

## Design and Experiment of Novel Fiber Bragg Grating Pressure Gas Sensor<sup>\*</sup>

YANG Jing<sup>1,2</sup>, HAN Xiaobing<sup>1\*</sup>, ZHANG Dongbo<sup>2</sup>, SHAN Haoxuan<sup>2</sup>

(1. College of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;  
2. Xi'an Huawei Power and Electronic Tech Co. Ltd, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** A novel optical fiber Bragg grating (FBG) pressure gas sensor with simple structure is proposed. While pressure of bellows is transformed to Lozenge structure, Vertical distribution of pressure is transformed to horizontal strain of the Lozenge structure, and is transmitted to FBG which is pasted on the Lozenge structure. By monitoring the central wavelength shift difference of the FBG, the vertical distribution of pressure can be obtained. It has proved that the variety of pressure can be sensed by the sensor. Preliminary experiments were carried out and the feasibility of this proposed sensor is verified. The experimental results indicate that the pressure measurement sensitivity coefficient can reach  $1.360 \times 10^{-3} / \text{MPa}$  (equivalently, sensitivity can reach  $2.111 \text{ nm} / \text{MPa}$ ), while the correlation coefficient is 0.994.

**Key words:** fiber optics; pressure gas sensor; fiber bragg grating; lozenge structure; bellows

EEACC:4125;7230E

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2012.03.015

## 一种新颖的布拉格光栅气体压力传感器的设计与实验<sup>\*</sup>

杨晶<sup>1,2</sup>, 韩晓冰<sup>1\*</sup>, 张东波<sup>2</sup>, 单浩轩<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学通信与信息工程学院, 西安 710054; 2. 西安华伟电力电子技术有限责任公司, 西安 710119)

**摘要:** 设计了一种将光纤光栅悬空固定结构的气体压力传感器, 利用金属不锈钢菱形结构将波纹管中的压强转化成该菱形结构的应变, 同时实现将菱形纵向分布的压力转化成菱形横向的应变, 通过菱形结构应变直接被传递给光纤光栅, 从而实现了测量波纹管中压强的目的。实验结果表明, 在  $0 \sim 0.45 \text{ MPa}$  范围内, 光纤光栅中心波长的漂移与波纹管中的压强呈很好的线性关系, 线性度可达 0.99 以上。在压力测量范围内, 压力灵敏度系数达到  $1.360 \times 10^{-3} / \text{MPa}$  (相当于灵敏度  $2.111 \text{ nm} / \text{MPa}$ )。

**关键词:** 光纤光学; 气体压力传感器; 光纤布拉格光栅; 菱形结构; 波纹管

中图分类号: TN212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)03-0355-04

目前气体压力传感器主要应用在生产和使用被测气体的工厂中探测该气体的泄露, 同时也可以用来探测该气体的密度, 以提高该气体所应用环境的可靠性和安全性能。将光纤布拉格光栅 (fiber bragg grating, FBG) 直接应用在传感领域往往因为其灵敏度很低而不可能用于常规测量中, 为了使光栅光纤的压力测量能够应用于实际中, 人们开始研究对光纤光栅的压力增敏。M. G. Xu 等人提出了玻璃球结构增敏法<sup>[1-2]</sup>, 在实际中这种玻璃球结构很难加工, 刘云启等人制作了弹簧悬臂梁结构光纤光栅压力传感器<sup>[3-4]</sup>, 张颖等人设计了一种聚合物增敏罐封装方法等<sup>[5]</sup>, 这些方法往往因为需要较高的粘栅工艺, 而且在特殊环境中稳定性差等原因不能大规模应用于实际的传感器产品中。基于此, 本文设计了一种将光纤光栅悬空固定于菱形结构上的波纹管式

光纤光栅压力传感器。将普通光纤光栅悬空粘接于菱形结构上, 充入气体控制波纹管内压强的同时, 实现将波纹管纵向应变转化为菱形结构横向应变, 从而达到与光纤光栅波长的线性对应, 实验结果表明该传感器波长漂移与波纹管中的压强呈很好的线性关系, 重复性好, 可靠性高。

### 1 理论分析

#### 1.1 光纤布拉格光栅传感原理及应变灵敏性

由 FBG 的耦合模理论, 均匀非闪耀 FBG 可将其中传输的一个导模耦合到另一个沿相反方向传输的导模而形成窄带反射, 反射波 Bragg 波长满足<sup>[6]</sup>:

