon_2 = S_2/S_1, \quad (1)$$

$$\epsilon_1 = \frac{S_2 l}{S_1(l-l_1) + S_2 l_1} \epsilon, \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = \frac{S_1 l}{S_1(l-l_1) + S_2 l_1} \epsilon, \quad (3)$$

当温度、应变发生变化时,光纤光栅中心反射波长的变化量可以表示为<sup>[1]</sup>

$$\Delta\lambda = [(1 - P_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T] * \lambda, \quad (4)$$

这里  $P_e$  为光纤的有效弹光系数,在 1550 nm 波段,  $P_e \approx 0.22$ ;  $\alpha$  为光纤的热膨胀系数,  $\xi$  为光纤的热光系数。光栅 1 和光栅 2 材料相同,因此它们的  $P_e, \alpha, \xi$  相同。温度、应变发生变化时,光栅 1 和光栅 2 之间中心波长的间距可表示为

$$\lambda_1 - \lambda_2 = (\lambda_{1,0} - \lambda_{2,0}) + (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2), \quad (5)$$

$\lambda_{1,0}, \lambda_{2,0}$  为光栅 1 和光栅 2 的初始中心波长。在光纤腐蚀深度不大的情况下,基模有效折射率基本不变,因此有  $\lambda \approx \lambda_{1,0} \approx \lambda_{2,0}$ ,由(2)~(5)式得到

$$\Delta\lambda_1 = (1 - P_e) \frac{S_2 l}{S_1(l-l_1) + S_2 l_1} \lambda \epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \lambda = \kappa_{e1} \epsilon + \kappa_{T1} \lambda, \quad (6)$$

$$\Delta\lambda_2 = (1 - P_e) \frac{S_1 l}{S_1(l-l_1) + S_2 l_1} \lambda \epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \lambda = \kappa_{e2} \epsilon + \kappa_{T2} \lambda, \quad (7)$$

$$\lambda_1 - \lambda_2 \approx (1 - P_e) \frac{(S_2 - S_1) l}{S_1(l-l_1) + S_2 l_1} \lambda \epsilon = \kappa_{es} \epsilon, \quad (8)$$

$\kappa_{e1}, \kappa_{e2}$  为光栅 1 和光栅 2 的应变响应系数,  $\kappa_{T1}, \kappa_{T2}$  为光栅 1 和光栅 2 的温度响应系数,有  $\kappa_{T1} = \kappa_{T2}, \kappa_{es}$  定义为两峰间距的应变响应系数,  $S_1$  越小,  $\kappa_{es}$  越大。可以看出,光栅腐蚀后光栅 1 和光栅 2 的传感系数矩阵  $|\kappa_{e1} \kappa_{T2} - \kappa_{e2} \kappa_{T1}| \neq 0$ ,因此从测量出的  $\Delta\lambda_1$  和  $\Delta\lambda_2$  通过解方程组可以确定传感光栅上的温度和应变<sup>[3]</sup>。另外从式(8)可以看出,一部分腐蚀后的光栅受到应变时,其分裂出的两个反射峰间距大小与温度无关,与受到的应变成正比。根据这两个反射峰的间距大小可直接计算出光栅受到的应变。

## 3 实验结果和讨论

光纤光栅用 Corning SMF-28 标准单模光纤经过载氢处理采用相位膜版法制作。光栅长度为 10 mm,光栅退火后中心波长为 1554.46 nm。采用 HF 酸腐蚀的方法使一部分含有光纤光栅的光纤包层直径变小,光纤腐蚀部分长度  $l_1 = 17.5$  mm,直径

$d_1 = 82 \mu\text{m}$ 。光栅腐蚀前后的光谱如图 2 所示。

光栅腐蚀后,光栅反射率下降,光谱展宽,这是由于光栅 1 的基模有效折射率因光纤的包层直径减小而发生改变,其中心波长有微小移动,以及在腐蚀部分和未腐蚀部分存在缓变的过渡区域(100  $\mu\text{m}$  左右),造成光栅 1 和光栅 2 的光谱相互错开但没有完全分裂开,从而导致光栅腐蚀后光谱展宽。同时光栅 1 和 2 的长度都小于原来整个光栅的长度,导致光栅腐蚀后反射率下降。

光栅腐蚀后,将其置于半导体温控盒中测量它的光谱随温度的变化,如图 3 所示,在测量范围 0~50 $^{\circ}\text{C}$  内,光栅光谱形状没有发生改变,可见光栅 1 和光栅 2 具有相同的温度响应系数 0.01 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

