

## 红外光谱条件下 Bragg 光栅的横向受力研究

张 臻<sup>1</sup>, 马鹏阁<sup>1</sup>, 王金凤<sup>1</sup>, 孙俊灵<sup>2</sup>

(1. 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450015;

2. 北京工业大学, 北京 100124)

**摘要:** 如何解决光纤传输过程中的色散补偿, 以及实现高速数据的密集波分时复用和全光解复用, 成为当前研究过程中的主要难题。光纤 Bragg 光栅(FBG)是一种理想的无源传感与信号解调器件, 文中基于此探究了光纤 Bragg 光栅的横向受力特性, 建立了相应的理论模型, 搭建了 ASE100 光源的实验系统。红外光谱条件下的解调实验结果表明:透射谱主阻带内有偏振损耗的最大值;分裂点与受力大小呈线性关系, 并随受力的变化产生周期性移动;温度的不同并不能使偏振损耗的形状发生改变, 只是使其在波长轴上的位置产生了变化。上述研究成果对于明确光纤 Bragg 光栅横向受力具有明显的参考价值。

**关键词:** 光纤 Bragg 光栅; 红外光谱; 横向受力; 解调

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1841-04

## Lateral force study on conditions under IR Bragg grating

Zhang Zhen<sup>1</sup>, Ma Pengge<sup>1</sup>, Wang Jinfeng<sup>1</sup>, Sun Junling<sup>2</sup>

(1. Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China;

2. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** How to solve the optical fiber transmission dispersion compensation, as well as to achieve high-speed data-intensive wave of all-optical time division multiplexing and multiplexing solution, become a major problem during the study. Fiber Bragg Grating (FBG) is an ideal passive sensing and signal demodulation device, the lateral force characteristics of fiber Bragg grating was explored, and an experimental system ASE100 source was built. Demodulation results show that: loss of polarization had maximum transmittance spectrum of the main stop band; split point was linear relationship with size of the force, and generated to move with the periodic variation of the force; different temperatures did not change the shape of the loss of polarization, but it was generated at the position of the wavelength axis. The research results for the clear fiber Bragg grating lateral force has significant reference value.

**Key words:** fiber Bragg grating; infrared spectroscopy; lateral force; demodulation

收稿日期: 2014-10-05; 修订日期: 2014-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(71371172, 61331021); 河南省科技攻关计划项目(132102210219, 142102210076); 航空科学基金重点项目(2014ZC13004)

作者简介: 张臻(1978-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事信息与通信工程方面的教学与科研工作。Email: deepwhitezorro@163.com

## 0 引言

当前,光纤光栅已经在光纤传感、光信号处理、光源等领域崭露头角,其稳定的性能能够实现与光纤系统的有效兼容,在日后光纤通信系统的应用中必定占有举足轻重的地位<sup>[1]</sup>。近年来,多媒体与互联网通信的飞速发展使得人们对光纤通讯技术的关注日益增加。其中,密集波分时复用技术尤为突出,其能够有效地增加光纤通讯的容量<sup>[2]</sup>。然而,怎样解决光纤传输过程中的色散补偿、怎样完成高速数据的密集波分时复用和全光解复用,成为当前研究过程中的主要难题。光纤 Bragg 光栅(FBG)是一种理想的无源传感与信号解调器件,然而,研究人员对其的研究应用只局限于利用 FBG 测量轴向应变,而对其横向受压的特性研究却相当少<sup>[3-6]</sup>: A-Ping Zhang 对 FBG 的横向受压特性进行了分析;Gafsi 和 El-Sherif 对 FBG 的横向负载敏感特性进行了讨论;C.J.S de Matos 对 FBG 和线性啁啾光栅局部受压的特性进行了验证。但是,目前为止,尚未有人从理论上分析横向局部的受压特性。笔者基于上述背景,对光纤 Bragg 光栅的横向受力特性完成了研究,研究成果对于明确光纤 Bragg 光栅横向受力具有明显的参考价值。

