

非扫描相关解调光纤法布里-珀罗微腔应变传感器

寇琬莹, 王伟*, 陈海滨, 张天阳, 吕文涛

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 使用单模光纤与空芯熔石英光纤制作了一种高灵敏度的光纤法布里-珀罗(F-P)微腔应变传感器,并采用非扫描相关解调技术实现了这种应变传感器的解调。该传感器由两段垂直切割的单模熔石英光纤穿入一段空芯熔石英光纤制成,其腔长为微米量级。将单模熔石英光纤固定于空芯熔石英光纤两端,实现了光纤 F-P 微腔应变传感器腔长-应变灵敏度的增敏效果。根据其腔长变化范围采用非扫描相关解调技术进行解调,对于初始腔长为 30.129 μm ,空芯熔石英光纤长度为 40 mm 的光纤 F-P 微腔应变传感器,腔长-应变变化灵敏度达到了 14.08 nm/ μe ,线性度可达 99.7%。

关键词 光纤光学; 应变; 光纤传感器; 法布里-珀罗腔; 非扫描相关解调

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170630

Non-Scanning Correlation Demodulation for Fiber-Optic Fabry-Perot Microcavity Strain Sensor

Kou Wanying, Wang Wei*, Chen Haibin, Zhang Tianyang, Lü Wentao

School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract A highly sensitive fiber-optic Fabry-Perot microcavity strain sensor is fabricated using single-mode fibers and a glass capillary tube; the fabricated strain sensor is demodulated using the non-scanning correlation demodulation method. The sensor is fabricated by penetrating two vertically cut single-mode fused silica fibers into a hollow core fused silica fiber and fixing the fibers to both ends of the hollow core fused silica fiber. Thus, the enhanced cavity length-strain sensitivity of the fiber-optic Fabry-Perot microcavity strain sensor is realized. The sensor has a cavity length with micron dimension. The non-scanning correlation demodulation method is used for demodulation based on varying cavity lengths. For a fiber-optic Fabry-Perot microcavity strain sensor with an initial cavity length of 30.129 μm and a hollow core capillary length of 40 mm, the cavity length-strain sensitivity reaches 14.08 nm/ μe and its linearity is up to 99.7%.

Key words fiber optics; strain; fiber-optic sensor; Fabry-Perot cavity; non-scanning correlation demodulation

OCIS codes 060.2330; 060.2370; 060.5060; 060.4510

1 引言

应变测量在各类工程测量和科学实验中有重要地位,从最早的电阻应变片发展至今,应变测量的传感器种类繁多,性能各异。目前,传统的电子式应变传感器越来越难以满足各种复杂环境中应变测量的需求,光纤式应变传感器由于在抗电磁干扰、抗腐

蚀、防爆、耐高温、小型化,以及分布式测量等方面具有天然的优势,受到了学术界与产业界的广泛重视^[1-4]。

典型的光纤应变传感器有:光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器、光纤马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)应变传感器和光纤法布里-珀罗(F-P)腔应变传感器。常规 FBG 应变传感器利用紫外准分子

收稿日期: 2019-05-21; 修回日期: 2019-06-21; 录用日期: 2019-07-02

基金项目: 西安市智能探视感知重点实验室项目(201805061ZD12CG45)、陕西省组合与智能导航重点实验室开放基金(SKLIIN-20180210)

* E-mail: wangwei@xatu.edu.cn

激光器,通过相位掩模技术在光敏光纤上刻写光栅,光纤的固有圆柱结构限制了应变灵敏度的提高,同时,当温度过高(大于 350 °C)时,FBG 结构(在光纤纤芯中通过紫外光写入的周期性折射率变化结构)会被完全擦除,这限制了 FBG 应变传感器在高温条件下的使用^[5-7]。传统的 Mach-Zehnder 应变传感器是在待测环境的影响下,根据传感臂中传输光与参考臂中传输光的相位差引起的干涉条纹的移动量,确定待测环境中物理量的变化,由于该传感器对应变和温度存在交叉敏感问题^[8],所以测量误差较大。

