

文章编号: 0253-2239(2010)10-2855-04

高精度机械感生长周期光纤光栅横向压力传感系统

姜明顺¹ 冯德军² 隋青美¹

(¹ 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; ² 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要 设计并实验研究了一种基于机械微应变引入长周期光纤光栅(MLPFG)的横向压力传感系统。利用机械线加工技术制作周期为600 μm, 长度为60 mm的不锈钢压力槽板, 测定了槽板对待写制光纤施加的横向压力与MLPFG谐振峰峰值之间的关系, 并借助布拉格光纤光栅(FBG)搭建了高精度横向压力解调系统。实验表明, 在0~60 N的范围内, 压力与MLPFG透射谱深度有很好的线性关系, 线性度达0.9950, 灵敏度约为0.35 dB/N。保持45 N的压力20 h, MLPFG谐振峰峰值最大波动小于0.06 dB, 具备良好的稳定性。采用中心波长为1542.890 nm的FBG实现了系统解调, 系统灵敏度为0.12 μW/N, 进一步提高了检测系统的实用性。

关键词 光纤布拉格光栅; 横向压力; 机械感生长周期光纤光栅; 解调

中图分类号 TN253; O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.2855

High-Precision Transverse-Pressure Sensing System Utilizing Mechanically-Induced Long-Period Fiber Grating

Jiang Mingshun¹ Feng Dejun² Sui Qingmei¹

(¹ School of Control science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China
² School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China)

Abstract A high precision transverse pressure sensing system using mechanically-induced long period fiber gratings (MLPFG), is designed and studied experimentally. 60 mm-long periodic pressure grooves are made by mechanical line processing technology with the groove period of 600 μm. The relation between transverse pressure and MLPFG resonance peak is measured. Furthermore, a demodulation system is constructed employing a fiber Bragg grating (FBG), the results show that MLPFG transverse pressure has good linear relation with MLPFG resonance peak in the range of 0~60 N. Linearity is up to 0.9950 and the sensitivity is about 0.35 dB/N. Keeping the MLPFG transverse pressure 45 N for more than 20 h, the MLPFG resonance peak's maximum fluctuation is less than 0.06 dB. The FBG with central-wavelength at 1542.890 nm is adopted to realize system demodulation, the system sensitivity is 0.12 μW/N, and the practicality of detecting system is further improved.

Key words fiber Bragg grating; transverse pressure; mechanically-induced long period fiber Bragg grating (MLPFG); demodulation

1 引 言

近年来,周期为几十到几百微米的长周期光纤光栅(LPFG)由于其易于制作、附加损耗小、无后向反射以及与偏振无关等特点,以及具有比光纤布拉

格光栅(FBG)更好的温度、横向压力、折射率和弯曲灵敏度,得到了广泛重视,在光纤通信及传感领域中得到了广泛的应用,如带阻滤波,增益平坦,温度、应力、气体浓度和折射率传感以及系统解调等^[1~3]。

收稿日期: 2010-01-09; 收到修改稿日期: 2010-01-30

基金项目: 山东省自然科学基金(Z2006G06)和山东省中青年科学家奖励基金(2006BS01001)资助课题。

作者简介: 姜明顺(1981—),男,博士研究生,主要从事光电子技术、光纤传感器、光纤通讯等方面的研究。

E-mail: mingshunjiang@yahoo.com

导师简介: 隋青美(1963—),女,教授,博士生导师。主要从事检测理论及应用、光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

压力是工业生产过程中重要的基本检测参数之一,如桥梁动态负荷及振动监测、建筑结构动态受载情况监控,动态称重等^[4]工程应用有着广泛的需求。

LPPG 为透射型光栅,其相位匹配条件是同向传输的纤芯基模和包层模耦合。由于 LPPG 的周期可达数百微米,本文利用机械线加工技术制作不锈钢板周期性压力槽板,采用机械感生法写制长周期光纤光栅,测定了对槽板施加的周期性压力与机械感生长周期光纤光栅 (MLPFG) 的谐振峰值之间的关系,并监测了系统工作的长期稳定性。最后,通过引入解调 FBG,设计了基于机械感生长周期光纤光栅的横向压力传感系统。

