

基于光纤 Bragg 光栅反射波带宽展宽的 压力传感研究*

郭 团 乔学光 贾振安 孙 安 陈长勇

(西安石油大学理学院, 光纤传感重点实验室, 西安 710065)

摘 要 报道了一种新颖的光纤 Bragg 光栅压力传感装置, 提出并实现了利用光纤 Bragg 光栅反射波带宽展宽实现压力传感的新方法. 利用压力作用下双孔悬臂梁非均匀应变带动光栅使 Bragg 反射波漂移的同时带宽展宽, 实现压力传感. 在 0~23.5 N 的测量范围内, 基于光谱分析仪 0.05 nm 的光谱分辨率, 压力分辨率为 0.54 N, 带宽最大展宽量 2.14 nm, 压力响应曲线具有良好的线性. 多次测量表明: 展宽波型稳定, 重复性好.

关键词 光纤光栅; 带宽展宽; 压力传感

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

近年来, 光纤光栅作为一种新型传感器引起了人们广泛的重视. 这种传感器除具有一般光纤传感器不受电磁干扰、灵敏度高、重量轻、结构紧凑、成本低, 适于在高温、腐蚀性或危险性环境使用的优点之外, 还具有本征自相干能力强和在一根光纤上利用波分复用技术实现多点复用、多参量分布式区测量的独特优势^[1], 具有巨大的发展潜力. 压力传感器在工业生产中有着广泛的应用, 结合光纤光栅突出特性研制结构简单而新颖实用光纤光栅压力传感器具有重要的现实意义. 通常人们是依据 Bragg 反射波长与压力对应关系, 通过测量 Bragg 反射波长漂移量实现待测压力的测量^[2-5]. 本文报道了一套新颖的光纤 Bragg 光栅压力传感装置, 提出并实现了利用光纤 Bragg 光栅反射波带宽展宽实现压力传感的新方法. 通过聚合物材料将光栅粘接于双孔悬臂梁非均匀应变区, 利用其非均匀应变带动光栅使 Bragg 反射波漂移的同时带宽展宽, 通过测量带宽展宽量实现压力传感. 在 0~23.5 N 的测量范围内, 利用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪检测反射波, 实验得到压力分辨率为 0.54 N, 带宽最大展宽量 2.14 nm, Bragg 反射波带宽展宽量随压力变化呈良好的线性关系, 线性度均高于 99.8%. 多次测量展宽波型稳定, 重复性好. 此方案可实现通过一个光栅感受双孔悬臂梁上不同点的压力变化, 测量位

置选择性好, 具有很好的实际应用价值.

1 基本原理

1.1 光纤 Bragg 光栅的应变响应机理

轴向应变对光栅的影响表现在: 一是使光栅栅距、光纤纤芯和包层半径变化, 另一方面将通过光弹效应改变光纤的折射率. 两者综合作用结果使得光纤 Bragg 光栅反射波中心波长发生漂移.

光纤 Bragg 光栅的响应峰值波长为^[6]

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率, Λ 为光栅栅距.

轴向应变作用下, Bragg 波长的相应漂移量为^[7]

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda(1 - p_e)\varepsilon \quad (2)$$

式中, ε 为应变, $p_e = (n_{eff}^2/2)[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]$ 为光纤的有效弹光系数, p_{ij} 为光纤材料的弹光张量分量.

1.2 双孔悬臂梁压力响应特性分析

双孔悬臂梁由铝材料制成, 设梁长度为 L , 厚度为 H . 双孔中各单孔由两离心半圆组成, 其结构式如图 1 所示. 双孔悬臂梁一侧紧固于侧壁, 另一侧施加压力. 通过聚合物材料将光栅贴于预定标的双孔悬

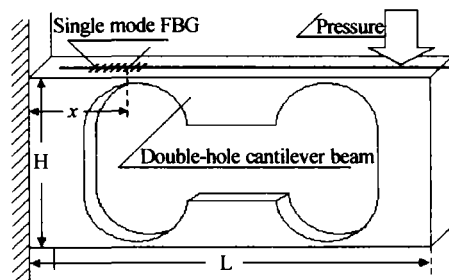


图 1 双孔悬臂梁结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the double-hole cantilever beam used in sensing system

*国家自然科学基金项目(69877025)、国家“863”发展计划项目(2002AA313150)、国家教育部科学技术重点项目(02190)和陕西省自然科学基金项目(2000C34)资助
Tel: 029-88482746 Email: guotuan2001@163.com
收稿日期: 2003-10-16

臂梁非均形变区上表面, 粘贴时通过刻入适当深度凹槽以确保光栅与梁表面粘贴的牢固性和准直性.

