

LPFG 和 FBG 级联结构双参数光纤传感器研究*

张 雯^{1,2,3}, 刘小龙^{1,2,3}, 何 巍^{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:提出了一种长周期光纤光栅(LPFG)级联布拉格光纤光栅(FBG)的温度/应变双参数光纤传感器。利用飞秒激光直写制作 LPFG 并级连 FBG,且 FBG 波谷位置为 1 551.9 nm,LPFG 波谷位置为 1 559.1 nm,最高对比度为 -12.7 dB。在 30 ~ 70℃ 温度变化范围内对传感器温度特性进行测试,并在 25℃ 超净环境下对 0 ~ 500 $\mu\epsilon$ 应变变化范围内对传感器应变特性进行测试。实验结果表明,升温过程 FBG 中心波长发生红移,灵敏度 15.00 pm/℃,线性度 0.981 3;LPFG 中心波长发生蓝移,灵敏度 -11.75 pm/℃,线性度 0.945 3。降温过程 FBG 中心波长发生蓝移,灵敏度 18.25 pm/℃,线性度 0.953 8;LPFG 中心波长发生红移,灵敏度 -15.42 pm/℃,线性度 0.980 2。加载过程 FBG 中心波长发生红移,灵敏度 0.93 pm/ $\mu\epsilon$,线性度 0.991 5;LPFG 中心波长发生蓝移,灵敏度 -1.51 pm/ $\mu\epsilon$,线性度 0.986 3。卸载过程 FBG 中心波长发生蓝移,灵敏度 0.92 pm/ $\mu\epsilon$,线性度 0.990 9;LPFG 中心波长发生红移,灵敏度 -1.51 pm/ $\mu\epsilon$,线性度 0.972 8。结果表明,该光纤传感器灵敏度高,线性度好,可以同时动态实现应变和温度的测量。

关键词:长周期光纤光栅;飞秒加工;布拉格光纤光栅;双参数测量

中图分类号: TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Study on dual-parameter fiber sensor based on LPFG cascaded with FBG structure

Zhang Wen^{1,2,3}, Liu Xiaolong^{1,2,3}, He Wei^{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: A dual-parameter fiber sensor based on Long Period Fiber Grating (LPFG) cascaded with Fiber Bragg Grating (FBG) structure for temperature and strain is presented. The proposed fiber sensor is cascaded with LPFG micromachined by the femtosecond laser and FBG, and there are two dips for the transmission spectrum, namely FBG transmission dip at 1 551.9 nm and LPFG transmission dip at 1 559.1 nm with the fringe contrast -12.7 dB. The temperature and strain characteristics of the proposed sensor were measured at 30 ~ 70℃ and 0 ~ 500 $\mu\epsilon$, respectively. Experimental results show that during the warming process, the FBG shows red shift with increasing wavelength, the sensitivity is 15.00 pm/℃, and the linearity is 0.981 3; The LPFG shows blue shift with decreasing wavelength, the sensitivity is -11.75 pm/℃, and the linearity is 0.945 3. During the cooling process, the FBG shows blue shift with decreasing wavelength, the sensitivity is 18.25 pm/℃, and the linearity is 0.953 8; The LPFG shows red shift with decreasing wavelength, the sensitivity is -15.42 pm/℃, and the linearity is 0.980 2. During the loading process, the FBG shows red shift with increasing wavelength, the sensitivity is 0.93 pm/ $\mu\epsilon$, and the linearity is 0.991 5; The LPFG shows blue shift with decreasing wavelength, the sensitivity is -1.51 pm/ $\mu\epsilon$, and the linearity is 0.986 3. During the unloading process, the FBG shows blue shift with decreasing wavelength, the sensitivity is 0.92 pm/ $\mu\epsilon$, and the linearity is 0.990 9; The LPFG shows red shift with decreasing wavelength, the sensitivity is -1.51 pm/ $\mu\epsilon$, and the linearity is 0.972 8. The proposed sensor exhibits high sensitivity and good linearity for dual-parameter measurements.