2 MLPFG 横向应力实验

机械线加工技术是目前较为成熟的一种数控加工技术,加工过程由计算机进行控制,制作误差小,精度高。基于此技术写制周期 P 为 $600\ \mu\text{m}$ (误差 $\pm 5\ \mu\text{m}$),周期数为 100 (即光栅长度为 $6\ \text{mm}$),深 $0.3\ \text{mm}$ 的槽板,选用 Corning SM-28 光纤 (纤芯直径 $8.3\ \mu\text{m}$,包层直径 $125\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.11)。压力传感系统如图 1 所示,由超荧光光源 (波长范围 $1200\sim 1750\ \text{nm}$), ANDO AQ 6331 光谱仪 (分辨率为 $10\ \text{pm}$,观察写制 LPPG 透射谱),制作槽板以及放置光纤的平板组成。将承受横向应力的光纤放置于周期性压力槽和底板之间,为了维持受力过程中的平衡,平行放置一根光纤保证受力的均匀以及系统的稳定。通过不断调整施加在槽板上的压力,测得的 MLPFG 的透射谱如图 2 所示。为了更为精确的控制 MLPFG 的透射谱,对待写制的光纤施加纵向预拉力以减少 MLPFG 形成过程中光纤自身微弯带来的影响。

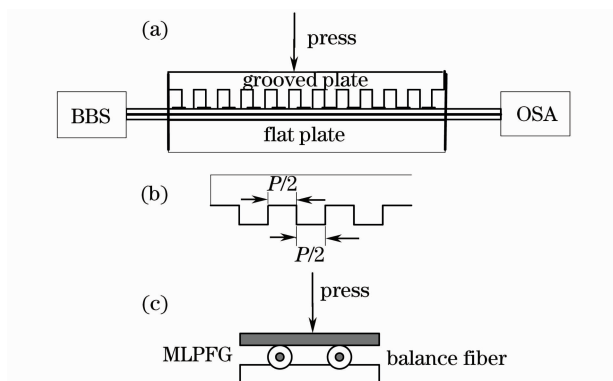


图 1 横向应力感生长周期光纤光栅结构示意图

Fig. 1 Experimental setup for the mechanically induced LPPG

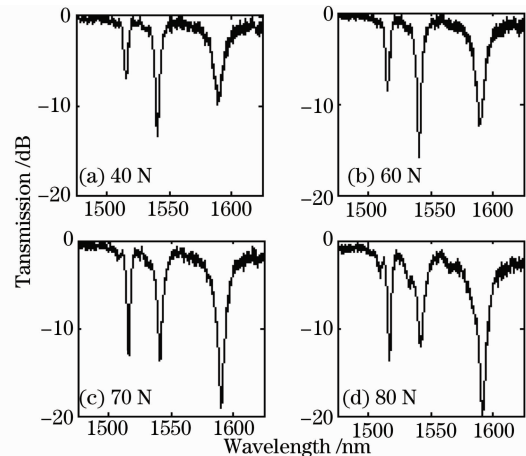


图 2 不同横向应力下 MLPFG 光谱

Fig. 2 MLPFG spectra under different transverse pressures

根据设计的写制结构分析,MLPFG 主要由光纤周期性应力引起的光弹效应以及光纤自身周期性的微弯形成。LPPG 的原理是将前向传输的基模耦合至前项传输的离散、圆对称的 n 阶包层模中,且这种耦合与波长有关。LPPG 的透射光波中心波长 λ_D 为