当在梁的自由端施加垂直压力时, 梁的上表面受拉应力作用产生拉应变, 根据材料力学原理, 自由端压力 P 引起的梁上考察点 x_0 处截面的弯矩 M 可表示为^[8]

$$M = (L - x)P \tag{3}$$

式中, x 为考察点 x_0 到悬臂梁固定端的距离. x_0 点的轴向应力 σ 可表示为^[8]

$$\sigma = MH/2I = [(L - x)H/2I]P \tag{4}$$

式中 I 为 x_0 处截面的惯性矩, 由梁的横截面积及其制成材料决定; $H/2$ 为 x_0 处到中性轴的距离. 由胡克定理得到压力 P 引起的梁上考察点 x_0 处的应变 ϵ 为^[8]

$$\epsilon = \sigma/E = [(L - x)H/2EI]P \tag{5}$$

式中 E 为合金铝材料的弹性模量.

结合双孔悬臂梁结构分析式(5)可知, 在相同的压力 P 作用下, 由于光栅粘贴处各位置梁的截面积不同即惯性矩 I 不同, 各位置的应变 ϵ 将由弧顶向两侧递减, 带动光栅不同位置栅距伸长量以同样的趋势依次递减, 从而得到中心反射波长不同的反射峰, 由于各反射峰间距相对于其反射波带宽较小, 波与波之间大部分重叠, 因此形成了一个整体带宽展宽的 Bragg 反射波. 设光栅长度为 l , 在压力 P 的作用下, 光栅应变变化绝对量为

$$\Delta\epsilon = [(L - x)Hl/2EI^2]P \tag{6}$$

将式(6)代入式(2), 得到 Bragg 反射波带宽展宽量随压力变化响应关系式为

$$\Delta\lambda_{BW} = 2n_{eff}\Delta[(1 - p_e)(L - x)Hl/2EI^2]P \tag{7}$$

将实验得到的反射波带宽展宽量 $\Delta\lambda_{BW}$ 代入式(7)可方便地求出相应的压力 P .

2 实验结果与讨论

光纤 Bragg 光栅压力传感实验装置如图 2 所示. 实验中使用中心波长 1550 nm, 功率 40 nW, 有效带宽 45 nm (C 波段) 的掺铒光纤光源; 耦合器为工作窗口 1550 nm, 3 dB 衰减 2 × 2 型耦合器; 多功能光谱分析仪 (Anritsu MS9710C) 最高分辨率为 0.05 nm; 压力通过悬挂于双孔悬臂梁光栅另一端托盘中的砝码重量传递, 精确度为 0.1 g. 被测光纤光栅利用准分子激光器紫外光在掺铈单模光纤上采用相位掩模板技术侧面辐照写入得到, 其室温自由状态下中心反射波长 1548.25 nm, 反射率为 95%, 3 dB 带宽 0.2 nm. 通过上述实验装置, 利用宽带光源平坦增益宽带光波经耦合器入射到单模光纤进而入射到贴于悬臂梁上表面的光纤光栅, 经光纤光栅反射的窄带反射波再次通过耦合器进入光谱分析仪, 分析光栅压力响应特性.

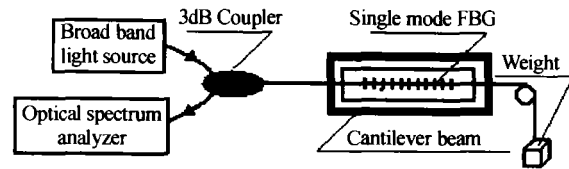


图 2 光纤 Bragg 光栅压力传感实验装置
Fig. 2 Schematic diagram for fiber Bragg grating pressure sensing

由于光栅在压力作用下反射波漂移的同时波形将随之有规律的展宽, 窄带阈值将无法覆盖整个展宽波形, 实验中以 10 dB 阈值反射波带宽宽度 λ_{BW} 为记录数据以消除上述问题. 在 0 ~ 2400 gf (即 0 ~ 23.5 N) 的压力测量范围内, 以 50 gf 砝码重量为测量间隔, 绘制出了光栅在拉伸过程带宽宽度 λ_{BW} 随压力变化曲线及其线性拟合曲线, 如图 3 所示. 图 4 给出了 0 gf、800 gf、1600 gf 和 2400 gf 时 Bragg 反射波带宽展宽谱. 实验数据曲线及反射谱表明: 压力变化在引起 Bragg 反射波波长漂移的同时反射波带宽展宽; 带宽展宽曲线具有较好的线性度.

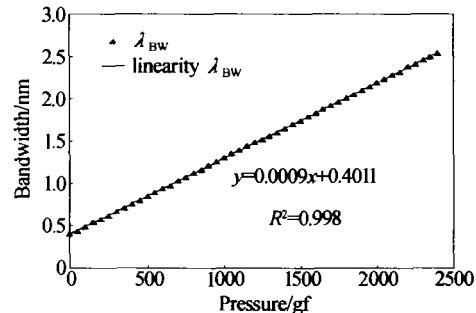


图 3 λ_{BW} 压力响应曲线 ($T = 26^\circ\text{C}$)
Fig. 3 λ_{BW} versus pressure in gf measured at a temperature of 26°C

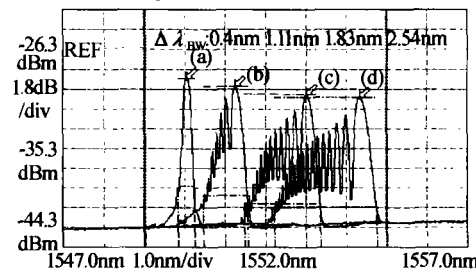


图 4 0 gf (a)、800 gf (b)、1600 gf (c) 和 2400 gf (d) 光纤 Bragg 光栅反射谱 ($T = 26^\circ\text{C}$)