Keywords: long period fiber grating (LPFG); femtosecond laser micromachining (FBG); fiber bragg grating; dual-parameter measurements

收稿日期: 2017-04 Received Date: 2017-04

* 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(TJSHC201510772016)、光电信息与仪器北京市工程研究中心开放课题(GD2016008)项目资助

0 引 言

光纤传感技术是 20 世纪 70 年代发展起来的新型传感技术,通过调制光纤中传输光的强度、相位、波长、偏振态并对这些变化进行监测,实现对温度、应变、压力、声振动、角速度等多种参量的测量^[1-2]。由于光纤传感器具有体积小、重量轻、测量灵敏度高、复用能力强、抗电磁干扰、易于嵌入材料内部等诸多优点^[3],近年来受到广泛关注,成为传感技术研究领域的热点之一^[4-5]。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,特别是在航空航天领域的极端应用环境下,光纤传感器的独特优势更加凸显^[6-7]。作为未来国防航空航天关键技术,航空航天光纤传感技术的研究具有重要的学术价值和应用前景,对航空航天工业的发展具有重要意义。

由于实际应用过程中交叉敏感问题普遍存在,近年来双参数传感器的研究受到广泛的关注^[8-9]。2012 年葡萄牙 Gouveia C 等人^[10]利用高双折射光纤制作了能够同时传感折射率和温度的光栅腔传感器,通过分别测量干涉条纹对比度和波长漂移变化来解调折射率和温度的变化,以 0.01 折射率变化为单位 (refractive index unit, RIU) 实现的快慢轴折射率灵敏度分别达到 -1.06%/0.01RIU 和 -0.96%/0.01RIU,温度灵敏度达到 10.52 pm/°C 和 10.13 pm/°C;2012 年,西北工业大学邵敏等人^[11-12]利用长周期光纤光栅 (long period fiber grating, LPFG) 和保偏光纤 Sagnac 环透射光谱的调制特性,设计了温度和折射率同时区分测量系统,其中,该系统温度灵敏度 0.128 6 nm/°C,折射率灵敏度 49.38 dB/RIU;2014 年 Yuan J. Y. 等人^[13]利用 LPFG 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;2015 年,康泽新等人^[14]提出了一种基于耦合型双芯光纤级联布拉格光纤光栅 (fiber bragg grating, FBG) 的温度与应力双参数解耦测量的全光纤型传感系统,可以分别实现 4.304 8 με 及 0.456 2°C 的应力与温度传感测量分辨率;2016 年, Wu SH. N. 等人^[15]通过 FBG 连接侧面开口的光纤法布里-珀罗谐振腔,并应用于气体压力及温度测量,气体压力灵敏度分别为 4.063 和 4.071 pm/kPa,温度交叉敏感度分别为 214 和 204 Pa/°C;2017 年,天津大学苏耿华等人^[16]设计了一种基于级联保偏光纤和 LPFG 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。

大型航空航天飞行器运行过程中,应变^[17-18]与温度^[19-20]是两类重要的监测对象,也是其他物理量传感的

技术基础^[21-22]。本文以 Corning 公司 SMF-28 单模光纤为研究对象,利用飞秒激光逐线写入方式加工 LPFG 并与 FBG 级联,制成温度/应变双参数光纤传感器;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 LPFG 和 FBG 级联结构与双参数传感

在结构健康监测领域,测量对象的应变与温度特性能直接反映设备的运行情况,且两者相互影响,密切相关,具有重要的研究意义。本文提出的级联结构紧凑简单、稳定性高,通过将 LPFG 与 FBG 级联,利用两支光栅的不同滤波特性进行测量和解调,一体实现双参数传感。

LPFG 的模式耦合是纤芯基模与同向包层模的耦合,其导模与某一包层模耦合的耦合波长为:

$$\lambda_{\text{LPFG}} = (n_{\text{eff}} - n_{\text{cl}}^{(p)}) \Lambda_{\text{LPFG}} \quad (1)$$

式中: λ_{LPFG} 是 LPFG 的干涉条纹波长, n_{eff} 和 $n_{\text{cl}}^{(p)}$ 分别为导模和第 p 阶包层模的有效折射率, Λ_{LPFG} 为 LPFG 光栅周期。

当外界温度为 T 时,低耦合强度的 C + L 波段的 LPFG 光谱干涉峰谐振波长的温度灵敏度可表示为:

$$\frac{d\lambda_{\text{LPFG}}}{dT} = \frac{1}{\Delta m} \left(\frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial T} + \Delta n_{\text{eff}} \alpha_T \right) \lambda_{\text{LPFG}} \quad (2)$$

式中: Δm 是光纤差分有效群折射率, $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{co}} - n_{\text{cl}}^{(p)}$ 是光纤纤芯与包层的有效折射率之差, n_{co} 是光纤纤芯的有效折射率, α_T 是光纤的热膨胀系数。

FBG 对于温度单独变化所引起的反射波长改变的温度灵敏度为:

$$\frac{\Delta \lambda_{\text{FBG}}}{\lambda_{\text{FBG}}} = (\alpha_T + \zeta_T) T \quad (3)$$