$$\lambda_D = (n_{co}^{eff} - n_{cl}^{eff})\Lambda, \quad (1)$$

式中 n_{co}^{eff} , n_{cl}^{eff} 分别为芯模和包层模的有效折射率, Λ 为光栅周期^[5,6]。一般说来,LPPG 透射谱的形成主要是由纤芯基模与低次包层模耦合形成,所以在图 2 中可以看到三个不同低阶包层模式与纤芯基模耦合形成的 LPPG 透射谱。对于其中任一谐振峰,其透射峰的谐振峰值透射率 $T(\lambda)$ 与模式间的交流耦合系数 κ 和光栅长度 L 的乘积的关系为

$$T(\lambda) \propto \sin^2(\kappa L). \quad (2)$$

由(2)式可以看出,交叉耦合率随平均有效折射率的调制是周期性变化的^[7,8]。当 $\kappa L < \pi/2$ 时,随着平均有效折射率调制的增加,谐振峰深度会逐渐增大。当平均有效折射率到达一定值时,即满足模式间的交流耦合系数 κ 和光栅长度 L 的乘积 $\kappa L = \pi/2$,此时谐振波长处有最大的交叉耦合率,也即纤芯基模的能量完全转移到包层模中,谐振峰最深;如果平均有效折射率使 $\kappa L > \pi/2$,模式间就会发生过耦合,能量从包层模耦合回纤芯导模,即谐振波长处的交叉耦合率开始下降,谐振峰值变小,直到 $\kappa L = \pi$ 时,此时波层模中的能量完全回到纤芯模,即交叉耦合率为零^[9,10]。

实验对谐振波长处峰值随压力变化的关系是符合上述理论分析的。实验观察到了透射峰衰减随压力增加而逐渐增大,而压力值大于某值时,衰减出现了回减现象^[11]。

在一定的径向压力范围内,各模式透射谱谐振峰值逐渐增加。而谐振峰值的变化与径向压力的大小呈周期性变化的关系,所以当径向压力施加至一定程度后,谐振峰值开始减小,产生过耦合现象,如图 2 中间模式($\lambda_D=1541.210$ nm 附近)谐振峰值变化所示。由图 2 可以看出,不同的谐振峰值随压力变化的曲线不一致,这是由不同次的包层模式和基模的耦合决定的。中间透射谱落在 C 波段,并具有良好的透射谱随横向压力变化的关系,所以可以应用在通信与传感系统中。

为检验采用此方法写制的长周期光纤光栅的稳定性,选用放大自辐射(ASE),光源(1525~1575 nm)将写制 MLPFG 的结构放置于恒温环境中,对中间透射光谱进行了长时间的监测,透射光谱输出如图 3 所示。实验测得,在 20 h 内,MLPFG 的谐振峰峰值变化最大的也小于 0.06 dB。

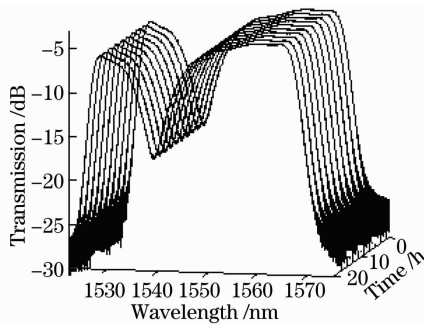


图 3 长时间 MLPFG 稳定输出谱

Fig. 3 MLPFG output spectra of long time monitoring

图 4 所示为中心波长在 1541.210 nm 的谐振峰峰值与压力的关系曲线。可以看出,在 0~60 N 的范围内,透射谱深度随应力增加而增加,即能量从纤芯逐渐耦合到包层,并且有很好的线性度,线性拟合度为 0.9950,灵敏度约为 0.35 dB/N。当压力大于 60 N 时,谐振峰值出现振荡现象,随着压力的继续

