

文章编号: 0258-7025(2004)12-1508-05

光纤布拉格光栅横向应变特性的研究

涂勤昌, 张伟刚, 孙磊, 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要 根据耦合模理论,对光纤布拉格光栅(FBG)的横向应变特性进行了深入研究,并采用数值分析方法对光纤布拉格光栅在平面应变和应力情况下进行了模拟分析:对于平面应变情况,一个谐振峰向波长增大的方向移动,而另一个谐振峰向波长减小的方向轻微移动;对于平面应力情况,两个谐振峰都向波长增大的方向移动。设计了相应的实验进行验证,实验结果与理论分析相符;该实验结果表明光纤布拉格光栅的横向应变情况介于平面应力和平面应变之间,而且更接近平面应力情况。根据理论分析,横向应变与纵向应变对波长漂移的贡献不一样,从而使三维应变测量成为可能。

关键词 光电子学;光纤传感;光纤布拉格光栅;横向应变;平面应变;平面应力

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Study on Transversal Strain on Fiber Bragg Grating

TU Qin-chang, ZHANG Wei-gang, SUN Lei, DONG Xiao-yi

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

Abstract In this paper, the transversal strain on fiber Bragg grating (FBG) is specially analyzed according to the couple-mode theory. For both cases, plane strain and plane stress, numerical simulation is done for uniform FBG. In the case of plane strain, one peak of the reflection spectrum shifts towards the longer wavelength, while the other shifts slightly towards the shorter wavelength and in the case of plane stress, both peaks shift towards the longer wavelength. Finally, a plan of experiment on FBG under lateral load is designed to examine the conclusions. Good agreements between experimental results and numerical simulations have been obtained. The results of the experiment indicate that the transversal strain is between the case of plane strain and plane stress and more close to the case of plane stress. Since the transversal strain and the axial strain have different contributions to the wavelength shift based on the theoretical analysis, it is possible to obtain the measurement of three-dimensional strain from the Bragg reflection wavelength variation.

Key words optoelectronics; fiber sensing; fiber Bragg grating; transverse strain; plane strain; plane stress

1 引言

光纤光栅是近年来发展最为迅速且令人瞩目的光无源器件之一。作为光传感基础元件,由于光纤光栅传感器感应的信息采用绝对波长编码,与传统传感器相比具有抗电磁干扰、响应速度快、精度高、感测范围宽等优点^[1],因此,深受研究者与信息产业人士的重视。

目前,多数光纤光栅传感器是以轴向应变为传感机制而研究开发出来的,并在工程实际应用中实现了位移、温度、应变、应力、压强、扭角、扭矩、加速度、磁场、电流等多种物理量的感测^[2]。然而,在工程结构的应变测量中,不仅需要检测一维应变,还需要检测平面应变及其形变^[3],以便综合评估结构体的健康状况。因此,利用光纤布拉格光栅(FBG)横向应变特性对结构体进行平面应变及其形变监测,

收稿日期:2003-08-12;收到修改稿日期:2003-10-29

基金项目:国家 863 计划(2002AA313110)、南开大学科技创新基金和南开大学人事处科研启动基金资助项目。

作者简介:涂勤昌(1981—),男,福建长汀人,南开大学现代光学研究所硕士研究生,主要从事光子技术及现代光通信方面的研究。E-mail:tuqc@mail.nankai.edu.cn

在大型土木工程结构的健康监测中具有重要的应用价值。

2 基本理论

耦合模理论是分析光纤光栅最基本的方法,是定量描述光纤光栅的基本光学参量:反射谱(或透射谱)分布、中心波长、反射谱(或透射谱)带宽的有力工具^[4]。

把光纤所支持的线偏振模式 $P(LP_{mp})$ 分解为 x, y 方向相互垂直的偏振光,在无外部应力作用时,它们有相同的传输常数 $\beta_{mp}^x = \beta_{mp}^y = \beta_{mp}$ 。根据模式之间的正交性,它们各自独立地向前传播,不发生耦合,没有能量交换。当光纤受外界应力、应变、温度等作用后,光纤发生了几何形变或折射率的改变,导致导模 x 和 y 方向的偏振光传输常数不一致,从而在纤芯(或包层)发生耦合现象,产生能量的交换。其耦合情况可用耦合模理论来描述。对光纤布拉格光栅,考虑其纤芯正、反基模(LP_{01})的耦合情况,得到横向载荷的均匀光纤布拉格光栅的反射谱^[5]

$$R = R_x + R_y \quad (1)$$

R_x, R_y 分别为 x 和 y 方向的偏振光反射谱,它们的表达式分别为

$$R_x = \frac{k_x^2 \sinh^2(S_x L)}{S_x^2 \cosh^2(S_x L) + \hat{\sigma}_x^2 \sinh^2(S_x L)} \quad (2)$$

$$R_y = \frac{k_y^2 \sinh^2(S_y L)}{S_y^2 \cosh^2(S_y L) + \hat{\sigma}_y^2 \sinh^2(S_y L)} \quad (3)$$