式中: λ_{FBG} 是 FBG 的干涉条纹波长, ζ_T 是光纤的热光系数。

由式(3)可知,当温度单独变化时,LPFG 的温度变化灵敏度仍包含有效折射率之差与外界温度变化的微分量,故相比于 LPFG,FBG 具有更高的温度灵敏度。

当应变 ε 单独变化时,引起的 LPFG 与 FBG 耦合波长偏移量分别为:

$$\frac{d\lambda_{\text{LPFG}}}{d\varepsilon} = \left(\frac{dn_{\text{co}}}{d\varepsilon} - \frac{dn_{\text{cl}}^{(p)}}{d\varepsilon} \right) \Lambda_{\text{LPFG}} + (n_{\text{co}} - n_{\text{cl}}^{(p)}) \frac{d\Lambda_{\text{LPFG}}}{d\varepsilon} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta \lambda_{\text{FBG}}}{\lambda_{\text{FBG}}} = \left\{ 1 - \frac{n_{\text{FBG}}^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{12} + \rho_{11})] \right\} \varepsilon \quad (5)$$

式中: n_{FBG} 为 FBG 的有效折射率, ρ_{11} 和 ρ_{12} 为光纤应力张量的分量, ν 为泊松系数。

对于本文提出的级联结构而言,应变、温度交叉灵敏度的影响主要体现在 $\lambda_{\text{LPFG}}(T, \varepsilon)$ 与 $\lambda_{\text{FBG}}(T, \varepsilon)$ 的

Taylor 展开式的二阶交叉项^[23]。在大应变范围和高温升情况下,必须考虑该项非线性因素。在本文提出的应变和温度范围内,该项交叉影响较小。

将 LPFG 与 FBG 级联,同时改变温度和施加应力,两支光栅的中心波长都会因温度或应变而发生漂移,由于两支光栅的光栅周期、包层热光系数、有效弹光系数等都不同,因此两支光栅的温度灵敏度与应变灵敏度也不同。只要确定灵敏系数矩阵,保证两支光栅的中心波长差别足够大,即可通过 LPFG 和 FBG 的波长变化值求解方程得到相应的温度与应变,实现双参数测量。

设外界温度 T 和应变 ε 发生变化时,光纤 LPFG 和 FBG 的透射谱波长变化 $\Delta\lambda_{\text{LPFG}}$ 、 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 与温度变化 ΔT 、应变变化 $\Delta\varepsilon$ 的相关关系可表述如下:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{\text{LPFG}} = K_{11}\Delta T + K_{12}\Delta\varepsilon \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} = K_{21}\Delta T + K_{22}\Delta\varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

式中: K_{11} 、 K_{12} 分别为 LPFG 的温度灵敏系数、应变灵敏系数, K_{21} 、 K_{22} 分别为 FBG 的温度灵敏系数、应变灵敏系数。

由式(6)可得,LPFG 与 FBG 的温度、应变、波长漂移存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{LPFG}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} \quad (7)$$

对求其逆矩阵,可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{LPFG}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(7)~(8)可知,若测得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,代入对外界环境温度与应变进行监测,实现温度与应变的双参数测量。

2 光纤传感器的制备与系统实现

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。将飞秒激光功率设为 50 μW ,加工速度 10 m/s,光栅周期 200 μm ,占空比为 0.5,实验中,刻写 50 个周期。本文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(BBS)、环行器、LPFG、FBG 级联结构和光谱仪(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,最小分辨精度为 0.02 nm。由于 FBG 具有反射滤波特性,LPFG 具有透射滤波特性,故在光谱仪 1 端观测的反射谱不受 LPFG 影响,而在光谱仪 2 端观测到的是两支光栅共同滤波后的透射谱。

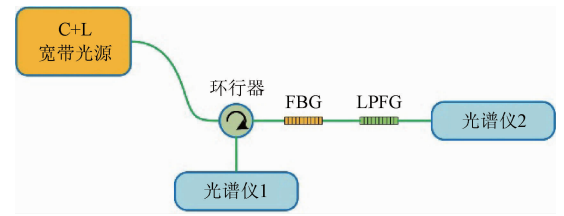


图1 双参数光纤传感器实验系统原理

Fig.1 Schematic diagram of the proposed dual-parameter fiber sensor

由光谱仪 2 端可观测到透射光谱如图 2 所示。由于两支光栅的滤波作用,使得该级联光纤传感器透射光谱范围内出现两个明显波谷,其中,FBG 波谷位置为 1 551.9 nm,最高对比度为 -6.1 dB;LPFG 波谷位置为 1 559.1 nm,最高对比度为 -12.7 dB。实验选取 FBG 和 LPFG 的波谷作为检测点,对该两处波长漂移进行解调,验证该传感器的双参数传感特性。

