

非本征光纤法布里-珀罗干涉传感器的温度特性

刘加萍, 王彦, 刘吉虹

安徽工业大学电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243000

摘要 介绍了非本征光纤法布里-珀罗干涉传感器的结构及制作方法。通过 Matlab 仿真研究不同腔长及反射率对非本征光纤法布里-珀罗干涉传感器干涉谱的影响,建立了非本征光纤法布里-珀罗干涉传感器的温度传感模型。对不同腔长及不同反射率的非本征光纤法布里-珀罗干涉传感器进行温度对比实验。结果表明,短腔的非本征光纤法布里-珀罗干涉传感器的温度灵敏度高;镀钯金膜的非本征光纤法布里-珀罗干涉传感器可较好地避免温度对其干涉谱的影响,具有温度补偿的作用。

关键词 光纤光学; 非本征光纤法布里-珀罗干涉传感仪; 温度特性; 腔长; 反射率

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.110601

Temperature Characterization of Extrinsic Fiber Fabry-Perot Interferometric Sensor

Liu Jiaping, Wang Yan, Liu Jihong

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243000, China

Abstract The structure and fabrication method of the extrinsic fiber Fabry-Perot interference (EFPI) sensors are introduced. The influence of different cavity lengths and reflectivities on interference spectrum of the EFPI is analyzed through Matlab simulation, and a temperature sensing model of the EFPI sensor is established. Finally, temperature characteristics of the EFPI sensors with different cavity lengths and reflectivities are researched through a comparison experiment. The results indicate that the EFPI sensor with a short cavity fiber has a higher temperature sensitivity. In addition, the EFPI sensor coated with palladium-gold film can effectively avoid the influence of temperature on interference spectrum and compensate temperature fluctuation.

Key words fiber optics; extrinsic fiber Fabry-Perot interferometric sensor; temperature characteristic; cavity length; reflectivity

OCIS codes 120.2230; 120.5700; 060.2280

1 引言

光纤法布里-珀罗(F-P)传感器按照结构可分为本征光纤法布里-珀罗传感器和非本征光纤法布里-珀罗传感器,其中,本征光纤法布里-珀罗干涉(IFPI)传感器为内腔式结构,光束均在光纤内部进行反射;而非本征光纤法布里-珀罗干涉(EFPI)传感器中存在一个空气腔,可以通过测量腔长的变化来监测环境参数,并且具有精细度高、波长调节范围宽等优点,因此被广泛应用在工程等领域中。深入研究 EFPI 传感器的各种特性是其广泛应用的前提,其中温度特性是 EFPI 传感器的重要特性之一。目前,国内外学者对不同结构 EFPI 传感器的温度特性进行了广泛研究,Zhang 等^[1]设计了基于聚合物的 EFPI 温度传感器,温度灵敏度约为 5.2 nm/°C。张杰等^[2]制作了一种简单结构的熔接式全石英 EFPI 传感器,进行温度敏感度测量实验,

收稿日期: 2017-05-16; 收到修改稿日期: 2017-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(51309001)、安徽省教育厅自然科学基金重点项目(KJ2017A041)

作者简介: 刘加萍(1993—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: liujiaping_612@163.com

导师简介: 王彦(1975—),女,博士,教授,主要从事智能监控与控制、分布式光纤传感技术、结构健康监测方面的研究。

E-mail: wangyan@ahut.edu.cn(通信联系人)

温度敏感系数约为 $0.72 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。段丹阳等^[3]提出了一种基于 EFPI 的温度传感器,其敏感部分是一段两端研磨为平面的单模光纤,温度分辨率为 $0.046 \text{ }^\circ\text{C}$ 。Wang 等^[4]制作了一种基于空气腔的 EFPI 传感器,有较高的温度灵敏度,其灵敏度优于 $20 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。Wu 等^[5]利用单模光纤和空芯光纤进行熔接制作了 EFPI 传感器,其温度灵敏度为 $1.08 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。此外,研究 EFPI 传感器的温度性能有利于其温度补偿功能在工程中的应用,如 Wang 等^[6]采用金属管制作了一种应用于地质学中断层测量的温度补偿位移传感器,可以有效避免温度对监测断层的影响,最大的测量范围为 $4.954 \text{ }\mu\text{m}$ 。彭华等^[7]利用两种不同热膨胀系数的材料在结构上进行温度补偿,应用于断层测量,但其结构复杂。

