

doi: 10.3788/gzxb20174601.0106002

基于多芯光纤级联布喇格光纤光栅的横向压力与温度同时测量

蒋友华¹, 傅海威¹, 张静乐¹, 贾振安¹, 乔学光²

(1 西安石油大学 理学院 光电油气测井与检测教育部重点实验室, 西安 710065)

(2 西北大学 物理系, 西安 710069)

摘要:提出并制作了一种基于多芯光纤与单模光纤错位构成的马赫-曾德尔干涉仪, 将其与光纤布喇格光栅级联, 形成的全光纤传感系统可实现横向压力和温度双参量同时测量. 马赫-曾德尔干涉仪是利用多芯光纤和单模光纤的模场不匹配而发生模间干涉, 当外界横向压力直接作用在多芯光纤内部光场, 干涉仪具有较高的灵敏度, 实验结果表明: 马赫-曾德尔干涉仪压力灵敏度为 $28.57 \text{ nm}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$, 线性度为 0.997, 而光纤布喇格光栅在一定范围内对压力变化不敏感; 马赫-曾德尔干涉仪和光纤布喇格光栅对温度变化都具有较高的线性度, 温度灵敏度分别为 $56.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $11.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. 对于分辨率为 0.02 nm 的光谱仪, 传感器可实现的压力和温度测量分辨率分别为 $7.0 \times 10^{-4} \text{ N}/\text{mm}$ 和 0.03°C . 马赫-曾德尔干涉仪的透射谱和光纤布拉光栅的谐振峰对横向压力和温度的变化有不同的光谱响应, 利用光谱仪对传感器的透射谱实时监测, 方便地实现了压力与温度双参量的测量. 该传感器结构简单, 灵敏度高, 可用于不同领域的压力传感.

关键词: 光纤传感; 多芯光纤; 全光纤压力传感器; 光纤马赫-曾德尔干涉仪; 光纤布喇格光栅; 双参量测量

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0106002-6

Simultaneous Measurement of Transverse Pressure and Temperature Based on Multi-core Fiber Cascaded with Fiber Bragg Grating

JIANG You-hua¹, FU Hai-wei¹, ZHANG Jin-le¹, JIA Zhen-an¹, QIAO Xue-guang²

(1 School of Science, Ministry of Education Key Laboratory on Photoelectric oil-gas Logging and detecting, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

(2 Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: An all-fiber sensing system based on the Mach-Zehnder Interferometer (MZI) and Fiber Bragg Grating (FBG) was proposed for the measurement of transverse pressure and temperature simultaneously. The MZI was fabricated by splicing of a lateral-offset Multi-Core Fiber (MCF) with two single mode fibers, the modal interference was formed due to the mode field mismatch among MCF and Single Mode Fibers (SMFs), which made the external pressure directly acted on the light field inside of the multi-core fiber, thus a high pressure sensitivity of interferometer can be achieved. Experimental results show that the pressure sensitivity of the MZI is $28.57 \text{ nm}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$, and the linearity is 0.997, while FBG is not sensitive to the pressure change. Both the MZI and the FBG show a good linearity between the wavelength shift and temperature, and the sensitivity is $56.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ and

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61275088, 61077060)、陕西省教育厅重点实验室科研计划项目 (No. 14JS073) 和西安石油大学研究生创新基金项目 (No. 2015cx140837) 资助

第一作者: 蒋友华 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为干涉型光纤传感技术. Email: yhjiangxssy@163.com

导师 (通讯作者): 傅海威 (1966-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电子及光纤传感技术. Email: hwf@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2016-07-18; **录用日期:** 2016-08-25

<http://www.photon.ac.cn>

11.3pm/°C, respectively. For a spectrometer with a resolution of 0.02 nm, the proposed sensor can reach a resolution of 7.0×10^{-4} N/mm for pressure and of 0.03 °C for temperature. The transmission spectrum of the MZI and the resonance peaks of the FBG have different spectral responses to pressure and temperature changes. By using optical spectrum analyzer to monitor the wavelength shift of the transmission spectrum of the sensor, so that the dual-parameters of pressure and temperature can be measured conveniently. The proposed sensor has a simple structure a high sensitivity, it can be well applied to transverse pressure measurement.

