

CO₂ 激光刻写长周期光纤光栅与 光纤 MZ 结构的双参数传感特性

刘 超^{1,2,3}, 张 雯^{1,2,3}, 董明利^{1,2,3}, 娄小平^{1,2,3}, 祝连庆^{1,2,3}

(1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016; 2. 现代测控技术教育部
重点实验室, 北京 100192; 3. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192)

摘 要: 为了实现温度与应变的双参数高精度传感测量, 提出了一种 CO₂ 激光刻写长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)与光纤马赫-增德尔(MZ)干涉型结构的光纤传感器, 利用 CO₂ 激光刻写制作 LPFG 并利用错位熔接法制备光纤 MZ 结构, 将二者级联并实时监测温度及应变变化时的透射谱变化, 研究了其传感原理并验证了其温度及应变传感特性。实验结果表明: 该双参数光纤传感器的 LPFG 仅对温度敏感, MZ 干涉结构对温度和应变都敏感; 在温度范围 35~70 °C 时, LPFG 特征波长升温灵敏度 38.57 pm/°C, 降温灵敏度 39.17 pm/°C; MZ 干涉结构特征波长升温灵敏度 38.57 pm/°C, 降温灵敏度为 37.50 pm/°C; 当应变范围 0~450 $\mu\epsilon$ 时, MZ 干涉结构加载灵敏度 4.01 pm/ $\mu\epsilon$, 卸载灵敏度为 4.24 pm/ $\mu\epsilon$ 。为温度和应变的实时测量提供了一种灵敏度高、线性度好的光纤传感器。

关键词: 长周期光纤光栅; 光纤 MZ 结构; 双参数传感

中图分类号: TN253 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0922001

Dual-parameter sensing characteristics of long period fiber grating cascaded with fiber MZ structure fabricated by CO₂ laser

Liu Chao^{1,2,3}, Zhang Wen^{1,2,3}, Dong Mingli^{1,2,3}, Lou Xiaoping^{1,2,3}, Zhu Lianqing^{1,2,3}

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China; 2. Key Laboratory of Modern Measurement Control Technology, Ministry of Education, Beijing 100192, China; 3. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to achieve the temperature and strain of the two-parameter high-precision sensor measurements, a dual-parameter measurement of long period fiber grating(LPFG) fabricated by CO₂ laser cascaded with fiber Mach-Zehnder (MZ) interference structure was proposed. The LPFG was fabricated

收稿日期: 2017-01-10; 修订日期: 2017-05-20

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队”发展计划(IRT-16R07); 北京市教委 2015 年度创新能力提升计划项目(TJSHG201510772016); 国家自然科学基金(51535002); 北京市自然科学基金青年项目(4164084); 北京市教育委员会科技计划一般项目(KM201611232006)

作者简介: 刘超(1985-), 男, 讲师, 博士, 主要从事超精密光电检测技术、生物医学检测技术与仪器等方面的研究。

Email: liuchaodi@vip.sina.com

通讯作者: 祝连庆(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光纤传感与激光器、精密测量与系统方面的研究。

Email: zhulianqing@sina.com

using the CO₂ laser and the fiber MZ structure was fabricated using dislocation welding method. The sensing principle was derived and the transmission spectrum of the cascaded structure was monitored for temperature and strain measurements. The experimental results show that the LPFG is sensitive only to the temperature while the MZ structure is sensitive to both temperature and strain, when the temperature varied from 35 °C to 70 °C, the LPFG sensitivities for warming and cooling are 38.57 pm/°C and 39.17 pm/°C, respectively, while the MZ structure sensitivities are 38.57 pm/°C and 37.50 pm/°C, respectively. When the strain varied from 0 με to 450 με, the MZ structure sensitivities for loading and unloading are 4.01 pm/με and 4.24 pm/με, respectively. A sensor with high sensitivity and good linearity for real-time and dynamic range measurements of dual-parameter was developed.