Fig. 4 Reflection spectrum of fiber Bragg grating at 0 gf (a)、800 gf (b)、1600 gf (c) and 2400 gf (d) at a temperature of 26°C

实验得出, 双孔悬臂梁光纤 Bragg 光栅反射波带宽 λ_{BW} 压力展宽响应系数 0.0009 nm/gf 即 0.092 nm/N, 线性度 99.8% 代入式(7), 变换得到

$$P = 10.87\Delta\lambda_{BW} \tag{8}$$

实验中, 在 1400 gf 砝码压力作用下, Bragg 光栅反射波带宽展宽 $\Delta\lambda_{BW}$ 为 1.26 nm, 代入式(8)可得, 待测压力的大小为 1387 gf, 相对误差 0.93%. 与实验条件的变化基本一致, 说明这种压力测量方法切

实可行. 由式(7)可知, 通过改变孔顶距悬臂梁上表面的厚度以及压力作用点距光栅粘贴处距离, 可实现不同压力范围的检测; 另外, 此传感装置可通过一个光栅感受双孔悬臂梁上不同位置的应力变化, 在实际测量中具有较好的灵活性.

3 结论

本文设计了一种新颖的双孔悬臂梁光纤光栅压力传感装置, 提出并实验验证了基于光纤 Bragg 光栅反射波带宽展宽技术实现大范围压力测量的新方法. 实验表明, 在 0 ~ 23.5 N 的压力测量范围内, 利用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪检测反射波, 压力分辨率为 0.54 N, 带宽最大展宽量 2.14 nm, 压力响应曲线具有良好的线性, 多次测量表明展宽波型稳定, 重复性好. 在实际应用中, 此传感装置可通过一个光栅感受悬臂梁上不同位置的应力变化, 测量位置选择性好, 与此同时, 通过改变光栅粘贴处悬臂梁弧顶厚度和压力作用点与光栅距离, 可适时调整压力测量范围及其精度, 具有很好的实际应用价值.

参考文献

1 Jackson D A, Gibeiro A B L, Reekie L, *et al.* Simple multiplexing scheme for a fiber optic grating sensor network. *Opt Lett*, 1993, **18**(14): 1192 ~ 1194

2 Ho H L, Jin W, Chan C C, *et al.* A fiber Bragg grating sensor for static and dynamic measurands. *Sensors and Actuators*, 2002, **A96**: 21 ~ 24

3 Tao Xiaoming, Tang Liqun, Du Weichong, *et al.* Internal strain measurement by fiber Bragg grating sensors in textile composites. *Composites Science and Technology*, 2000, **60**: 657 ~ 669

4 刘云启, 郭转运, 刘志国, 等. 光纤光栅的压力传感特性研究. *光子学报*, 1999, **28**(5): 443 ~ 445
Liu Q Y, Guo Z Y, Liu Z G, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(5): 443 ~ 445

5 张颖, 刘志国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究. *光学学报*, 2002, **22**(1): 89 ~ 91
Zhang Y, Liu Z G, Guo Z Y, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 89 ~ 91

6 Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors. *Proc of SPIE*, 1989, **1169**: 98 ~ 107

7 Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, *et al.* Fiber grating sensors. *J Light Wave Technol*, 1997, **15**(8): 1442 ~ 1463

8 刘鸿文. 材料力学. 北京: 高等教育出版社, 1998. 313 ~ 318
Liu W H. *Material mechanics*. Beijing: High Education Press, 1998. 313 ~ 318

Investigation of Fiber Bragg Grating for Pressure Sensing Based on Reflected Wave's Broadened Bandwidth

Guo Tuan, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, Sun An, Chen Changyong

Key Lab of Optical Fiber Sensing, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

Received date: 2003-10-16

Abstract A new approach for pressure sensing using a fiber Bragg grating based on reflected wave's broadened bandwidth is proposed and demonstrated. FBG is affixed on the non-uniformity strain area of double-hole cantilever beam by special polymer. Bragg central reflected wave is shifted and reflected wave's bandwidth is broadened caused by pressure change. Pressure sensing is achieved through measuring the change of broaden-bandwidth. In the pressure range of 0 ~ 23.5 N, due to the spectral resolution of 0.05 nm for spectral analyzer, the resolutions of pressure measure is 0.54 N and the change of reflected bandwidth is up to 2.14 nm. Response curve of pressure has a good linearity. Reflection spectrum has a steady figure through repeated measurement.

Keywords Fiber Bragg grating; Broadened bandwidth; Pressure sensing



Guo Tuan was born in 1979, in Tianjin, China. He received the B. S. degree in 2001 from the Electronic Engineering School, Xi'an Shiyou University. He is presently pursuing the M. S. degree at Science School in the same University. His major research fields include optic fiber sensing, optic fiber communication and optical waveguide.