

文章编号: 1001-3806(2005)06-0611-04

两种不同膜片的光纤光栅压力传感器的研究

郭明金,姜德生*,袁宏才,干维国

(武汉理工大学 光纤传感技术研究中心,武汉 430070)

摘要: 理论分析了光纤布喇格光栅的压力传感特性,并将光纤布喇格光栅分别纵向粘贴在不同型号的膜片上进行压力实验。实验结果表明, FBC20WB2 型膜片的光纤布喇格光栅压力灵敏系数比 ZXYC01 型设计膜片大得多,其值分别为 376pm/MPa 和 45pm/MPa 左右,其测量精度分别为 1% (full scale) 和 0.5% (full scale)。同时发现两种膜片中光纤布喇格光栅的中心波长与压力变化有着良好的线性关系和很高的相关系数,且迟滞现象较小,它们的相关系数均在 0.9998 以上。说明不同的膜片对压力灵敏系数有较大的影响。

关键词: 光纤布喇格光栅;压力传感器;膜片;压力灵敏度系数

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

Study on fiber Bragg grating pressure sensors on two different diaphragms

GUO Ming-jin, JIANG De-sheng, YUAN Hong-cai, GAN Wei-guo

(Fiber Optic Sensing Technology Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 4300070, China)

Abstract: The pressure sensitive characteristic of fiber Bragg gratings is analyzed, the pressure experiments are carried out on different diaphragms. The experimental results indicate that the pressure sensitivity coefficient of fiber Bragg gratings in the FBC20WB2 type diaphragm is much bigger than that in the ZXYC01 type diaphragm. The values are about 376pm/MPa and 45pm/MPa, with measurement precision of 1% (full scale) and 0.5% (full scale) respectively. At the same time there is a very good linearity and repetition between the center wavelength of fiber Bragg grating and pressure change in two diaphragms, and there is scarcely hysteresis effect, their pertinence coefficient is more than 0.9998. The study indicates that the different diaphragm has a great impact on the pressure sensitivity coefficient.

Key words: fiber Bragg grating; pressure sensor; diaphragm; pressure sensitivity coefficient of the sensor

引 言

光纤布喇格光栅传感技术是上世纪 90 年代发展起来的新一代光纤传感技术,近年来,其应用研究受到了国内外科研工作者和工程技术人员的极大关注^[1,2]。光纤布喇格光栅传感器具有高安全性、高绝缘性、高可靠性、高精度、抗电磁干扰、防潮防腐等优越性能^[3],非常适合许多易燃、易爆的工业生产场合。因此,研制一种能够应用于易燃、易爆环境下的高精度光纤布喇格光栅压力传感测量系统,保证生产工艺过程中对压力进行准确、安全、可靠地测量具有十分重要的意义。

国外对光纤布喇格光栅传感技术的研究较国内要早,并且在有些领域的应用取得了巨大的成功,如航空航天工业领域^[4]。美国埃姆斯研究中心用无损伤灵

敏压力传感器对直升机旋翼进行了测量,他们将光纤布喇格光栅传感器埋入一个特别设计的套管中,在飞机和风洞实验中能提供两维、实时的传感数据。加拿大的一个光子研究小组提出用光纤布喇格光栅传感器测量飞机喷气涡轮发动机系统的压力和温度。国内虽然在光纤布喇格光栅制作技术、解调技术等方面也开展了大量的工作,但国内对光纤布喇格光栅在传感方面的应用研究比国外起步晚,而对光纤布喇格光栅在压力方面的应用研究更晚。1993年, XU 等人^[5]首先对裸露的光纤布喇格光栅的压力传感特性进行了研究,发现在 70MPa 的高压下,光纤布喇格光栅中心反射波长仅移动 0.22nm,其压力敏感度很低;1996年, XU 等^[6]人又将光纤布喇格光栅固定于中空的玻璃球结构中,虽使其压力敏感度提高了,但是这种方法存在光纤布喇格光栅在压缩过程中容易损坏的缺点,具有一定的局限性;1998年,刘云启等人^[7]应用聚合物封装的方法来提高光纤光栅压力灵敏度。提高光纤布喇格光栅的压力灵敏度是其应用的难点,作者将对粘贴在富士公司生产型号为 FBC20WB2 的膜片上以及自行设计型号为 ZXYC01 的膜片上的光纤布喇格光栅分

