

文章编号: 0258-7025(2009)04-0906-07

# 一种多参数光纤光栅波长调谐器的设计与研制

林锦海 张伟刚 兰玉文 刘卓琳 姜萌 尚佳彬 王春宝 刘波

(南开大学现代光学研究所光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要** 对基于应力、位移、空间角度的多参数可调谐的光纤光栅(FBG)波长调谐进行了理论分析和实验研究。根据推导出的波长调谐公式,数值模拟了光纤光栅波长受应力、位移、空间角度时的多种调谐关系。在模拟分析的基础上,设计了一种基于应力、位移、空间角度的多参数可调谐的光纤光栅波长调谐器,并进行了实验验证。实验表明基于应力、位移的调谐为线性调谐,各光栅调谐线性拟合度均达 0.9975 以上;基于角度的调谐近似满足正(余)弦调谐。理论分析和实验测量具有良好的一致性。

**关键词** 光纤光学; 波长调谐器; 应力调谐; 位移调谐; 角度调谐; 光纤布拉格光栅

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093604.0906

## Design and Research of a Multi-Parameter Fiber Grating Wavelength Tuner

Lin Jinhai Zhang Weigang Lan Yuwen Liu Zhuolin Jiang Meng  
Shang Jiabin Wang Chunbao Liu Bo

(*Key Laboratory of Opto-Electronic Information and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

**Abstract** The basic principles of multi-parameter tunable optical fiber grating wavelength tuner based on stress, displacement, space angle are analyzed and relative experimental researches are performed. According to the tunable formulas derived in detail, a series of numerical simulations about tuning relationships are presented. On the basis of numerical simulations, we design a multi-parameter tunable optical fiber grating wavelength tuner based on stress, displacement, space angle. Then we carry out relative experimental research. Experimental results indicate that the relation of center wavelength tuning with the force and displacement is linear. The linearity of three fiber Bragg grating (FBG) are above 0.9975. With space angle as a function of the wavelength of FBG, the fitting curves are approximately sine (cosine) relations. And the experimental results match the theoretical analysis perfectly.

**Key words** fiber optics; wavelength tuner; stress tuning; displacement tuning; angle tuning; fiber Bragg grating

## 1 引言

光纤光栅(FBG)是利用光纤材料的光敏性在光纤内建立的一种空间周期性折射率分布,光纤光栅能够改变或控制光在光栅区域的传播行为和方式。光纤光栅结构新颖、性能优异<sup>[1~3]</sup>,因此在光纤通信和光纤传感领域均有广泛应用<sup>[4~10]</sup>。基于光纤光

栅的调谐器件具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强、动态范围宽、可靠性好、插入损耗低、与光纤系统兼容性好、体积小等优异特性。鉴于光纤光栅调谐器的诸多优良特性,基于光纤光栅的调谐器设计已经引起了业内人士的高度关注<sup>[11~13]</sup>。基于光纤光栅的调谐器已被广泛用于光纤通信和光纤传感等领域。

收稿日期: 2008-12-09; 收到修改稿日期: 2008-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(10674075, 60577018, 60736039)、国家 863 计划(2006AA01Z217)、光电信息技术教育部重点实验室开放基金、天津市高等学校科技发展基金(20060609) 资助项目。

作者简介: 林锦海(1985-),男,硕士研究生,主要从事光子技术及光通信方面的研究。E-mail: ljh03332@163.com

导师简介: 张伟刚(1959-),男,教授,博士生导师,主要从事光子技术与现代光传感、新型光电子器件的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

目前,基于光纤光栅的调谐器件的调谐方式<sup>[14~18]</sup>主要有机械调谐<sup>[19,20]</sup>、热调谐<sup>[21,22]</sup>、电磁调谐<sup>[23,24]</sup>。机械调谐因为形式简单,易于实现,得到广泛采用。

本文对基于应力、位移、空间角度的多参数光纤光栅的波长调谐进行了研究,阐述了其调谐原理,并推导出相关的调谐公式。采用圆柱悬臂梁结构,设计并实现了一种新型的基于应力、位移、空间角度的光纤光栅波长调谐器。实验表明这种基于光纤光栅的波长调谐器件可以准确实现基于三维空间应力、挠度、角度的多参数光纤光栅波长调谐。该调谐器件的调谐灵敏度高、结构简单、操作方便、性能良好,因而具有广泛的应用前景。