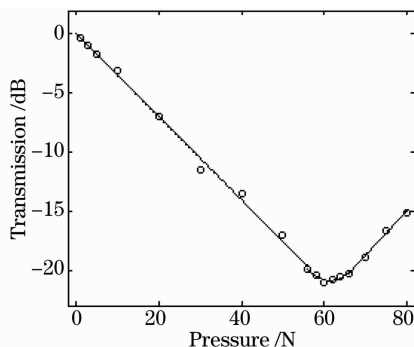


图 4 横向应力与 MLPFG 谐振峰峰值关系

Fig. 4 Relation between transverse pressure and MLPFG resonance peak

增加,透射谱峰值开始减小,过耦合现象开始出现,即包层模能量开始耦合回纤芯模。

3 解调系统

在实际应用中,由于 LPFG 的带宽较宽,不采用光谱仪很难准确地检测其谐振峰值及谐振波长,由于 MLPFG 在谐振峰值处以及其谐振边带在固定波长处的插入损耗对横向压力变化响应,虽然绝对变化值不同,但都是线性的,因此设计了一种利用 FBG 解调的系统,如图 5 所示。系统由 ASE 波段宽带光源、横向应力写制长周期光纤光栅机构、一个 3 dB 耦合器,以及一个中心波长 1542.890 nm,3 dB 带宽 0.26 nm,反射率 93.6% 的 FBG 构成。其中 FBG 在恒温环境下,并处于自由状态,以保证其中心波长不受影响。宽带光源入射至横向应力写制长周期光纤光栅机构后,光源经过 MLPFG 滤波,经耦合器后,被 FBG 反射至光功率计接收。设计系统引入 FBG 后,解调原理由检测 MLPFG 的谐振峰值对横向压力的响应,转变为利用 MLPFG 在 FBG 中心波长处对横向应力响应的插入损耗的变化,对 FBG 的滤波光强解调,在保证高灵敏度的前提下,提高了系统的实用性。

由 MLPFG 的横向压力实验可知,在 0~60 N 的范围内具有较好的线性度,因此系统的压力检测范围为 0~60 N。

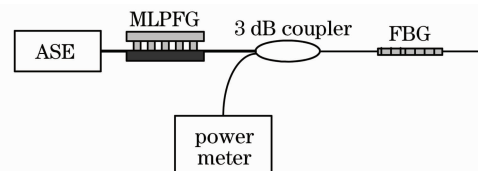


图 5 MLPFG 横向负载解调系统图

Fig. 5 Demodulation system of MLPFG transverse load

结合系统分析,系统输出光功率为

$$P_s = I_0 K \int T_L(\lambda) R_{\text{FBG}}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

式中 P_s 是解调系统输出的光功率, K 是由于耦合器,以及光纤本身引起的插损因子, $T_L(\lambda)$ 是 MLPFG 在其光谱范围内的透射曲线, $R_{\text{FBG}}(\lambda)$ 是 FBG 的反射谱功率。从(3)式中可以看出,输出光功率 P_s 受 $T_L(\lambda)$ 的直接影响,在 MLPFG 写制的过程中,其光谱透射曲线将会发生变化,即在 FBG 反射处,MLPFG 的插入损耗将会发生变化。

系统解调原理如图 6 所示。可以看出,横向应力分别为 20,35,45 N,随着横向应力的逐渐增大,

MLPFG 在 FBG 处的插入损耗也逐渐增大, MLPFG 与 FBG 的功率卷积逐渐减小, 则经 FBG 解调反射的功率将会有显著的跟随变化。在 0~60 N 的范围内, 测得的横向应力与解调输出光功率的关系如图 7 所示, 横向应力与输出光功率灵敏度为 $0.12 \mu\text{W}/\text{N}$, 灵敏度较高, 稳定性好。