本文制作了一种采用石英毛细管径直对准的 EFPI 传感器,理论分析 EFPI 腔长和端面反射率对 EFPI 传感器干涉谱的影响,采用 Matlab 分析软件进行仿真,得出腔长和反射率与 EFPI 传感器干涉谱之间的关系。为了研究 EFPI 传感器的温度特性,对不同腔长和反射率的 EFPI 传感器进行温度对比实验,实验结果表明,短腔 EFPI 传感器的温度灵敏度更高。此外,镀钽金膜 EFPI 传感器比传统 EFPI 传感器的温度灵敏度低,因此,在工程监测压力、位移等方面中可以有效地避免温度对其监测结果的交叉影响。

2 传感器制备

实验制作不同腔长和反射率的 EFPI 传感器。该传感器的材料有:单模光纤(康宁-28),纤芯和包层直径分别为 $8.2 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $242 \text{ }\mu\text{m}$,数值孔径为 0.14,温度工作范围为 $-60 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$,热膨胀系数为 $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$;与光纤直径相匹配的石英毛细管,内径为 $250 \text{ }\mu\text{m}$ 、外径为 0.5 mm ;环氧树脂胶,切割刀,离子溅射仪(美国 HUMMER)等。

图 1 为 EFPI 传感器的结构图,如图所示,选用两段长度约为 20 cm 的单模光纤,两端用剥线钳剥去光纤外面的涂覆层,得到 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 的裸光纤,然后利用切割刀将其端面切平。在两根光纤离端面 $10 \sim 15 \text{ mm}$ 处涂覆环氧树脂胶,再将两根光纤端面水平放置在石英毛细管中并精确对准,其中一根光纤与解调设备相连,通过观察是否形成干涉条纹来调整法布里-珀罗腔之间的距离,待 5 min 后环氧树脂胶固定,EFPI 传感器制作完成。

图 2 为 EFPI 传感器的实物图,利用读数显微镜读出其腔长 d 为 $962 \text{ }\mu\text{m}$,全长 L 为 25 mm 。此外,为了研究不同端面反射率对 EFPI 传感器干涉谱的影响,镀膜 EFPI 传感器的制备方法与传统 EFPI 传感器相同,端面切平的裸光纤表面采用离子溅射仪镀上一层钽金膜,镀膜时间为 5 min ,钽金膜厚 $54.4 \text{ }\mu\text{m}$,镀膜后通过读数显微镜可测得镀膜光纤直径为 $235 \text{ }\mu\text{m}$ 。此外,通过光功率计读出光纤镀膜前后的光强值分别为 -70 dBm 、 -15 dBm ,可得端面反射率约为 80% ,完成制作的镀钽金膜 EFPI 传感器的腔长 d 为 $323 \text{ }\mu\text{m}$ 。

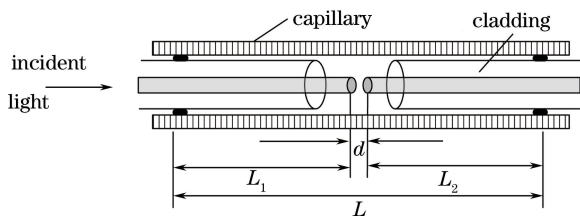


图 1 EFPI 传感器结构图

Fig. 1 Structure of EFPI sensor



图 2 EFPI 传感器实物

Fig. 2 Image of EFPI sensor

3 EFPI 传感器的理论分析

EFPI 传感器基本原理如图 1 所示,多束入射光经过法布里-珀罗腔后被多次反射,两块平行的反射端面形成一个光学谐振腔。在监测信号的过程中,多束光经过第 1 个端面反射一部分的光,另一部分透射光通过法布里-珀罗腔进入第 2 个反射端面,再经过 1 次透射损耗,第 2 次反射的光束会与第 1 次反射的光束形成干涉谱,从而可以通过检测反射波的信息来判断信号。

EFPI 传感器反射谱干涉信号的反射光强 I_r 及透射光强 I_t 分别为^[8]

$$I_r = \frac{4R \sin^2(\delta/2)}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)} I_i, I_t = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)} I_i, \quad (1)$$