Key words: Fiber optics sensors; Multi-core fiber; All-fiber pressure sensor; Optical fiber Mach-Zehnder interferometer; Fiber Bragg grating; Double-parameter-measurement

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.2430; 060.3735

0 引言

在工程应用中,温度和层间压是航空航天、建筑工程^[1]等领域中需要在线监测的重要物理参量.在高电磁干扰环境和易燃易爆等场所,可靠的测量方法至关重要.与传统传感器相比,全光纤传感器因其具有体积小、质量轻、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀和灵敏度高等特点得到广泛关注.目前光纤压力传感器主要包括光纤光栅(Fiber Bragg Grating FBG)^[2]、法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Pérot Interferometer, FPI)^[3-5]、锥形光纤^[6]、萨格奈克干涉仪^[7-8]等.这些传感器在特定领域都有各自的优点且都可以实现光纤轴向压力和应变的测量,但不足的是在测量光纤横向压力时,需要设计特殊结构的传感头,因而使得传感器体积大大增加且难以实现高精度测量.其次,如果要检测材料内部的全部应变信息就需要埋设多个传感器(如使用光纤光栅),且要保证光纤光栅的轴向与所测应力方向一致,这样布置大量方向相互垂直的光纤光栅传感器十分困难,也会使得系统成本提高、结构复杂,更重要的是传感器数量过多将严重削弱主体材料性能,并对其造成影响甚至损害.所以制作性能更优、结构更简单的光纤横向压力传感器具有重要意义.

目前,文献报道的光纤压力传感器主要集中在光纤轴向应力传感,而在光纤横向应力传感仅有少量报道,且主要采用光子晶体光纤制作敏感元^[9-11].2010年侯尚林等^[12]采用可调谐长周期光子晶体光纤光栅,通过监测压力和透射谱峰值间的关系,实现了横向压力在20~60N范围内高线性度的测量,灵敏度为0.5 dB/N.2011年Wang等^[13]利用压力引起光纤布喇格光栅的双折射现象实现了温度不敏感的横向压力测量.2015年付兴虎等^[14]提出了一种基于单模光纤与多模光纤级联结构的马赫-曾德尔干涉型横向压力传感器,该传感器在2~16N的压力范围内,灵敏度可达554.83 pm/N.2015年孙婷婷等^[15]采用倾斜光纤光栅实现了较低压力范围内(1~7N)的线性监测,可应用于电子元器件安装压力测试.这些不同结构的光纤横向压力传感器,不仅拓展了常规光纤的使用范围,而且为开发新的全光纤横向压力传感器提供了丰富的理论和实验借鉴基础.

多芯光纤(Multi-core Fiber, MCF)作为一种新型光纤已经成为光纤通信领域的研究热点之一.MCF不仅提高了光纤的传输容量,还可以利用光纤中模式间的关系进行传感研究.本文提出了一种在两段单模光纤间错位熔接一段MCF构成的光纤马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)和光纤布喇格光栅(FBG)级联结构的全光纤传感系统.由于MCF和FBG对温度与压力的响应特性不同,通过实时监测MZ干涉仪的透射光谱波谷处波长和FBG的谐振峰波长响应差异,构建灵敏度系数矩阵实现温度与压力双参量同时测量,该结构具有制作简单、成本低廉、灵敏度高等优点.

1 传感器的结构与原理

基于多芯光纤的MZ干涉仪和FBG级联的全光纤传感器结构原理如图1.实验中采用的是由长飞公司生产的纤芯和包层分别为9 μm和125 μm的单模光纤(Single Mode-Fiber, SMF).多芯光纤(MCF)则是由富通集团生产的七芯通信光纤,光纤的横截面如图1(a),该光纤含有7根纤芯,每根纤芯的结构和参数都相同,可以传输少量低阶模式.七个纤芯的直径 $d=10.31 \mu\text{m}$,纤芯之间的距离 $\Delta=38.78 \mu\text{m}$,纤芯折射率和周围包层折射率差 $\Delta n=0.0045$.实验中使用的熔接机为古河公司生产的普通商用S177型熔接机.首先,在两段单模光纤通过径向错位熔一段30 mm的MCF,然后在第二个错位熔接点后10 mm的载氢光敏光纤上通过相位掩模板法刻写光纤光栅.刻写的光纤光栅的栅区为10 mm,中心波长为1550.7 nm,3 dB带宽为