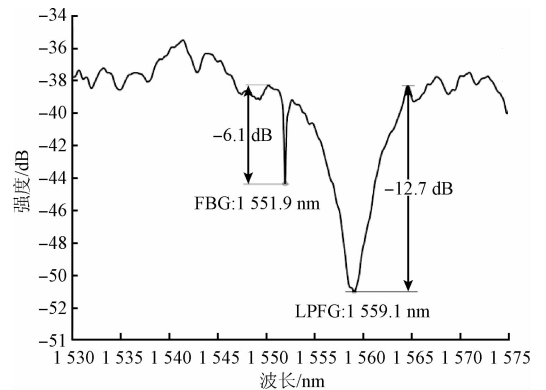


图2 双参数光纤传感器透射谱

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

3 双参数特性

3.1 温度特性

将 LPFG 级联 FBG 光纤传感器固定在薄的导热片上,连入温度测试系统,并使用精密温控台对导热片进行加热和降温。为减小环境误差,本实验在恒温恒湿的超净间环境中进行。

温度变化范围为 30℃~70℃,步长 5℃,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、降温过程级联光纤传感器的透射光谱如图 3、4 所示。为清晰计,取光谱范围 1 550~1 566 nm。

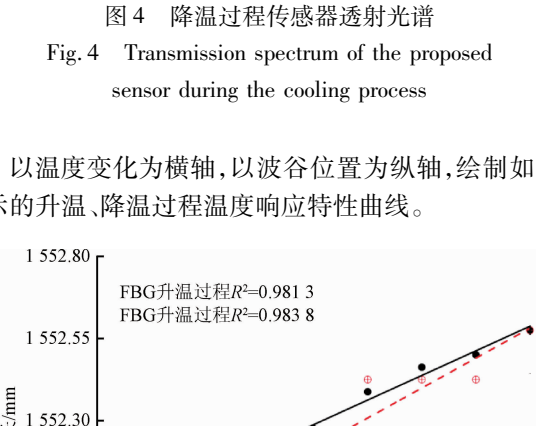
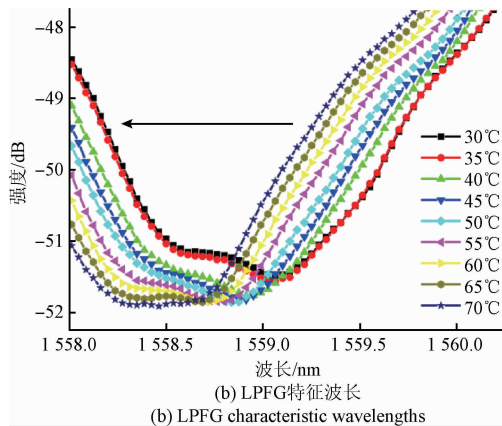
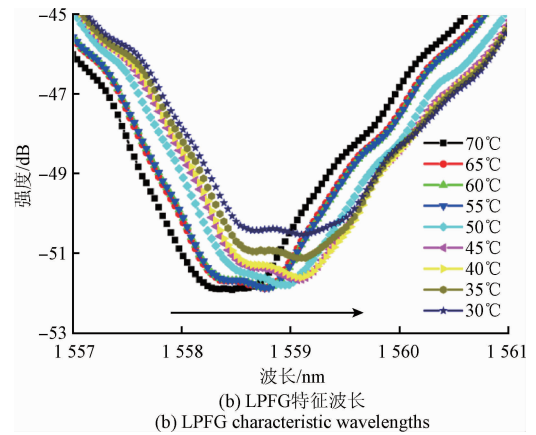
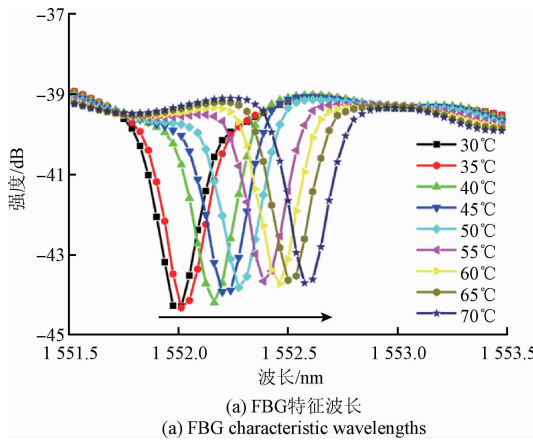


图3 升温过程传感器透射光谱

Fig.3 Transmission spectrum of the proposed sensor during the warming process

由图3、4及其细节可以看出,该光纤传感器的两个特征波谷随温度变化均有漂移,且变化趋势相异。当温度升高时,FBG波谷位置发生右移,LPFG波谷位置发生左移;当温度降低时,FBG波谷位置发生左移,LPFG波谷位置发生右移。