## 2 光纤光栅调谐机构以及相关的理论分析

基于应力、位移、空间角度的多参数光纤光栅波长调谐结构如图 1 所示。该调谐机构由圆柱形悬臂梁和三根光纤光栅组成。圆柱形悬臂梁为刚性的,弹性模量为  $E$ ,半径为  $R$ ,长为  $L$ ,一端固定,另一端为自由端;三根光纤光栅平行于悬臂梁轴线粘贴于悬臂梁的侧面。三根光栅之间相距  $120^\circ$ ,光栅中心距离固定端的距离为  $l$ ,在光纤光栅的自由端施加力  $F$  时,悬臂梁将会发生弯曲,光纤光栅也将产生形变,光纤光栅的中心波长将会发生漂移,从而实现波长调谐。

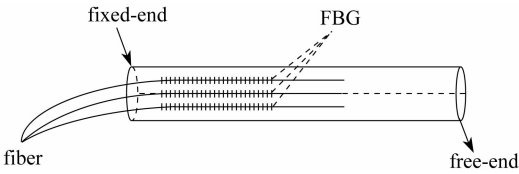


图 1 光纤光栅波长调谐结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FBG wavelength tuning structure

建立如图 2 所示的坐标系。取圆柱体横截面的圆心作为原点,横截面的法线作为  $z$  轴,横截面内原点与其中一根光栅的连线作为  $x$  轴,横截面内与  $x$  轴垂直的方向为  $y$  轴。设力  $F$  与  $z$  轴的夹角为  $\theta$ ,力  $F$  在横截面上的投影  $F_{xy}$  与  $x$  轴的夹角为  $\varphi$ ,那么  $F$  与三根光栅的夹角分别为  $\varphi, \varphi+2\pi/3, \varphi+4\pi/3$ 。

设应变受力点到中性层的距离为  $y$ ,曲率半径为  $\rho$ ,由材料力学的理论可知,悬臂梁应变满足  $\epsilon = y/\rho$ 。将力  $F$  分解为沿轴向的  $F_z$  和悬臂梁横截面内的  $F_{xy}$ ,  $F_z$  和  $F_{xy}$  将分别产生轴向应变  $\epsilon_z$  和  $\epsilon_{xy}$ , 轴向应变  $\epsilon_z$  满足

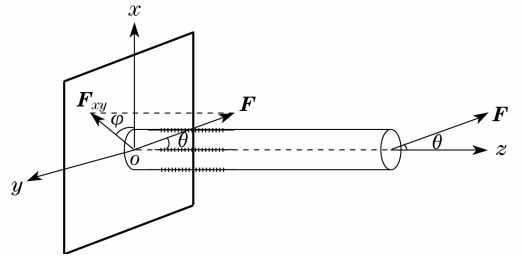


图 2 三维坐标系下的传感机构示意图

Fig. 2 Three-dimensional coordinate system

$$\epsilon_z = \sigma/E = F_z/\pi R^2 E, \quad (1)$$

其中,  $\sigma$  为应力,  $F_z = \int \sigma dA = \sigma \cdot \pi R^2$ 。横向应变  $\epsilon_{xy}$  满足

$$\epsilon_{xy} = \sigma/E = My/EI_x, \quad (2)$$

式中  $M$  为弯矩,  $I_x = \int_A y^2 dA = \pi/4 R^4$  为横截面对  $x$  轴的惯性矩。于是,有

$$\epsilon_{xy} = \frac{F_{xy}(L-l)y}{E \cdot (\pi/4) R^4}. \quad (3)$$

三根光栅的应变分别为  $\epsilon_1 = \xi F_{xy} \cos \varphi + \epsilon_z$  ( $y = R \cos \varphi$ ),  $\epsilon_2 = \xi F_{xy} \cos(\varphi + 2\pi/3) + \epsilon_z$  ( $y = R \cos(\varphi + 2\pi/3)$ ),  $\epsilon_3 = \xi F_{xy} \cos(\varphi + 4\pi/3) + \epsilon_z$  ( $y = R \cos(\varphi + 4\pi/3)$ ), 其中,  $\xi = 4(L-l)/E\pi R^3$ 。

根据耦合模理论<sup>[11]</sup>, 恒温下光纤光栅的  $\Delta\lambda$  总变化可以表示为

$$\Delta\lambda = \lambda_0(1 - P_e)\epsilon = \kappa_e \epsilon, \quad (4)$$

式中  $P_e$  为光纤的有效光弹系数且  $P_e = 0.22$ 。

将三根光栅的应变分别代入(4)式有

$$\lambda_i = \lambda_{0i} + \kappa_i F, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