0.2 nm,制作好的传感器总长度为 50 mm. 该传感器的工作原理为:宽带光源(Broadband Light Source, BBS)发出的光经过 SMF 进入第一个错位熔接点时,由于模场不匹配在多芯光纤的中心纤芯,周围纤芯和多芯光纤的包层激发出传导模,当到达第二个错位熔接点时又将不同的传导模耦合到单模光纤纤芯中发生干涉.光继续传播经过 FBG 后,根据 FBG 的带通滤波特性,满足布喇格波长的光被反射,透射光谱在 FBG 中心波长处出现一个明显的波谷,通过光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)监测透射谱波长的漂移量而实现外界参量测量.

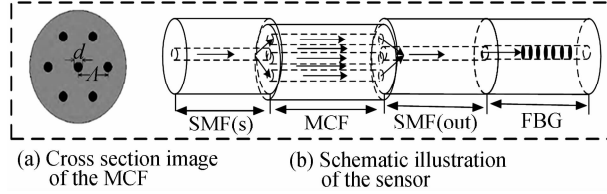


图 1 多芯光纤截面与传感器结构

Fig. 1 Cross section image of the MCF and schematic illustration of the sensor

对于马赫-曾德干涉仪,透射光谱波谷波长表示为^[16]

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2N+1} \quad N=0,1,2,3,\dots \quad (1)$$

式中, Δn_{eff} 为产生干涉的传导模有效折射率差, L 为干涉仪中 MCF 的长度.根据耦合模理论,FBG 的中心波长 λ_B ,光纤纤芯的有效折射率 n_{eff} 和 FBG 的周期 Δ 满足

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

传感器 MZI+FBG 的透射谱如图 2,和初始的 MZI 透射谱相比,只是在 MZI 透射谱中出现了一个 FBG 布喇格谐振峰,由于受到 MZI 透射谱的调制,谐振峰的消光比较小,但是其所处的波长和 3 dB 带宽保持不变,也不影响其测量灵敏度.

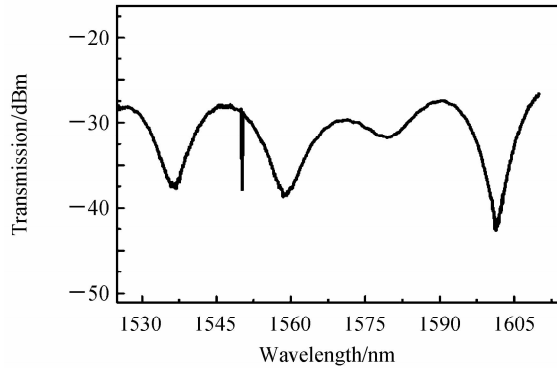


图 2 基于多芯光纤的 MZI 级联 FBG 的透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of the sensor based on MCF-MZI cascaded by FBG

将基于多芯光纤的 MZI+FBG 型传感器应用于横向压力测量,当作用在传感器横向上的压力发生变化时,传感器也会随之发生轻微的变化.由于弹光效应微应变引起光纤中纤芯和包层有效折射率发生相应的变化.因此,产生的模间干涉的模式之间的光程差发生变化,从而引起 MZI 的透射谱波长的漂移.由式(1)可知,外界横向压力变化引起 MZI 透射谱波谷波长的漂移量表示为

$$\Delta\lambda_m = \frac{2(\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n)L}{2N+1} - \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2N+1} = \frac{2\Delta nL}{2N+1} \quad (3)$$

式中, $\Delta\lambda_m$ 为受外界压力引起的某一阶波谷波长漂移量, Δn 为外界压力引起的弹光效应使得干涉模间有效折射率差值的变化量.外界横向压力直接作用在多芯光纤内部光场,可以有效提高传感器的灵敏度.

