

飞秒刻写光纤 F-P 腔级联 FBG 传感特性研究*

张 雯,孟凡勇,宋言明,娄小平,祝连庆

(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:提出了一种飞秒刻写光纤法布里-珀罗(F-P)腔级联切趾布拉格光纤光栅(FBG)的微结构传感器并研究了该传感器的温度与应变传感特性。该微结构传感器光谱稳定性良好,监测时长2 h内FBG波长最大漂移量为0.009 nm,功率最大漂移量为0.015 dB,F-P腔波长最大漂移量为0.018 nm,功率最大漂移量为0.072 dB。当应变由0 $\mu\epsilon$ 增至450 $\mu\epsilon$ 再减回0 $\mu\epsilon$ 时,该微传感器FBG特征峰先右移再左移,波长变化0.530 4 nm,应变灵敏度约1.17 $\text{pm}/\mu\epsilon$,线性度高于0.99;光纤F-P腔特征谷波长变化0.491 1 nm,应变灵敏度约1.10 $\text{pm}/\mu\epsilon$,线性度高于0.90。当温度由50 $^{\circ}\text{C}$ 升至200 $^{\circ}\text{C}$ 再降回50 $^{\circ}\text{C}$ 时,FBG特征峰先右移再左移,波长变化约1.418 nm,应变灵敏度约10.09 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$,线性度高于0.95;光纤F-P腔特征谷波长变化约1.578 nm,应变灵敏度约10.53 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$,线性度高于0.98。所提出的微结构传感器是解决单根光纤双参数测量的有效手段,同时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。

关键词:飞秒加工;光纤F-P腔;稳定性;应变特性;温度特性

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

Research on the cascaded fiber F-P cavity fabricated by femtosecond laser with FBG and its sensing characterization

Zhang Wen, Meng Fanyong, Song Yanming, Lou Xiaoping, Zhu Lianqing

(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 cascaded fiber Fabry-Perot (F-P) cavity fabricated by femtosecond laser with fiber Bragg grating (FBG) and its sensing characterization has been proposed and its temperature and strain sensing characterization has been studied. During two hours of stability test, the maximum FBG wavelength shift is 0.009 nm, and the maximum FBG power drift is 0.015 dB; the maximum F-P cavity wavelength shift is 0.018 nm, and the maximum F-P cavity power drift is 0.072 dB. When the strain is varying from 0 $\mu\epsilon$ to 450 $\mu\epsilon$ then back to 0 $\mu\epsilon$, the FBG wavelength peak is shifting towards right then left with the wavelength shift 0.530 4 nm, and the strain sensitivity is 1.17 $\text{pm}/\mu\epsilon$ with linearity higher than 0.99; the F-P cavity wavelength shift 0.4911 nm, and the strain sensitivity is 1.10 $\text{pm}/\mu\epsilon$ with linearity higher than 0.90. When the temperature is varying from 50 $^{\circ}\text{C}$ to 200 $^{\circ}\text{C}$ then back to 50 $^{\circ}\text{C}$, the FBG wavelength peak is shifting towards right then left with the wavelength shift 1.418 nm, and the temperature sensitivity is 10.09 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ with linearity higher than 0.95; the F-P cavity wavelength shift 1.578 nm, and the strain sensitivity is 10.53 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ with linearity higher than 0.98. This paper provides not only effective method to solve the problem of single fiber for double parameter measurement, but also reference value for the measurement of multi parameters coupling and decoupling in complex environment.

Keywords: femtosecond laser micromachining; fiber Fabry-Perot cavity; stability; strain characterization; temperature characterization

收稿日期:2017-07 Received Date: 2017-07

* 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(TJSHG201510772016)、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

20世纪70年代以来,光纤传感器件具有质量轻、体积小、抗腐蚀、抗电磁干扰和灵敏度高优点,已广泛应用于物理、化学、生物、医药、航空、航天等核心传感领域^[1-5],利用光纤传感器实现温度、应变、折射率、相对湿度和压强等多参数的测量已经成为研究热点之一^[6-10]。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,其中,应变与温度是两类重要的监测对象,也是其他物理量传感的技术基础^[11-16]。