## 1 FBG 特性分析

### 1.1 横向受力特性

首先,对 FBG 的横向受力特性进行分析,压力均匀作用在光纤的表面使其发生形变,产生双折射现象,其横截面上的两个折射率变化可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta n_x \\ \Delta n_y \end{bmatrix} = -\frac{n_{\text{eff}}^3}{2E} \begin{bmatrix} (p_{11}-2\nu p_{12}) & (1-\nu)p_{12}-\nu p_{11} \\ (p_{11}-2\nu p_{12}) & (1-\nu)p_{12}-\nu p_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y+\sigma_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $p_{11}$ 和 $p_{12}$ 为光弹系数; $\nu$ 为泊松比; $E$ 为杨氏模量; $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 和 $\sigma_z$ 为应力分量。当 FBG 两端为自由端时, $\sigma_z=0$ ;当 FBG 两端固定时, $\sigma_z=\nu(\sigma_x+\sigma_y)$ 且 $\varepsilon_z=0$ 。这里,只考虑第一种情况,即 $\sigma_z=0$ 。

选择传输矩阵法对受到横向压力的某截 FBG 进行分析。当 FBG 的总长度为 $L=10$  mm,将其看作 3 个小 FBG,长度分别为 $l_1=l_3=4.9$  mm, $l_2=0.2$  mm。1 个 $2 \times 2$ 阶方阵可以表示 1 个小 FBG,那么整个

FBG 就能够用 3 个 $2 \times 2$ 阶方阵表示。假定已知 3 个小 FBG 的矩阵,则反射幅值为:

$$\begin{bmatrix} a_0^+ \\ a_0^- \end{bmatrix} = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \begin{bmatrix} a_4^+ \\ a_4^- \end{bmatrix} \quad (2)$$

将边界值 $a_4^+=1, a_4^-=0$ 代入上式,计算得到反射率为 $R=|a_0^-/a_0^+|^2$ 。

FBG 的受压段 $l_2$ 的传输矩阵是 $T_2$ 。光栅受压导致双折射现象的产生,由于其不同的折射率变化,致使 $X$ 和 $Y$ 方向的中心波长发生改变,分别为 $\lambda_B+\Delta\lambda_x$ 和 $\lambda_B+\Delta\lambda_y$ 。

### 1.2 FBG 的光谱图和折射率分布

布拉格光纤光栅的特性之一就是能够对某一频段的光进行反射。反射光的光谱宽度一般不会超过 1 nm,其本质是在纤芯内部形成一个反射镜或者滤波器。一束光进入光纤光栅,满足布拉格条件的波长会发生反射现象,不满足布拉格条件的波长继续传输。图 1 显示了 $XY$ 面上的 Bragg 光纤光栅图,图中已经将每种颜色所代表的的折射率详细的表示了出来。其背景折射率(Background Index)设定为 1.462 9,光纤光栅折射率的变化范围是 1.462 9~1.472 9。

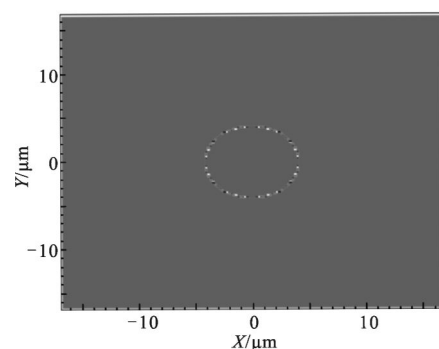


图 1 Bragg 光纤光栅在 $XY$ 面折射率分布

Fig.1 Bragg grating fiber refractive index profile in the $XY$  plane

## 2 横向力的实验分析

图 2 为检测光栅中横向力的实验系统图。光的传输路径大致如下:光由 ASE 产生,途径光纤隔离器、耦合器端口 1 和端口 3,进入 FBG,满足布拉格条件的光会在 FBG 中产生反射,再次经由耦合器端口 3 和端口 2,最后进入光谱分析仪。其中,ASE 选用的是 ASE100,其输出功率 13.5 dB,产生波长处于 1 528~1 610 nm 之间宽带光源。光谱分析仪最小分辨

