

# 复合式光纤法布里-珀罗传感器非扫描相关解调系统

张瑶, 王可宁, 陈海滨, 陈青青, 王伟\*

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 为提高复合式光纤法布里-珀罗传感器的相关解调分辨率, 提出了一种基于新型复合式光楔的非扫描相关解调系统。根据所解调复合式光纤法布里-珀罗传感器各腔体光学厚度变化范围, 沿线阵 CCD 像素点排布方向, 设计了分段式不同倾角和厚度范围的空气间隙式光楔结构, 实现了多个法布里-珀罗腔腔长的复合同步解调。针对基底腔和空气腔腔长分别为  $600\ \mu\text{m}$  和  $80\ \mu\text{m}$  的复合式光纤法布里-珀罗传感器, 设计了复合式光楔, 仿真并分析了其解调性能。结果表明, 采用基于复合式光楔的非扫描相关解调方案, 可以实现光学厚度差异较大的多法布里-珀罗腔构成的复合式光纤法布里-珀罗传感器的同步高精度解调, 腔长解调分辨率优于单光楔解调。

**关键词** 光纤光学; 光纤法布里-珀罗传感器; 光楔; 非扫描相关解调; 相关干涉信号

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.130603

## Non-Scanning Correlation Demodulation System for Compound Optical Fiber Fabry-Perot Sensors

Zhang Yao, Wang Kening, Chen Haibin, Chen Qingqing, Wang Wei\*

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

**Abstract** A new type of non-scanning correlation demodulation system based on a new compound optical wedge structure is introduced in order to improve the correlation demodulation resolution of compound fiber Fabry-Perot (FP) sensors. Based on the desired demodulation range of the optical thickness of each cavity of the compound fiber FP sensors along the pixel arrangement direction of the linear array CCD, an air-gap optical wedge structure having different tilt angles and thickness ranges is designed and adopted to achieve the compound synchronous demodulation of multiple FP cavity lengths. The demodulation performance of the designed compound optical wedge structure is simulated and analyzed for compound fiber FP sensors having basal and air-cavity lengths of  $600\ \mu\text{m}$  and  $80\ \mu\text{m}$ , respectively. Simulation results show that such sensors with multiple FP cavities and different optical thicknesses are demodulated synchronously and accurately using the proposed non-scanning correlation demodulation system based on the compound optical wedge structure. The demodulation resolution for a compound fiber FP sensor can be better than that of a single optical wedge. This conclusion is particularly true for a compound fiber FP sensors comprising cavities with large cavity length differences.

**Key words** fiber optics; fiber Fabry-Perot sensors; optical wedge; non-scanning correlation demodulation; correlation interference signal

**OCIS codes** 060.2330; 260.3160; 060.2310; 060.2370

## 1 引言

法布里-珀罗腔光纤传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、动态响应范围大和抗电磁干扰等优

点<sup>[1-3]</sup>, 且被广泛应用于航空航天、桥梁、油田和大坝等领域<sup>[4-5]</sup>, 通过解调法布里-珀罗腔长变化信息, 可实现压力、温度、应变、曲率等不同物理量的测量。

光纤法布里-珀罗传感器一般采用两个平行反射

收稿日期: 2019-01-14; 修回日期: 2019-01-23; 录用日期: 2019-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(61501363)、陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室开放基金(ZSKJ201703)、西安市智能探视感知重点实验室项目(201805061ZD12CG45)

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

面构成单法布里-珀罗腔结构。这类光纤法布里-珀罗传感器的解调技术已经成熟,主要的解调方法有强度解调<sup>[6]</sup>和相位解调<sup>[7]</sup>。强度解调容易受光源功率波动、光路损耗及外部扰动等影响,精度低、稳定性差。相位解调主要包括条纹计数法<sup>[8]</sup>、傅里叶变换法<sup>[9-10]</sup>和相关解调法<sup>[11-13]</sup>。条纹计数法和傅里叶变换法需要昂贵的光谱仪,成本较高。相关解调法相对成本较低,可分为扫描式解调与非扫描式解调,二者均利用腔长匹配原理进行解调,但前者从时间上采取机械式扫描,体积大;后者从空间上利用光楔夹角,并采取非扫描方式,解调原理是对光楔与光纤法布里-珀罗传感器的反射光进行互相关运算,实现对光纤法布里-珀罗传感器的腔长解算,该方法无机械运动部件、结构紧凑,相比于扫描式相关解调更具优势。