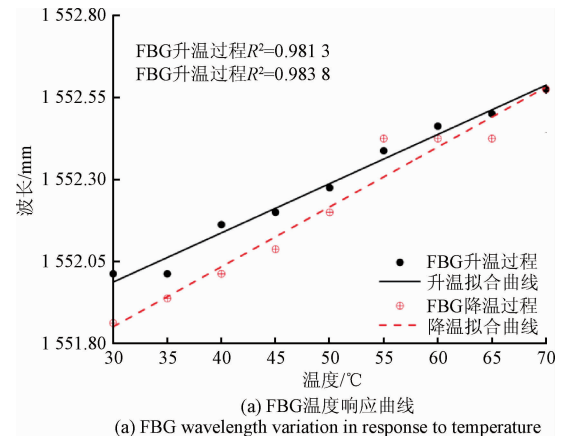
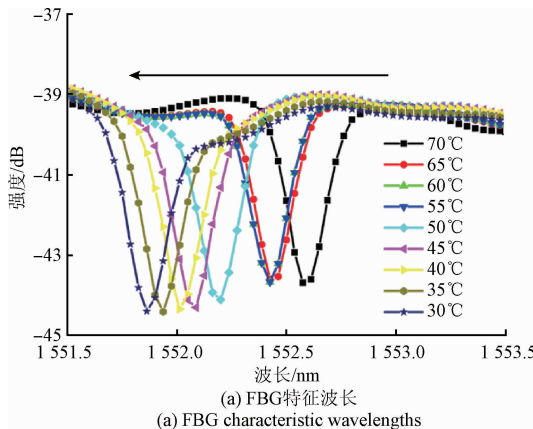


图5 传感器温度响应特性曲线

Fig.5 Temperature characteristic curves of the proposed sensor

由实验结果可知,当温度由 30℃ 升至 70℃ 时,FBG 中心波长线性增加,由 1 552.012 5 nm 增至 1 552.575 0 nm,灵敏度 15.00 pm/℃,线性度 0.981 3;LPFG 中心波长线性减小,由 1 559.062 5 nm 降至 1 558.662 5 nm,灵敏度 -11.75 pm/℃,线性度 0.945 3。当温度由 70℃ 降至 30℃ 时,FBG 中心波长线性减小,由 1 552.575 0 nm 降至 1 551.862 5 nm,灵敏度 18.25 pm/℃,线性度 0.953 8;LPFG 中心波长线性增加,由 1 558.662 5 nm 增至 1 559.300 0 nm,灵敏度为 -15.42 pm/℃,线性度 0.980 2。具体参数如表 1 所示。

表 1 传感器温度特性参数

Table 1 Temperature characterization of the proposed sensor			
温度变化	特征波谷	灵敏度/(pm·℃ ⁻¹)	线性度
升温	FBG	15.00	0.981 3
	LPFG	-11.75	0.945 3
降温	FBG	18.25	0.953 8
	LPFG	-15.42	0.980 2

3.2 应变特性

以厚度 2 mm、中心线 280 mm 的航铝 7075-0 等强度梁为测试基体,将本文双参数光纤传感器的 LPFG 与 FBG 对称粘贴于等强度梁中心线两侧。粘贴前对 LPFG 与 FBG 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,本文实验均在恒温 25℃ 的超净间环境内完成。

实验中,等强度梁微分头每转一圈,等强度梁在水平方向上的形变为 20 με。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 FBG 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 ~ 500 με,步长为 20 με。图 6、7 所示为分别处于应变环境中的传感系统透射光谱图,为清晰计,分别取 0、100、200、300、400、500 με 时的数据做图。

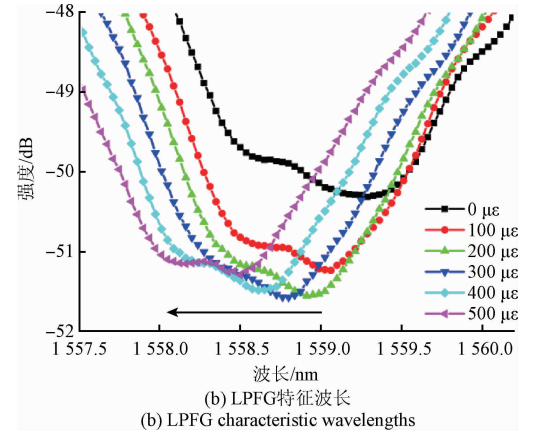
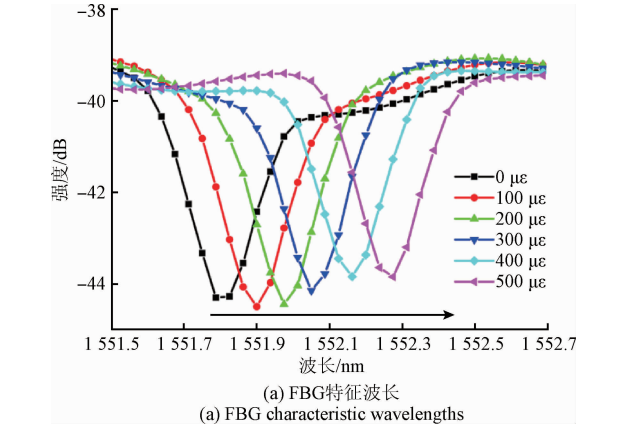