其中,  $\kappa_i$  为应力调谐灵敏度,

$$\kappa_1 = \lambda_{01} \frac{1 - P_e}{\pi R^2 E} \left( -\frac{4 \sin \theta \cos \varphi \cdot (L-l)}{R} + \cos \theta \right)$$

$$\kappa_2 = \lambda_{02} \frac{1 - P_e}{\pi R^2 E} \times$$

$$\left[ -\frac{4 \sin \theta \cos \left( \varphi + \frac{2\pi}{3} \right) \cdot (L-l)}{R} + \cos \theta \right],$$

$$\kappa_3 = \lambda_{03} \frac{1 - P_e}{\pi R^2 E} \times$$

$$\left[ -\frac{4 \sin \theta \cos \left( \varphi + \frac{4\pi}{3} \right) \cdot (L-l)}{R} + \cos \theta \right],$$

$$\cos \theta = \frac{\pi R^2 E}{3(1 - P_e)} \left( \frac{\kappa_1}{\lambda_{01}} + \frac{\kappa_2}{\lambda_{02}} + \frac{\kappa_3}{\lambda_{03}} \right),$$

$$\tan \varphi = \sqrt{3} \frac{\frac{\kappa_3}{\lambda_{03}} - \frac{\kappa_2}{\lambda_{02}}}{\frac{2\kappa_1}{\lambda_{01}} - \frac{\kappa_2}{\lambda_{02}} - \frac{\kappa_3}{\lambda_{03}}}.$$

由悬臂梁自由端的侧向位移(挠度)  $\omega = \frac{FL^3}{3EI}$   
 $= \frac{4FL^3}{3\pi ER^4}$ , 可以求出光纤光栅的波长变化与位移间的  
 的关系为

$$\lambda_i = \delta_i \omega + \lambda_{0i}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

其中,

$$\delta_1 = \frac{1 - P_e}{\pi R^2 E} \left( -\frac{4 \sin \theta \cos \varphi \cdot (L - l)}{R} + \cos \theta \right) \frac{3\pi ER^4}{4L^3},$$

$$\delta_2 = \frac{1 - P_e}{\pi R^2 E} \times$$

$$\left[ -\frac{4 \sin \theta \cos \left( \varphi + \frac{2\pi}{3} \right) \cdot (L - l)}{R} + \cos \theta \right] \frac{3\pi ER^4}{4L^3},$$

$$\delta_3 = \frac{1 - P_e}{\pi R^2 E} \times$$

$$\left[ -\frac{4 \sin \theta \cos \left( \varphi + \frac{4\pi}{3} \right) \cdot (L - l)}{R} + \cos \theta \right] \frac{3\pi ER^4}{4L^3}.$$

(5)式为基于应力、角度的光纤光栅波长调谐的基本公式,(6)式为基于位移、角度的光纤光栅波长调谐的基本公式。

### 3 光栅波长调谐关系的理论模拟

基于公式(5)和公式(6),选取相关的实验参数

进行数值模拟。选取参数如下: $P_e = 0.22, L = 8 \text{ cm}, l = 1.5 \text{ cm}, R = 2 \text{ mm}, E = 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}, \lambda_{01} = 1533.08 \text{ nm}, \lambda_{02} = 1532.68 \text{ nm}, \lambda_{03} = 1533.20 \text{ nm}$ 。在公式(5)中取定  $F$  值,对三根光纤光栅波长随着角度  $\theta$  和  $\varphi$  的变化进行模拟。

当  $F$  取恒定值  $63 \text{ N}$  时,三根光纤光栅波长随角度  $\theta$  和  $\varphi$  的变化关系如图 3 所示。模拟发现,光栅 1 和光栅 3 的波长变化情况比较相似,光栅 2 的变化情况则与光栅 1 和光栅 3 相反。

当  $\varphi$  取定值  $56^\circ$  时,三根光纤光栅波长随应力  $F$  和角度  $\theta$  的变化关系如图 4 所示。

当  $\theta$  取定值  $88^\circ$  时,三根光纤光栅波长随应力  $F$  和角度  $\varphi$  的变化关系如图 5 所示。

当  $\omega$  取定值  $5 \text{ mm}$  时,三根光纤光栅波长随角度  $\theta$  和  $\varphi$  的变化关系如图 6 所示。

### 4 实验装置及结果分析

光纤光栅波长调谐的实验装置如图 7 所示。

该调谐装置由宽带光源 BBS(Broadband Source),光谱分析仪 OSA(Optical Spectrum Analyzer),3 dB 耦合器,1×3 光开关,粘贴于悬臂梁上的光纤光栅五