其中 $S_x = (k_x^2 - \hat{\sigma}_x^2)^{1/2}$, $S_y = (k_y^2 - \hat{\sigma}_y^2)^{1/2}$; k_x, k_y 分别为 x, y 偏振光的耦合系数; $\hat{\sigma}_x = \beta_x + \Delta\beta_x - \frac{\pi}{\Lambda}$, $\hat{\sigma}_y = \beta_y + \Delta\beta_y - \frac{\pi}{\Lambda}$ 分别为 x, y 偏振的相位失配量; L 为光纤光栅的长度。这里需要特别指出的是光纤光栅的周期(Λ)在外场作用下会发生改变,此时光栅周期为 $\Lambda + d\Lambda = \Lambda(1 + \epsilon_z)$ 。根据 $\hat{\sigma}_x = 0, \hat{\sigma}_y = 0$, 推得 x 偏振和 y 偏振对应的谐振峰处的波长分别为

$$\lambda_x = \lambda_B \left(1 + \frac{\Delta n_x}{n_{\text{eff}}} \right) (1 + \epsilon_z) \quad (4)$$

$$\lambda_y = \lambda_B \left(1 + \frac{\Delta n_y}{n_{\text{eff}}} \right) (1 + \epsilon_z) \quad (5)$$

其中 n_{eff} 为纤芯有效折射率。 $\Delta n_x, \Delta n_y$ 可由光纤的弹光效应得出。

3 模拟研究

根据耦合模理论推出的光纤布拉格光栅反射谱

公式((1)~(3)),代入具体的参数,用 Mathematica 4.0 软件进行图像模拟。从模拟的图像上,易得反射谱分布、中心波长、反射谱带宽等光学参量。为方便起见,光纤布拉格光栅反射谱的纵坐标归一化处理。

经周期性紫外光照射后,光纤纤芯的折射率会发生周期性改变。折射率的改变量一般可表示为

$$\Delta n(r, \theta, z) = \Delta n_{\text{dc}}(r, \theta) +$$

$$\Delta n_{\text{ac}}(r, \theta) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \quad (6)$$

其中 Δn_{dc} 为光致折射率变化的直流成分; Δn_{ac} 为光致折射率调制的幅度; $\phi(z)$ 用来表述沿光纤轴向光栅周期的变化情况,对于均匀光纤光栅, $\phi(z) = 0$ 。

假设光纤光栅的长度 $L = 10 \text{ mm}$, 纤芯有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.45$, $\Delta n_{\text{dc}} = 1.0 \times 10^{-4}$, $\Delta n_{\text{ac}} = 6.5 \times 10^{-5}$ 。当均匀光纤布拉格光栅受横向力 F 作用时,并设横向力 F 作用的长度为 l , 先考虑两种特殊情况:平面应变(轴向应变 $\epsilon_z = 0$, 此时轴向应力 $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$, ν 为泊松比)情况及平面应力(轴向应力 $\sigma_z = 0$)情况。根据(1)式得到均匀光纤布拉格光栅受横向载荷的反射谱,如图 1 实线所示(虚线是均匀光纤光栅不受外场作用时的反射谱)。

从图 1 可知,对于平面应变情况,一个谐振峰向波长增大的方向移动,漂移量约为 0.4 nm ;另一个谐振峰向波长减小的方向移动,漂移量约为 -0.03 nm 。而对于平面应力情况,两个谐振峰都向波长增大的方向移动,漂移量分别约为 0.53 nm 和 0.12 nm 。光栅反射谱主峰两侧的次谐振峰是由光栅两侧折射率突变所引起的法布里-珀罗(Fabry-Perot)效应所造成的^[6]。

一般的横向应变情况介于平面应变和平面应力之间,可表示为

$$\sigma_z = u \cdot \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (7)$$

其中 u 为修正系数, $0 \leq u \leq 1$ 。显然当 $u = 0$ 时,为平面应力情况;当 $u = 1$ 时,为平面应变情况。

改变光栅布拉格光栅单位长度所受的横向力 F/l 的大小,其反射谱也随之发生改变。现以平面应变为例,光栅反射谱与横向力的关系如图 2 所示(注:(d)图考虑了 x 偏振和 y 偏振分量的比值,曲线 a, b, c 中 x 偏振和 y 偏振分量的振幅比值分别为 $\sqrt{2}/2, 1, \sqrt{2}$)。由该图知,施加一定的横向载荷 F 后,原来的谐振峰在中间产生凹陷,形成两个谐振峰。随着载荷的不断增大,劈开的两个峰也不断移开。从图中还可以看出劈开的两个谐振峰受横向载荷的影响