光纤 F-P 腔应变传感器通过在光纤光路中引入 F-P 腔,借助 F-P 腔的干涉效应实现应变传感,这种传感器可以承受较高的温度,制作简单,成本低,并且应变温度交叉敏感性远低于 FBG 应变传感器和 Mach-Zehnder 应变传感器^[9-10]。Villatoro 等^[11]通过电弧放电方法在标准单模光纤(SMF)和光子晶体光纤之间产生了一个直径为 20~58 μm 的球形微腔,该结构的应变灵敏度最高为 2.7 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。Gong 等^[12]利用盐酸和氢氟酸的混合液对掺铒光纤的端面进行化学蚀刻,制造出一个 50 μm 深的微腔,然后把刻蚀后的掺铒光纤熔接到单模光纤上,制备了一种 F-P 微腔干涉应变传感器,其最高灵敏度约为 3.15 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。Liu 等^[13]先将两段单模光纤的端面预处理,并附着折射率匹配液,然后通过熔接的办法在两个光纤端面之间制作一个空气微腔,微腔的应变测量灵敏度可达 6.0 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。Zhao 等^[14]将一段空芯光纤熔接在两段单模光纤中间,形成了一个矩形空气 F-P 腔应变传感器,其应变灵敏度为 2.23 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。2016 年 Costa 等^[15]在两段标准的单模光纤之间熔接了一小段毛细玻璃管,这种 F-P 腔应变传感器的灵敏度可达 9.5 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。李坤等^[16]通过腐蚀多模光纤制作 F-P 腔体,并将该腔体与普通通信单模光纤熔接构成微型非本征型光纤 F-P 干涉应变传感器,并通过实验证明该传感器的灵敏度可达到 0.00095 $\text{nm}/\mu\epsilon$ 。

虽然研究人员已提出多种光纤 F-P 腔应变传感器的结构以及相应的制作方法,然而现有的光纤 F-P 腔应变传感器灵敏度通常只能达到 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 量级^[17-20],F-P 腔的制作工艺难和传感器的灵敏度较低一直是光纤 F-P 应变传感器面临的最大问题^[21]。

本文利用单模光纤和空芯熔石英光纤制备了一种光纤 F-P 微腔应变传感器,利用厘米量级长度的空芯熔石英光纤增加了应变-腔长灵敏度,并根据其

腔长变化范围特点,采用非扫描相关解调技术解算腔长^[22],实现了一种易于制造的高灵敏度的光纤 F-P 微腔应变传感器。

2 光纤 F-P 微腔应变传感器的结构与制作

本文使用的增敏型光纤 F-P 微腔应变传感器,采用空芯熔石英光纤内置单模光纤的结构,是一种典型的非本征型光纤 F-P 传感器,如图 1(a)所示,F-P 干涉腔由两个相互平行的光纤端面形成,为了固定两个分离的标准单模光纤以形成稳定的空气腔,使用紫外固化胶(UV curable adhesive)将两个标准单模光纤封装在几厘米长的空芯熔石英光纤内部。F-P 腔的腔长可随外界应变的改变而改变,单模光纤实时传输腔长变化后的干涉光信号。

光纤 F-P 微腔应变传感器制作步骤如下:1)去除两段单模光纤端面处一定长度的涂覆层,用光纤切割刀切割端面,并对其进行抛光处理,以保证两个光纤端面的绝对平整;2)在显微镜下检测,利用 5 维调节架将两段单模光纤穿入几厘米长的空芯熔石英光纤,并调整两光纤端面的间距使其达到预定长度(几十微米);3)在两段单模光纤尾部使用紫外固化胶将其与空芯熔石英光纤黏结固定。图 1(b)所示为在显微镜下光纤 F-P 微腔应变传感器结构的放大图,图中, L_e 为空芯熔石英光纤有效工作长度, l 为光纤 F-P 微腔传感器空气腔的腔长。

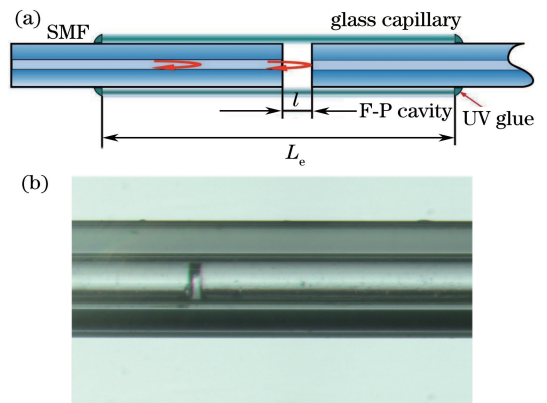


图 1 光纤 F-P 微腔应变传感器的结构。

(a) 示意图;(b) 实物图

Fig. 1 Structure of fiber-optic F-P microcavity strain sensor. (a) Diagram of sensor; (b) fabricated sensor