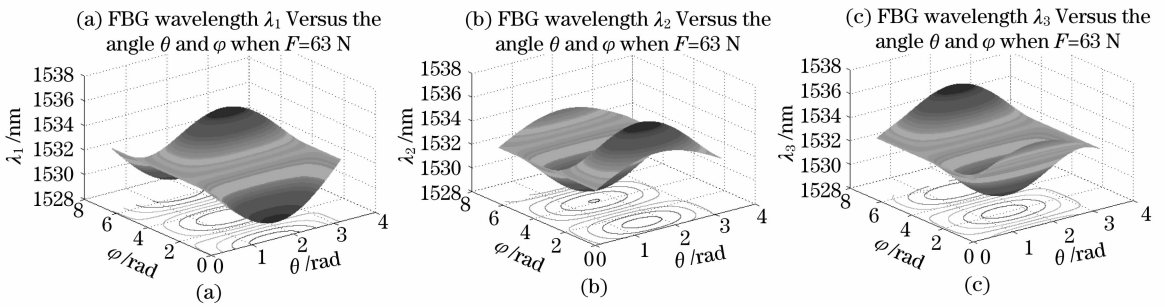


图 3  $F$  恒定时,三根光纤光栅波长随角度  $\varphi$  和  $\theta$  变化的理论模拟曲线。(a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3

Fig. 3 With constant  $F$ , simulative curve of the relation

between the wavelength of FBG and angle  $\varphi, \theta$ . (a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3

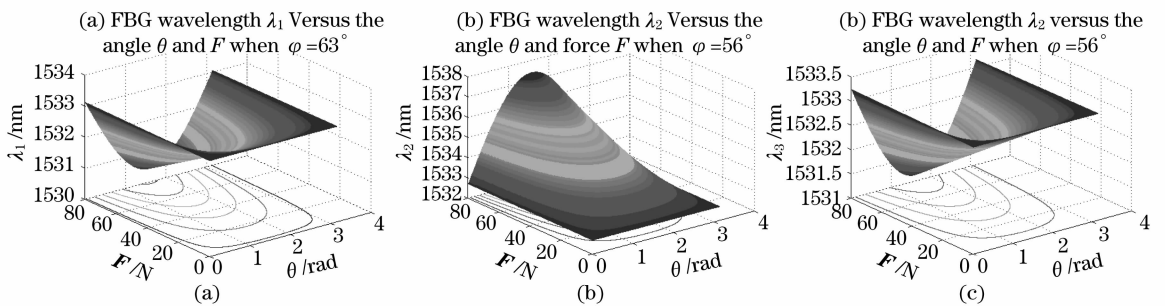


图 4  $\varphi$  恒定时,三根光纤光栅波长随应力  $F$  和角度  $\theta$  变化的理论模拟曲线。(a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3

Fig. 4 With constant  $\varphi$ , simulative curve of the relation between the wavelength

of FBG and force  $F$  and angle  $\theta$ . (a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3

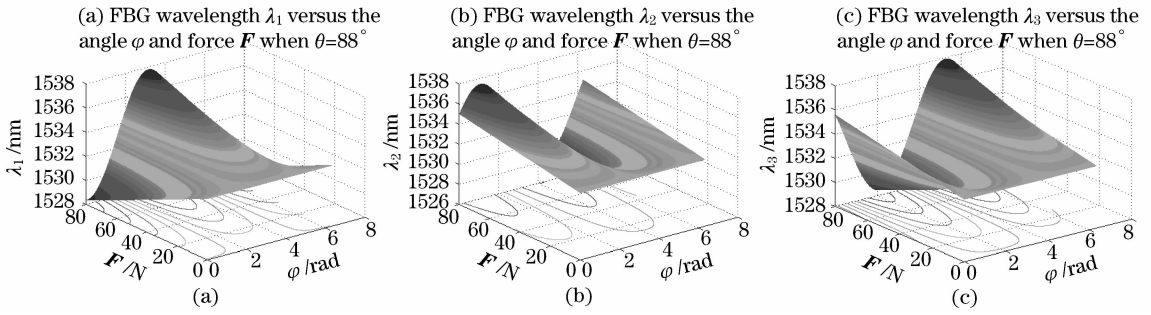


图 5  $\theta$  恒定时, 三根光纤光栅波长随应力  $F$  和角度  $\varphi$  变化的理论模拟曲线。(a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3

Fig. 5 With constant  $\theta$ , simulative curve of the relation between the wavelength of FBG and force  $F$  and angle  $\varphi$ . (a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3