Key words: long period fiber grating; fiber MZ structure; dual-parameter sensing

0 引言

光纤传感器体积小、重量轻、测量灵敏度高、复用能力强、抗电磁干扰能力强、易于嵌入材料内部^[1-5],能实现对温度、应变、压力、声振动、角速度、加速度等多种参量的测量^[6-9]。与传统的机电或电子传感器相比,光纤传感器更符合现代传感技术的需求,具有重要的学术价值和应用前景^[10-11]。

近年来,光纤化双参数传感器相关研究广受青睐。2012年,童峥嵘等提出一种多模-单模-多模结构与光纤布拉格光栅级联测量温度与应变的光纤传感器,其温度灵敏度分别为 0.091、0.010 2 nm/°C,应变灵敏度为-0.001 3、0.001 2 nm/με^[12]。2014年,Jianning Yuan 等人利用长周期光纤光栅与 Sagnac 干涉环串联,实现了温度及折射率的同时测量,折射率灵敏度为 16.864 nm/RIU,温度灵敏度为 1.533 nm/°C^[13]。2016年,Tong Zhengrong 等将单模光纤纤化后与多模光纤级联,实现了温度和液位检测,温度灵敏度为 0.0202、0.031 02 nm/°C,液位灵敏度为 0.022 02、0.070 2 nm/mm^[14]。2016年,Wu Shengnan 等人将 FBG 连接侧面开口的光纤法珀腔应用于气体压力和温度的测量,气体压力灵敏度分别为 4.063 pm/kPa 和 4.071 pm/kPa,温度交叉敏感度为 214 Pa/°C 和 204 Pa/°C^[15]。2017年,苏耿华等设计了一种基于级联保偏光纤和长周期光纤光栅的 Sagnac 环温度和环境折射率双参量传感器,其温度灵敏度 1.2 nm/°C,环境折射率灵敏度为 15 nm/RIU^[16]。

与上述文献不同,文中以 Corning SM-28 普通

光纤为制备基材,采用 CO₂ 激光刻写长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG),采用错位熔接法制备光纤马赫-增德尔(MZ)干涉型结构,利用两种光纤结构的不同滤波特性,实现温度与应变的传感测量。通过控制 MZ 干涉结构的干涉波谷位置,与 LPFG 级联后实现了级联结构透射谱特定波长的应变不灵敏,增强了双参数灵敏矩阵的实际可解性。分别搭建温度和应变测试系统,对该传感器的双参数测量进行数据分析与误差处理。

1 光纤传感器工作原理

设外界温度为 T ,低耦合强度的 LPFG 光谱干涉峰谐振波长的温度灵敏性可表示为:

$$\frac{d\lambda_L}{dT} = \frac{\lambda_L}{\Delta m} \left(\frac{\partial \Delta n_{eff}}{\partial T} + \Delta n_{eff} \alpha_T \right) \quad (1)$$

式中: λ_L 为干涉条纹波长; Δm 为光纤差分有效群折射率; $\Delta n_{eff} = n_{co} - n_{cl}^{(p)}$ 为光纤纤芯与包层的有效折射率之差; α_T 为光纤的热膨胀系数。

设 LPFG 包层折射率为 n_2 ,当外界环境折射率从 n_3 变为 n'_3 时,LPFG 谐振波长的漂移量可表示为:

$$\Delta\lambda_L \cong \frac{U_\infty^2 \lambda_L^3 \Lambda}{8\pi n_2 r_2^3} \left(\frac{1}{\sqrt{n_2^2 - n_3^2}} - \frac{1}{\sqrt{n_2^2 - n_3'^2}} \right) \quad (2)$$

式中: r_2 为包层半径; U_∞ 为 0 阶第一类贝塞尔函数 J_0 的 m 阶根。

设外界温度 T 和应变 ε 发生变化时,光纤 LPFG 和光纤 MZ 结构的透射谱波长变化与温度变化 ΔT 、浓度变化 $\Delta\varepsilon$ 存在如下相关关系:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = K_{T1} \Delta T + K_{\epsilon1} \Delta\epsilon \\ \Delta\lambda_2 = K_{T2} \Delta T + K_{\epsilon2} \Delta\epsilon \end{cases} \quad (3)$$

