

文章编号: 0253-2239(2005)09-1153-4

一种新颖的高灵敏度光纤光栅带宽调谐机构*

涂勤昌¹ 张伟刚¹ 陈建军² 刘波¹ 金龙¹ 牛晖² 陈振洲² 董孝义¹

(¹ 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)
(² 南开大学物理科学学院, 天津 300071)

摘要: 设计了一种由一直梁和两个半圆拱组成的开口环结构, 并将均匀光纤布拉格光栅斜贴于直梁中间的表面处。对两半圆拱施加与直梁方向平行的应力作用时, 光纤光栅受到线性应力场的作用, 光纤布拉格光栅即转化为啁啾光纤光栅。该机构实现了光纤光栅带宽的线性调谐, 线性度高达 0.9982, 实验结果与理论分析一致。与以往的带宽调谐机构相比, 该机构具有很高的应力灵敏度, 在 20 N 力的作用下, 可产生约 7 nm 的带宽反射, 灵敏度达 0.34 nm/N。利用环境温度对带宽调谐无影响的特性, 采用带宽编码技术, 研制出具有温度自动补偿特性、高灵敏度的带宽调谐装置。

关键词: 光纤光学; 光栅; 带宽调谐; 线性应变; 温度不敏感

中图分类号: TN247; TN253 文献标识码: A

A Novel High-Sensitivity Chirp Tuning Device of Fiber Grating

Tu Qinchang¹ Zhang Weigang¹ Chen Jianjun² Liu Bo¹ Jin Long¹

Niu Hui² Cheng Zhenzhou² Dong Xiaoyi¹

(¹ Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)
(² College of Physics Science, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract: A novel and simple chirp tuning device of fiber Bragg grating (FBG) is proposed, which possesses a "C" shape and consists of a straight beam and two half-round arches. A linear strain field is induced over the straight beam by applying stress on the arches. As a result, the uniform FBG bonded on the surface of the beam is converted to a linearly chirped fiber grating. The bandwidth of the FBG is tuned linearly by applied stress with the sensitivity up to 0.34 nm/N and a linearity of 0.9982. In the experiment, a chirp bandwidth of about 7 nm can be obtained with the stress of 20 N. Additionally, the reflective spectra are quite flat. The experimental results are in good agreement with the analyses. Due to the characteristic of the bandwidth immunity to environmental temperature variation and large tunable range of bandwidth, the device can be applied in fields such as measurement of stress (strain, curvature, etc.), fiber laser, chromatic dispersion compensation.

Key words: fiber optics; grating; chirp tuning; linear strain field; immunity to temperature

1 引 言

光纤光栅是一种新型的光子器件, 它是在光纤中形成的一种空间周期性折射率分布, 这种结构可以改变和控制光波在光纤中的传播行为。光纤光栅传感器具有诸多传统传感器所不具有的优良特性, 如抗电磁干扰、高精度、体积小、可远程测量等, 从而在光纤通信和传感领域中获得广泛应用^[1~4]。光纤

光栅是波长编码装置, 具有不受连接损耗, 光源功率抖动的影响等优点, 常用于应力、应变的感测。但应力/应变与温度的交叉敏感性给实际测量带来较大误差。为分离应变与温度的交叉敏感效应, 人们提出不少解决办法^[5,6], 但这些方法普遍存在结构复杂或光纤光栅成本增加等缺点。文献^[7~9]采用带宽编码技术, 获得温度不敏感的曲率、应力/应变测

* 国家 863 计划(2002AA313110)和南开大学科技创新基金资助课题。

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, 主要从事光纤光栅传感技术的研究。
E-mail: tuqc@mail.nankai.edu.cn

收稿日期: 2004-09-20; 收到修改稿日期: 2005-03-10

量。但文献[7]中的实验,是利用简支梁来实现带宽调谐的,而由于梁的中心部位具有最大的挠度,在光纤布拉格光栅用于大尺度啁啾传感时,微弯条件难以保证;而文献[8,9]则采用等强度悬臂梁设计传感装置,平坦性好,且调谐带宽大,不足的是需施加相当大的外力。

为了提高带宽调谐效率,提出一种可产生线性梯度应变的新颖传感机构。将光纤布拉格光栅斜贴于该机构表面,利用带宽编码技术,获得温度不敏感的高灵敏度外力调谐。

2 带宽调谐原理

设计的开口环传感机构如图 1 所示。该机构中间为一直梁,两端为半圆拱结构。当开口环半圆拱受到外力 F 时,根据力学平衡原理,截面上将作用有内力分量 F_{Nx} 和弯矩 M_x ,其中 $F_{Nx} = F, M_x = Fd$, d 为竖直力与直梁中线的距离。设开口环直梁的宽度为 a ,厚度为 b 。根据理论分析,我们得到由力 F 引起的开口环直梁横截面上的正应力分布为

$$\sigma_x = \frac{12Fd}{a^3b}y - \frac{F}{ab} = \frac{12Fd}{a^3b}\left(y - \frac{a^2}{12d}\right), \quad (1)$$