式中 R 为端面的反射率; $\delta = 4\pi nd/\lambda_0$ 为相邻两条光线之间的相位差, 其中, λ_0 为真空中光波长, n 为法布里-珀罗腔介质的折射率; I_i 为入射光的强度。

3.1 不同腔长及反射率对 EFPI 传感器干涉谱的影响

根据对 EFPI 传感器的理论分析可知, EFPI 传感器产生的干涉谱受腔长和反射率的影响。通过 Matlab 仿真研究不同腔长 EFPI 传感器对其干涉谱的影响, 选取波长范围为 $1.540 \sim 1.560 \mu\text{m}$, 反射率为 80% , 由 (1) 式可得 EFPI 传感器干涉谱随腔长变化的关系, 由图 3 可见, 当 EFPI 腔长减小时, 通过反射的干涉条纹数目增加, 干涉效果增强。此外, 研究不同端面反射率对 EFPI 传感器产生的干涉谱的影响, 在 Matlab 仿真中, 根据 (1) 式设定相位为 $0^\circ \sim 20^\circ$, 可得 EFPI 传感器不同反射率对反射光的相对光强的影响。由图 4 可见, 随着端面反射率 R 值的增大, 干涉条纹的细锐度变大, 干涉的效果增强, EFPI 传感器传感的分辨率增大。因此在制作过程中宜尽量提高光纤端面反射率。

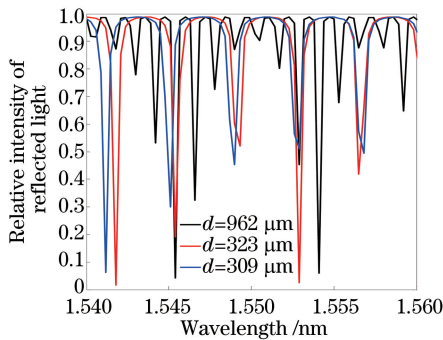


图 3 反射光相对光强随波长和腔长的变化

Fig. 3 Changes of relative intensity of reflected light with wavelength and cavity length

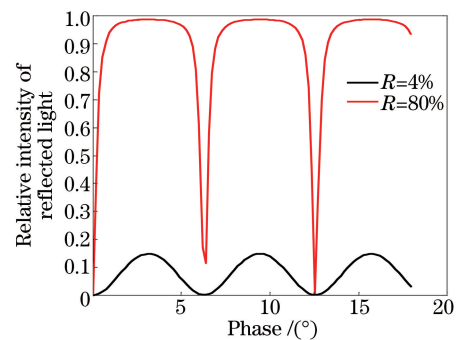


图 4 反射光相对光强随相位和 R 值的变化

Fig. 4 Changes of relative intensity of reflected light with phase and R value

3.2 EFPI 传感器的温度传感原理

假定入射光进入第 1 个反射端面的光强为 I_1 , 一部分透射光经过第 2 个反射面的光强为 I_2 , 两束光强存在 $2nd$ 的光程差, 发生干涉现象。干涉谱的光强为^[9]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda} + \delta_0\right), \quad (2)$$

式中 δ_0 为初始相位。从 (2) 式可得出干涉谱中相邻两个波长的差值为

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2nd}, \quad (3)$$

式中 λ_1, λ_2 是干涉谱中相邻点处的波长。由 (3) 式可见, 自由谱宽随着腔长 d 的减小而增大。当温度发生变化时, 光纤传感器的毛细管及光纤会产生热膨胀的现象, (2) 式中的相位发生改变, 即腔长 d 发生变化, 干涉谱随之改变。假定 n 是常数, EFPI 传感器的温度灵敏度可表示为

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta d} \cdot \frac{\Delta d}{\Delta T} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\Delta d}{\Delta T}. \quad (4)$$

当温度升高时, 石英毛细管受热膨胀影响使腔长增加, 因此腔长与温度的关系为

$$\frac{\Delta d}{\Delta T} = \alpha \cdot L, \quad (5)$$

式中 α 为单模光纤的热膨胀系数, L 为 EFPI 传感器的长度。将 (5) 式代入 (4) 式, 可得 EFPI 传感器的温度灵敏度为

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \frac{\lambda}{d} \cdot \alpha \cdot L. \quad (6)$$