式中： K_{T1} 、 $K_{\epsilon2}$ 分别为 LPFG 的温度灵敏系数、应变灵敏系数； K_{T2} 、 $K_{\epsilon2}$ 分别为光纤 MZ 结构的温度灵敏系数、应变灵敏系数。

由公式(3)可得,LPFG 与光纤 MZ 结构的温度、应变、波长漂移存在如下关系：

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{\epsilon1} \\ K_{T2} & K_{\epsilon2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix} \quad (4)$$

对公式(4)求其逆矩阵,可得：

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{\epsilon1} \\ K_{T2} & K_{\epsilon2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由公式(5)可知,若已知该光纤传感器对温度与应变变化的灵敏度,即可通过光谱仪监测透射谱波长变化,代入公式(5)计算求解。在实际求解计算中,两组光纤结构的灵敏度系数差异越大,温度与应变的无串扰监测与传感越可靠。

2 光纤传感器的制备

实验采用 Corning 公司 SMF-28 单模光纤,将光纤去除涂覆层,用酒精清洁,风干,夹至光纤夹具上。将 CO₂ 激光功率设为 1 mW,加工速度 10 m/s,光栅周期 550 μm。采用错位熔接法制备光纤 MZ 结构,纤芯内的传播光有一部分透射到包层,经包层传播后再次进入下一段光纤的纤芯,于是,“纤芯-包层-纤芯”传播的光与“纤芯-纤芯-纤芯”传播的光产生干涉。文中提出的级联结构测量系统如图 1 所示,由 C+L 波段宽带光源、环行器、LPFG、MZ 结构、光谱仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)组成。采用的光谱分析仪(Yokogawa AQ6375)工作波长范围 1 200~2 400 nm,最小分辨力为 0.02 nm。其

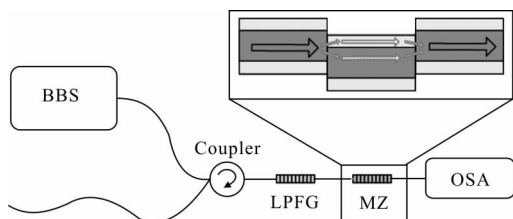
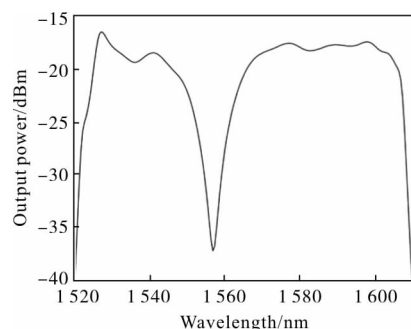


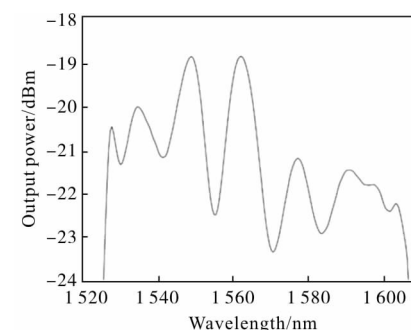
图 1 双参数光纤传感器实验系统原理图

Fig.1 Schematic of the dual-parameter fiber sensor experiment system

中,LPFG、MZ 结构、级联后的双参数光纤传感器的透射谱如图 2 所示。

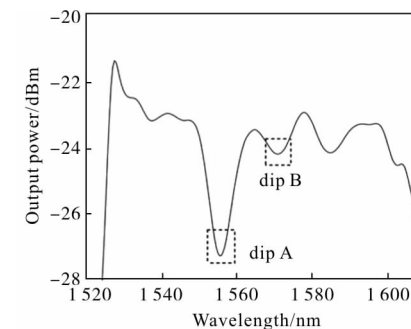


(a) LPFG



(b) MZ 干涉结构

(b) MZ interference structure



(c) 级联结构

(c) Cascaded structure

图 2 双参数光纤传感器透射谱图

Fig.2 Transmission spectrums of the proposed dual-parameter fiber sensor

由于 LPFG 与 MZ 干涉结构的不同透射滤波特性,该级联光纤传感器光谱范围内出现如图 2(c)所示的敏感特征波长,记为 dip A 和 dip B,且位置分别在 1 555.1 nm 和 1 557.4 nm。后续实验中选取这两处特征波谷作为检测点,对两处波长漂移进行解调,验证该级联光栅结构的双参数传感特性。