当应用该传感器进行压力和温度双参量同时测量时,干涉仪长度 L ,干涉模间有效折射率差值 Δn ,光纤布喇格光栅周期 Δ ,纤芯有效折射率 n_{eff} 将会发生变化,因而引起 MZI 的透射光谱和 FBG 的谐振峰发生漂移.当 MZI 透射谱的波谷波长和 FBG 的谐振峰波长随外界压力与温度都呈线性关系时,压力与温度引起的 MZI 波谷波长和 FBG 波长漂移量用双参量矩阵表示为^[17]

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{MZI}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{F,\text{MZI}} & \mathbf{K}_{T,\text{MZI}} \\ \mathbf{K}_{F,\text{FBG}} & \mathbf{K}_{T,\text{FBG}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{K}_{F,\text{MZI}}$ 和 $\mathbf{K}_{T,\text{MZI}}$ 分别为 MZI 波谷波长对压力和温度的灵敏度系数, $\mathbf{K}_{F,\text{FBG}}$ 和 $\mathbf{K}_{T,\text{FBG}}$ 分别为 FBG 波长对压力和温度的灵敏度系数, ΔF 和 ΔT 分别表示压力和温度的变化量. 压力和温度两个参量的变化可以用矩阵表示, 即

$$\begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{T,\text{FBG}} & -\mathbf{K}_{T,\text{MZI}} \\ -\mathbf{K}_{F,\text{FBG}} & \mathbf{K}_{F,\text{MZI}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{MZI}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $M = \mathbf{K}_{F,\text{MZI}}\mathbf{K}_{T,\text{FBG}} - \mathbf{K}_{T,\text{MZI}}\mathbf{K}_{F,\text{FBG}}$, 为式(4)中系数矩阵的行列式值, 矩阵中相应的压力和温度灵敏度系数可以通过实验测得. 对于一个已知的波长分辨率, 大的 $|M|$ 也会使传感器的测量分辨率更高. 显然, 当 $\mathbf{K}_{F,\text{MZI}}\mathbf{K}_{T,\text{FBG}}$ 和 $\mathbf{K}_{T,\text{MZI}}\mathbf{K}_{F,\text{FBG}}$ 符号相反, 则 $|M|$ 取得更大的值^[18].

2 实验结果与分析

测试传感器的压力响应系统的实验结构如图 3. 实验使用的光源为上海飞秒光电子技术有限公司生产的 ASE3700 型宽带光源 (Broadband Light Source, BBS), 光源波长范围为 1 520~1 610 nm; 光谱分析仪 (Optical Spectrum Analyzer, OSA) 是由日本安利公司生产公司生产的 MS974 型光谱仪, 其最小分辨率为 0.02 nm.

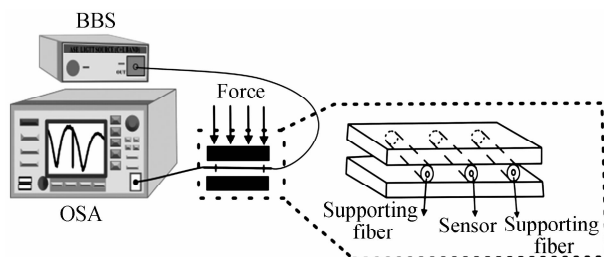


图 3 压力测试实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the press-tested experimental setup

横向压力实验中, 首先将制作好的传感器置于设计好的施压装置中, 如图 3. 传感器拉直固定在载玻片上, 以消除传感器的弯曲影响, 为使得传感器能受到始终径向垂直向下的力并且保持施压装置的稳定性和测量的准确性, 传感器的两侧等距离固定两段去除涂覆层的光纤, 且光纤的长度和直径与传感器保持一致. 然后在传感器和两根支撑光纤上放固定一块同样的载玻片, 通过增加载玻片上的砝码质量来改变传感器受到的横向压力. 在此施压装置中, 传感器所受到压力为载玻片上砝码重量的 1/3. 实验中, 添加的砝码质量为 0.6 kg~4.8 kg, 每增加 0.6 kg 记录一次光谱, 即作用于传感器上的横向压力范围为 2~16N, 每增加 2N 记录一次透射光谱, 对于传感区长度为 50 mm 的该传感器, 将其长度与所承受的压力归一化处理使其更具普遍意义, 即光纤上所承受的压力每次增加 0.04N/mm, 在整个压力测试过程中保持温度恒定为室温 27℃. 实验所测得的不同压力下传感器透射谱如图 4.