随着技术的逐渐成熟,光纤法布里-珀罗传感器向可实现多参量测量的方向发展,为满足多参量测量的需要,需将多个不同腔长、不同结构的光纤法布里-珀罗传感器串联或并联,或直接采用多个法布里-珀罗腔构成的复合式传感结构,并通过解调光路的复用,降低整个传感系统的尺寸、成本与复杂度。使用微机电系统(MEMS)技术制作的非本征型空气隙复合式光纤法布里-珀罗传感器<sup>[14-16]</sup>,结构小巧、性能稳定、可批量化生产,非常适合气体或液体的压力测量,并可通过对基底腔腔长的同步解算实现温度传感。此类传感器即为空气腔与基底腔构成的复合式法布里-珀罗腔结构,空气腔与基底腔通常因为腔长差别较大而存在较大的光程差。

以往采用的非扫描相关解调<sup>[17]</sup>通常仅针对光纤单法布里-珀罗腔传感器<sup>[18]</sup>,虽然也可以用于复合腔解调,但该解调方式存在的问题如下:在解调过程中,光楔的最大厚度必须大于复合式法布里-珀罗腔的最长法布里-珀罗腔的光学厚度,要求光楔具有较大的倾角;非扫描相关解调系统中使用电荷耦合元件(CCD)线阵的像素数量有限,像素数量与单元尺寸限制了解调精度与解调分辨率。这使得非扫描相关解调装置解调时法布里-珀罗腔腔长的解调范围与解调精度之间存在矛盾,无法同时高精度解调复合式光纤法布里-珀罗传感器中两个光学厚度相差较大的法布里-珀罗腔,使用范围受限。

为解决上述问题,根据相关解调原理,本文提出了一种基于新型复合式光楔的非扫描相关解调方案,并进行了深入的理论与仿真计算分析,证明了该方法在复合式光纤法布里-珀罗传感器解调中的优越性与可行性。

## 2 基于复合式光楔的非扫描相关解调原理

当外界物理量作用于光纤法布里-珀罗传感器时,其腔长发生改变,引起光程差变化。根据腔长匹配原理,采用互相关元件光楔对法布里-珀罗腔的光学厚度进行空间扫描,当光楔厚度与光纤法布里-珀罗腔的光学厚度相等时,相关干涉信号输出光强最大,即输出光强最大点所对应的光楔厚度即为此时法布里-珀罗腔的光学厚度,再考虑法布里-珀罗腔内填充介质的折射率,可以计算得到腔长,从而实现光纤法布里-珀罗传感器的解调。

基于新型复合式光楔的非扫描相关解调方案,所使用的原理相同,但采用的是新设计的分段式不同倾角和厚度范围的空气间隙式光楔结构,称之为复合式光楔。

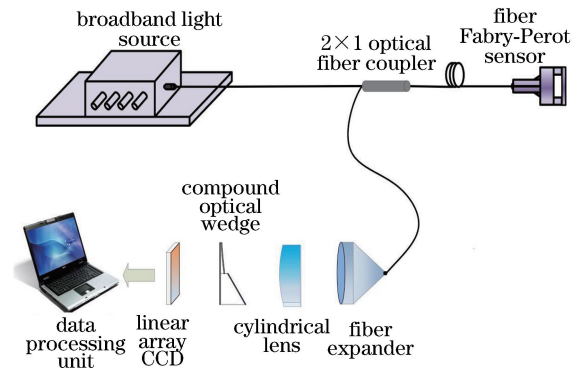


图1 复合式光纤法布里-珀罗传感器非扫描相关解调装置

Fig. 1 Non-scanning correlation demodulation system for compound fiber Fabry-Perot sensors

实验解调装置如图1所示,光源输出3 dB带宽为60 nm的宽带光,耦合进入2×1光纤耦合器的一个输入端口,宽带光经由2×1光纤耦合器的输出端口进入复合式光纤法布里-珀罗传感器,并发生多光束干涉,携带两个腔体腔长信息的部分宽带光被反射并沿原光路返回,经过2×1光纤耦合器后,部分光经过光纤扩束器和柱透镜转换为线状光斑,该线状光斑穿过复合式光楔,由于复合式光楔前后反射面的反射而再次发生多光束干涉,经过复合式光楔后,线状光斑的光强受到调制,调制后的光由线阵CCD接收,再由数据处理单元进行处理。