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

式中:  $\lambda_B$  为光纤布拉格光栅中心波长,  $n_{\text{eff}}$  为光纤传播模式的有效折射率,  $\Lambda$  为光栅周期。Bragg 波长随

着光栅周期和有效折射率的变化而变化,当 FBG 受到外力作用或当环境温度变化时,由于弹光效应、热光效应、FBG 上的应变和热膨胀的作用,将引起 Bragg 波长的变化。当温度恒定时,应变引起的 Bragg 波长的漂移可表示为<sup>[7]</sup>:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})] \right\} \Delta\varepsilon = \lambda_B (1 - P_e) \Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$  为光纤光栅反射波长移动量; $\rho_{11}, \rho_{12}$  为光纤应变张量的分量, $\nu$  为泊松比, $P_e$  为光纤材料的弹光系数,其中: $P_e = \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})] = \frac{1}{n} \frac{dn}{d\varepsilon}$ , 带入光栅的典型数据<sup>[6]</sup>  $n_{\text{eff}} = 1.456, \nu = 0.17, \rho_{11}, \rho_{12}$  分别等于 0.121, 0.270 可以得到:

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = 0.784 \Delta\varepsilon \quad (3)$$

当波长  $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$  时,每个微应变将使光栅产生  $1.21 \times 10^{-3} \text{ nm}$  的波长移动。

## 1.2 传感器结构设计

如图 1 所示,左图为传感器剖面图,右面为传感器的核心部分,结构上菱形上端和下端都有螺钉固定,利用进气孔向密封的波纹管内冲入气体,控制所加压力。整个外壳,菱形结构和波纹管都采用不锈钢:1Cr18Ni9Ti 材料,对菱形结构表面经机械抛光,所用波纹管单波刚度 50.10 N/mm,最大耐压力 1.29 MPa。由于金属波纹管是纵向可以形变,侧向基本不变形的弹性元件。利用波纹管的这一特性可以将外界压强变化转换为波纹管纵向的压强变化。波纹管内为常压,当外界压强变化时波纹管会受到力的作用而发生伸缩,从而引起菱形结构形变,进而引起固定在菱形结构上的光纤光栅栅距变化,弹光效应也将导致光纤光栅布拉格波长发生漂移。通过测量光纤光栅的波长漂移量,就可以测得外界压强变化(该结构已申请国家发明专利 201110081380.2)。

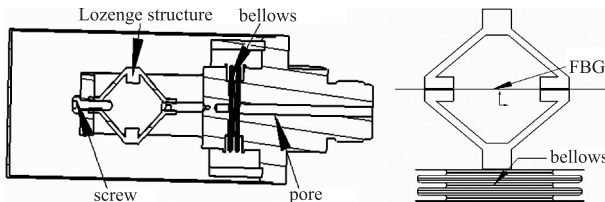


图 1 FBG 传感器结构

相比其他由悬臂梁,聚合物,平面薄膜等制作的光纤光栅压力传感器,这种将光纤光栅悬空的结构可以保证光纤光栅应变的均匀性,相比悬臂梁,在得到相同微变量时封装后传感器体积更小,更加稳定。本结构已经通过仪表振荡试验且性能完好。相比聚合物和平面薄膜其制作工艺更简单更易于实现产品

批量化。无独有偶,文献[8]中提到一种双拱形结构传感器,将光纤光栅贴在中央工型金属膜片上获得了很好的压力灵敏度和重复性,和本文中提到的纵向应变转换为横向应变原理类似,从而更加证明了该原理的可行性。

利用 ANSYS 有限元分析软件进行仿真分析<sup>[9]</sup>,菱形结构采用 solid186 单元,杨氏模量  $E = 206 \text{ GPa}$ <sup>[10]</sup>,泊松比 0.29,密度  $7930 \text{ kg/m}^3$ ,在菱形结构上端面施加  $z$  方向位移约束,在下端面施加面力  $0.45 \text{ MPa}$ <sup>[11]</sup>。约束与载荷设定后,对模型进行静态分析。

由图 2 分析可知在  $0.45 \text{ MPa}$  的面力作用下该传感器左右两端,即 FBG 粘接的两端,产生的位移量为  $5.09 \mu\text{m}$ ,计算可知对应约 340 个微应变,理想情况下,理论计算得到对应的波长漂移量为  $413.7 \text{ pm}$ 。