由 (6) 式可见, EFPI 传感器的温度灵敏度随着腔长的减小而变大。此外, 当镀钽金膜 EFPI 传感器 (结

构如图 1 所示)周围的温度发生变化时,其长度 L 为

$$L = L_1 + L_2 + d. \quad (7)$$

设定 T_0 为室温,当温度改变 ΔT 时,有

$$\begin{cases} L = L_0 + \alpha_s \Delta T L_0 \\ L_1 = L_{10} + (\alpha_f + \alpha_c) \Delta T L_{10}, \\ L_2 = L_{20} + (\alpha_f + \alpha_c) \Delta T L_{20} \end{cases} \quad (8)$$

式中 L_0 为传感器的初始长度, L_{10} 、 L_{20} 分别为反射端面到传感器的初始长度,毛细管的热膨胀系数为 $\alpha_s = 5.5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$, 光纤的热膨胀系数 $\alpha_f = \alpha_s$, 钽金膜的热膨胀系数为 $\alpha_c = 1.3 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

将(8)式代入(7)式可得腔长的变化 Δd 为

$$\begin{aligned} \Delta d = d - d_0 = \Delta T [\alpha_s L_0 - (\alpha_f + \alpha_c) L_{10} - (\alpha_f + \alpha_c) L_{20}] \approx \\ \Delta T [\alpha_s L_0 - \alpha_c (L_{10} + L_{20})] = \Delta T [\alpha_s L_0 - \alpha_c (L_0 - d_0)]. \end{aligned} \quad (9)$$

由于钽金膜的热膨胀系数 α_c 远大于光纤的热膨胀系数 α_f , 可忽略光纤本身的热膨胀系数。假定 $L_0 = 25 \text{ mm}$, $d_0 = 323 \text{ }\mu\text{m}$, $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$, 代入(9)式可计算出腔长的变化 $\Delta d \approx 1.625 \text{ }\mu\text{m}$ 。因此,镀钽金膜的 EFPI 传感器可较好地避免温度对其腔长的影响,进而影响输出干涉谱。

4 温度传感实验

为了验证 EFPI 传感器的温度传感理论特性,分别对不同腔长和不同端面反射率的 EFPI 传感器进行温度传感实验。图 5 为实验系统示意图,实验系统中的光源为可调谐的 C 波段宽带光源(BBS),工作波长为 $1525 \sim 1565 \text{ nm}$,输出功率值为 10 dBm ,采用波长解调模块(美国 BaySpec)搭建光谱检测系统,分辨率为 1 pm ,工作波长与宽带光源波长范围一致^[10]。此外,系统标定采用低温恒温槽(美国 Fluke 公司 7008 型),温度工作范围为 $-5 \sim 110 \text{ }^\circ\text{C}$,当介质为蒸馏水时,分辨率为 $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ 。EFPI 传感器的温度实验范围为 $25 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$,温度间隔为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$,进行升温降温实验。当达到设定的温度时,待温度稳定后读取波长数据。图 6 为腔长 $962 \text{ }\mu\text{m}$ 、端面反射率 4% 的传统 EFPI 传感器的局部升温干涉谱,在温度 T 为 $30 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,随着温度升高,干涉谱变化幅度减小。同时,选取两个相邻的波峰 $\lambda_1 = 1546.677 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 1547.830 \text{ nm}$ 探究 EFPI 传感器的温度特性。