σ_x 的分布如图 2 所示。令(1)式 = 0,得到该开口环的中性面位于 $y_0 = a^2/(12d)$ 的层面上。

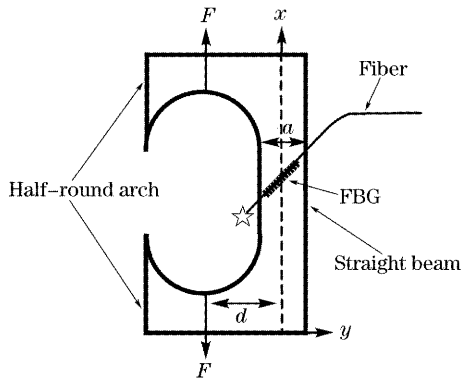


图 1 开口环结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the chirp tuning device of "C" shape

此时(1)式可写为

$$\sigma_x = \frac{12Fd}{a^3b}(y - y_0), \quad (2)$$

由此得到其正应变为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_x}{E} = \frac{12Fd}{Ea^3b}(y - y_0), \quad (3)$$

(3)式说明,作用在该开口环半圆拱上的力,将在开口环直梁厚度方向上产生线性的应变场。

把此开口环作为衬底模型,将长度为 l_0 、中心波

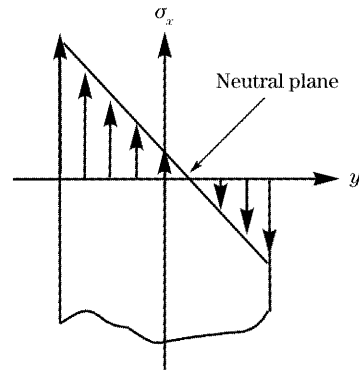


图 2 开口环直梁应力分布图

Fig. 2 Distribution of stress along y axis over the straight beam

长为 λ_0 的光纤布拉格光栅斜向粘贴在开口环直梁的侧面上,并使其中点恰好位于开口环直梁的中性面 y_0 上,而且光栅轴向与直梁中性面的夹角为 β 。在力 F 的作用下,光纤布拉格光栅上的轴向应变为

$$\varepsilon(l) = \mu\varepsilon \cos \beta = \mu \frac{12Fd(y - y_0)}{Ea^3b} \cos \beta = \mu \frac{6Fd \sin(2\beta)l}{Ea^3b}, \quad (4)$$

其中 μ 为应变传递因子,它与衬底材料及胶水特性等相关; l 为光栅上的任意一点与中性面的位移, $l \in [-l_0/2, l_0/2]$ 。

研究表明,当温度不变时,光纤布拉格光栅的中心反射波长变化 $\Delta\lambda$ 与其轴向应变 $\varepsilon(l)$ 的关系为

$$\Delta\lambda = \lambda_0(1 - p_e)\varepsilon(l), \quad (5)$$

其中, p_e 为光纤的有效弹光系数,约为 0.22。把(4)式代入(5)式,可求得光纤布拉格光栅的轴向长度微元 dl 所引入的波长差为

$$d\lambda = \mu\lambda_0(1 - p_e) \frac{6Fd}{Ea^3b_0} \sin(2\beta) dl, \quad (6)$$

即不同光栅位置处所对应的波长也不同。均匀光纤光栅在线性应变场的响应是各个长度微元 dl 的共同贡献,整个光纤布拉格光栅 $[-l_0/2, l_0/2]$ 反射谱的带宽为

$$\Delta\lambda_{\text{chirp}} = \int_{-l_0/2}^{l_0/2} d\lambda = \mu\lambda_0(1 - p_e) \frac{6Fd}{Ea^3b} \sin(2\beta) l_0 = \frac{6\mu\lambda_0(1 - p_e) d \sin(2\beta) l_0}{Ea^3b} F, \quad (7)$$

即在外力 F 作用下,整个光纤布拉格光栅反射谱的带宽将展宽。从(7)式易知,光纤布拉格光栅反射谱的带宽 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 与外力 F 成明显的线性关系,也就是说,我们可以利用带宽编码技术来感测外力的大小。由于开口环是用同一材料制作,故其直梁上各点的