3 双参数传感特性

3.1 温度传感特性

将 LPFG 级联 MZ 干涉结构的双参数光纤传感器固定在温度控制台上, 使用精密温控单元进行加热和降温, 待测温度范围为 35~70 °C, 步长为 5 °C, 待温度稳定后记录光谱仪中光谱数据, 检测传感器的波长偏移量。

升温过程双参数光纤传感器透射光谱如图 3 所示, 其中, 图 3(a)为 1 540~1 580 nm 光谱范围内透射光谱随温度变化图, 图 3(b)、(c)分别为 LPFG、MZ 干涉结构的温度变化细节图。结合实验数据可知, 在 35 °C 温度变化范围内, LPFG 特征波长由 1 555.55 nm

变至 1 556.9 nm, MZ 干涉结构特征波长由 1 571.3 nm 变至 1 572.65 nm。由图 3 可知, 该双光栅级联结构的两个特征波谷随温度升高均有漂移, 且变化趋势相同, 均发生红移。

相似地, 降温过程双参数光纤传感器透射光谱如图 4 所示, 级联结构透射谱、LPFG 细节图、MZ 干涉结构细节图分别如图 4(a)~(c)所示。结合实验数据可知, 在 35 °C 温度变化范围内, LPFG 波长由 1 556.9 nm 变至 1 555.55 nm, MZ 干涉结构波长由 1 572.65 nm 变至 1 571.3 nm。由图 4 可知, 该双光栅级联结构的两个特征波谷随温度降低均有漂移, 且变化趋势相同, 均发生蓝移。

以温度变化为横轴, 以波谷位置为纵轴, 绘制如

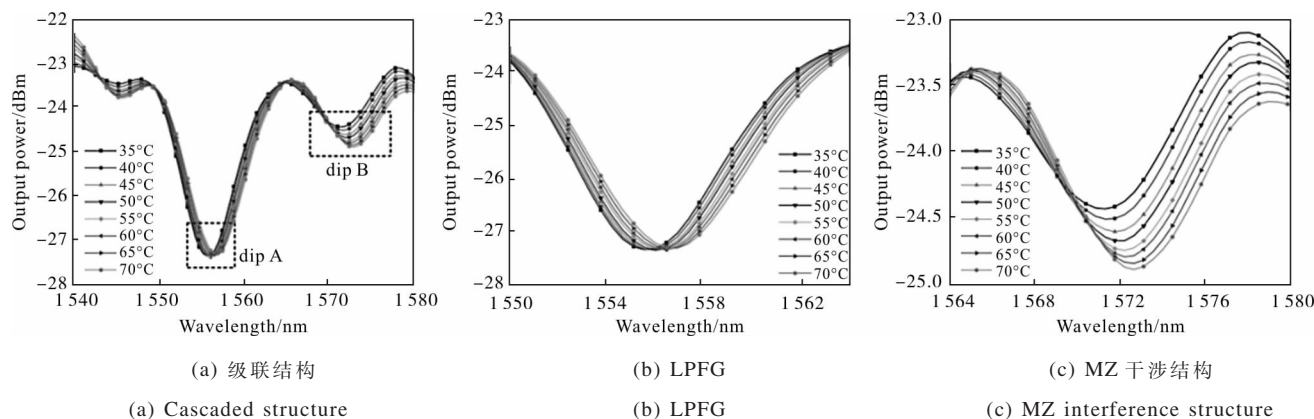


图 3 升温过程(35~70 °C)双参数光纤传感器透射光谱图

Fig.3 Transmission spectrums of the proposed dual-parameter fiber sensor when temperature rises from 35 °C to 70 °C