2015年卞继城等人^[17]在单模光纤上熔接双球形结构与细芯光纤制作M-Z(Mach-Zehnder)干涉传感器实现对应变和温度的同时测量;同年,Tong ZH. R.等人^[18]利用光纤锥形结构和球形结构相结合的方式制作了M-Z干涉传感器,并将其与光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)级联实现液位与温度测量;2016年,Wu SH. N.等人^[19]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。同年,Li X. G.等人^[20]利用单模光纤、多模光纤和光子晶体光纤制作了集成光纤法F-P(Fabry-Perot)干涉仪与M-Z干涉仪的光纤传感器,通过分别观测F-P干涉仪的反射光谱与M-Z干涉仪的透射光谱,实现对折射率和温度的双参数测量。然而,目前大多数研究是将不同结构光纤通过级联的方式连接构成干涉结构,实现双参数测量,而利用飞秒激光直写制作本征型F-P干涉传感器实现双参数同时测量的研究相对较少。此外,均匀FBG反射谱两侧有较多旁瓣,这是由于光栅两端折射率突变成F-P腔谐振产生,旁瓣的存在大大降低了FBG的波长选择性,通过对折射率分布加适当的切趾函数可以抑制旁瓣,显著提高滤波特性。

本文首先从双参数灵敏度矩阵出发,分析级联结构的无串扰传感模型,利用飞秒激光直写刻线的方式在HI1060光纤中制作腔长80 μm、干涉条纹对比度大于10 dB的光纤F-P干涉传感器,与准分子激光在SM-28单模光纤上加工的切趾FBG级联并观测其反射谱,分别搭建应变和温度测试系统,对该微结构传感器的稳定性与传感特性进行分析。

1 级联结构与传感模型

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,通过飞秒激光直写加工光纤F-P腔,并

准分子激光在SM-28单模光纤上加工的切趾FBG级联,利用两种光学结构不同滤波及敏感特性进行测量和解调,一体实现双参数传感。

当应变 ε 单独变化时,FBG波长偏移量为:

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

式中: λ_{FBG} 是FBG干涉条纹波长, 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。

当温度 T 单独变化时,FBG波长偏移量为:

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG}}}{\lambda_{\text{FBG}}} = (\alpha_{T1} + \zeta_{T1}) \Delta T \quad (2)$$

式中: α_{T1} 是FBG所用光纤的热膨胀系数, ζ_{T1} 是FBG所用光纤的热光系数。

利用飞秒激光在光纤中加工出两个锥形槽作为F-P腔的反射端面,经过端面反射的光会在纤芯中发生耦合。由于两束反射光的相位差异产生不同的干涉光强,对应反射光谱的不同峰值,形成干涉光谱。当两锥形反射槽之间的相位差满足 π 的奇数倍时,干涉强度取最小值:

$$\begin{cases} I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi nL}{\lambda_{\text{F-P}}} + \varphi_0\right) \\ \frac{4\pi nL}{\lambda_{\text{F-P}}} + \varphi_0 = (2k + 1)\pi \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_1 和 I_2 表示两个锥形槽的反射光强, L 是F-P腔长, n 为光纤纤芯的有效折射率, φ_0 为两束发射光的初始相位差, k 为整数, $\lambda_{\text{F-P}}$ 为光纤F-P干涉光谱中波谷的对应波长。

当F-P腔内光程发生变化时,对波长 λ_k 求导可得:

$$\frac{\Delta(nL)}{\Delta\lambda_{\text{F-P}}} = \frac{nL}{\lambda_{\text{F-P}}} \quad (4)$$

式中: $\Delta(nL)$ 表示F-P腔内光程变化, $\Delta\lambda_k$ 为干涉光谱中波谷的波长漂移。

当应变 ε 单独变化时,应变效应与光弹效应也会导致光纤F-P腔光程差发生变化:

$$\Delta(nL) = nL(\xi + \rho) \Delta\varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{F-P}}}{\lambda_{\text{F-P}}} = (\xi + \rho) \Delta\varepsilon \quad (6)$$

式中: ξ 与 ρ 分别为光纤材料的应变系数和光弹系数。

比较式(1)和(6)可知,光纤F-P腔与FBG对于应变的灵敏度趋势相同,但线性系数不同,组成级联结构后两者对应变的波长漂移不会存在串扰。

同理,当温度 T 单独变化时,热光效应与热膨胀效应导致光纤F-P腔光程差发生变化,即:

$$\Delta(nL) = nL(\alpha_{T2} + \zeta_{T2}) \Delta T \quad (7)$$

由式(4)和(7)可得:

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{F-P}}}{\lambda_{\text{F-P}}} = (\alpha_{T2} + \zeta_{T2}) \Delta T \quad (8)$$

式中: α_{T2} 是F-P腔所用光纤的热膨胀系数, ζ_{T2} 是F-P腔

所用光纤的热光系数。

比较式(2)与(8)可知,光纤 F-P 腔与 FBG 对于温度的灵敏度趋势相同,均呈线性关系,具体数值区别主要体现在光纤材料上。要使得级联传感器的两处光学结构温度灵敏度不同,必须使用热膨胀系数与热光系数不同的光纤进行加工。

设外界应变 ε 和温度 T 发生变化时,FBG 和光纤 F-P 腔的反射谱波长变化 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 、 $\Delta\lambda_{\text{F-P}}$ 与应变变化 $\Delta\varepsilon$ 、温度变化 ΔT 的相关关系可表述如下:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{\text{FBG}} = K_{\varepsilon 1}\Delta\varepsilon + K_{T1}\Delta T \\ \Delta\lambda_{\text{F-P}} = K_{\varepsilon 2}\Delta\varepsilon + K_{T2}\Delta T \end{cases} \quad (9)$$

式中: $K_{\varepsilon 1}$ 、 K_{T1} 分别为 FBG 的应变灵敏系数、温度灵敏系数, $K_{\varepsilon 2}$ 、 K_{T2} 分别为光纤 F-P 腔的应变灵敏系数、温度灵敏系数。

由式(9)可得,FBG 和光纤 F-P 腔的应变、温度、波长漂移存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{FBG}} \\ \Delta\lambda_{\text{F-P}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (10)$$

求逆可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{FBG}} \\ \Delta\lambda_{\text{F-P}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(11)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,代入式(11)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 微结构传感器制备与系统实现

搭建如图 1 所示的飞秒激光直写光纤 F-P 腔加工系统,包括钛蓝宝石飞秒激光器、三维气浮隔振光学平台、高能聚焦物镜、宽带光源、高精度光谱分析仪。由飞秒激光器发出的超窄脉宽飞秒激光经聚焦物镜聚焦至已开窗的单模 H11060 光纤纤芯上,GUI 控制平台移动和光斑闭合,通过高精度光谱分析仪实现刻写过程的实时监测。本文使用的飞秒激光加工速度为 $80 \mu\text{m/s}$,刻线长度 $25 \mu\text{m}$,刻写的本征型 F-P 腔长 $50 \mu\text{m}$ 。

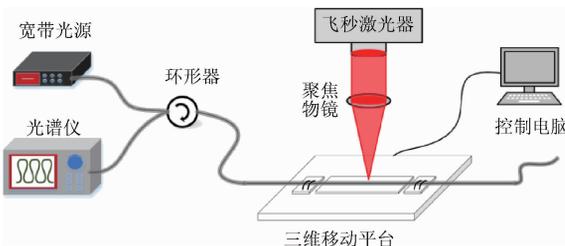


图 1 飞秒激光直写光纤 F-P 腔加工系统
Fig. 1 Schematic diagram of the fiber F-P cavity manufactured by femtosecond laser

利用准分子激光加工在 SM-28 单模光纤上加工切趾 FBG,与飞秒激光加工的 F-P 腔级联并观测其反射谱如图 2 所示。由图可知,该级联光纤传感器 $1520 \sim 1610 \text{ nm}$ 波长范围内,FBG 反射谱波峰位于 1550.2470 nm ,最高对比度为 -33.3 dB ;光纤 F-P 腔反射谱清晰明显,为保证后续解调精度,选择波长位置为 1594.4065 nm 的特征波谷,此处对比度为 -10.7 dB 。

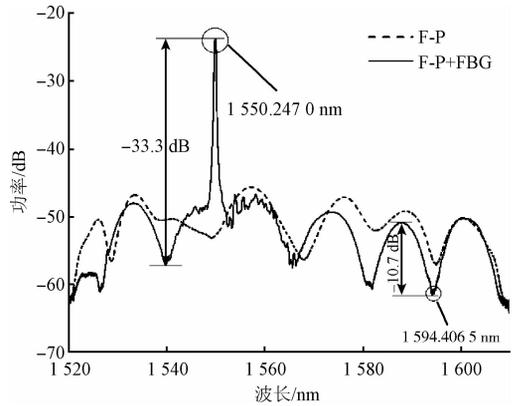


图 2 微结构传感器反射谱
Fig. 2 Reflection spectrum of the proposed microstructure

3 微结构传感特性

3.1 稳定性

为测量该级联微结构传感器的光谱稳定性,在恒温恒湿超净环境中对级联结构光谱进行监测。光谱仪分辨率 0.05 nm ,采样点数 10001 个,监测时长 2 h ,记录时间步长为 10 min 。各特征峰的光谱稳定性如图 3、4 所示。