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50179029)

作者简介:郭明金(1971-),男,讲师,博士研究生,主要从事光纤布喇格光栅传感器技术的研究和应用。

* 通讯联系人。E-mail: jiangdesheng@mail.whut.edu.cn

收稿日期:2004-09-24;收到修改稿日期:2004-12-16

别进行压力实验研究,为光纤布喇格光栅压力传感器实用化提供一定的理论依据。

1 光纤布喇格光栅压力传感机理

光纤布喇格光栅压力分布传感系统的原理图如图 1 所示。准分布的多个光纤布喇格光栅,通过不同光

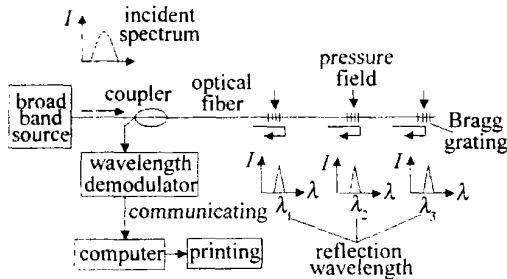


Fig 1 The working principle of optical fiber Bragg grating (FBG) pressure sensor system

纤光栅的反射光波长 ($\lambda_1, \dots, \lambda_n$),与待测结构沿程各测量点 (1, \dots , n) 相对应,分别感受待测结构沿线分布各点的压力变化,使其反射光的波长发生改变,改变的反射光经传输光纤从测量现场传出;通过光纤布喇格光栅解调器探测其波长改变量的大小,并将之转换成电信号,由下位机计算出待测结构的各个测点的温度的大小及在整个待测结构上的分布状态,并通过计算机显示出个测量点的压力值,同时可以将数据和图文通过计算机打印出来。

2 光纤布喇格光栅压力传感器的研究

2.1 传感单元的设计

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性在光纤纤芯形成的空间相位光栅。当一束光进入光纤布喇格光栅时,根据光栅理论,对满足布喇格条件的光波产生反射,该光波的波长称为光纤布喇格光栅的中心波长 λ_B ,光纤布喇格光栅的中心波长 λ_B 与折射率和光栅周期的关系为:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Delta \tag{1}$$

式中, n_{eff} 为导模的有效折射率, Δ 为光栅的周期。当环境温度不变,光纤布喇格光栅只受应变 ϵ 作用时,其中心反射波长的相对变化为:

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = (1 - P_e) \epsilon \tag{2}$$

式中, $P_e = n_{eff}^2 [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] / 2$ 为有效弹光系数; P_{11}, P_{12} 为弹光系数; μ 为纤芯材料的泊松比。对于选用的光纤, $n_{eff} = 1.46, \mu = 0.16, P_{11} = 0.12, P_{12} = 0.27$,由此可以计算得 $P_e = 0.22$ ^[5]。将光纤布喇格光栅粘贴在膜片上,并假设膜片材料与光纤布喇格光栅紧密结合。

光纤布喇格光栅压力传感器的机械结构如图 2 所示。两套传感器结构一样,只是外形尺寸不同。采用氨基丙烯酸酯 502 T-1 粘合剂纵向将光纤布喇格光栅

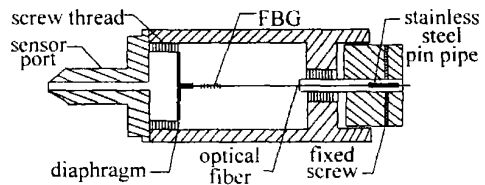


Fig 2 The schematic diagram of FBG pressure sensor

粘贴在两种不同的线性膜片上制作成 FBG 压力传感器,FBG 的一端粘贴在膜片上,另一端固定在可移动的柱体上,轻微旋转可移动柱体预拉 FBG,预拉 FBG 达到要求后,通过固定螺孔固定光纤光栅。当外界压力发生变化时,在膜片左右两侧形成压差,膜片将会发生位移,预加有应力的 FBG 将会收缩, λ_B 发生偏移,通过检测 λ_B 的变化量就可以得到压力的大小。