是不一样的：一个移动很明显，而另一个却相反。如果光纤布拉格光栅仅受 y 方向的横向力，由受力分析及弹光效应可以推得： $|(\Delta n_{\text{eff}})_x| \gg |(\Delta n_{\text{eff}})_y|$ 。

由(4),(5)式可知,对于 x 方向的偏振光由于折射率的改变量较大,相应的谐振峰漂移也大;而相应于 y 方向的偏振光的谐振峰则漂移微小。

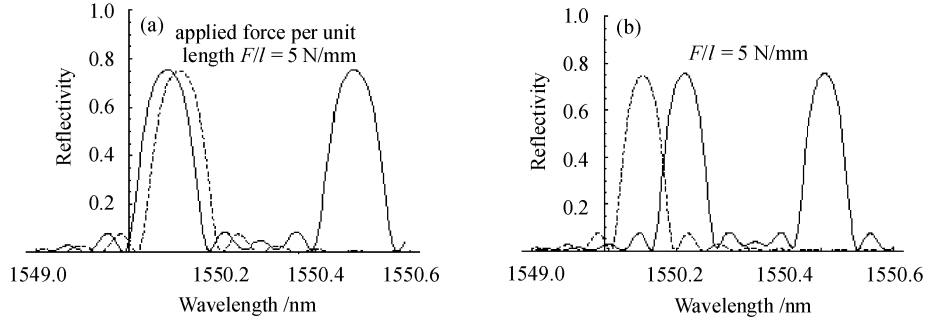


图 1 均匀光纤布拉格光栅受横向载荷作用时的反射谱
(a) 平面应变情况; (b) 平面应力情况

Fig. 1 Calculated reflection spectra of uniform FBG under transversal compress
(a) case of plane strain $\epsilon_z = 0$; (b) case of plane stress $\sigma_z = 0$

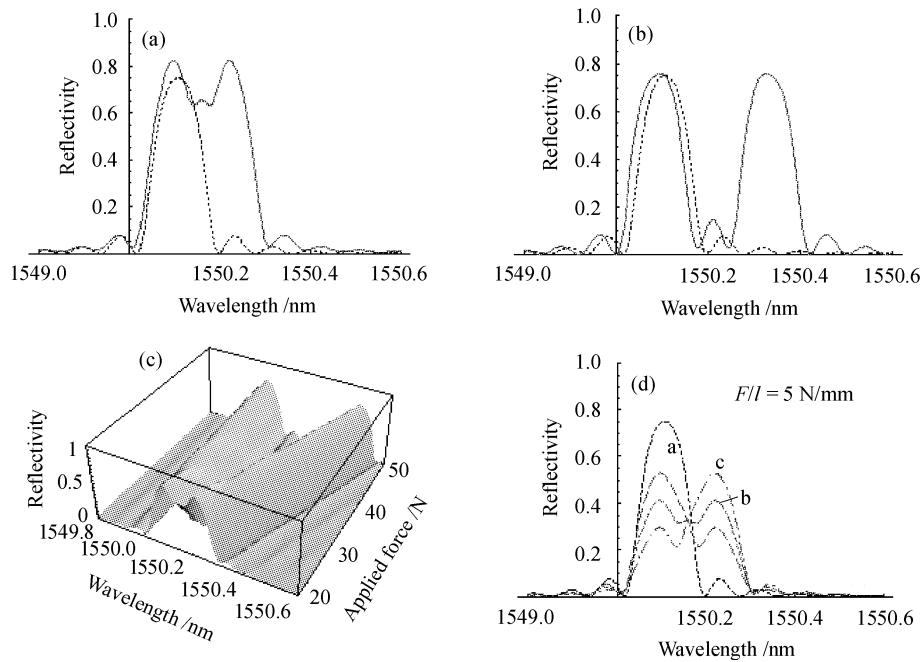


图 2 均匀光纤布拉格光栅的反射谱与横向载荷的关系模拟图

(a) $F/l = 1.5 \text{ N/mm}$; (b) $F/l = 3.0 \text{ N/mm}$; (c) 反射谱与横向载荷的三维图; (d) 考虑 x, y 偏振分量振幅比值的反射谱
Fig. 2 Calculated reflection spectra of uniform FBG under varying transverse load in the case of plane strain
(a), (b) applied force per unit length F/l are 1.5 N/mm and 3.0 N/mm , respectively; (c) the transverse load is varied;
(d) the amplitude ratios of LP_x and LP_y components in curves a, b, and c are $\sqrt{2}/2, 1, \sqrt{2}$, respectively