图 6 加载过程传感器透射光谱

Fig. 6 Transmission spectrum of the proposed sensor during the loading process

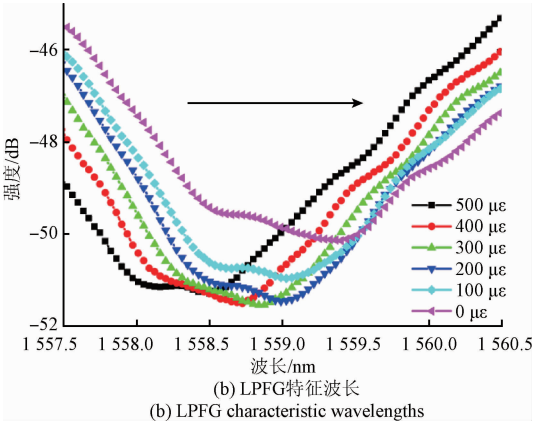
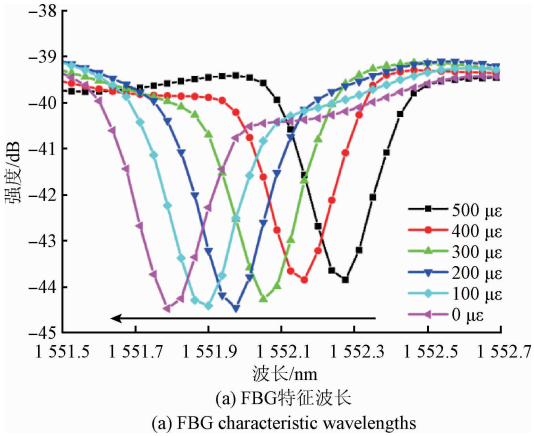


图 7 卸载过程传感器透射光谱

Fig. 7 Transmission spectrum of the proposed sensor during the unloading process

由图 6、7 及其细节可以看出,该光纤传感器的两个特征波谷随应变变化均有漂移,且变化趋势相异。在加载过程应变增加时,FBG 波谷位置发生右移,LPFG 波谷

位置发生左移;在卸载过程应变减小时,FBG 波谷位置发生左移,LPFG 波谷位置发生右移。

以应变变化为横轴,以波谷位置为纵轴,绘制如图 8 所示的载荷变化过程应变响应特性曲线。

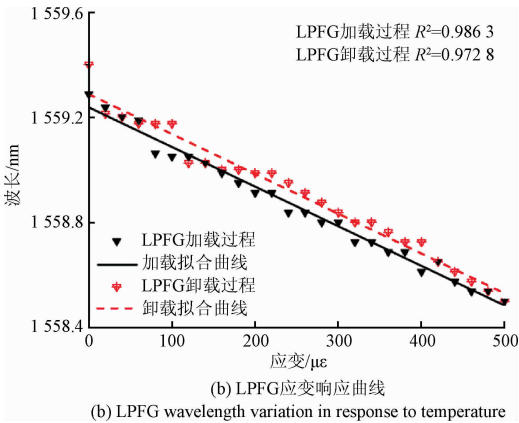
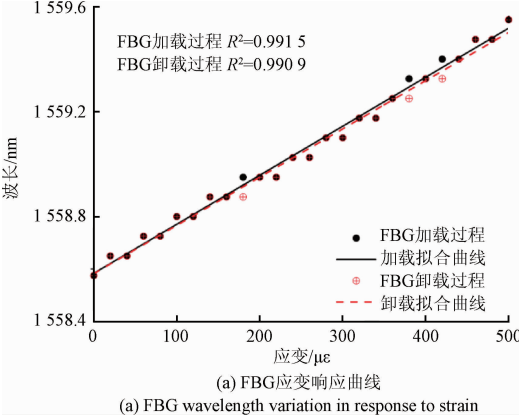