传感器内外压力相等的情况下,由于光栅上有预应力存在,线性膜片会发生形变,平衡状态下相当于膜片上受一个集中力 F_1 的作用,该力与原长度为 L 的 FBG 伸长量 s_1 之间的关系为:

$$F_1 = \frac{S_f E_f s_1}{L} \tag{3}$$

此时,膜片的变形量为:

$$s_0 = \frac{12(1 - \mu^2) a^2 S_f E_f s_1}{16\pi L E h^3 S_e} \tag{4}$$

式中, μ 和 E 分别为膜片材料的泊松比和弹性模量, a 和 h 分别为膜片半径和厚度, L 为光纤在膜片和另一固定端之间的长度, S_e 为膜片的有效面积, E_f 和 S_f 分别为光纤的弹性模量和横截面积。

在均压 p 的作用下,也就是内外压差为 p ,作用在膜片上的力是 p 所产生的等效力 F 与 FBG 所产生的拉力 F_2 之和,此合力使膜片产生形变,导致波长发生变化^[8]。设此时 FBG 的伸长量为 s_2 ,则有:

$$F_2 = \frac{S_f E_f s_2}{L} \tag{5}$$

此时,膜片发生的形变为:

$$s_0 + s_1 - s_2 = \frac{12(1 - \mu^2) a^2 S_f E_f s_2}{16\pi L E h^3 S_e} + \frac{3(1 - \mu^2) a^4 p}{16E h^3} \tag{6}$$

$$\frac{s_2 - s_1}{L} = \frac{-3(1 - \mu^2) a^4 \pi S_e}{16\pi L S_e E h^3 + 12(1 - \mu^2) a^2 E_f S_f} p \tag{7}$$

于是有:

$$\epsilon = \frac{-3(1 - \mu^2) a^4 \pi S_e}{16\pi L S_e E h^3 + 12(1 - \mu^2) a^2 E_f S_f} p \tag{8}$$

在 (8) 式中,令 $\eta = \frac{-3(1 - \mu^2) a^4 \pi S_e}{16\pi L S_e E h^3 + 12(1 - \mu^2) a^2 E_f S_f}$,当膜片做好后, η 就是一个常数。所以,光纤布喇格光栅中心反射波长的相对变化可以表示:

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = \eta(1 - P_e) p = k_p p \tag{9}$$

式中, $k_p = \eta(1 - P_e)$ 定义为压力灵敏系数,是一个仅与光纤参数和膜片材料特性有关的常数。由 (9) 式可知,纵向粘贴时光纤布喇格光栅中心反射波长的相对

变化与压力呈线性关系。

2.2 实验材料及设备

实验使用的光纤布喇格光栅采用相位掩模法制作^[9],由武汉理工光科股份有限公司加工制作,接头采用通用的光纤 FC/APC跳线头。光纤布喇格光栅的中心波长分别为 1292.842nm 和 1294.614nm,其长度均为 10mm 左右,光纤布喇格光栅制备好之后。光纤布喇格光栅中心波长识别系统采用武汉理工光科股份有限公司生产的 BGD-L10C 光纤布喇格光栅调制解调器,该仪器基于 F-P 干涉原理对布喇格反射谱中心波长进行解调,具有很高的波长分辨率,其主要的技术指标为:波长分辨率为一个皮米左右,波长测量精度为几个皮米,最大光路损耗小于 10dB,扫描范围为 1285nm~1300nm,扫描频率为几赫兹,使用环境温度为 -10℃~40℃。