具体模拟结果表明,光纤光栅横向应变传感数值分析结果与理论分析结果一致,同时,也与国内外相关文献报道的实验结果相符^[6~8]。

4 实验及分析

在实际应用中,常将光纤布拉格光栅粘贴或埋

置于弹性衬底材料之中。使衬底材料产生应变的外应力形式包括纵向应力(使光纤布拉格光栅轴向拉伸或压缩)、横向应力(使光纤布拉格光栅侧向弯曲)及扭应力(使光纤布拉格光栅产生形变)。当光纤布拉格光栅受到外场(应变场或温变场)作用时,利用光检测仪器(如光谱仪 OSA)测量光纤布拉格光栅的反射波长变化,即可获得相应外场的定量信息。

实验装置包括宽带光源 (BBS), 耦合器 (2×2 coupler), 光谱仪 (ADVANTEST Q8388 OSA), 光纤布拉格光栅, 偏振控制器 (PC) 等, 如图 3 所示。宽带光源发出的光波经耦合器进入传感光栅, 若传

感光栅受横向载荷作用, 则将入射光波调制, 此时带有外场信息的调制光被传感光栅反射, 并经耦合器进入接收器 (光谱仪) 解调并输出。从光谱分布及波长漂移, 可获取详尽的外场信息。

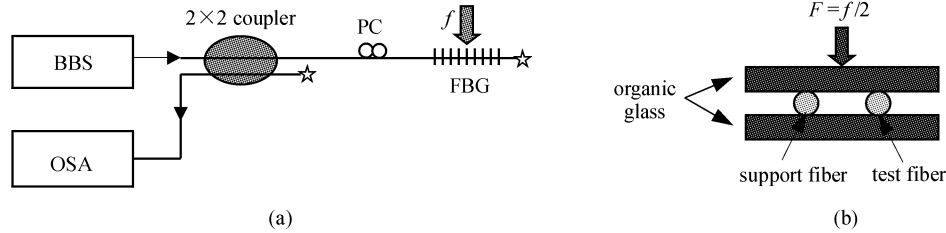


图 3 光纤布拉格光栅横向应变传感实验装置图

(a) 应变传感实验光路图; (b) 光纤布拉格光栅受力图

Fig. 3 Experiment setup of FBG under transversal compress
(a) optical configuration for measurement of strain; (b) loading system

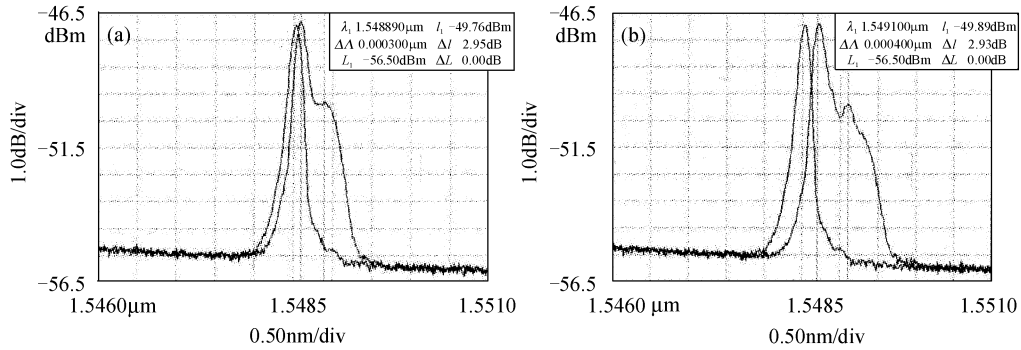


图 4 均匀光纤布拉格光栅的反射谱与横向载荷的实验图

(a) 横向载荷比较小; (b) 横向载荷比较大

Fig. 4 Experimental results of uniform FBG under transverse load
(a) transverse load is slighter; (b) transverse load is heavier

由于当光纤光栅受到横向载荷时, 轻微的错动就会使光纤光栅断裂, 故用两块光滑的有机玻璃板夹住光纤光栅。由于受实验条件所限, 只能靠螺钉的松紧定性地给光纤光栅施加一定的横向力, 得到如图 4 所示的实验结果。