采用宽带光源,光源在空间和光谱上呈高斯分布,则线阵CCD上所探测的输出光强<sup>[19]</sup>可以表示为

$$I_{out_i}(x_i) = \exp\left[-\frac{(x-x_p)^2}{B_x^2}\right] I_0 \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \frac{4\pi n_i L_i}{\lambda}}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \frac{4\pi n_i L_i}{\lambda}} \cdot \frac{(1 - R_3)^2}{1 + R_3^2 - 2R_3 \cos \frac{4\pi(x_i \tan \theta_i + h_i)}{\lambda}} \cdot \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{B_\lambda^2}\right] d\lambda, \quad (1)$$

式中:第一项为宽带光源在空间上的高斯分布函数;第二项为光纤法布里-珀罗传感器的反射输出项;第三项为光楔的透射输出项;第四项为宽带光源在光谱上的高斯分布函数。其中, $R_1$ 、 $R_2$  分别为空气腔近端面和远端面的端面反射率; $L_i$  为法布里-珀罗腔的腔长,当  $i=1$  时,表示长腔长,当  $i=2$  时,表示短腔长; $n_i$  为法布里-珀罗腔介质折射率; $R_3$  为光楔内表面的反射率; $x_i$  为光楔短边上的任意位置; $\theta_i$  为构成光楔两平面的夹角; $h_i$  为复合式光楔的初始厚度; $I_0$  为光强常量; $\lambda_p$  为宽带光源光谱的中心波长; $\lambda$  为光源的输出波长; $B_\lambda$  为宽带光源光谱带宽所决定的高斯函数半峰全宽; $x_p$  为宽带光源的中心位置; $B_x$  为宽带光源空间带宽所决定的高斯函数的半峰全宽<sup>[20]</sup>。

由(1)式可知,当满足

$$x_i \tan \theta_i + h_i = n_i L_i, \quad (2)$$

即光楔厚度与法布里-珀罗腔光学厚度相等时,在光楔  $x_i$  位置处线阵 CCD 可探测到相关干涉信号光强的最大值。

因此,解调时只需索引相关干涉信号光强最大值对应的光楔厚度,以及对应法布里-珀罗腔腔体材料的折射率  $n_i$ ,即可获得此刻的腔长值  $L_i$ ,实现非扫描式相关解调。

由于线阵 CCD 像素尺寸有限,在不引入任何附加算法的前提下,相关干涉信号光强最大值位置的分辨率由所使用线阵 CCD 的尺寸决定,假定线阵 CCD 像素单元尺寸为  $\Delta x_i$ ,则根据(2)式可得,光纤法布里-珀罗传感器中第  $i$  个法布里-珀罗腔的腔长解调分辨率为

$$\Delta L_i = \frac{\Delta x_i \tan \theta_i}{n_i}. \quad (3)$$

显然,在不考虑任何附加算法的前提下,CCD 线阵尺寸和光楔倾角决定了腔长解调分辨率。利用分段式的复合式光楔,根据待测复合式法布里-珀罗腔传感器中各法布里-珀罗腔腔长变化范围,优化各

段长度与倾角大小,可以实现各法布里-珀罗腔腔长解调分辨率的最优化。

### 3 复合式光楔设计

以用于双法布里-珀罗腔复合式光纤法布里-珀罗传感器解调的复合式光楔为例,介绍复合式光楔的设计与制作。所提出的复合式光楔由三片平面光学玻璃所夹成的空气隙组成,平面光学玻璃外侧镀宽带减反射膜,内侧镀部分反射膜。一片光学玻璃作为复合式光楔的基底,根据不同腔长法布里-珀罗腔腔体的解调需求,选择不同厚度的离型膜作为支撑,置于基底与另外两片平面光学玻璃之间,搭建不同倾角与厚度范围的斜面结构。该结构分为两部分:第一部分厚度范围与倾角较小,用于解调复合式光纤法布里-珀罗传感器的短腔长法布里-珀罗腔;第二部分厚度范围与倾角较大,用于解调复合式光纤法布里-珀罗传感器的长腔长法布里-珀罗腔。两部分光楔可根据需解调复合式光纤法布里-珀罗传感器的两个法布里-珀罗腔的腔长变化范围,综合考虑解调范围与解调分辨率,分段调整光楔的厚度范围。将厚度范围调整后的光楔用黏结剂固定,构成复合式光楔。具体结构如图 2 所示。 $0 \sim x_1$  为短腔长法布里-珀罗腔相关干涉信号极大值出现的位置范围,基底光学玻璃与第二片玻璃搭建成的厚度范围为  $h_1 \sim h_3$ ; $x_1 \sim x_2$  为长腔长法布里-珀罗腔相关干涉信号极大值出现的位置范围,基底光学玻璃与第三片玻璃搭建成的厚度范围为  $h_2 \sim h_4$ 。其中, $h_1$  和  $h_3$  分别为第一段光楔左端与右端的厚度,即第二片光学玻璃左端与右端内表面距基底玻璃内表面的距离; $h_2$  和  $h_4$  分别为第二段光楔左端与右端的厚度,即第三片光学玻璃左端与右端内表面距基底玻璃内表面的距离。