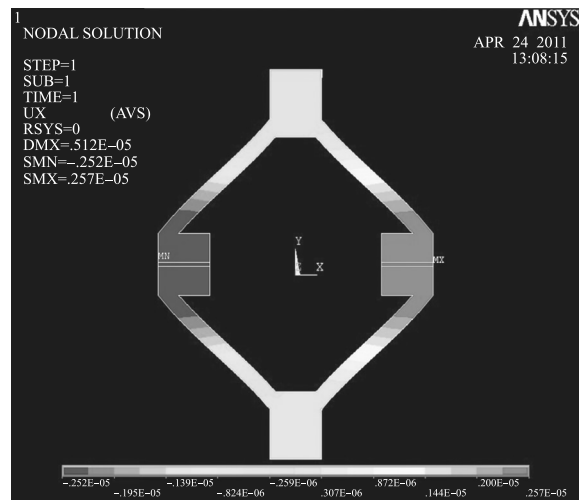


图 2 加入  $0.45 \text{ MPa}$  面力后传感器微位移

## 2 实验与结果分析

实验台置于恒温  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  的环境中,并用罩扣在传感器上。实验时,对光纤光栅进行  $500 \text{ pm} \sim 1000 \text{ pm}$  的预拉,以适应过低温度。然后将光纤光栅用紫外胶 NOA 81 固化粘在菱形结构的 U 型槽中固定,这种胶的粘度很小,但是完全固化后硬度很大,最重要的是它对光纤,光纤光栅,金属的抓附能力很强,不会像环氧树脂胶那样出现包层脱离纤芯或是胶体整体脱落的现象。参数如表 1 所示,采用照度为  $2 \text{ w/cm}^2$  的紫外固化设备进行固化。

表 1 NOA 81 典型参数

Solids	100%
Viscosity at $25 \text{ }^\circ\text{C}$	300 cps
Refractive Index of Cured Polymer	1.56
Modulus of Elasticity (psi)	200 000
Tensile Strength (psi)	4 000
Hardness-Shore D	90

将传感器在实验平台上进行压力测试,实验测量系统如图3示,实验中光纤光栅的中心波长1551.95 nm,采用美国Micro Optics公司生产的解调系统sm125光栅解调仪测量光栅在发生应变时的中心波长,这一系统集成波长范围1510 nm~1590 nm宽带光源,通过数据采集卡和PC交换数据,由专门提供的软件实时记录波长的变化,分辨率1 pm。实验中压力采用精密压力仪表,精度等级0.4,测量范围0~1 MPa。为了实验的安全性使用高浓度氮气作为被测气体,实验开始后向波纹管中每次充入或放出0.05 MPa气体,并通过sm125光栅解调仪记录下此时对应光纤光栅中心波长值。实验数据结果如图4所示。

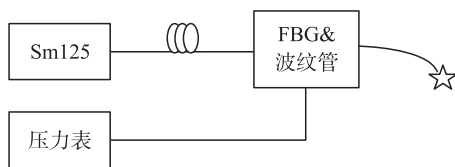


图3 FBG传感器实验装置

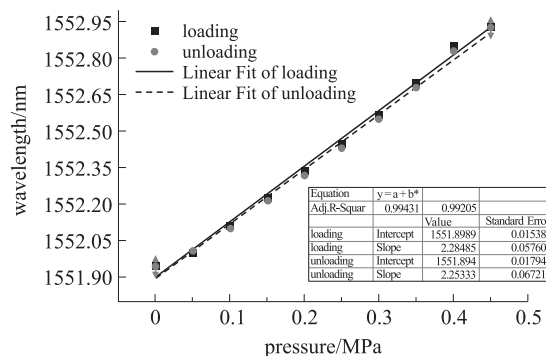


图4 加压和减压时压强与光栅中心波长的关系

从图4可以看到,在实验测量范围内,光纤布拉格光栅的中心波长漂移量与外界所加压力的变化呈线性关系,如图对两组数据进行拟合分别得到加压时 $y_1=1551.8989+2.28485x$ ,减压时 $y_2=1551.894+2.25333x$ ,线性度分别为0.99431和0.99205。可以看到加压和减压曲线重合的很好,经过若干次重复试验该传感器相同压力下的数据总体样本标准差平均值为0.0231,说明该传感器重复性和可靠性很好。相对于理想情况下理论计算值,实验中测得的波长漂移量950 pm,这是因为在实际情况下,由于传感器各个部分及光纤光栅与传感器间的连接都非理想刚性,因此不可能做到纵向压力的完全传递。假设传感器所受到的压力传递百分比为 $\eta$ ,则由式(3)可得光纤光栅的中心波长漂移与传感器所受压力满足

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B=0.784\eta\Delta\varepsilon \quad (4)$$