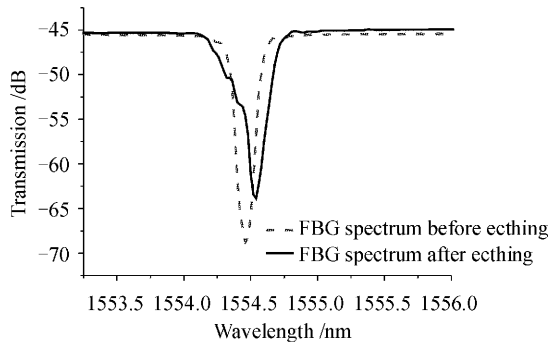


图 2 传感光栅腐蚀前后的透射光谱

Fig. 2 FBG transmission spectrum before and after etching

用环氧树脂将光栅固定在精度为 10  $\mu\text{m}$  的一维精密平移台上,固定点(图 1 中的 A,B 两点)之间的间距  $l = 62.5 \text{ mm}$ 。通过精确控制光栅一端平移台的移动来给光栅施加外应变。光栅同时放置于温控盒中来改变其温度。通过分辨率为 0.07 nm 的光谱仪来测量光栅分裂的两个反射峰的间距。把各参数值代入(6)~(8)式,计算得到  $\kappa_{e1}$  为 0.00205 nm/ $\mu\epsilon$ ,  $\kappa_{e2}$  为 0.000886 nm/ $\mu\epsilon$ ,两峰间距的应变响应系数  $\kappa_{es}$  为 0.00116 nm/ $\mu\epsilon$ 。光栅光谱随应变的变化如图 4 所示。光栅分裂出的两个反射峰幅度大小不同,这是由于腐蚀后,光栅 1 和光栅 2 的长度不同所致。