3 应变测量原理与解调

将光纤 F-P 微腔应变传感器固定于待测物体表面,或直接嵌入至待测物体内部,传感器将随物体

表面或内部结构一起发生应变。假定空芯熔石英光纤有效工作长度为 L_e ，在一定应变作用下，空芯熔石英光纤长度发生变化。F-P 微腔腔长变化直接来自于空芯熔石英光纤长度的变化，假定变化量为 Δl ，则应变值 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L_e}. \quad (1)$$

通过测量 F-P 微腔腔长变化量 Δl ，即可由(1)式得到应变值 ϵ 。

虽然 F-P 微腔腔长只有微米量级，但空芯熔石英光纤长度为数厘米，因此在外部应变作用下，整个空芯熔石英光纤的长度变化都会直接转化为 F-P 微腔的长度变化，从而可以对相同应变条件下的腔长变化产生增敏效果，使得腔长-应变灵敏度得到显

著提升。

显然，这种应变传感器的关键是准确测量 F-P 微腔的腔长变化量 Δl 。为了达到该目的，对 F-P 微腔的绝对腔长进行实时监测，并测量应变前后绝对腔长之差。本文通过采用非扫描相关解调系统，对光纤 F-P 微腔应变传感器的绝对腔长进行解调，从而获取腔长变化量，最终得到应变值，验证这种传感器对应变作用的高灵敏度。

所采用解调实验装置如图 2 所示，高稳定台式 SLED(Self-scanning light emitting device)光源的输出光经过 2×1 光纤耦合器进入光纤 F-P 微腔应变传感器，光在光纤 F-P 微腔应变传感器的 F-P 腔前后的两个光纤端面发生反射，两束反射光发生双光束干涉，干涉光进入非扫描相关探测系统。

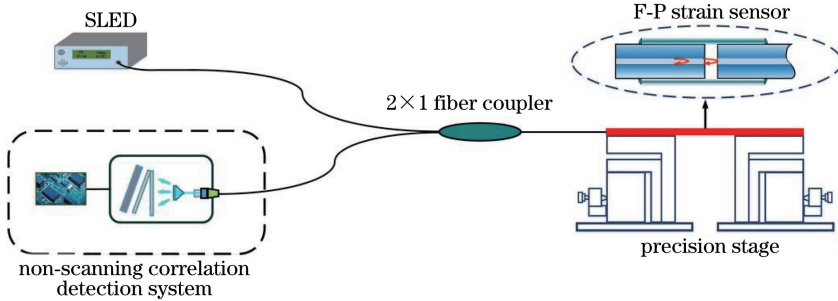


图 2 光纤 F-P 微腔应变传感系统示意图

Fig. 2 Diagram of fiber-optic F-P microcavity strain sensing system

非扫描相关探测系统由光纤准直器、鲍威尔棱镜、空气楔和线阵 CCD 构成。光纤准直器将光纤中出射的发散光转换为准直光束输出，再经鲍威尔棱镜将其转换为线状光照射到空气楔，空气楔内部上下表面镀有半透半反膜，光在其上下表面发生多光束干涉，实现互相关运算，最终透射光照射到线阵 CCD 上。线阵 CCD 采集相关信号的光强信息将光信号转换成电信号。

根据相关解调的原理^[23-24]，可以得到，CCD 光敏面探测到的光强相关干涉信号的光强表达式为

$$I_{\text{OUT}}(x) = \frac{I_0 \eta(x) \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \delta}{1 + R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \delta} \times \frac{(1 - R_3)^2}{1 + R_3^2 - 2R_3 \cos\left(\frac{4\pi x \tan \theta}{\lambda}\right)} f(\lambda) d\lambda}{}, \quad (2)$$

式中： R_1 为 F-P 腔近端面的反射率； R_2 为 F-P 腔远端面的反射率； R_3 为空气楔内表面的反射率； x 为空气楔长边上的任意位置； θ 为构成空气楔两平面间的夹角； I_0 为随波长 λ 分布的光源光强，为常量； $\eta(x)$ 为由光纤