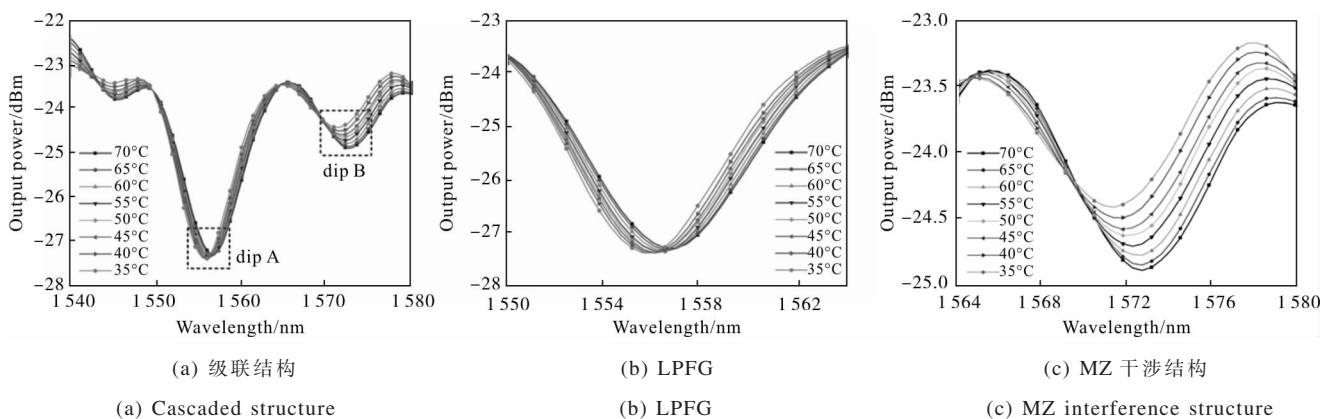


图 4 降温过程(70~35 °C)双参数光纤传感器透射光谱图

Fig.4 Transmission spectrums of the proposed dual-parameter fiber sensor when temperature falls from 70 °C to 35 °C

图 5、6 所示的升温、降温过程温度响应特性曲线。由实验结果可知, 当温度由 35 °C 升至 70 °C 时, LPFG 特征波长线性增加, 灵敏度 38.57 pm/°C, 线

性度 0.999 6; MZ 干涉结构特征波长线性增加, 灵敏度 38.57 pm/°C, 线性度 0.996 4。当温度由 70 °C 降至 35 °C 时, LPFG 特征波长线性减小, 灵敏

度 39.17 pm/°C, 线性度 0.998 9;MZ 干涉结构特征波长线性减小,灵敏度为 37.50 pm/°C,线性度 0.991 7。

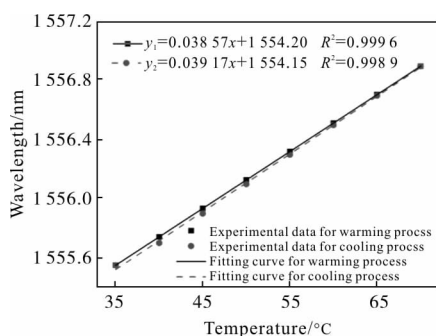


图 5 双参数光纤传感器 LPFG 结构温度特性曲线

Fig.5 Temperature sensing characterization curve of the LPFG structure of the dual-parameter fiber sensor

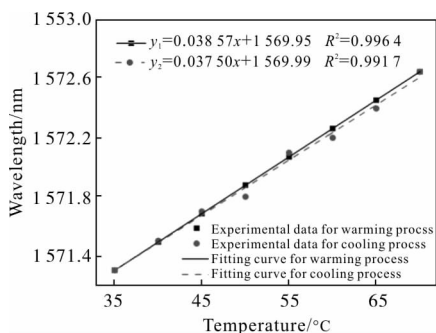


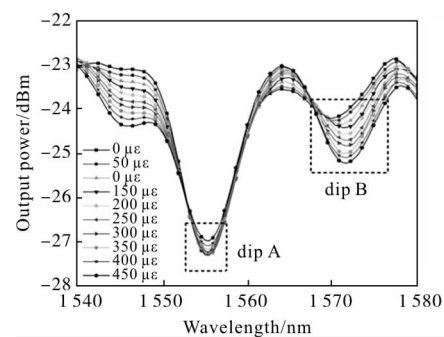
图 6 双参数光纤传感器 MZ 结构温度特性曲线

Fig.6 Temperature characterization curve of the MZ structure of the dual-parameter fiber sensor