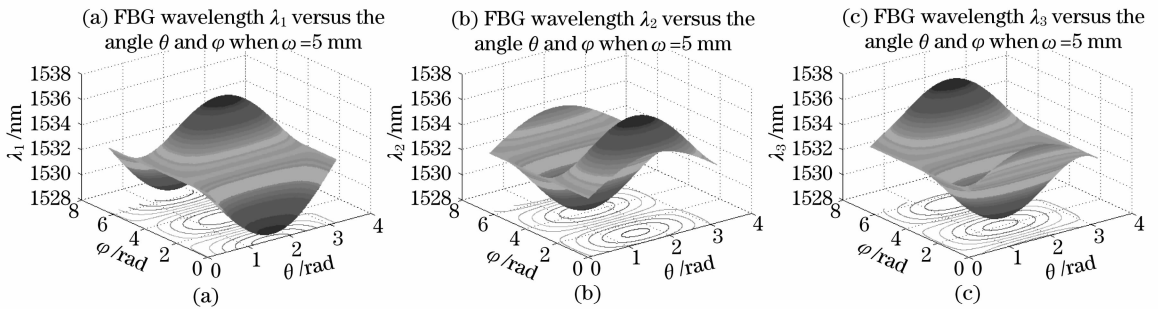


图 6  $\omega$  恒定时, 三根光纤光栅波长随角度  $\theta$  和  $\varphi$  变化的理论模拟曲线。(a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3

Fig. 6 With constant  $\omega$ , simulative curve of the relation between the wavelength of FBG and angle  $\theta$ ,  $\varphi$ . (a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3

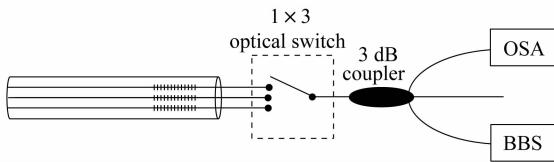


图 7 光线光栅波长调谐装置原理图

Fig. 7 Schematic of FBG wavelength tuning setup

部分组成。实验中所选用的刚性圆柱体悬臂梁长  $L=8$  cm, 半径  $R=2$  mm, 杨氏模量  $E=2.1 \times 10^{11}$  Pa, 三根光纤光栅平行于悬臂梁轴线粘贴于圆柱体悬臂梁的表面, 三根光栅之间相距  $120^\circ$ 。3 dB 耦合器一方面将光源 BBS 发出的光耦合进光纤光栅, 另一方面将光纤光栅反射回来的光耦合进入 OSA 以便检测。光纤光栅的波长用型号为 AQ6317B 的光谱分析仪进行测量, 光谱仪的扫描次数取  $AVG=1$ ,  $RES=0.2$  nm。室温下测得三根光纤光栅的中心波长分别为:  $\lambda_{01}=1533.08$  nm,  $\lambda_{02}=1532.68$  nm,  $\lambda_{03}=1533.20$  nm。

通过对悬臂梁在不同角度施加不同的应力或位移, 或者在相同角度之下施加不同的应力和位移, 可以对三根光纤光栅的波长进行不同的调谐。当  $\varphi=56^\circ$ ,  $\theta=124^\circ$  时, 得到图 8 中三根光纤光栅的反射光谱图。从图中发现, 光栅 1 和光栅 3 的波长分别向

短波方向漂移了 2.08 nm 和 1.88 nm, 而光栅 2 则向长波方向漂移了 3.04 nm, 相应的实验结果如图 9 所示。

由图 9(a) 可见, 三根光纤光栅的波长  $\lambda$  与应力  $F$  之间均呈明显的线性关系, 三直线拟合方程分别为:  $\lambda_1 = 1533.0952 - 0.0289 F$ ,  $\lambda_2 = 1532.6721 + 0.0421 F$ ,  $\lambda_3 = 1533.1989 - 0.0226 F$ , 线性拟合度分别为 0.99873, 0.99959, 0.99933, 这表明线性度是很好的。于是可以得到三根光纤光栅在  $\varphi=56^\circ$ ,  $\theta=124^\circ$  时的应力调谐灵敏度分别为:  $\kappa_1 = -0.0289$  nm/N,  $\kappa_2 = 0.0421$  nm/N,  $\kappa_3 = -0.0226$  nm/N。经理论计算得到的三根光纤光栅的波长  $\lambda$  与应力  $F$  之间的调谐方程分别为:  $\lambda_1 = 1533.08 - 0.0276 F$ ,  $\lambda_2 = 1532.68 + 0.0485 F$ ,  $\lambda_3 = 1533.20 - 0.0217 F$ , 调谐灵敏度分别为  $\kappa_1 = -0.0276$  nm/N,  $\kappa_2 = 0.0485$  nm/N,  $\kappa_3 = -0.0217$  nm/N。

由图 9(b) 可见, 三根光纤光栅的波长  $\lambda$  与自由端侧向位移(挠度)  $\omega$  之间均呈明显的线性关系, 三直线拟合方程分别为:  $\lambda_1 = 1533.0681 - 351.9722\omega$ ,  $\lambda_2 = 1532.7125 + 512.7994\omega$ ,  $\lambda_3 = 1533.1770 - 274.8911\omega$ , 线性度分别为: 0.99906, 0.99852, 0.99758。于是可以得到三根光纤光栅在  $\varphi=56^\circ$ ,