从图 4 可以看出施加横向应变后, 反射谱的谐振峰被劈开, 并发生漂移。劈开的两个峰都向波长增大的方向移动, 但漂移量不一样。根据实验测得的反射谱, 并对比图 2(d) 中的模拟图, 可知 x 偏振和 y 偏振分量的振幅比值更接近 $\sqrt{2}/2$ 。图 4(b) 所加的横向载荷比 (a) 图的大, 反映在反射谱上就是 (b) 中的对应中心波长漂移量比 (a) 中的大。跟前面的理论分析一致。

对于图 4(a), $(\Delta\lambda)_x \approx 0.06$ nm, $(\Delta\lambda)_y \approx 0.36$ nm。考虑一般的横向应变情况, 即 z 方向的应力 σ_z 由 (7) 式表示, 代入波长漂移量与应力的关系式^[9]

$$(\Delta\lambda)_x = -\frac{n_{\text{eff}}^3 \Delta}{E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_x + [(1 - \nu) p_{12} - \nu p_{11}] (\sigma_y + \sigma_z) \} + 2 \frac{n_{\text{eff}} \Delta}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_y + \sigma_x)] \quad (8)$$

$$(\Delta\lambda)_y = -\frac{n_{\text{eff}}^3 \Delta}{E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_y + [(1 - \nu) p_{12} - \nu p_{11}] (\sigma_x + \sigma_z) \} + 2 \frac{n_{\text{eff}} \Delta}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_y + \sigma_x)] \quad (9)$$

其中 p_{11} , p_{12} 为光纤的弹光系数, E 为杨氏模量。可推得修正系数 $u \approx 0.27$ 。根据 (7) 式及其分析, 本实验的横向应变更接近平面应力情况。

由于光纤布拉格光栅受到纵向应变时, 反射谱的谐振峰会整体漂移, 这将给横向载荷的测量带来误差。根据理论分析, 横向应变和纵向应变对波长漂移的贡献是不一样的; 并且, 可以通过多次测量,

建立方程组,从而分别测出横向应变和纵向应变,由此得到三维的应变传感量。另外,由于夹持光纤的玻璃板不够光滑,亦会对光纤光栅产生剪切应变或者扭矩,从而造成测量误差。对此,实验前必须用酒精认真清洁玻璃板。此外,如果采用具有更高分辨能力的光谱仪,将会进一步提高横向载荷的测量精度。

5 结 论

以光纤布拉格光栅为例对横向应变传感进行了深入研究,采用数值分析方法对平面应变传感进行了模拟分析,设计了相应的实验并对上述结论进行了验证,实验结果与理论分析相符。本文的研究还表明:光纤布拉格光栅的横向应变与纵向应变对波长漂移的贡献是不一样的,因此,通过设计灵敏的传感机构,利用光纤布拉格光栅进行三维应变传感测量是可以实现的。

参 考 文 献

- Zhang Weigang, Liang Longbin, Zhao Qida *et al.*. Contrast analyses of strain measurement of fiber grating and resistance strain chip [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2001, (3):200~205
张伟刚,梁龙彬,赵启大等. 光纤光栅与电阻应变片应变测量的对比分析[J]. *传感技术学报*, 2001, (3):200~205
- Zhang Weigang, Kai Gaiyun, Zhao Qida *et al.*. Linearly torsion sensor of fiber grating with temperature-independent [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):83~87
张伟刚,开桂云,赵启大等. 免受温度影响的光纤光栅线性扭传感器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):83~87
- Zhang Weigang, Wang Yue, Zhang Dongsheng *et al.*. Real time sensing and measurement for two dimensional dynamics quantities using fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11):1323~1327
张伟刚,王 跃,张东生等. 利用光纤光栅实现力学量二维实时感测的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11):1323~1327
- Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294
- Rachid Gafsi, Mahmoud A. El-Sherif. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings [J]. *Optical Fiber Technology*, 2000, **6**(3):299~323
- P. Torres, L. C. G. Valente. Spectral response of locally pressed fiber Bragg grating [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **208**:285~291
- R. B. Wagreich, W. A. Atia, H. Singh *et al.*. Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibre [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(13):1223~1224
- Ai-ping Zhang, Bai-qu Guan, Xiao-ming Tao *et al.*. Experimental and theoretical analysis of fiber Bragg gratings under lateral compression [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **206**:81~87
- Tu Qinchang. Study on two-dimension strain sensing based on fiber gratings [D]. Bachelor's Thesis, Nankai University, 2003. 1~25
涂勤昌. 基于光纤光栅的二维应变传感研究[D]. 南开大学学士学位论文, 2003. 1~25