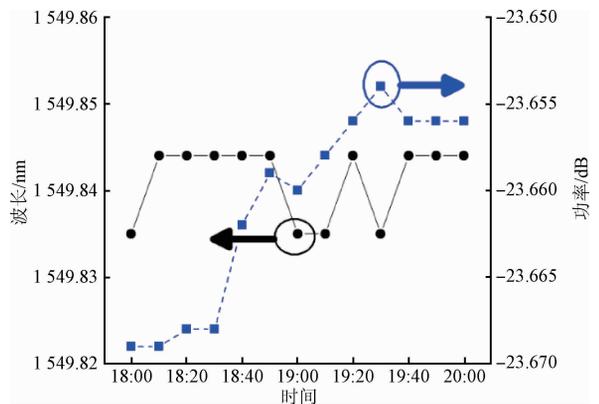


图 3 微结构传感器 FBG 特征波长稳定性测试
Fig. 3 Stability test of the FBG characterized wavelength of the proposed microstructure

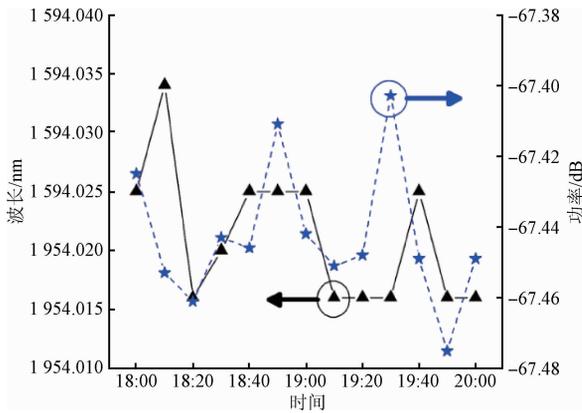


图4 微结构传感器 F-P 腔特征波长稳定性测试
Fig. 4 Stability test of the F-P cavity characterized wavelength of the proposed microstructure

结合实验数据可知,该级联微结构传感器光谱稳定性较好,监测时长内波长与频率均无明显漂移,其中 FBG 波长最大漂移量为 0.009 nm,功率最大漂移量为 0.015 dB,

F-P 腔波长最大漂移量为 0.018 nm,功率最大漂移量为 0.072 dB,满足 3σ 误差评价准则,具有较好的可信程度。

3.2 应变特性

以厚度 2 mm 的航铝 7075-0 等强度梁为测试基体,将本文微结构传感器的光纤 F-P 腔与 FBG 对称粘贴于等强度梁中心线两侧。粘贴前对光纤 F-P 腔与 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 $20 \mu\epsilon$ 。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微结构传感器反射谱线开始移动记为初始值,拧动微分头施加应变并由光谱仪实时记录数据。加载及卸载过程中应变范围均为 $0 \sim 450 \mu\epsilon$,步长为 $20 \mu\epsilon$ 。FBG 与光纤 F-P 腔的特征光谱及应变曲线如图 5、6 所示。