热学性质一致的。于是,当环境温度变化时,由于光栅各点的热膨胀系数相同,而因温度变化引起的光栅栅格周期变化是相同的,所以温度效应仅使光栅的带宽整体漂移而不会导致其改变。因此,利用带宽调谐技术可剔除温度交叉敏感效应,从而获得温度自动补偿的功能。另外,从(7)式可知, $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 还与 β 有关。在其他参量保持不变的情况下,当 $\beta = 45^\circ$ 时可获得最大的带宽。

3 实验设计及结果分析

实验采用自行设计的开口环机构来验证带宽调谐理论。开口环所用的材料为有机玻璃,其结构参量如下:半圆拱半径 $r=40$ mm,直梁长 $L=40$ mm,宽 $a=9$ mm,厚 $b=3$ mm,夹角 $\beta=35^\circ$,有机玻璃的杨氏模量 $E\approx 3000$ N/mm²,光栅长度 $l_0=12$ mm,在室温 26°C 时,测得反射峰的中心波长 $\lambda_0=1563.0$ nm,带宽为 0.15 nm,反射率约为 9 dB。

实验过程中,把开口环半圆拱的最高点竖直悬挂于一固定小圆柱上,下面悬挂托盘,通过增添砝码来控制外力 F 的大小。实验处于小挠度条件下,测得不同外力 F 大小所对应的反射谱带宽。实验装置示意图如图3所示。由自制宽带光源(BBS)发出的光,经 3 dB耦合器到达光纤光栅,反射回来的光再次经 3 dB耦合器,最后到达光谱分析仪(OSA)(分辨力 0.1 nm),各应力状态下的光纤光栅带宽由光谱仪测出,如图4所示。

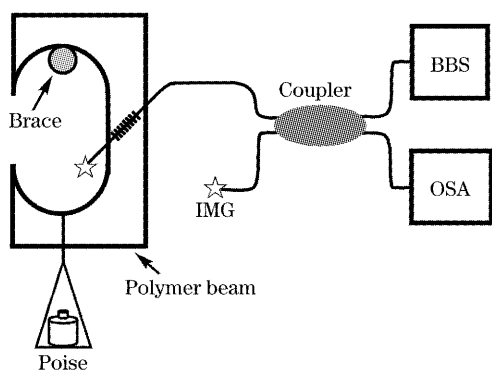


图3 均匀FBG在线性应变场作用下的实验装置图
Fig.3 Experimental setup for uniform FBG under linear strain field

测量之前首先将开口环直梁进行小挠度范围“预热”,以使其应变传递均匀;然后,顺序增减砝码盘中的砝码,使载荷从小到大,再逐步减小到原来的空载状态。每次增减载荷时,应使测量机构尽量处于平衡状态,并使两半圆拱处于同一平面内。实验

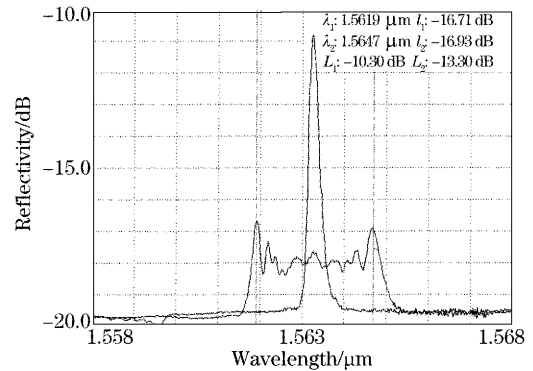


图4 均匀FBG在 7.94 N的外力作用下的反射谱
Fig.4 Reflection spectrum of uniform FBG under the force of 7.94 N

中环境温度稳定,测量装置运行良好,测量的多组数据可靠、有效。在室温为 26°C 时,测得反射谱带宽与应力的关系如图5所示。实验表明,带宽与外力大小明显成线性关系,线性度 R^2 高达 0.9982 ,与我们的理论非常符合。实验所测得的外力灵敏度达到 0.3389 nm/N,该灵敏度可满足实际测量要求。

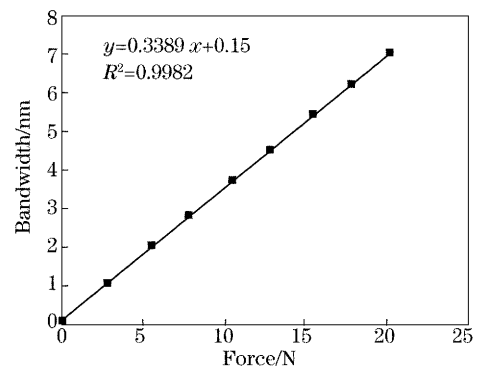


图5 FBG反射谱带宽与拉力的关系曲线
Fig.5 Relationship between chirp bandwidth of FBG and applied force