实验中富士公司生产的膜片型号为 FBC20WB2,膜片材料为 SW S316L 不锈钢,膜片直径为 60mm,膜片的厚度为 0.5mm;自行设计的膜片型号为 ZXYC01,膜片材料为不锈钢,膜片直径为 10mm,膜片的厚度为 0.8mm,L 为光纤在膜片和另一固定端之间的长度,其值为 70mm。压力源采用活塞式压力计,压力计量程范围为 0~6MPa。实验中将光纤布喇格光栅纵向粘贴在由富士公司生产型号为 FBC20WB2 的膜片以及自行设计型号为 ZXYC01 的膜片表面上,做成两套压力传感器。图 3 是光纤布喇格光栅压力传感测试的实验装置示意图,其中 BBS 为宽带光源,宽带光源发出的光入射到压力传感头中,由光纤布喇格光栅反射的光经耦合器进入解调仪,经过一系列的处理,送入计算机。

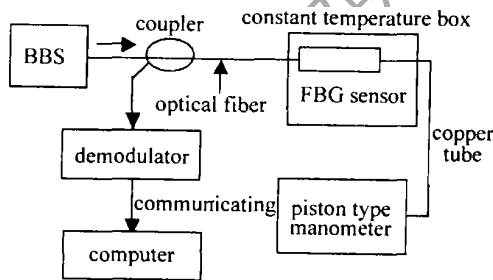


Fig 3 The schematic diagram of experimental setup for fiber Bragg grating pressure measurement

2.3 光纤布喇格光栅的封装及压力传感特性研究

实验中采用不同规格直径的不锈钢管封装光纤布喇格光栅,光栅与不锈钢管以及不锈钢管之间的粘贴,均采用美国生产的型号为 EPO-TEK 353ND 胶,通过微调架使光纤布喇格光栅预张,然后加热固化,最后用热收缩管保护。封装好的光纤光栅传感器需进行老化处理,老化处理后的光纤布喇格光栅传感器的中心波长与老化前相比较,应不大于 0.2nm。实验中将老化好的光纤布喇格光栅放入水浴恒温槽中保持其温度恒

定,以减少温度对实验结果的影响。

对于富士公司生产型号为 FBC20WB2 的膜片其压力的测量范围为 0~0.6MPa,加压过程中每增加 0.1MPa,保持恒定压力 2min 左右,将压力增加到 0.6MPa 后进行减压实验,减压过程也是压力每降低 0.1MPa,保持恒定压力 2min 左右。而自行设计型号为 ZXYC01 的膜片其压力的测量范围为 0~6MPa,加压过程每增加 1MPa,保持恒定压力 2min 左右,将压力增加到 6MPa 后进行减压实验,减压过程也是压力每降低 1MPa,保持恒定压力 2min 左右。光纤布喇格光栅的波长随压力变化的信息借助于光栅调制解调仪送入计算机中显示,同时可以将数据和图文通过计算机打印出来。图 4 是富士公司生产型号为 FBC20WB2 的膜片上纵向粘贴的光纤布喇格光栅的波长随压力变化时的响应曲线。加压时光纤布喇格光栅的波长与压

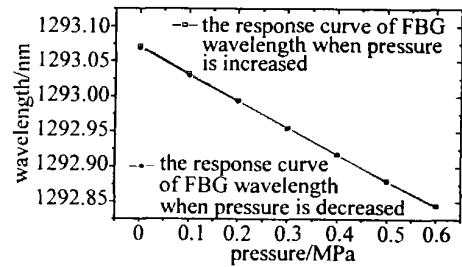


Fig 4 The response curve of fiber Bragg grating wavelength with the pressure change