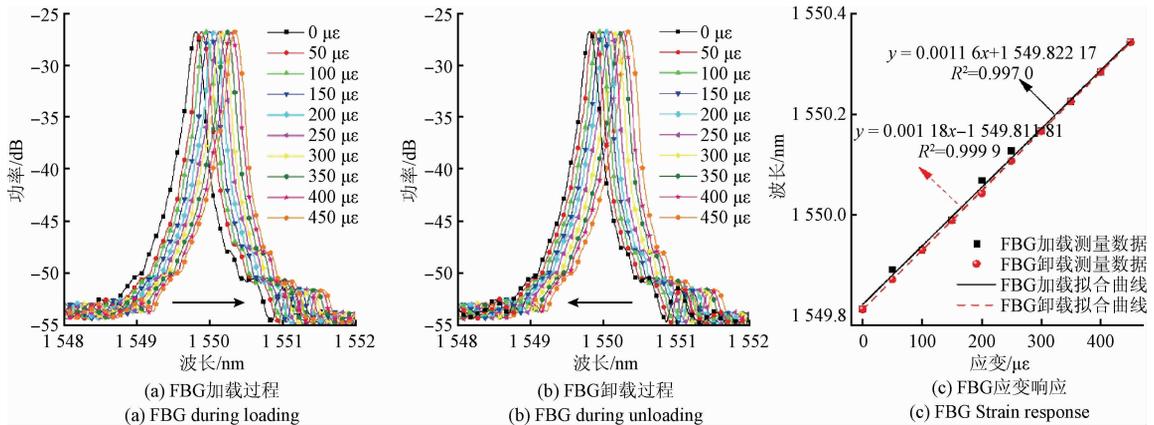


图5 应变过程传感器 FBG 特征峰光谱及响应

Fig. 5 Reflective spectrum and response of FBG peak of the proposed microstructure during strain variation

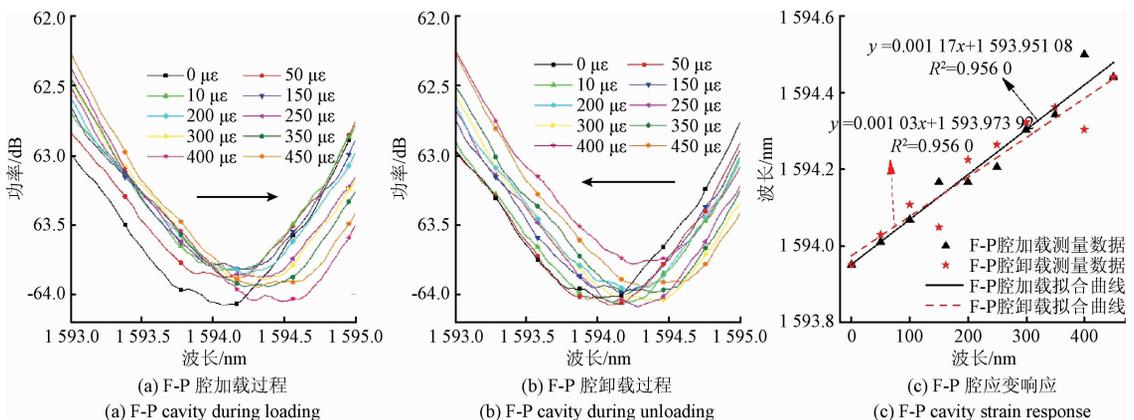


图6 应变过程传感器光纤 F-P 腔特征谷光谱及响应

Fig. 6 Reflective spectrum and response of fiber F-P cavity of the proposed microstructure during strain variation

由图 5、6 可知,该光纤传感器的两个特征波谷随应变变化均有漂移,且变化趋势相同。当应变由 $0 \mu\epsilon$ 增至 $450 \mu\epsilon$ 再减回 $0 \mu\epsilon$ 时,FBG 特征峰先右移再左移,波长变化 0.5304 nm ,应变灵敏度约 $1.17 \text{ pm}/\mu\epsilon$,线性度高于 0.99 ;光纤 F-P 腔特征谷波长变化 0.4911 nm ,应变灵敏度约 $1.10 \text{ pm}/\mu\epsilon$,线性度高于 0.90 。具体参数如表 1 所示。

表 1 微结构传感器应变特性参数

Table 1 Strain characterized parameters of the proposed sensor

方式	波长变化/nm	灵敏度/线性度	
		($\text{pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$)	
加载	FBG	0.5304	0.9970
	光纤 F-P 腔	0.4911	0.9560
卸载	FBG	0.5304	0.9999
	光纤 F-P 腔	0.4911	0.9045

3.3 温度特性

将光纤 F-P 腔级联 FBG 光纤传感器固定精密温控台上,温度变化范围为 $50 \sim 200^\circ\text{C}$,步长 25°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。FBG 与光纤 F-P 腔的特征光谱及应变曲线如图 7、8 所示。

由图 7、8 可知,该光纤传感器的两个特征波谷随温度变化均有漂移,且变化趋势相同。当温度由 50°C 升至 200°C 再降回 50°C 时,FBG 特征峰先右移再左移,波长变化约 1.418 nm ,应变灵敏度约 $10.09 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,线性度高于 0.95 ;光纤 F-P 腔特征谷波长变化约 1.578 nm ,应变灵敏度约 $10.53 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,线性度高于 0.98 。具体参数如表 2 所示。