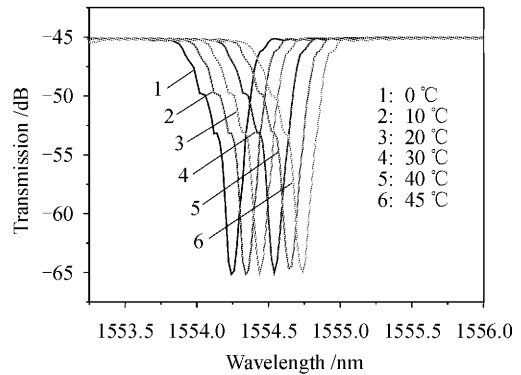


图 3 传感光栅透射光谱随温度的演化

Fig. 3 FBG spectrum at different temperature

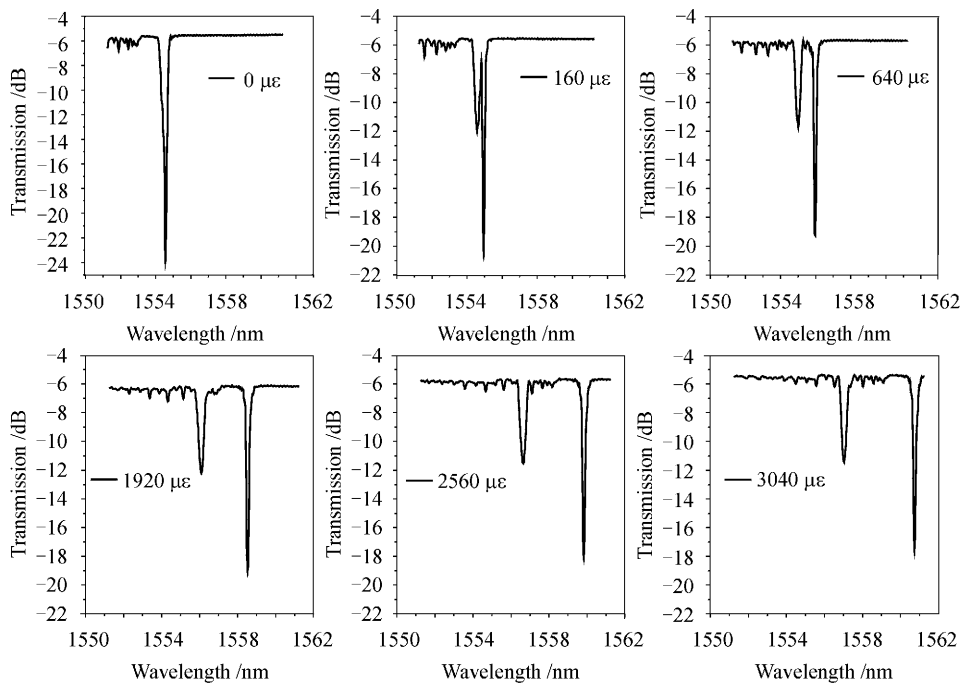


图 4 传感光栅透射光谱随应变的演化

Fig. 4 FBG spectrum at different strain

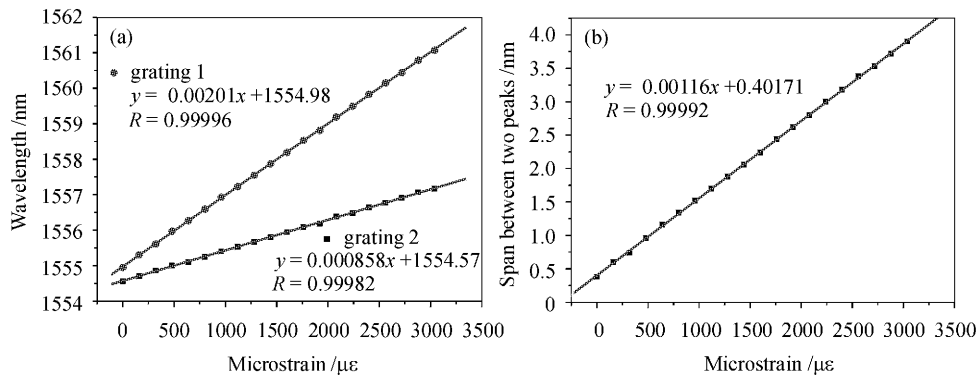


图 5 传感光栅应变响应曲线

(a) 单个布拉格峰的应变响应曲线; (b) 两布拉格峰间距的应变响应曲线

Fig. 5 Strain response curve of the FBG

(a) single Bragg peak at different strain; (b) measured span between two Bragg peaks at different strain

腐蚀后,光栅 1 和光栅 2 的光谱没有完全分裂开,不能确定两个反射峰的确切位置,因此在测量两峰间距大小与应变的关系曲线时,需要选取一个能使光栅光谱分裂开的初始应变为基点。实验选取的初始应变为  $160 \mu\epsilon$ ,此时两峰间距为  $0.38 \text{ nm}$ ,两反射峰应变响应曲线如图 5(a)所示,(b)为两反射峰间距大小的应变响应曲线。在给光栅施加应变的时候,同时改变光栅的温度,两峰的间距大小维持不变。

从图 5 中可以看出,  $\kappa_{e1}$  为  $0.00201 \text{ nm}/\mu\epsilon$ (线性拟合的相关系数  $R$  为  $0.99996$ ),  $\kappa_{e2}$  为  $0.000858 \text{ nm}/\mu\epsilon$ (线性拟合的相关系数为  $0.99982$ ),分裂出的两个反射峰的间距随应变呈线性变化,  $\kappa_{es}$  为  $0.00116 \text{ nm}/\mu\epsilon$ (线性拟合的相关系数为  $0.99992$ )。这三个应变响应系数实验值和计算值最大相差  $3\%$ ,这主要是由各种测量误差导致的。实际应用中  $\kappa_{e1}$ ,  $\kappa_{e2}$ ,  $\kappa_{es}$  应取实验值。

## 4 结 论

理论分析表明,由二段外径不同、但是纤芯和光栅周期相同的光栅构成的光纤光栅滤波器,在应力作用下,会呈现两个反射峰;这两个反射峰具有相同的温度敏感性和不同的应变敏感性并随温度和应变呈线性变化。这两个反射峰的波长变化可以确定传感光栅上的温度和应变,根据这两个反射峰的间距大小可直接计算出光栅受到的应变。实验上采用 HF 酸腐蚀的方法,制备了分段外径为  $125 \mu\text{m}$  和

$82 \mu\text{m}$  的光纤光栅。利用这种光栅制作的传感探头,具有制作容易、体积小、成本低等优点,较好地解决了光纤光栅传感器中温度和应变二参数分离的问题。

## 参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1442~1463
- 2 M. G. Xu, J.-L. Archambault, L. Reekie *et al.*. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(13):1085~1087
- 3 Zhang Ying, Guan Baiou, Dong Xinyong *et al.*. A novel fiber grating sensor for simultaneous measurement of strain and temperature based on prestrain technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8):729~731  
张颖,关柏鸣,董新永等.一种新颖的基于预应变技术的光纤光栅应变温度传感器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(8):729~731
- 4 H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey *et al.*. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(9):1223~1225
- 5 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**(12):1133~1134
- 6 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Stress sensitivity enhanced in-fiber Bragg grating pressure sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):473~476  
傅海威,乔学光,贾振安等.应力增敏的光纤布拉格光栅压强传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):473~476
- 7 M. G. Xu, L. Dong, L. Reekie *et al.*. Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in a tapered optical fibre [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10):823~825
- 8 Sungchul Kim, Jaejoong Kwon, Sungwoo Kim *et al.*. Temperature-independent strain sensor using a chirped grating partially embedded in a glass tube [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(6):678~680