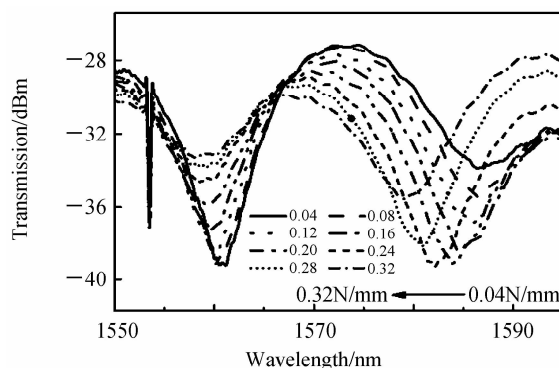


图 4 MZI 和 FBG 对施加压力的光谱响应

Fig. 4 Spectral response of MZI and FBG to the pressure

由图 4 可见,随着传感器所受横向压力的增大,MZI 的透射谱向短波方向移动,即发生蓝移,而 FBG 的谐振峰波长几乎不变.为了进一步得到传感器的压力响应特性,对 1 580 nm 附近 MZI 透射谱波谷和 FBG 的波长漂移量和压力变化之间的关系进行分析,并绘制压力响应特性曲线,如图 5.

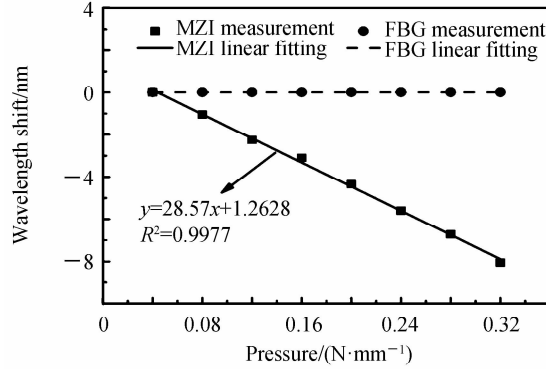


图 5 MZI 及 FBG 透射谱中谐振峰波长的漂移量与施加压力的关系

Fig. 5 Resonant wavelengths shifts of the transmission spectra in MZI and FBG as a function of pressure

由图 5 可知,该多芯结构 MZI 对横向压力非常敏感,且在实验中施加的压力范围内表现出较高的线性度. MZI 的透射谱在 1 580 nm 附近的波谷随压力变化总的漂移量为 8.05 nm,灵敏度为 28.57 nm/(N·mm⁻¹),线性度 R^2 为 0.997,与 FBG 轴向应力响应相比,FBG 对横向应力不敏感.所以式(5)中矩阵系数 $K_{F,MZI} = -571.4 \text{ pm/N}$, $K_{F,FBG} = 0$.

在温度实验中,传感器水平放置在恒温箱中,然后逐渐改变温度,其透光谱图如图 6,温度上升导致整个透射光谱向长波方向移动,而 MZI 透射谱的漂移量比 FBG 的谐振峰漂移量大. MZI 的透射谱在 1 580 nm 附近的波谷和 FBG 的谐振峰波长漂移量和温度间的关系如图 7.其中直线为根据实验数据所作的拟合曲线, MZI 透射谱波谷的温度响应灵敏度为 56.1 pm/°C,线性度 R^2 为 0.998, FBG 谐振峰波长的温度响应灵敏度 11.3 pm/°C,线性度 R^2 为 0.995,两者波长漂移量和温度变化具有很好的线性关系.因此,式(5)中矩阵系数 $K_{T,MZI} = 56.1 \text{ pm/}^\circ\text{C}$, $K_{T,FBG} = 11.3 \text{ pm/}^\circ\text{C}$.