率为 0.01 nm。

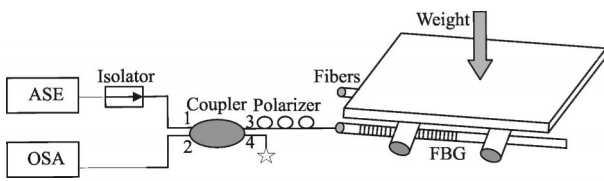


图 2 实验系统图  
Fig.2 Experimental system

首先对所应用的光纤光栅进行测量，其光栅长度为 10 mm，室温下的中心波长为 1530.5 nm，带宽为 0.2 nm，其受力位置距离中点位置约 0.2 mm 左右。最终实验结果表明，横向力作用于光栅上时，反射谱出现分裂，同时随着应力的变化，分裂点也会产生周期性的变化。图 3 中的两幅图就是光纤光栅实验反射谱，只是所受力的大小不同，分别为  $F=6\text{ N}$  和  $F=17\text{ N}$ 。由上图可以得出，分裂点的波长会随着光栅受力的增加而持续变化。图 4 显示了分裂点波长漂移与受力的关系图，该次实验中，其受力从  $F=1\text{ N}$  开始，到  $F=22\text{ N}$  结束，记录间隔为 1 N，总共记录了 22 次，记录的数据点在图中用黑色方块表示。由此能够计算出分裂点波长的漂移与受力大小的线性度

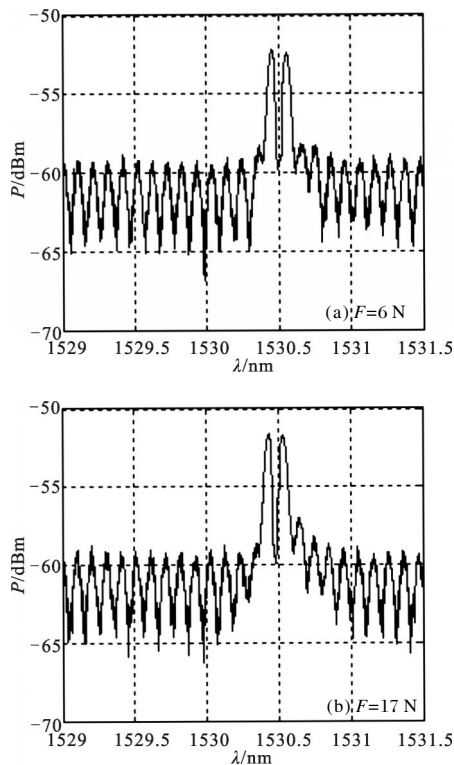


图 3 光纤光栅实验反射谱

Fig.3 Measured spectra of fiber Bragg grating

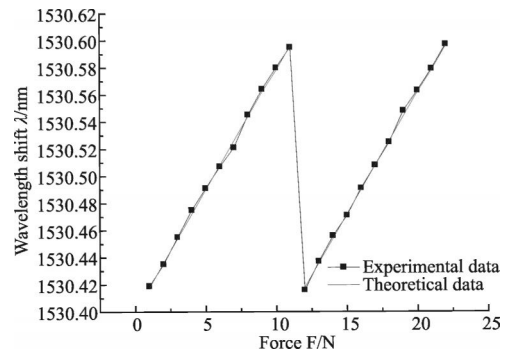


图 4 分裂点漂移与受力关系图

Fig.4 Split point wavelength shift versus applied force

为 0.018 nm/N。

### 3 FBG 解调应用设计

倘若磁场的量级处于  $0\sim 10^5$  的范围内，那么偏振损耗(Polarization Dependent Loss, PDL)值的大小会正比于磁场。这种特性能够用来测得磁场值。

#### 3.1 解调算法

图 5 即为磁场的解调框图，其中光功率计 1 和 2 出射的光功率分别为  $P_1$  和  $P_2$ ，即：

$$PDL(\lambda) = \left| 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \right| \quad (8)$$

假定磁场强度  $B$  与 PDL 的比值为  $K$ ，两者的关系式可以写成  $B=K \times PDL(\lambda)$ ，那么解调能够利用 FPGA 编程来完成。