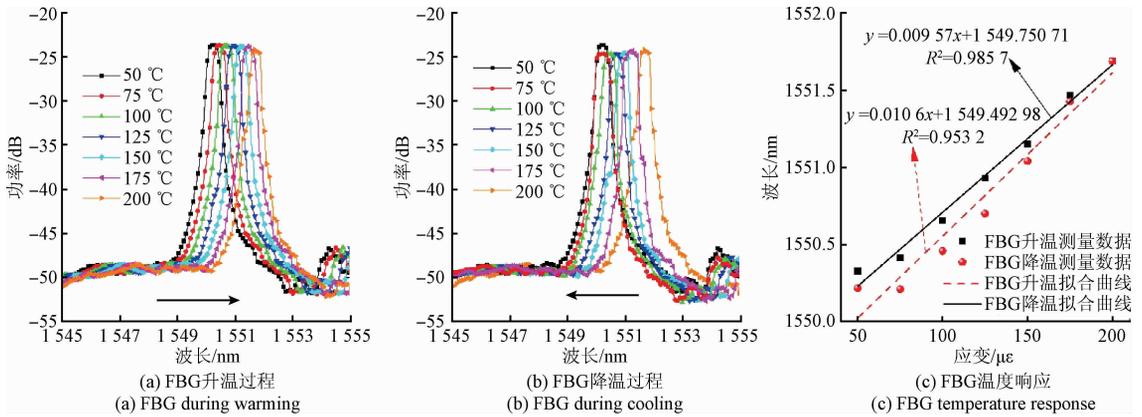


图 7 温度变化过程传感器 FBG 特征峰光谱及响应

Fig. 7 Reflective spectrum and response of FBG peak of the proposed microstructure during temperature variation

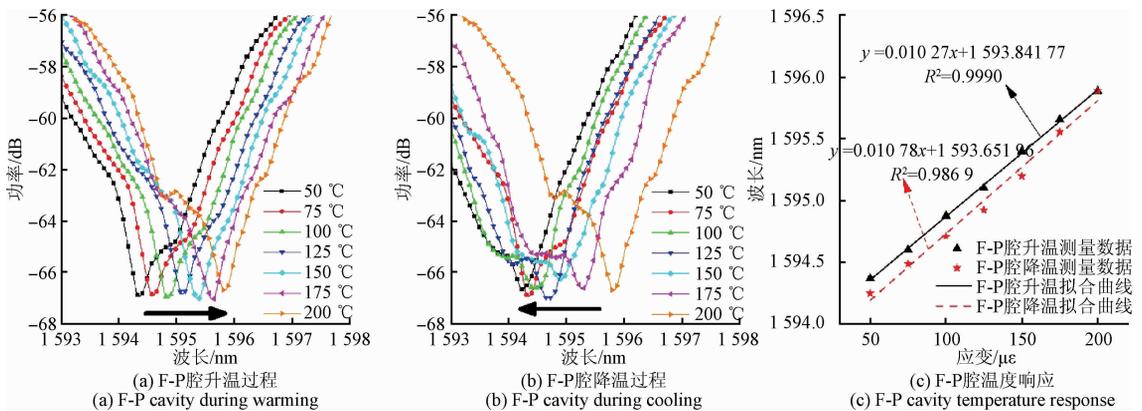


图 8 温度变化过程传感器 F-P 腔特征峰光谱及响应

Fig. 8 Reflective spectrum and response of F-P cavity of the proposed microstructure during temperature variation

结合实验数据,对表 1、2 中相关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:

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.17 & 10.09 \\ 1.10 & 10.53 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{FBG}} \\ \Delta\lambda_{\text{F-P}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

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,即可实时解算环境应变与温度,实现应变/温度双参量动态测量。

表2 传感器温度特性参数

Table 2 Temperature characterized parameters of the proposed sensor

	方式	波长	灵敏度/	线性度
		变化/nm	($\mu\text{m} \cdot \text{C}^{-1}$)	
升温	FBG	1.363	9.57	0.985 7
	光纤 F-P 腔	1.518	10.27	0.999 0
降温	FBG	1.473	10.6	0.953 2
	光纤 F-P 腔	1.638	10.78	0.986 9