实验中仅用 20 N的力就获得了 7 nm的带宽,其带宽可调范围较大,而且反射谱的平坦度良好。

在不同的环境温度下,实验测量的反射谱带宽随应力的变化如图6所示。结果表明,在 $20\sim 45^\circ\text{C}$ 的温度变化范围内,光纤光栅的带宽的变化很小。图6给出的几组实验数据验证了本文设计的带宽调谐机构对温度不敏感、具有温度自动补偿功能的理论预测。当环境温度升高到 50°C 以上时,光纤光栅与梁不再紧密接触,调谐装置将产生较大的实验误差。

由(7)式及上述实验结果可知,应变传递因子 μ 约为 0.4 ,比文献[7,8]的修正因子要小。经分析,主要原因如下:1)胶水粘贴程度并非完全刚性;2)半圆拱的材料有一定弹性,施加在半圆环的力没有完

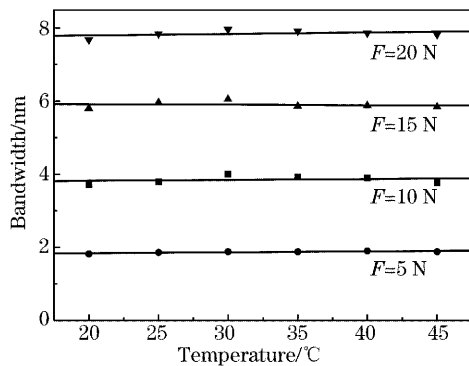


图 6 在不同外力作用下反射谱带宽随温度变化的关系图
Fig. 6 Relationship between chirp bandwidth and temperature at different applied force

全传递到直梁上;3)制作开口环的材料为有机玻璃,其杨氏模量约为 3000 N/mm^2 ,而光纤的杨氏模量约为 74000 N/mm^2 ,两者有较大的差异,从而会减弱它们之间的应变传递。由此可见,通过选用性能更优的材料以及对开口环机构的进一步改进及优化,可以获得更为理想的实验结果。

4 结 论

设计并实现了一种基于开口环结构的光纤光栅带宽调谐机构,其带宽可调范围较大,且反射谱中间区域的平坦度良好。这种设计新颖、制作简单的装置,在较小应力下即可实现大范围的带宽调谐。由于调谐带宽具有较大应力灵敏度,该装置可用作感测力学参量的传感器,进行微小外力、应变/应力、曲率、位移等参量的高灵敏度、高精度检测与实时监控,并具有温度自动补偿功能。由于该传感器的设计基于光纤光栅,故易集成于光纤网络系统之中,利用波分、时分/空分等复用技术,还可望实现大范围、长距离、准分布式传感检测。因此,该传感器在光传

感领域具有实际应用价值。此外该装置也可用于光纤激光器^[10]、光纤通信系统中的色散补偿等领域。

参 考 文 献

- 1 Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 2 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 3 Byoung-ho Lee. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Optical Fiber Technol.*, 2003, **9**(2): 57~79
- 4 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Dong Xiaoyi *et al.*. Theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 330~336 (in Chinese)
张伟刚, 开桂云, 董孝义等. 光纤光栅多点传感的理论及实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 330~336
- 5 Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 232~235 (in Chinese)
黄锐, 蔡海文, 瞿荣辉等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 232~235
- 6 Dong Xinyong, Guan Baiou, Yuan Shuzhong *et al.*. Strain gradient chirp of uniform fiber Bragg grating without shift of central Bragg wavelength[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **202**(1~3): 91~95
- 7 Guo Tuan, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and pressure using a single fiber Bragg grating based on reflected wave's broadened bandwidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1401~1405 (in Chinese)
郭团, 乔学光, 贾振安等. 单光纤光栅波谱展宽温度压力同时区分测量[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1401~1405
- 8 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Zhao Qida *et al.*. Novel sensing device of fiber Bragg grating with temperature active compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 999~1003
张伟刚, 开桂云, 赵启大等. 新型光纤布拉格光栅温度自动补偿传感研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 999~1003
- 9 Zhang Weigang, Liu Yange, Kai Guiyun *et al.*. A novel independent tuning technology of center wavelength and bandwidth of fiber Bragg grating[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **216**(4~6): 343~350
- 10 Jianliang Yang, Swee Chuan Tjin, Nam Quoc Ngo. Wideband tunable linear-cavity fiber laser source using strain-induced chirped fiber Bragg grating[J]. *Opt. and Laser Technol.*, 2004, **36**(7): 561~565