准直器和鲍威尔棱镜引入的强度空间分布；积分号内的第一项表示光纤 F-P 微腔传感器的反射光输出项；积分号内的第二项表示空气楔的透射光输出项； $f(\lambda)$ 表示 SLED 光源的光谱分布函数； λ_{\max} 、 λ_{\min} 分别为光源的最大波长和最小波长； δ 为光波在 F-P 腔中往返一个来回所产生的相位变化，可表示为

$$\delta = \frac{4\pi n l}{\lambda}, \quad (3)$$

式中： n 为光纤 F-P 微腔传感器空气腔的折射率， l 为光纤 F-P 微腔传感器空气腔的腔长。

(2)式所给出的相关干涉信号为一个存在极大值的振荡信号，其极大值出现在光楔厚度与 F-P 微腔长度相互一致的位置。利用线阵 CCD 所探测信号的最大值，可以实现光纤 F-P 微腔腔长的绝对测量，从而由(1)式实现应变测量。

4 实验与分析

光纤 F-P 微腔应变传感系统主要由 SLED 宽带光源、 2×1 光纤耦合器、空芯熔石英光纤内置单模光纤制作而成的光纤 F-P 微腔传感器(其中，单模光纤为美国

康宁生产,型号 G652D,纤芯 $9\ \mu\text{m}$,除去涂覆层后外径为 $125\ \mu\text{m}$;空芯光纤使用的是四川领航光瑞科技有限公司的 LHKX128 型号空芯光纤,该空芯光纤内径为 $128\ \mu\text{m}$,外径为 $320\ \mu\text{m}$)以及由准直器、光楔和光电耦合器形成的非扫描相关探测系统构成。

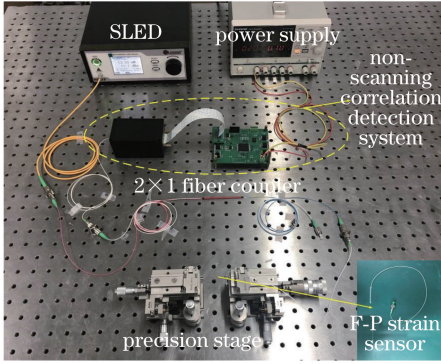


图 3 光纤 F-P 微腔应变传感系统

Fig. 3 Fiber-optic F-P microcavity strain sensing system

通过非扫描式相关解调系统采集光纤 F-P 微腔传感器处于初始状态时空气腔的相关干涉信号,该信号的最小值对应像素点处的光楔厚度与光纤 F-P 微腔传感器的腔长值一致。由于直接从 CCD 采集的相关干涉信号含有光源光强分布和电路高频噪声,所以首先要对 CCD 的输出信号进行滤波处理,得到滤波后的相关干涉信号,再拟合出信号的包络曲线,最后使用重心法精确地定位信号的峰值位置,如图 4 所示,上图实线表示 CCD 输出的原始相关干涉信号,下图点线表示滤波后的信号,下图实线表示相关干涉信号的拟合包络曲线。经实验验证得到光纤 F-P 微腔传感器初始状态时空气腔的峰值位置对应的像素点数为 485,腔长值为 $32.129\ \mu\text{m}$ 。

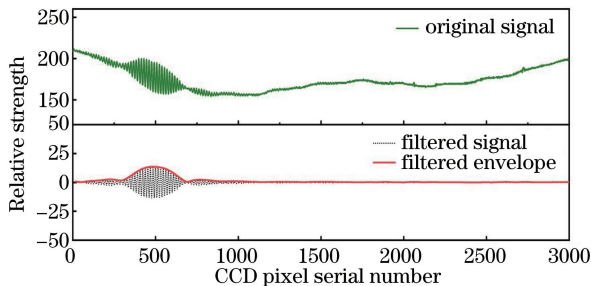


图 4 相关干涉信号的峰值定位

Fig. 4 Peak positioning of correlation interference signal

为了分析应变对相关干涉信号(即腔长)的影响,通过实验得到了三种不同应变 $0, 2000, 3000\ \mu\text{E}$ 对应的相关干涉信号,如图 5 所示,三种不同应变对应的干涉相关信号峰值像素序列依次为 485, 1446, 2333, 相应的腔长分别为 $31.129, 59.099,$