3.2 应变传感特性

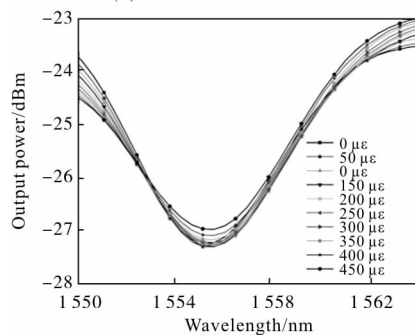
以厚度 2 mm、中心线长 280 mm 的航铝 7075 等强度梁为测试基体,将文中双参数光纤传感器的 LPFG 与 MZ 干涉结构对称粘贴于等强度梁中心线两侧。粘贴前对 LPFG 与 MZ 干涉结构进行一定预紧,用低温胶将其固定,并于室温下固化 24 h,为保证实验环境的洁净度与温湿度,文中实验均在恒温 25 °C 的超净间环境内完成。实验中,为避免固化过程中光纤回缩导致应变测量值不准,采用相对应应变值,即先旋转微分头至光谱图中 LPFG 和 MZ 结构透射谱线均移动开始记为初始值,拧动微分头对光纤传感器施加应变,用光谱仪采集数据。加载或卸载过程中对应的应变范围为 0~450 $\mu\epsilon$,步长 50 $\mu\epsilon$,加载及卸载过程波长变化如图 7、8 所示。

由图 7、8 及其细节图可以看出,当应变变化时,



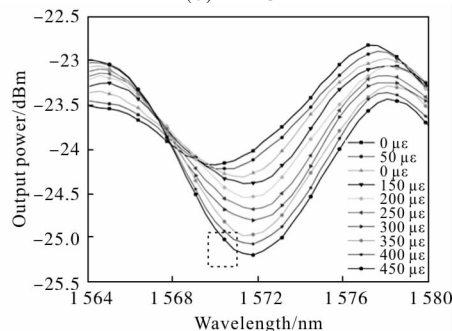
(a) 级联结构

(a) Cascaded structure



(b) LPFG

(b) LPFG

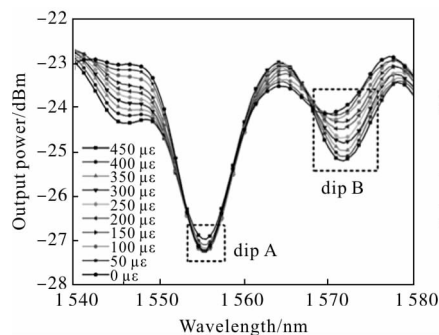


(c) MZ 干涉结构

(c) MZ interference structure

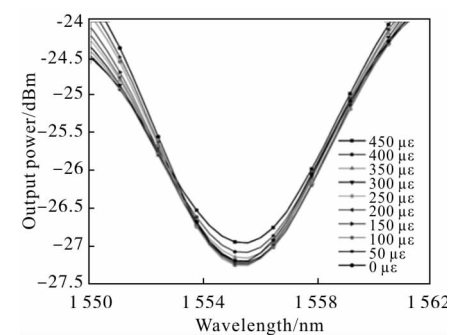
图 7 应力加载过程(0~450 $\mu\epsilon$)双参数光纤传感器透射光谱图

Fig.7 Transmission spectrums of the dual-parameter fiber sensor when strain rises from 0 $\mu\epsilon$ to 450 $\mu\epsilon$