力的拟合方程式为: $\lambda = -0.376P + 1293.069$,相关系数 $R^2 = 0.99988$;减压时光纤布喇格光栅的波长与压力的拟合方程式为: $\lambda = -0.378P + 1293.070$,相关系数 $R^2 = 0.99997$ 。从图 4 可以看出,富士公司生产型号为 FBC20WB2 的膜片上的光纤布喇格光栅的中心波长与压力有良好的线性关系,并且迟滞现象很小,它们相关系数达 0.9998 以上,光纤布喇格光栅的波长与压力灵敏度大致是 0.376nm/MPa,即 376pm/MPa,其测量精度为 1% (full scale)。

自行设计型号为 ZXYC01 的膜片上纵向粘贴的光纤布喇格光栅的波长随压力变化时的响应曲线如图 5

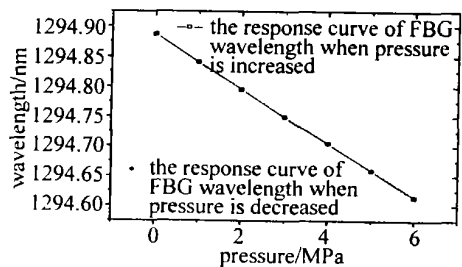


Fig 5 The response curve of fiber Bragg grating wavelength with the pressure change

所示。加压时光纤布喇格光栅的波长与压力的拟合方程式为: $\lambda = -0.0455P + 1294.887$,相关系数 $R^2 = 0.99999$;减压时光纤布喇格光栅的波长与压力的拟合

方程式为: $\lambda = -0.0454P + 1294.886$, 相关系数 $R^2 = 0.99997$ 。由图5可见, 自行设计型号为 ZXYC01 的膜片上光纤布喇格光栅的中心波长与压力有很好的线性关系, 并且几乎没有迟滞现象, 它们相关系数达 0.9999 以上, 光纤布喇格光栅的波长压力灵敏度大约为 0.045 nm/MPa, 即 45 pm/MPa, 其测量精度为 0.5% (full scale)。

分析以上两个图不难发现: 光纤布喇格光栅是一种理想的压力传感元件, 富士公司生产型号为 FBC20WB2 膜片上光纤布喇格光栅的中心波长与压力的灵敏度比自行设计型号为 ZXYC01 的膜片的灵敏度要大几倍。究其原因, 一是富士公司生产型号为 FBC20WB2 要比自行设计型号为 ZXYC01 的膜片表面积大, 二是膜片的材料和厚度不同引起。但富士公司生产型号为 FBC20WB2 相关性要比自行设计型号为 ZXYC01 的膜片小一些。因此, 富士公司生产型号为 FBC20WB2 的高灵敏度膜片非常适合于低压力的环境使用, 而自行设计型号为 ZXYC01 的膜片较适合于高压力的环境中使用。

3 结论

对光纤布喇格光栅的压力传感特性进行了理论分析, 通过实验研究了光纤布喇格光栅在不同膜片上的压力传感特性, 从实验结果不难发现光纤布喇格光栅的中心波长与压力变化有着很好的线性关系, 其压力灵敏度分别为 376 pm/MPa 和 45 pm/MPa 左右, 其测量精度分别为 1% (full scale) 和 0.5% (full scale), 说明了光纤布喇格光栅是理想的压力传感元件, 可以广泛

应用在多种复杂工业环境下的压力测量, 以替代传统传感器。

当然, 要实现产品化还需要做许多研究工作。主要有: (1) 深入研究膜片的制作和选用以及膜片的粘贴工艺; (2) 研究光纤光栅的封装工艺, 光栅传感器粘贴封装影响着传感器的灵敏度、寿命等, 包括粘接剂、封装材料的选择和粘贴工艺、封装工艺; (3) 研究光纤布喇格光栅允许的最大拉伸量与膜片在正常工作范围内的变化量的匹配关系, 设计多种膜片以完善产品类型; (4) 本次实验是将光纤布喇格光栅放置在水浴槽中恒温, 未考虑温度对光纤布喇格光栅的影响, 在实际的应用中应对温度的影响进行补偿。