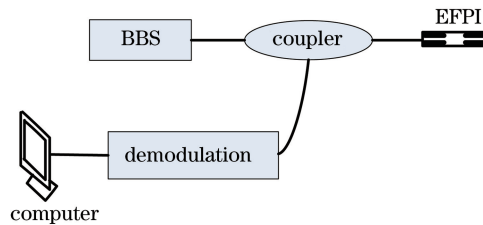


图 5 实验系统示意图

Fig. 5 Diagram of experimental system

制备 4 种不同腔长且端面反射率为 4% 的传统 EFPI 传感器,分析其温度特性。温度对比实验结果如图 7 所示,由图可见,在升温过程中,腔长 $d = 962 \text{ }\mu\text{m}$ 的传统 EFPI 传感器在波长 λ_1 、 λ_2 处对温度的灵敏度分别为 8.786 、 $7.617 \text{ pm}/^\circ\text{C}$;腔长 $d = 517 \text{ }\mu\text{m}$ 的传统 EFPI 传感器在 λ_1 、 λ_2 处对温度的灵敏度分别为 30.79 、 $27.69 \text{ pm}/^\circ\text{C}$;此外,腔长 $d = 309 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $d = 163 \text{ }\mu\text{m}$ 的传统 EFPI 传感器在 λ_1 、 λ_2 处对温度的灵敏度分别为 54.92 、 $53.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 61.74 、 $57.06 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,且降温与升温有较好的吻合性。结果表明,短腔的 EFPI 传感器温度监测的灵敏度更高。

此外,制备端面反射率为 80% 、腔长为 $323 \text{ }\mu\text{m}$ 的镀钽金膜 EFPI 传感器,讨论不同端面反射率对 EFPI 传感器温度特性的影响。实验结果如图 8 所示,镀钽金膜 EFPI 传感器在 λ_1 、 λ_2 处对温度的灵敏度分别为 6.083 、 $5.987 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,此外,降温 and 升温过程中温度灵敏度趋势有较好的一致性。结果表明,端面反射率为 80% 的 EFPI 传感器的温度灵敏度低,可避免温度对其干涉谱的影响。

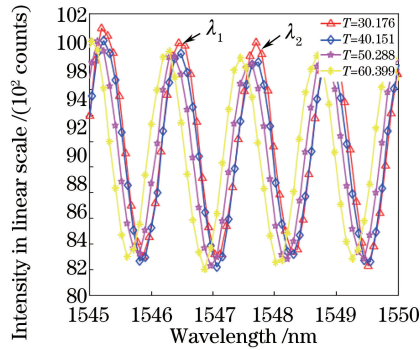
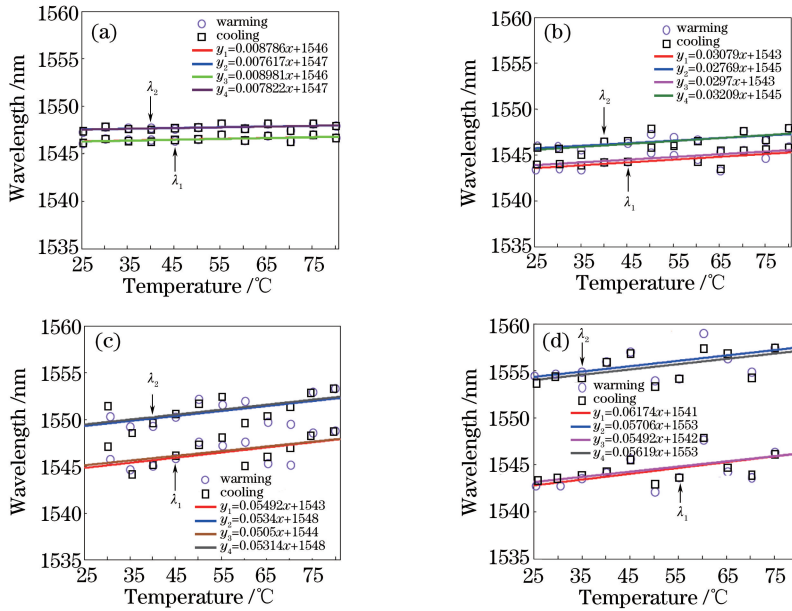
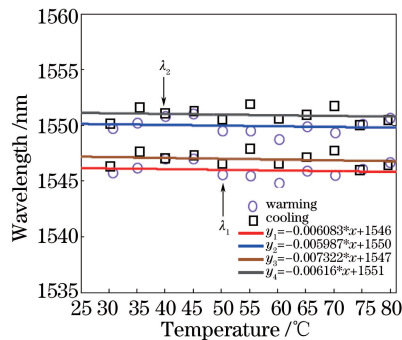
图6 传统 EFPI 传感器 $d=962 \mu\text{m}$ 局部干涉谱Fig. 6 Local interference spectra of traditional EFPI sensor with $d=962 \mu\text{m}$ 图7 传统 EFPI 传感器的波长与温度的关系。(a) $d=962 \mu\text{m}$; (b) $d=517 \mu\text{m}$; (c) $d=309 \mu\text{m}$; (d) $d=163 \mu\text{m}$

Fig. 7 Relationship between wavelength and temperature of traditional EFPI sensor.