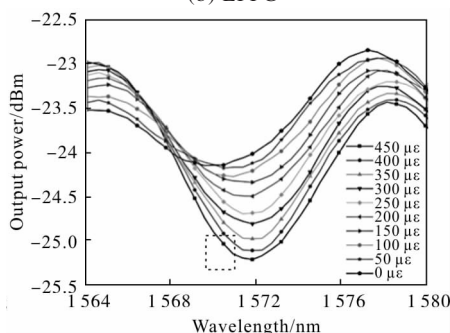
(a) 级联结构

(a) Cascaded structure



(b) LPFG

(b) LPFG



(c) MZ 干涉结构

(c) MZ interference structure

图 8 应力下降过程(450~0 με)双参数光纤传感器透射光谱图

Fig.8 Transmission spectrums of the dual-parameter fiber

sensor when strain falls from 450 με to 0 με

该光纤传感器的 LPFG 结构特征波长不随之漂移,只表现为功率的微小波动;MZ 干涉结构的特征波长随之发生变化,且应变增加时出现红移,应变减小时出现蓝移。当应变由 0 με 增至 450 με 时,LPFG 结构特征波长基本稳定在 1 555.55 nm,MZ 结构特征波长由 1 569.95 nm 增至 1 571.75 nm。当应变由 450 με 减至 0 με 时,LPFG 结构特征波长稳定在 1 555.55 nm,MZ 结构特征波长由 1 571.75 nm 降至 1 569.5 nm。以应变变化为横轴,以特征波长为纵轴,绘制如图 9、10 所示的载荷变化过程应变响应特性曲线。

由实验结果可知,LPFG 特征波长对应变不敏感,当应变由 0 με 增至 450 με 时,MZ 干涉结构特征波长线性增加,灵敏度 4.01 pm/με,线性度 0.961 4。当应变由 450 με 降至 0 με 时,MZ 干涉结构特征波长线性减小,灵敏度为 4.24 pm/με,线性度 0.914 9。

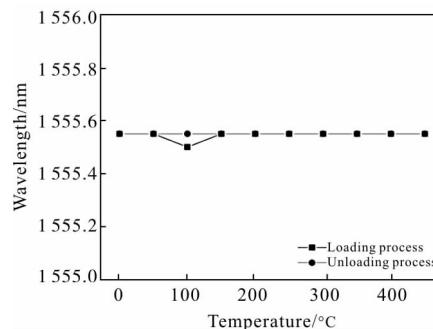


图 9 双参数光纤传感器 LPFG 结构应变特性曲线

Fig.9 Structure strain characterization curve of the LPFG

structure of the dual-parameter fiber sensor

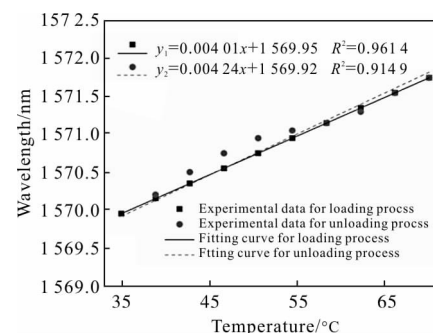


图 10 双参数光纤传感器 MZ 结构应变特性曲线

Fig.10 Structure strain train characterization curve of the MZ

structure of the dual-parameter fiber sensor

综上所述,该双参数光纤传感器中,LPFG 仅对温度敏感,MZ 干涉结构对温度和应变都敏感。其中,温度范围 35~70 °C 时,LPFG 特征波长升温灵敏度 38.57 pm/°C,降温灵敏度 39.17 pm/°C;MZ 干涉结构特征波长升温灵敏度 38.57 pm/°C,降温灵敏度为 37.50 pm/°C。当应变范围 0~450 με 时,MZ 干涉结构加载灵敏度 4.01 pm/με,卸载灵敏度为 4.2 pm/με。由于存在回程误差,对上述参数取平均值作为相应的灵敏度系数并代入公式(5),可以得到该光纤传感器的温度应变传感矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 38.87 & 0 \\ 38.04 & 4.13 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