参考文献

- [1] MEREY W W, MELTZ G, GLENN W H. Fiber optic Bragg grating sensors [J]. Proc SPIE, 1989, 1169: 98~107.
- [2] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J *et al*. Fiber Bragg grating sensors [J]. IEEE J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1442~1463.
- [3] 姜德生, 何伟光. 光纤光栅传感器的应用概况 [J]. 光电子·激光, 2002, 13(4): 420~430.
- [4] 鲍吉龙, 章献民, 陈抗生 *et al*. 光纤光栅传感器及其应用 [J]. 激光技术, 2000, 24(3): 174~179.
- [5] XU M G, REEKIE L, CHOW Y T *et al*. Optical in fiber grating high pressure sensor [J]. Electron Lett, 1993, 29(4): 398~399.
- [6] XU M G, GEIGER H, DAKN J P. Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass bubble housing [J]. Electron Lett, 1996, 32(2): 128~129.
- [7] 刘云启, 郭转运, 刘志国 *et al*. 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅压力传感器 [J]. 中国激光, 2000, A27(3): 211~214.
- [8] 秦子雄, 曾庆科, 项阳 *et al*. 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.
- [9] 贾宏志, 李育林, 忽满利. 光纤光栅制作技术 [J]. 激光技术, 2001, 25(1): 23~26.

(上接第 595 页)

实验结果表明, 采用快速凝固 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 熔体也可以直接得到纳米晶块材。其晶化机理有待进一步研究。

4 结论

(1) 利用激光快速重熔和冷却可以直接从 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 熔体中结晶出纳米晶结构的块材。(2) 纳米晶结构的块材的尺寸决定于激光重熔工艺。当激光输入光斑直径为 20mm~40mm, 输出光斑直径约为 2mm, 激光扫描速度为 5mm/s 时, 可以得到 2mm 深度, 长度与宽度不限的纳米晶块材。(3) 纳米晶块材主相为大量的硅及少量的硼和铜原子固溶其中的 $\alpha\text{-FeSi}$ 相, 晶粒尺寸为 25.57nm。另一个主要相为球状 Nb 富集区。

参考文献

- [1] 卢柯, 周飞. 纳米晶体材料的研究现状 [J]. 金属学报, 1997,

- 33(1): 99~106.
- [2] 张甫飞, 张洛, 纪朝廉 *et al*. 纳米晶软磁合金材料及应用 [J]. 上海金属, 2002, 24(1): 21~26.
- [3] 宋肿旸, 陈学定, 俞伟元 *et al*. Fe 基非晶软磁合金的纳米晶化及磁性 [J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(2): 14~17.
- [4] DUHAJ P, SVEC P, SPIED J *et al*. Thermodynamic, kinetic and structural aspects of the formation of nanocrystalline phase in $\text{Fe}_{76}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A304~A306: 178~186.
- [5] FRANCO V, CONDE C F, CONDE A *et al*. Superparamagnetic behaviour in Fe-Cu-Nb-Si-B alloy [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000, 214~216: 400~403.
- [6] 陈岁元, 刘常升, 才庆魁 *et al*. 激光晶化制备 Fe 基纳米软磁材料的研究进展 [J]. 激光技术, 2005, 29(1): 94~97.
- [7] ZHANG J W, ZHANG X Y, XIAO F R *et al*. Influence of additive elements Nb and Mo on the crystallization process of amorphous alloy $\text{Fe}_{76.5}\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ [J]. Mater Lett, 1998, 36: 223~228.
- [8] 韦世强, 李忠瑞, 张新夷 *et al*. 超细 Ni-B 非晶态合金的退火晶化及其催化性能 [J]. 科学通报, 2000, 45(18): 1941~1943.
- [9] 何开元, 赵玉华. Co 基纳米晶软磁合金研究进展 [J]. 金属功能材料, 2001, 8(2): 1~5.