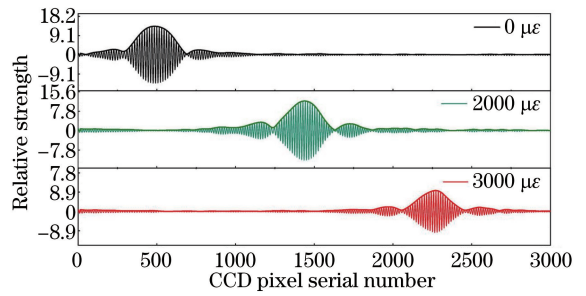


图 5 不同应变下的相关干涉信号

Fig. 5 Correlation interference signals under different strains

$74.349\ \mu\text{m}$,显然,峰值处于三个不同的位置。可以看出,在施加应变过程中,相关干涉信号从左到右连续不断地改变其位置,即光楔的厚度增大的方向,也就是说,光纤 F-P 微腔应变传感器的空气腔长度随着应变的增加在增大。

图 6 所示为初始腔长为 $30.129\ \mu\text{m}$,空芯熔石英光纤为 $40\ \text{mm}$ 的光纤 F-P 微腔应变传感器在不同的应变下测得的腔长值,其中点表示实测值,实线是通过实测值得到的拟合直线。从图中可以看出腔长和应变呈线性关系,通过线性拟合,得到应变和腔长的关系表达式为 $d = 0.02842x + 17.99425(\mu\text{m})$ 。腔长变化量的灵敏度为 $14.08\ \text{nm}/\mu\text{E}$,线性度可达 99.7% ,且尚未出现非线性的趋势,这说明该传感器的测量范围远大于 $3000\ \mu\text{E}$ 。由于进行非扫描相关解调时,实验中使用的 CCD 的像素点为 3648 个,为了提高解调系统的测量精度,使用的光楔厚度范围为 $20\sim 80\ \mu\text{m}$,即腔长测量范围为 $20\sim 80\ \mu\text{m}$ 。限于实验可测腔长范围,应变测量范围为 $0\sim 3000\ \mu\text{E}$,该应变测量范围不能揭示本文设计的传感器的极限使用范围。

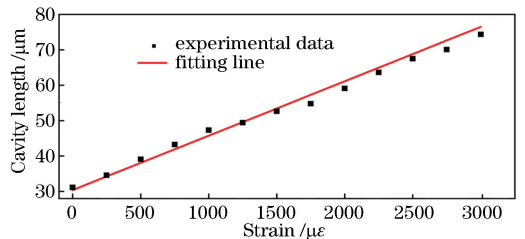


图 6 腔长-应变的关系曲线

Fig. 6 Relationship between cavity length and strain

5 结 论

提出了一种非本征型光纤 F-P 微腔应变传感器,该光纤 F-P 传感器由两段单模熔石英光纤穿入一段空芯熔石英光纤中构成,单模光纤通过紫外固

化胶固定于空芯熔石英光纤两端,通过较长空芯熔石英光纤对应变的响应,实现了光纤 F-P 微腔腔长-应变灵敏度增敏效果,并根据其变化范围采用非扫描相关解调技术进行解调。实验结果表明,对于初始腔长为 30.129 μm ,空芯熔石英光纤长度为 40 mm 的光纤 F-P 微腔应变传感器,腔长-应变变化灵敏度达到了 14.08 $\text{nm}/\mu\epsilon$,线性度高达 99.7%,应变测量范围在 3000 $\mu\epsilon$ 以上,实现了一种易于制造的高灵敏度的光纤 F-P 微腔应变传感器。