在实际测量中,通过解调该光纤传感器的波长变化值,代入双参数传感矩阵公式(6),即可实时解算环境温度与应变变化,实现对温度和应变的双参量实时测量。

4 结论

文中以 Corning SM-28 普通光纤为制备基材,

介绍了 CO₂ 激光刻写 LPFG、与错位熔接 MZ 干涉结构级联,利用两种光纤结构的不同滤波特性,实现温度与应变的传感测量。通过控制 MZ 干涉结构的干涉波谷位置,与 LPFG 级联后实现了级联结构透射谱特定波长的应变不灵敏,增强了双参数灵敏矩阵的实际可解性。分别搭建温度和应变测试系统,对该传感器的双参数测量进行研究,建立了该光纤双参数传感器温度/应变与光谱特征位置波长变化之间的无串扰双参数传感数学模型,通过双参数灵敏度系数矩阵便可以实时解算环境温度和应变变化。实验结果表明,温度范围 35~70 °C 时,LPFG 的升温灵敏度与降温灵敏度分别为 38.57 pm/°C 和 39.17 pm/°C;MZ 干涉结构的升温灵敏度与降温灵敏度分别为 38.57 pm/°C 和 37.50 pm/°C;应变范围 0~450 $\mu\epsilon$ 时,LPFG 的应变灵敏度为 0,MZ 干涉结构的加载灵敏度和卸载灵敏度分别为 4.01 pm/ $\mu\epsilon$ 和 4.24 pm/ $\mu\epsilon$ 。文中提出的双参数光纤传感器结构形式简单,稳定性好,灵敏度高,是实现单根光纤双参数测量的有效手段。

参考文献:

- [1] Liu Tiegeng, Wang Shuang, Jiang Junfeng, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8):1681-1692. (in Chinese)
- [2] Zhang Faxiang, Lv Jingsheng, Jiang Shaodong, et al. High sensitive fiber Bragg grating micro-vibration sensor with shock resistance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822002. (in Chinese)
- [3] Shen Yan, Xie Yi, Lou Shuqin, et al. Evaluation of optical properties of PCFs based on compressed sensing with Contourlet transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0321001. (in Chinese)
- [4] Xu Guoquan, Xiong Daiyu. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306-317. (in Chinese)
- [5] Wang Huaping, Xiang Ping. Optimization design of optical fiber sensors based on strain transfer theory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1233. (in Chinese)
- [6] Zhang Faye, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, et al. High sensitivity and low-frequency FBG acceleration sensors based on flexure hinge structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0317004. (in Chinese)
- [7] Wu Jing, Wu Hanping, Huang Junbin, et al. Large range FBG sensor for ship structure health monitoring [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 311-317. (in Chinese)
- [8] Qin Haikun, Zhang Min, Liu Yuliang, et al. Review: recent research development in fiber grating biosensor [J]. *Laser Journal*, 2008, 29(5): 1-3. (in Chinese)
- [9] Yang Ruizhu. Characterization and sensing application of long period fiber gratings [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [10] Luo Tao, Gu Zheng. Progress of biological and chemical sensors based on long period grating in photonic crystal fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(11):34-40. (in Chinese)
- [11] Yao Jianquan, Di Zhigang, Jia Chunrong, et al. Photonic crystal fiber SERS sensors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 96-106. (in Chinese)
- [12] Tong Zhengrong, Wang Jieyu, Yang Xiufeng, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain based on core diameter mismatch and fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 61-65. (in Chinese)
- [13] Yuan Jianying, Zhao Chunliu, Zhou Yumeng, et al. Reflective long-period fiber grating-based sensor with Sagnac fiber loop mirror for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(29): 85-90.
- [14] Tong Zhengrong, Luan Panpan, Cao Ye, et al. Dual-parameter optical fiber sensor based on concatenated down-taper and multimode fiber[J]. *Optics Communications*, 2016, 358: 77-81.
- [15] Wu S, Yan G, Wang C, et al. FBG incorporated side-open Fabry-perot cavity for simultaneous gas pressure and temperature measurements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(16): 1-1.
- [16] Su Genghua, Xu Degang, Shi Jia, et al. A dual-parameter sensor for temperature and refractive index based on a Sagnac loop composed of an LPFG and polarization maintaining fiber [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2017, 28(1): 25-31. (in Chinese)