4 结 论

本文介绍了基于飞秒激光直写加工光纤 F-P 腔级联切趾 FBG 的微结构光纤传感器,建立了该传感器应变/温度与光谱特征位置波长变化之间的数学模型,并对该传感器稳定性、应变特性、温度特性进行研究,确定传感系数矩阵,可实时解算环境温度和应变,具体结论如下。

1) 该微结构传感器光谱稳定性良好,监测时长 2 h 内 FBG 波长最大漂移量为 0.009 nm,功率最大漂移量为 0.015 dB, F-P 腔波长最大漂移量为 0.018 nm,功率最大漂移量为 0.072 dB。

2) 当应变由 0 μE 增至 450 μE 再减回 0 μE 时,该微传感器 FBG 特征峰先右移再左移,波长变化 0.530 4 nm,应变灵敏度约 1.17 $\text{pm}/\mu\text{E}$,线性度高于 0.99; 光纤 F-P 腔特征谷波长变化 0.491 1 nm,应变灵敏度约 1.10 $\text{pm}/\mu\text{E}$,线性度高于 0.90。

3) 当温度由 50 $^{\circ}\text{C}$ 升至 200 $^{\circ}\text{C}$ 再降回 50 $^{\circ}\text{C}$ 时, FBG 特征峰先右移再左移,波长变化约 1.418 nm,应变灵敏度约 10.09 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$,线性度高于 0.95; 光纤 F-P 腔特征谷波长变化约 1.578 nm,应变灵敏度约 10.53 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$,线性度高于 0.98。

本文提出的微结构传感器是解决单根光纤双参数测量的有效手段,利用不同光纤微结构对入射光的滤波特性,在不同波长位置构建特征波峰或波谷,通过各波峰或波谷对环境因素变化的灵敏度差异,实现环境参数的测量与解调。同时,本文提出的微结构也可通过对多环境因素的独立性测试,为多因素的耦合测量与解耦提供参考价值。

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] 张勇,魏广庆,施斌,等. 基于 BOTDR 的传感光纤温度效应研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(10):929-934.
ZHANG Y, WEI G Q, SHI B, et al. Study on temperature effect of BOTDR-based optical fibers [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(10):929-934.
- [3] 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, 35(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, 35(8):1681-1692.
- [4] 杨留强,宫继刚. 基于光纤传感技术的伽马探测研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4):113-116.
YANG L Q, GONG J G. Study of gamma ray detection based on optical fiber sensing technology [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(4):113-116.
- [5] 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 Instrument, 2006, 20(5):6-10.
- [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] SUN H, ZHANG X, YUAN L, et al. An optical fiber fabry-perot interferometer sensor for simultaneous measurement of relative humidity and temperature [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(5):2891-2897.
- [8] 王大伟,封皓,杨洋,等. 基于 Φ -OTDR 光纤传感技术的供水管道泄漏辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4):830-837.
WANG D W, FENG H, YANG Y, et al. Study on leakage identification method of water supply pipeline based on Φ -OTDR optical fiber sensing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4):830-837.
- [9] TONG ZH R, LUAN P 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.
- [10] 龚英, 葛俊峰, 叶林, 等. 对射式螺旋形光纤液位传感器的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(3):87-90.
GONG Y, GE J F, YE L, et al. Design and realization of an opposite-type spiral optical-fiber liquid-level sensor[J]. Foreign electronic measurement technology, 2017, 36(3):87-90.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 卞继城, 郎婷婷, 俞文杰, 等. 基于马赫-曾德尔干涉的温度和应变同时测量的光纤传感器研究 [J]. 光子·激光, 2015(11):2169-2174.
BIAN J CH, LANG T T, YU W J, et al. Study of fiber sensor for the simultaneous measurement of temperature and strain based on Mach-Zehnder interferometer [J]. Journal of Optoelectronics. Laser, 2015 (11):2169-2174.
- [18] TONG ZH R, CAO Y. Dual-parameter optical fiber sensor based on intermodal interferometer with an inline embedded fiber Bragg grating [J]. Optical Engineering, 2015, 54(3):036104.
- [19] WU SH N, YAN G F, WANG CH L, 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.
- [20] LI X G, ZHAO Y, CAI L, et al. Simultaneous measurement of RI and temperature with a FP and Mach-Zehnder composite interferometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(17):1-1.

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学位和硕士学位, 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 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 from Harbin Institute of Technology in 2013. 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.