图 8 传感器应变响应特性曲线

Fig. 8 Strain characteristic curves of the proposed sensor

由实验结果可知,当应变由 0 $\mu\epsilon$ 增至 500 $\mu\epsilon$ 时,FBG 中心波长线性增加,由 1 551.787 5 nm 增至 1 552.275 0 nm,灵敏度 0.93 $\text{pm}/\mu\epsilon$,线性度 0.991 5;LPFG 中心波长线性减小,由 1 559.287 5 nm 降至 1 558.500 0 nm,灵敏度 -1.51 $\text{pm}/\mu\epsilon$,线性度 0.986 3。当应变由 500 $\mu\epsilon$ 降至 0 $\mu\epsilon$ 时,FBG 中心波长线性减小,由 1 552.275 0 nm 降至 1 551.787 5 nm,灵敏度 0.92 $\text{pm}/\mu\epsilon$,线性度 0.990 9;LPFG 中心波长线性增加,由 1 558.500 0 nm 增至 1 559.400 0 nm,灵敏度 -1.51 $\text{pm}/\mu\epsilon$,线性度 0.972 8。具体参数如表 2 所示。

表 2 传感器应变特性参数

Table 2 Strain characterization of the proposed sensor

应变变化	特征波谷	灵敏度/ $(\text{pm} \cdot \mu\epsilon^{-1})$	线性度
加载	FBG	0.93	0.991 5
	LPFG	-1.51	0.986 3
卸载	FBG	0.92	0.990 9
	LPFG	-1.51	0.972 8

综上所述,该系统发生温度或应变时,FBG 与 LPFG 的变化趋势相异。其中,FBG 的升温与降温灵敏度分别为 15.00 和 18.25 $\text{pm}/^\circ\text{C}$,LPFG 的升温与降温灵敏度分别为 -11.75 和 -15.42 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。FBG 的加载与卸载灵敏度分别为 0.93 和 0.92 $\text{pm}/\mu\epsilon$,LPFG 的加载与卸载灵敏度均为 -1.51 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。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,可以得到该光纤传感器的温度应变传感矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.59 & -1.51 \\ 16.63 & 0.92 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{\text{LPFG}} \\ \Delta \lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

在实际测量中,通过解调该光纤传感器的波长变化值,代入温度应变传感矩阵,即可实时解算环境温度与应变,实现温度和应变双参量动态测量。

4 结 论

本文介绍了基于飞秒激光直写加工 LPFG 级连 FBG 结构实现温度和应变双参数实时监测的光纤传感器,并对该传感器温度和应变传感特性进行了研究,建立了该光纤传感器温度/应变与光谱特征位置波长变化之间的数学模型,通过传感系数矩阵便可以实时解算环境温度和应变。本文提出的双参数光纤传感器结构简单、稳定性好、灵敏度高,无需对 FBG 进行特殊写制,是解决单根光纤双参数测量的有效手段,同时,本文对复杂环境下的多参数耦合测量与解耦也具有重要的参考价值。

参考文献

[1] 黄肖迪,王源,孙阳阳,等. 涂覆层对光纤布拉格光栅应变传递的影响机理分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6):1233-1240.
HUANG X D, WANG Y, SUN Y Y, et al. Mechanism analysis on the impact of coating to fiber Bragg grating strain transfer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6):1233-1240.
[2] 肖元强,李得利,李川,等. 一种差动式光纤 Bragg 光栅渗压、温度双参量传感器[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10):2251-2256.
XIAO Y Q, LI D L, LI CH, et al. Differential FBG sensor for simultaneous dual-measurement of pressure and temperature [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10):2251-2256.
[3] 金秀梅,杜彦良,孙宝臣. 光纤传感元结构材料对其温度响应的影响研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20(5):6-10.
JIN X M, DU Y L, SUN B CH. Research on the temperature response of optical fiber sensing elements with different structures and materials [J]. Journal of