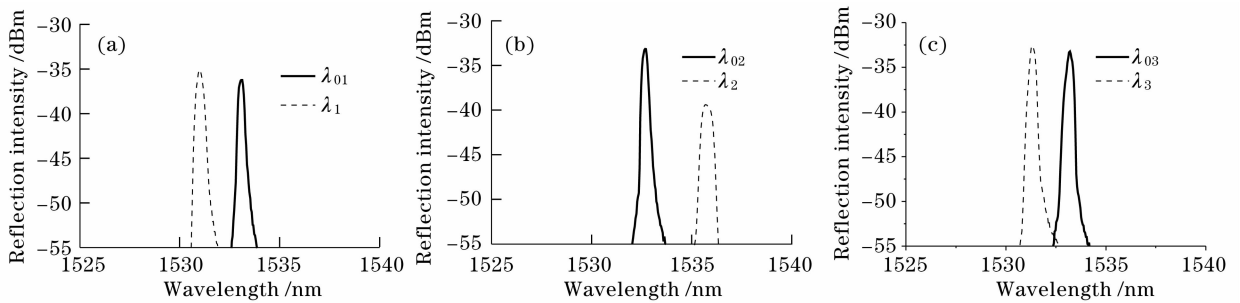


图8  $\varphi=56^\circ, \theta=124^\circ, F=73\text{ N}$ 时, 三根光纤光栅的反射光谱图。(a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3

Fig. 8 With  $\varphi=56^\circ, \theta=124^\circ, F=73\text{ N}$ , reflection spectrum of three FBG. (a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3

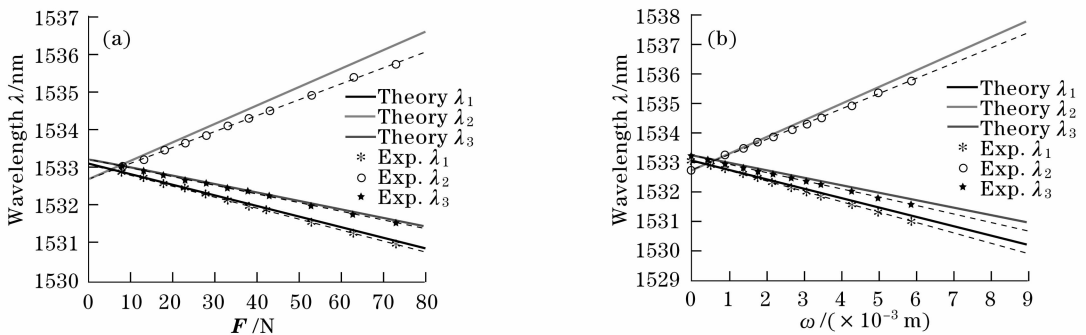


图9  $\varphi=56^\circ, \theta=124^\circ$ 时, 三根光纤光栅波长随  $F$ (a) 和  $\omega$ (b)变化的理论和实验曲线

Fig. 9 With  $\varphi=56^\circ, \theta=124^\circ$ , theoretical and experimental plots of force  $F$ .

(a) and displacement  $\omega$  (b) as a function of FBG wavelength

$\theta=124^\circ$  时的应力调谐灵敏度分别为  $\delta_1 = -351.9722\text{ nm/m}$ ,  $\delta_2 = 512.7994\text{ nm/m}$ ,  $\delta_3 = -274.8911\text{ nm/m}$ 。经理论计算得到三根光纤光栅的波长  $\lambda$  与自由端侧向位移(挠度)  $\omega$  之间的调谐方

程分别为:  $\lambda_1 = 1533.08 - 318.9062\omega$ ,  $\lambda_2 = 1532.68 + 562.6257\omega$ ,  $\lambda_3 = 1533.20 - 250.4977\omega$ , 相应的理论位移调谐灵敏度分别为  $\delta_1 = -318.9062\text{ nm/m}$ ,  $\delta_2 = 562.6257\text{ nm/m}$ ,  $\delta_3 = -250.4977\text{ nm/m}$ 。