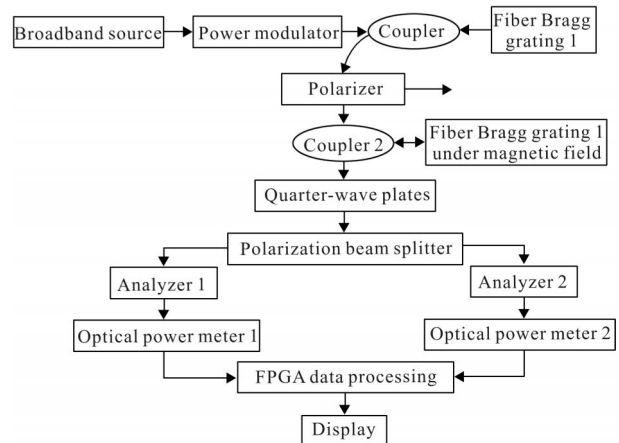


图 5 解调框图

Fig.5 Block diagram demodulation

#### 3.2 实验分析

图 6 为 PDL 值的示意图，这是通过 MATLAB 得到的。从图 6 可以得到，两个谱的交叉位置产生了

PDL 的最小值,同时,在透射谱主阻带内有 PDL 的最大值。

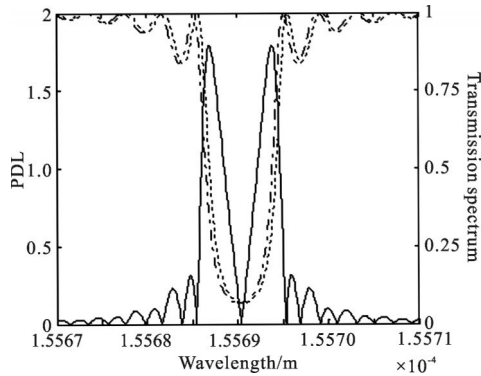


图 6 左旋和右旋圆偏振光的透射能量系数与 PDL  
Fig.6 Left handed and right handed circularly polarized light transmitted energy coefficient vs PDL

图 7 显示了不同温度下的 Bragg 光纤光栅反射能量谱,其温度从左向右依次为  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 。由此可以得到,温度的不同并不能使 PDL 的形状发生改变,只是使其在波长轴上的位置产生了变化。压力和应力对其的影响亦是如此。该方法虽然十分容易完成,并且成本相对较低,但是可存在一定的误差,其误差主要来源于:外界因素和光源波长的偏移都会影响 PDL 峰值对应波长的测量;与 PDL 峰值波长相对应的光源波长是否准确,也直接影响着其峰值的计算;光纤光栅的固有折射率也会在一定程度上

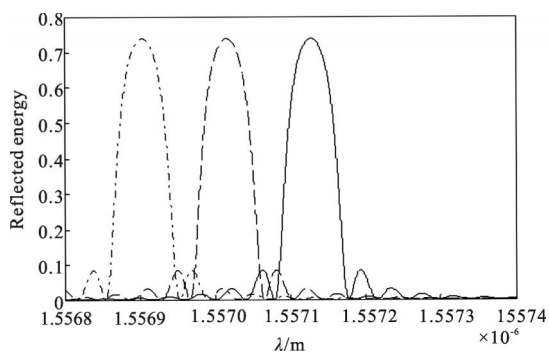


图 7 不同温度下的 Bragg 光纤光栅反射能量谱  
Fig.7 Bragg fiber grating reflected energy spectra at different temperatures

对其测量产生影响;器件本身及光在传输过程中都会产生损耗,都会影响其测量精度。

## 4 结论

文中从理论上和实验上对受横向应力情况下的光纤 Bragg 光栅的特性进行了分析,通过使用传输矩阵法对其进行理论分析和实验验证,得到了反射谱分裂点的漂移特性关系:在光纤光栅受到局部应力的情况下,其分裂点与受力谱分裂点的漂移特性关系:在光纤光栅受到局部应力的情况下,其分裂点与受力大小呈线性关系,并随受力的变化产生周期性移动。解调实验结果表明温度的不同并不能使 PDL 的形状发生改变,只是使其在波长轴上的位置产生了变化。

## 参考文献:

- [1] Wu Fei, Li Lixin, Li Yaping, et al. Study of fiber Bragg Grating characterization by transverse force to a small grating section[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005,16(11): 10-13. (in Chinese)
- [2] Liang Ming, Qian Jinren. An experimental investigation of fiber Bragg Grating transverse load sensitivity[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2004, 34(1): 53-57. (in Chinese)
- [3] Zhu Jun, Li Zhiqian, Qin Liuli. Cavity physical properties of SPP propagation in the MIM structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015,44(3): 854. (in Chinese)
- [4] Lia W Y, Chenga C C, Lob Y L. Investigation of strain transmission of surface-bonded FBGs used as strain sensors. [J]. *Sensors and Actuators*, 2009, 10(7): 603-608.
- [5] Zhao Chengjun, Zhuang Jungang, Xu Shuzhen, et al. Research on tension of anchor bolt based on fiber Bragg Grating strain sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, 33(4): 37-40. (in Chinese)
- [6] Chen Fuyun, Li Chuan, Chen Erkuo, et al. Dual-diaphragm fiber Bragg Grating soil pressure sensor [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 20(11): 3340-3344. (in Chinese)