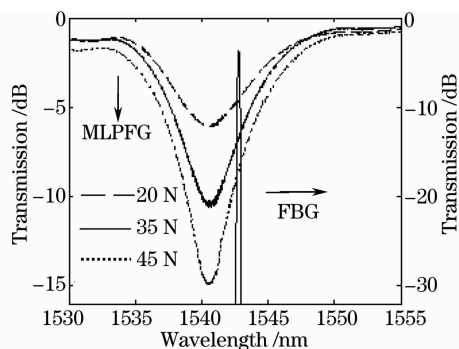


图 6 MLPFG 横向负载解调原理

Fig. 6 Demodulation principle of MLPFG transverse load

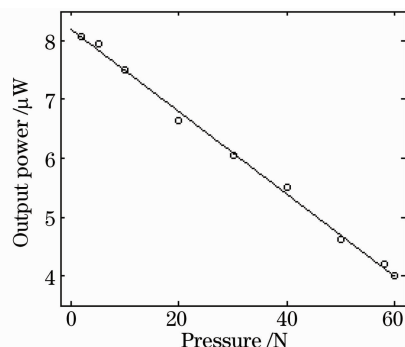


图 7 横向应力与解调输出光功率关系曲线

Fig. 7 Relation between transverse pressure and demodulation output power

4 结 论

利用机械感生法写制长周期光纤光栅, 主要是由光纤所承受的周期性压力引起的弹光效应, 以及光纤本身的周期性微弯形成, 横向压力检测结构简单, 成本低, 稳定性高, 且在一定的范围内, 横向压力与长周期光纤光栅的谐振峰值具有良好的线性关系, 线性度达 0.9950, 并具有良好的重复性, 易擦除, 可恢复等特点。通过引入解调 FBG, 利用随施加压力插入损耗不断变化的 MLPFG 谐振边带, 以

新颖的解调方式实现了横向压力传感系统。实验证明, 在 0~60 N 的横向应力范围内, 系统灵敏度为 $0.12 \mu\text{W}/\text{N}$, 灵敏度高, 实用性强, 在动态称重以及智能结构健康监测等传感领域有着广泛的应用价值。

参 考 文 献

- Xu Yanping, Gu Zhengxian, Chen Jiabi *et al.*. Structure optimization of long-period fiber grating gas-sensing film sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 326~330
徐艳平, 顾铮先, 陈家璧等. 长周期光纤光栅气敏薄膜传感器结构优化 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 326~330
- Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a long-period fiber grating with rotary index modulation [J]. *Chinese J. Lasers*. 2009, **36**(5): 1129~1133
宋 韵, 朱 涛, 饶云江等. 旋转折变型长周期光纤光栅实现应变和温度的同时测量 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1129~1133
- Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A humidity sensor based on ultra-long-period fiber gratings with asymmetric refractive index modulation [J]. *Chinese J. Lasers*. 2009, **36**(8): 2042~2045
宋 韵, 朱 涛, 饶云江等. 基于非对称折变型超长周期光纤光栅的湿度传感器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2042~2045
- Wentao Zhang, Lihui Liu, Fang Li *et al.*. Fiber Bragg grating pressure sensor with enhanced sensitivity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 507~508
- Jiang Mingshun, Feng Dejun, Sui Qingmei. Characteristic research on mechanically-induced long period fiber gratings [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(7): 1513~1518
姜明顺, 冯德军, 隋青美. 机械感生长周期光纤光栅实验 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(7): 1513~1518
- S. H. Ryu, Y. Park, S. T. Oh *et al.*. Effect of asymmetric stress relaxation on the polarization-dependent transmission characteristics of a CO₂ laser-written long-period fiber grating [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(3): 155~157
- Hou Shanglin, Huang Haiyu, Huang Yongqing *et al.*. Study on sensing characteristics of tunable long-period fiber gratings imprinted by mechanical pressure [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(4): 443~446
侯尚林, 黄海宇, 黄永清等. 可调谐长周期光纤光栅压力传感的实验研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2009, **20**(4): 443~446
- S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino *et al.*. Tunable mechanically induced long-period fiber gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(10): 710~712
- Enboa Wu, RouChing Yang, Kuoching San *et al.*. A Highly efficient thermally controlled loss-tunable long-Period fiber grating on corrugated metal substrate [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 612~614
- Mingshun Jiang, Dejun Feng, Qingmei Sui. Characteristics research on mechanically induced long-period fiber gratings [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(2): 112~114
- C. Y. Lin, Lon A. Wang. A wavelength and loss tunable band-rejection filter based on corrugated long-period fiber grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(4): 332~334