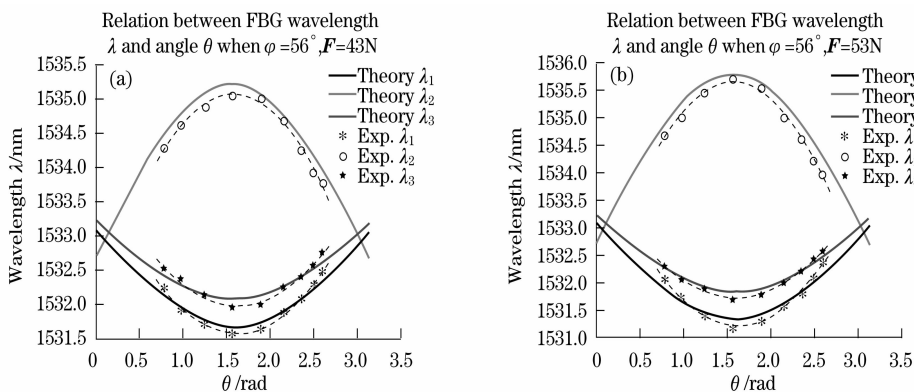


图10  $\varphi=56^\circ, F=43\text{ N}$  (a),  $\varphi=56^\circ, F=53\text{ N}$  (b)三根光纤光栅波长随角度  $\theta$ 变化的理论和实验曲线

Fig. 10 With  $\varphi=56^\circ, F=43\text{ N}$  (a) and with  $\varphi=56^\circ, F=53\text{ N}$  (b) theoretical and experimental plots of angle  $\theta$  as a function of FBG wavelength

从上述分析可知, 三根光纤光栅应变灵敏度 and 位移灵敏度实验测量值与理论分析两者之间存在一定的差异, 造成这种差异的主要原因有: 测量角度的过程中引入误差; 光纤光栅、悬臂梁、粘贴剂为非同性材料, 光纤光栅与悬臂梁之间粘贴并非完全刚性;

周围环境微小的变化等。

由图10可见, 在应力  $F$  和角度  $\varphi$  恒定时, 三根光纤光栅的波长变化和角度  $\theta$  之间不再是线性的变化, 而是比较接近正弦(或余弦)规律变化。实验结果和理论模拟之间也比较吻合。

## 5 结 论

利用圆柱型悬臂梁,设计并实现了应力、位移、角度的多参数光纤光栅波长调谐。其中,基于应力、位移的调谐为线性调谐,基于角度的调谐为正弦或余弦调谐。通过施加不同方向的应力或者位移,可以实现对调谐灵敏度、调谐范围的灵活控制。并且,可以实现基于不同角度的光纤光栅波长调谐。实验结果与理论模拟表现出良好的一致性。优化结构设计,可进一步提高测量灵敏度。研究表明,该调谐机构可用于光纤通信与光纤传感系统,在国防及民用工程监测领域具有良好的应用前景。