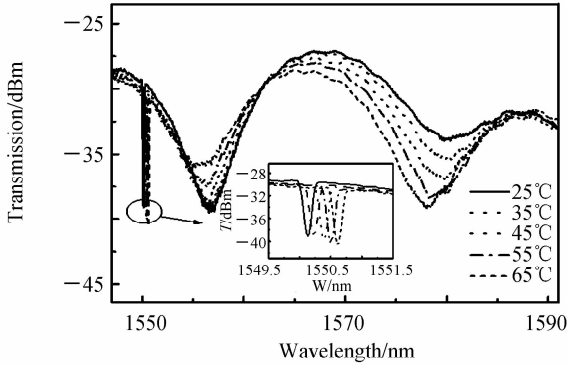


图 6 MZI 及 FBG 随着环境温度变化的光谱响应

Fig. 6 Spectral response of MZI and FBG to temperature

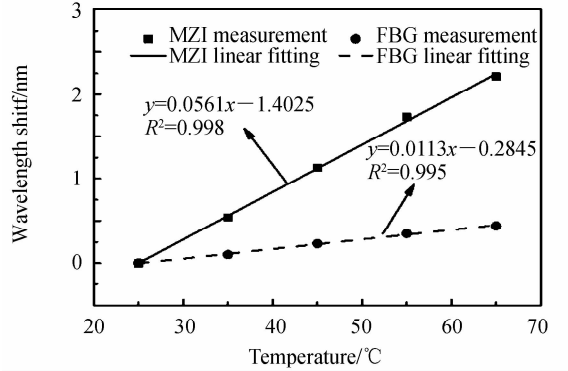


图 7 MZI 及 FBG 透射谱中谐振波长的漂移量随着环境温度的变化关系

Fig. 7 Resonant wavelengths shifts of the transmission spectra in MZI and FBG as a function of temperature

将所测得的 MZI 透射谱波谷和 FBG 谐振峰波长对压力与温度的响应灵敏度系数代入式(5)中,式中 $M = K_{F,MZI} K_{T,FBG} - K_{T,MZI} K_{F,FBG} = -322\ 841$,则可得

$$\begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{-322\ 841} \begin{bmatrix} 11.3 & -56.1 \\ 0 & -571.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{MZI} \\ \Delta \lambda_{FBG} \end{bmatrix} \quad (6)$$

因此,当传感器所受到的横向压力和环境温度同时变化时,利用光谱仪对 MZI+FBG 结构传感器的透射光谱实时监测光谱的漂移量,就可以同时得到压力与温度的具体改变量,传感器的压力和温度分辨率主要受光谱仪的最小波长分辨率影响,对于波长分辨率为 0.02 nm 的光谱仪,传感器的横向压力和温度的测量

分辨率分别为 $7.0 \times 10^{-4} \text{ N/mm}$ 和 0.03°C .

3 结论

提出并制作了一种基于多芯光纤与单模光纤错位构成的 MZI 和 FBG 级联可实现横向压力和温度双参量同时测量的全光纤传感系统. 由于基于 MCF 的 MZI 与 FBG 对横向压力和温度的响应灵敏度不同, 且二者对两个参量的响应有较高的线性度, 利用光谱仪实时监测传感器透射谱的漂移量就可以方便地测量出所施加于传感器上压力和环境温度, 并有效解决了压力测量过程中的温度交叉敏感问题. 实验结果表明, MZI 和 FBG 的温度响应灵敏度分别为 $56.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $11.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$; MZI 对横向压力的响应灵敏度为 $571.4 \text{ pm}/\text{N}$, 而 FBG 对横向压力不敏感. 该传感具有结构简单、易于制作、体积小、灵敏度高以及可以实现双参量测量等优点, 能较好的应用于横向压力测量.