参 考 文 献

- [1] Pevac S, Donlagic D. All-fiber, long-active-length Fabry-Perot strain sensor[J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 15641-15651.
- [2] Ding X D, Zhang Y M, Song Y M, *et al.* Response characteristics of pure-quartz-core fiber Bragg grating under high temperature strain[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106003.
丁旭东, 张钰民, 宋言明, 等. 纯石英芯光纤光栅高温应变响应特性[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106003.
- [3] Ferreira M S, Bierlich J, Kobelke J, *et al.* Towards the control of highly sensitive Fabry-Pérot strain sensor based on hollow-core ring photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 21946-21952.
- [4] Peng J, Feng W L, Yang X Z, *et al.* Dual Fabry-Pérot interferometric carbon monoxide sensor based on the PANI/Co₃O₄ sensitive membrane-coated fibre tip[J]. *Zeitschrift Für Naturforschung A*, 2019, 74(2): 101-107.
- [5] Wang Y H, Zhang M Y, Zhang C W, *et al.* Strain sensing measurement technology for fiber Bragg grating with holder type temperature self-compensation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 050605.
王永洪, 张明义, 张春巍, 等. 夹持式温度自补偿光纤布拉格光栅应变传感测试技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 050605.
- [6] Kaur A, Watkins S E, Huang J, *et al.* Microcavity strain sensor for high temperature applications[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(1): 017105.
- [7] Tan Z, Liao C R, Liu S, *et al.* Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1206007.
谭展, 廖常锐, 刘申, 等. 基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1206007.
- [8] Ma S Z, Feng W L, Peng Z Q, *et al.* Carbon monoxide gas sensor based on CuO/PANI coated photonic crystal fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 050603.
马诗章, 冯文林, 彭志清, 等. 基于氧化铜/聚苯胺包覆光子晶体光纤的一氧化碳传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 050603.
- [9] Yin C C, Cao Z G, Zhang Z, *et al.* Temperature-independent ultrasensitive Fabry-Perot all-fiber strain sensor based on a bubble-expanded microcavity[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4): 6802009.
- [10] Ferreira M S, Roriz P, Bierlich J, *et al.* Fabry-Perot cavity based on silica tube for strain sensing at high temperatures[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 16063-16070.
- [11] Villatoro J, Finazzi V, Coviello G, *et al.* Photonic-crystal-fiber-enabled micro-Fabry-Perot interferometer[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(16): 2441-2443.
- [12] Gong Y, Rao Y J, Guo Y, *et al.* Temperature-insensitive micro Fabry-Pérot strain sensor fabricated by chemically etching Er-doped fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(22): 1725-1727.
- [13] Liu S, Wang Y P, Liao C R, *et al.* High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry-Perot interferometer[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2121-2124.
- [14] Zhao Y, Chen M Q, Lü R Q, *et al.* In-fiber rectangular air Fabry-Perot strain sensor based on high-precision fiber cutting platform [J]. *Optics Communications*, 2017, 384: 107-110.
- [15] Costa G K B, Gouvêa P M P, Soares L M B, *et al.* In-fiber Fabry-Perot interferometer for strain and magnetic field sensing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14690-14696.
- [16] Li K, Wen H Q, Li H. A study on miniature interferometer strain sensor based on EFPI[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3282-3285.
李坤, 文泓桥, 李慧. 光纤法布里-珀罗结构的微型应变传感器的研制[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3282-3285.
- [17] Chen W M, Lei X H, Zhang W, *et al.* Recent progress of optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328010.
陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里-珀罗传感器

- 研究进展[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328010.
- [18] Favero F C, Araujo L, Bouwmans G, *et al.* Spheroidal Fabry-Perot microcavities in optical fibers for high-sensitivity sensing [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7112-7118.
- [19] Tian K, Farrell G, Wang X F, *et al.* Strain sensor based on gourd-shaped single-mode-multimode-single-mode hybrid optical fibre structure [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 18885-18896.
- [20] Jia P G, Fang G C, Li Z, *et al.* "Bellows spring-shaped" ultrasensitive fiber-optic Fabry-Perot interferometric strain sensor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 277: 85-91.
- [21] Liu C C, Zou X, Zhou Z X. Study of high-precision dynamic optical fiber strain sensing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(11): 1106007.
刘冲冲, 邹翔, 周正仙. 高精度动态光纤应变传感研究[J]. *光子学报*, 2016, 45(11): 1106007.
- [22] Zhang Y, Wang N K, Chen H B, *et al.* Non-scanning correlation demodulation system for compound optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 130603.
张瑶, 王可宁, 陈海滨, 等. 复合式光纤法布里-珀罗传感器非扫描相关解调系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 130603.
- [23] Wang W, Tang Y, Zhang X X, *et al.* Elliptical-fitting cavity length demodulation algorithm for compound fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor with short cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0606001.
王伟, 唐瑛, 张雄星, 等. 短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器椭圆拟合腔长解调算法[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0606001.
- [24] Li J S, Zhu Y, Wang N, *et al.* An algorithm for improving the signal stability of the fast fiber optic Fabry-Perot non-scanning correlation demodulation system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 0106005.
李钧寿, 朱永, 王宁, 等. 一种提高快速光纤法-珀非扫描式相关解调系统信号稳定性的算法[J]. *光子学报*, 2015, 44(1): 0106005.