经过计算可知 $\eta=2.29$ ,对式(4)修改得到

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B=1.795\Delta\varepsilon \quad (5)$$

如果定义 $k=\Delta\lambda_B/\lambda_{BP}$ 为压力灵敏度系数, $p$ 为波纹管内所受压强,则由实验测得 $k=1.360\times 10^{-3}/\text{MPa}$ ,对应压力灵敏度为2.111 nm/MPa。

另外由图4可以看到当压力增大时,该传感器会出现迟滞现象,也就是说同样压力下得到的波长值的差值随着压力的增大而增大,这主要由于光纤光栅和传感器的连接部位所用紫外胶产生的蠕变所致,我们在试验前期尝试了数十种低、中、高端胶<sup>[12]</sup>,试验证明紫外胶是伸缩量最小同时硬度最高的胶之一,那么为了能够实现刚性连接,我们目前在探索使用光纤镀膜后焊接的方式解决这种迟滞现象<sup>[13]</sup>。

本课题是为特定产品所做的研究,有特定的要求,但实验中也发现为了实验的数据更加稳定可以考虑用一波的波纹管实现气体压强与菱形传感元应变的转换,改变菱形结构参数如材料,尺寸等可以获得更宽压力测试范围,这几点上该结构优于文献[8],同时使用裸光纤光栅可以获得更高的压力灵敏度,希望大家能提供思路。

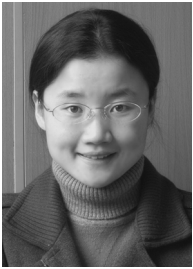
### 3 结论

采用菱形结构与波纹管结合的方法,设计了一种新型结构的光纤光栅压力传感器。并在0~0.45 MPa的压力范围内对其压力特性进行了测量,试验证明光纤光栅中心波长漂移量与波纹管中的压强呈很好的线性关系,线性度可达0.99以上。相比其他由悬臂梁,聚合物,平面薄膜等制作的光纤光栅压力传感器,该光纤光栅压力传感头更适用于外界环境比较复杂,温度和振动变化比较频繁的地方,特别是压力容器气体测量。通过改变传感头的结构及封装材料,可以设计出适合于不同需要的光纤光栅传感器。

### 参考文献:

- [1] Xu M G, Reekie L, Chow Y T, et al. Optical in-Fiber Grating High Pressure Sensor[J]. Electron Lett, 1996, 29(4): 398-399.
- [2] Xu M G, Geiger H, Dakin J P. Fiber Grating Pressure Sensor with Enhanced Sensitivity Using a Glass-Bubble Housing[J]. Electron Lett, 1996, 32(2): 128-129.
- [3] 刘云启, 刘志国, 郭转运, 等. 光纤光栅弹簧管压力传感器的压力和温度特性[J]. 光子学报, 1998, 27(12): 1111-1115.
- [4] 刘云启, 郭转运, 刘志国, 等. 光纤光栅的压力传感特性研究[J]. 光子学报, 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[J]. 光学学报, 2002, 22(1): 89-91.
- [6] 赵勇. 光纤光栅及其传感技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 93-107.
- [7] 曹晔, 刘波, 刘丽辉, 等. 对温度不敏感的光纤光栅压力传感器[J]. 传感技术学报, 2005, 18(1): 177-179.

- [8] 褚晓慧,张敏,周宏朴,等.一种光纤布喇格光栅压力传感器的设计及实验[J].光子学报,2009,38(11):2785-2788.
- [9] 任钧国,王洪业,欧阳勇,等.平膜片式压力传感器有限元分析[J].传感技术学报,2001,14(2):152-156.
- [10] 中国机械工程学会,中国机械设计大典编委会.《中国机械设计大典(全6卷)》[M].江西:江西科学技术出版社,2002.
- [11] 邓凡平,编著. ANSYS10.0有限元分析自学手册[M].北京:人民邮电出版社,2007.
- [12] 张金涛.基于光纤光栅传感网络的健康监测技术[D]:[硕士学位论文].黑龙江:黑龙江大学,2005.
- [13] 张文禹.光纤光栅表面金属化工艺研究[D]:[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.



杨晶(1986-),女,陕西西安人,西安科技大学通信与信息工程学院硕士研究生,主要从事光纤光栅传感及光通信方面的研究,aayangjingaa@163.com;



韩晓冰(1965-),山东烟台人,主要研究方向有数字化矿山与煤矿信息化技术,智能检测技术,宽带综合业务网络技术,主持和参加完成了20余项科研项目,在国内外学术期刊发表论文20多篇,编写出版著作5部。