参考文献

- [1] MOKHTA R, OWEN S, KWASN Y, *et al.* Fiber-optic strain sensor system with temperature compensation for arch bridge condition monitoring[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2012, **12**(5): 1470-1476.
- [2] LI L T, ZHANG D S, LIU H, *et al.* Design of an enhanced sensitivity FBG strain sensor and application in highway bridge engineering[J]. *Photonic Sensors*, 2014, **4**(2): 162-167
- [3] GONG Y, RAO Y J, GUO Y, *et al.* Temperature insensitive micro fabry-perot strain sensor fabricated by chemically etching Er-doped fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(22):1725-1727.
- [4] LI C, XIAO J, GUO T T, *et al.* Interference characteristics in a Fabry-Perot cavity with graphene membrane for optical fiber pressure sensors[J]. *Microsystem Technologies*, 2015, **21**(11): 2297 -2306.
- [5] YU Y Q, CHEN X, HUANG Q D, *et al.* Enhancing the pressure sensitivity of a Fabry-Perot interferometer using a simplified hollow-core photonic crystal fiber with a microchannel[J]. *Applied Physics B*, 2015, **120**(3):461-467.
- [6] TIAN Z B, SCOTT S H Y. In-line abrupt taper optical fiber Mach-Zehnder interferometric strain sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(3): 161-163.
- [7] GONG H P, CHAN C C, CHEN L H, *et al.* Strain sensor realized by using low-birefringence photonic-crystal-fiber-based sagnac loop[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(16):1238-1240.
- [8] FU H Y, TAM H Y, SHAO L Y, *et al.* Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(15): 2835-2839.
- [9] LIU Z Y, WU C, VINCENT T, *et al.* Ultrahigh birefringence index-guiding photonic crystal fiber and its application for pressure and temperature discrimination[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(9): 1385-1387.
- [10] THOMAS G, GEERT L, ELI V, *et al.* Transversal load sensing with fiber Bragg gratings in microstructured optical fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(1):6-8.
- [11] ZHAO Chun-liu. Optical fiber sensors based on long-period gratings in photonic crystal fibers [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(1):9-12.
赵春柳. 基于光子晶体光纤长周期光栅的传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(1):9-12.
- [12] HOU Shang-lin, HAN Jia-wei, ZHANG Rui-rui, *et al.* Study on sensing characteristics of tunable long-period gratings imprinted by mechanical pressure in photonic crystal fiber[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(1):5-7.
侯尚林, 韩佳巍, 张睿睿, 等. 可调谐长周期光子晶体光纤光栅压力传感的实验研[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(1):5-7.
- [13] WANG Y P, HUANG X Q, WANG Y. Temperature insensitive transverse load sensing with improved accuracy using stress induced birefringence effects of fiber Bragg grating[J]. *Optik*, 2011, **122**(21):1914-1917.
- [14] FU Xing-hu, XIE Hai-yang, WANG Liu-liu, *et al.* Pressure sensor based on cascading single mode fiber with multimode fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **4**(44): 0406005.
付兴虎, 谢海洋, 王柳柳, 等. 单模与多模光纤级联型压力传感器[J]. *光子学报*, 2015, **4**(44): 0406005.
- [15] SUN Ting-ting, PEI Shi-xin, LI Jin-hua. A transverse strain sensor based on tilted fiber Bragg grating. [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, **26**(10): 1854-1859.
孙婷婷, 裴世鑫, 李金花. 基于倾斜光纤 Bragg 光栅的横向压力传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2015, **26**(10): 1854-1859.
- [16] LI L C, LI X, XIE Z H, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index and temperature using thinned fiber based Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(19):3945-3949.
- [17] LU Y F, SHEN C Y, ZHONG C, *et al.* Refractive index and temperature sensor based on double-pass M-Z interferometer with an FBG[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(11): 1124-1127.
- [18] YU S W, PEI L, LIU C, *et al.* Simultaneous strain and temperature measurement using a no-core fiber-based modal interferometer with embedded fiber Bragg grating[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(8):1-4.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61275088, 61077060), the Research Foundation of Education Bureau of Shaanxi Province, China (No. 14JS073), the Graduate Student Innovation Fund of Xi'an Shiyou University (No. 2015cx140837)