## 参 考 文 献

- Liu Zhiguo, Zhang Yibing, Jin Fahong *et al.*. Technology of optical fiber gratings and their developments [J]. *Optical Communication Technology*, 1996, **2**(2):141~145  
刘志国, 张艺兵, 金发宏等. 光纤光栅技术及其发展[J]. 光通信技术, 1996, **2**(2):141~145
- Lu Shaohua, Xu Ou, Dong Xiaowei *et al.*. Analysis for the reflective spectrum characteristics of chirped phase-shifted fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):577~581  
鲁韶华, 许 鸥, 董小伟等. 啾啾相移光纤光栅的反射谱特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(4):577~581
- Meng Jiang, Weigang Zhang, Long Jin *et al.*. Reflection spectra of fiber Bragg gratings in quadratic strain field [J]. *Optoelectron. Lett.*, 2006, **2**(6):0419~0421
- Zhang Weigang, Kai Guiyun, 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转传感器[J]. 中国激光, 2003, **30**(1):83~87
- Weigang Zhang, Guiyun Kai, Xiaoyi Dong *et al.*. Temperature-independent FBG-type torsion sensor based on combinatorial torsion beam [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8):1154~1156
- Weigang Zhang, Xiaoyi Dong, Qida Zhao *et al.*. FBG-type sensor for simultaneous measurement of force (or displacement) and temperatures based on bilateral cantilever beam [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12):1340~1342
- Zhang Weigang, Tu Qinchang, Sun Lei *et al.*. Recent progress in theory, design and applications of fiber grating sensors [J]. *Progress in Physics*, 2004, **24**(4):398~423  
张伟刚, 涂勤昌, 孙 磊等. 光纤光栅传感器的理论、设计及应用的最新进展[J]. 物理学进展, 2004, **24**(4):398~423
- Jiang Meng, Zhang Weigang, Tu Qinchang *et al.*. Fabrication of temperature-insensitive chirped fiber grating pressure sensor. *Advanced Sensor Systems and Applications III* [J]. *SPIE*, 2008, **6830**:83018
- Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.*. Light intensity-referred and temperature-insensitive fiber Bragg grating dynamic pressure sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):207~211  
郭 团, 赵启大, 刘丽辉等. 光强检测型光纤光栅温变不敏感动态压力传感研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(2):207~211
- Guo Tuan, Liu Bo, Zhang Weigang *et al.*. Research on optical fiber grating chirp-sensing technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):828~834  
郭 团, 刘 波, 张伟刚等. 光纤光栅啾啾化传感研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(5):828~834
- Tu Qinchang, Zhang Weigang, Liu Bo *et al.*. Development of a device with controllably tuning bandwidth of fiber Bragg grating [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2006, **28**(5):517~519  
涂勤昌, 张伟刚, 刘 波等. 光纤光栅带宽可控调谐装置的研制[J]. 压电与声光, 2006, **28**(5):517~519
- Qin Zixiong, Zeng Qingke, Xiang Yang *et al.*. Grating wavelength shifter with a broad-range tunability by using a beam of uniform strength [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12):1421~1425  
秦子雄, 曾庆科, 项 阳等. 大调谐范围的等强度梁光纤光栅波长调节器[J]. 光学学报, 2001, **21**(12):1421~1425
- Han Zehua, Qu Ronghui, Geng Jianxin *et al.*. Progress and applications of fibre grating tuning techniques [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(3):22~25  
韩泽华, 瞿荣辉, 耿建新等. 光纤光栅调谐技术的进展与应用[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(3):22~25
- Zhang Weigang, Kai Guiyun, Dong Xiaoyi *et al.*. A novel independent tuning method of center wavelength and bandwidth of fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2):164~169  
张伟刚, 开桂云, 董孝义等. 新型光纤光栅中心波长与带宽独立调谐方法[J]. 光学学报, 2003, **23**(2):164~169
- Xue Lifang, Liu Jianguo, Zhao Qida *et al.*. A novel independent tuning method of center wavelength and bandwidth of fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):596~600  
薛力芳, 刘建国, 赵启大等. 一种新型光纤光栅波长与带宽独立调谐的方法[J]. 中国激光, 2006, **33**(5):596~600
- Guo Wei, Liu Kai, Huang Yongqing *et al.*. Study on Bragg wavelength tuning property of fiber gratings [J]. *Optical Communication Technology*, 1999, **24**(3):217~219  
郭 威, 刘 凯, 黄永清等. 光纤光栅喇格波长调谐特性的研究[J]. 光通信技术, 1999, **24**(3):217~219
- K. W. Yang, A. G. Liu, Cheng Chihchun *et al.*. Topology and shape optimizations of substrates for chirp fiber Bragg grating spectrum tuning [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(7):1182~1187
- Han Zehua, Qu Ronghui, Geng Jianxin *et al.*. A novel fiber grating tuning method without chirp [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1362~1366  
韩泽华, 瞿荣辉, 耿建新等. 一种新型光纤光栅无啾啾调谐方法[J]. 中国激光, 2005, **32**(10):1362~1366
- Zhang Weigang, Zhao Qida, Kai Guiyun *et al.*. Wavelength tunable principle and technological progress of fiber Bragg grating based on elastic beam [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, **22**(5):299~303  
张伟刚, 赵启大, 开桂云等. 基于弹性梁的光纤光栅波长调谐原理及技术[J]. 半导体光电, 2001, **22**(5):299~303
- Yu Youlong, Liu Zhiguo, Dong Xiaoyi *et al.*. Linear tuning of fiber Bragg grating based on a cantilever [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(5):621~625  
余有龙, 刘治国, 董孝义等. 基于悬臂梁的光纤光栅线性调谐[J]. 光学学报, 1999, **19**(5):621~625
- Han Qun, Lü Kecheng, Li Jiafang *et al.*. Research on a novel fiber Bragg grating thermal tuning scheme [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(12):4253~4256  
韩 群, 吕可诚, 李家方等. 一种新颖的光纤光栅温度调谐装置的原理与实验研究[J]. 物理学报, 2004, **53**(12):4253~4256
- Geng Jianxin, Li Lin, Zhao Ling *et al.*. Temperature tunability of metallized fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):735~738  
耿建新, 李 琳, 赵 岭等. 金属化光纤光栅的温度调谐[J]. 中

- 国激光, 2003, **30**(8):735~738
- 23 Dong Xinyong, Wen Wuqi, Wei Yuhua *et al.*. Electrically tuning fiber Bragg grating by metal coating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4):422~424
- 董新永, 温午麒, 魏玉花 等. 光纤布喇格光栅的金属管封装与电调谐[J]. 光子学报, 2001, **30**(4):422~424
- 24 Huang Yonglin, Dong Xingfa, Li Jie *et al.*. Electromagnetic force tuning of fiber Bragg grating [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, **25**(3):228~230
- 黄勇林, 董兴法, 李 杰 等. 光纤光栅的电磁调谐[J]. 半导体光电, 2004, **25**(3):228~230