(a) $d=962 \mu\text{m}$; (b) $d=517 \mu\text{m}$; (c) $d=309 \mu\text{m}$; (d) $d=163 \mu\text{m}$ 图8 镀钯金膜 EFPI 传感器 $d=323 \mu\text{m}$ 的波长与温度的关系Fig. 8 Relationship between wavelength and temperature of EFPI sensor coated with palladium-gold film with $d=323 \mu\text{m}$

5 结 论

制作了不同腔长以及不同反射率的 EFPI 传感器;理论分析不同腔长和反射率对其干涉谱的影响,并建立其温度传感理论模型;通过温度对比实验探究不同腔长及不同反射率的 EFPI 传感器的温度特性。结果

表明,短腔 EFPI 传感器的温度灵敏度比长腔 EFPI 传感器高,镀钽金膜 EFPI 传感器波长对温度灵敏度约为 $6.083 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,在其他监测领域,镀钽金膜 EFPI 传感器可以较好地避免温度对其输出干涉谱的影响。因此,在工程应用中,宜根据实际监测要求选择结构适合的 EFPI 传感器。

参 考 文 献

- [1] Zhang G L, Yang M H, Wang M. Large temperature sensitivity of fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer based on polymer-filled glass capillary[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(6): 618-622.
- [2] Zhang Jie, Jing Zhenguo, Li Ang, *et al.* All-silica fiber EFPI high static pressure sensor in fusion with simple structure[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(10): 1010004.
张杰, 荆振国, 李昂, 等. 结构简单的熔接式全石英光纤 EFPI 高静压传感器[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1010004.
- [3] Duan Danyang, Cheng Jin, Gao Ran, *et al.* Temperature sensor based on optical fiber Fabry-Perot interferometer[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(4): 124-127.
段丹阳, 程进, 高然, 等. 基于光纤法布里-珀罗干涉仪的温度传感器[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(4): 124-127.
- [4] Wang J, Dong B, Lally E, *et al.* Multiplexed high temperature sensing with sapphire fiber air gap-based extrinsic Fabry-Perot interferometers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(5): 619-621.
- [5] Wu Y, Zhang Y, Wu J, *et al.* Temperature-insensitive fiber optic Fabry-Perot interferometer based on special air cavity for transverse load and strain measurements[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9443-9448.
- [6] Wang Z, Jiang Y, Peng H, *et al.* A temperature-compensated fibre optic extrinsic Fabry-Perot interferometric displacement sensor for fault measurement in geomechanics[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 24(2): 025104.
- [7] Peng Hua, Ma Xiumin, Wang Zhen, *et al.* A fibre optic extrinsic Fabry-Perot interferometer with temperature compensation for fault measurement[J]. *Journal of Geomechanics*, 2013, 19(3): 315-324.
彭华, 马秀敏, 王震, 等. 用于断层测量的温度补偿光纤外腔型法布里-珀罗位移传感器[J]. *地质力学学报*, 2013, 19(3): 315-324.
- [8] Jiang Yi, Tang Caijie. *Optical fiber Fabry-Perot interferometer principle and applications* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
江毅, 唐才杰. *光纤 Fabry-Perot 干涉仪原理及应用* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [9] Wang Dangshu, Wang Xinxia. Theoretical model and simulation of Fabry-Perot fiber temperature sensor [J]. *Instrumentation Technology*, 2014, 21(4): 50-52.
王党树, 王新霞. 法布里-珀罗光纤温度传感器的理论模型与仿真[J]. *仪表技术*, 2014, 21(4): 50-52.
- [10] Wang Yan, Zhao Kai, Liu Jiaping. Optical fiber Bragg grating temperature monitoring based on volume phase grating dispersion demodulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101202.
王彦, 赵凯, 刘加萍. 基于体相位光栅色散解调的布拉格光纤光栅温度监测[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 101202.