- Electronic Measurement and Instrumentation, 2006, 20(5):6-10.
- [4] 刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014(8):1681-1692.
LIU T G, WANG SH, JIANG J F, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014(8):1681-1692.
- [5] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 用于船舶结构监测的大量程光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2):311-317.
WU J, WU H P, HUANG J B, et al. Large range FBG sensor for ship structure health monitoring[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2):311-317.
- [6] 马洒洒, 王彬, 李川, 等. 基于 FBG 应变传感器的隧道安全实时监测算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2):304-311.
MA S S, WANG B, LI CH, et al. Research on real-time monitoring algorithm for tunnel safety status based on fiber Bragg grating strain sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2):304-311.
- [7] 贾丹平, 武威. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅电流传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12):1806-1812.
JIA D P, WU W. Fiber Bragg grating current sensor based on giant magnetostrictive material[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12):1806-1812.
- [8] TONG Z, LUAN P, CAO Y, et al. Dual-parameter optical fiber sensor based on concatenated down-taper and multimode fiber[J]. Optics Communications, 2016, 358(1):77-81.
- [9] 赵明富, 王念, 罗彬彬, 等. 可同时测量蔗糖浓度和温度的组合光纤光栅传感器[J]. 中国光学, 2014, 7(3):476-482.
ZHAO M F, WANG N, LUO B B, et al. Simultaneous measurement of temperature and concentration of sugar solution based on hybrid fiber grating sensor[J]. Chinese Optics, 2014, 7(3):476-482.
- [10] GOUVEIA C, JORGE P A S, BAPTISTA J M, et al. Fabry-Pérot cavity based on a high-birefringent fiber bragg grating for refractive index and temperature measurement[J]. Sensors Journal IEEE, 2012, 12(1):17-21.
- [11] 邵敏, 乔学光, 傅海威, 等. 基于长周期光纤光栅和 Sagnac 环的温度与折射率的区分测量[J]. 光电子·激光, 2012(8):1442-1446.
SHAO M, QIAO X G, FU H W, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on LPFG and Sagnac loop[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012(8):1442-1446.
- [12] 邵敏, 乔学光, 兆雪, 等. 基于长周期光纤光栅和保偏光纤 Sagnac 环光谱特性的温度与应变测量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(9):2318-2321.
SHAO M, QIAO X G, ZHAO X, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain based on long-period fiber grating and sagnac interferometer spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(9):2318-2321.
- [13] YUAN J Y, ZHAO C L, ZHOU Y, 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] 康泽新, 孙将, 马林, 等. 基于双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力解耦双测量传感系统[J]. 光学学报, 2015, 35(5):82-87.
KANG Z X, SUN J, MA L, et al. Decoupling dual measurement sensor system of temperature and strain based on twin-core fiber cascaded with fiber bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5):82-87.
- [15] WU SH N, 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):3761-3767.
- [16] 苏耿华, 徐德刚, 石嘉, 等. 基于保偏光纤和 LPFG 的 Sagnac 环温度及环境折射率双参量光纤传感器研究[J]. 光电子·激光, 2017(1):25-31.
SU G H, XU D G, SHI J, 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(1):25-31.
- [17] BOHNERT K, DEWIT C C, NEHRING J. Coherence-tuned interrogation of a remote elliptical-core, dual-mode fiber strain sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(1):94-103.
- [18] CHEN J, LIU Q, FAN X, et al. Ultrahigh resolution optical fiber strain sensor using dual Pound-Drever-Hall feedback loops[J]. Optics Letters, 2016, 41(5):1066-1069.
- [19] PEVEC S, DONLAGIC D. High resolution, all-fiber, micro-machined sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. Optics Express, 2014, 22(13):16241-16253.
- [20] KANG S, ZHANG H, LIU B, et al. A fiber-optic

interferometer based on non-adiabatic fiber taper and long-period fiber grating for simultaneous measurement of magnetic field and temperature [J]. Journal of Optics, 2016, 18(1):015802.

[21] ALEMOHAMMAD H R, FOROOZMEHR E, COTTEN B S, et al. A dual-parameter optical fiber sensor for concurrent strain and temperature measurement: design, fabrication, packaging, and calibration [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(8):1198-1204.

[22] SHU X, LIU Y, ZHAO D, et al. Dependence of temperature and strain coefficients on fiber grating type and its application to simultaneous temperature and strain measurement [J]. Optics Letters, 2002, 27 (9): 701-703.

[23] 江俊峰. 用于结构健康监测的光纤传感解调系统的理论与方法研究 [D]. 天津:天津大学, 2004.

JIANG J F. A research on theory and technique of demodulation of optical fiber sensors used for structure health monitoring [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.

作者简介



张雯, 分别在 2009 年和 2012 年于中国计量大学获得学士和硕士学位, 2016 年于天津大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院讲师, 主要研究方向为 MEMS 器件及光纤传感系统。

E-mail: wenzhang@bistu.edu.cn

Zhang Wen received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from China Jiliang University in 2009 and 2012, respectively, and her Ph. D. degree from Tianjin University in 2016. Now she is a lecturer in School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include MEMS devices and optical fiber sensing systems.



祝连庆 (通讯作者), 分别在 1982 年和 1989 年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位, 2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤传感、光纤激光器、光电精密测试技术等。

E-mail: zhulianqing@sina.com

Zhu Lianqing (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hefei University of Technology in 1982 and 1989, respectively, and his Ph. D. degree in 2013 from Harbin Institute of Technology. Now he is a professor in Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber sensing technology, fiber laser, and optical measurement technology.