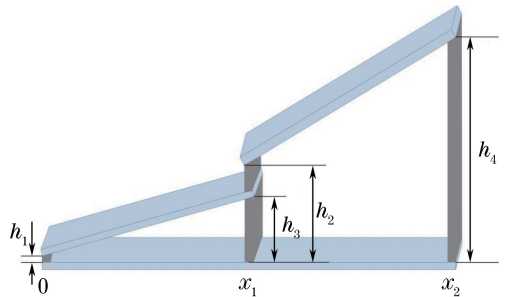


图 2 复合式光楔结构

Fig. 2 Structure of compound optical wedge

采用该结构,不同光学厚度(或腔长)的法布里-珀罗腔的相关干涉信号会分开出现在复合式光楔各

段范围内,各段倾角与厚度范围可以灵活调整,可以避免不同法布里-珀罗腔相关干涉信号之间的相互干扰,还可避免复合式光纤法布里-珀罗传感器各法布里-珀罗腔光学厚度相差较大时,为解调较大光学厚度的法布里-珀罗腔而对短腔长法布里-珀罗腔腔长解调分辨率做出的牺牲。使用该解调方案可以实现对光学厚度相差较大的法布里-珀罗腔构成的复合式光纤法布里-珀罗传感器的高精度解调。

## 4 仿真分析

蓝宝石压力传感器具有耐热性好、弹性强度高和绝缘性好等优点,被广泛应用于气压传动设备、石油勘探和船舶等大量压力测量应用环境中。针对图3所示蓝宝石材料的复合式光纤法布里-珀罗压力传感器进行解调,宽带光通过光纤耦合至复合式光纤法布里-珀罗压力传感器,分别在基底腔和空气腔的两个端面发生双光束干涉,即返回光信息的同时携带长腔长和短腔长的干涉信息。

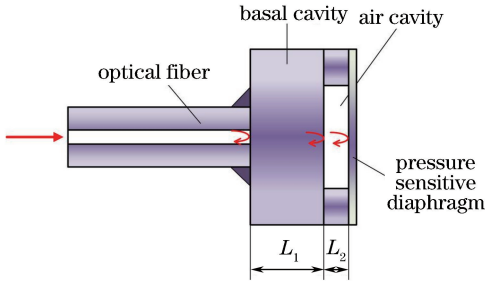


图3 复合式光纤法布里-珀罗腔压力传感器

Fig. 3 Compound fiber Fabry-Perot pressure sensor

由于该基底腔介质材料为蓝宝石,折射率为1.77,初始腔长 $L_1 = 600 \mu\text{m}$ ,考虑腔长匹配中折射率的影响,初始腔长为 $600 \mu\text{m}$ 的基底腔对应光楔匹配厚度为 $1062 \mu\text{m}$ ;空气腔折射率为1,初始腔长 $L_2 = 80 \mu\text{m}$ ,则对应光楔匹配厚度为 $80 \mu\text{m}$ 。采用图2所示的复合式光楔解调,总长度与线阵CCD感光范围长度相同,为3 cm,假定第一部分采用厚度范围为 $70 \sim 90 \mu\text{m}$ 、长度为1.5 cm的光楔解调初始腔长为 $80 \mu\text{m}$ 的空气腔,第二部分采用厚度范围为 $1040 \sim 1080 \mu\text{m}$ 、长度为1.5 cm的光楔解调初始腔长为 $600 \mu\text{m}$ 的基底腔。

针对所提出的新型复合式光楔结构的解调特性,利用(1)式的数学模型进行仿真。其中,法布里-珀罗腔端面反射率 $R_1 = R_2 = 0.077$ ,光楔内表面反射率 $R_3 = 0.5$ , $I_0 = 1$ ,宽带光源采用超辐射发光二极管(SLED),中心波长 $\lambda_p = 850 \text{ nm}$ ,半峰全宽

$B_\lambda = 60 \text{ nm}$ ,光源中心位置为光楔的中心,则 $x_p = 1.5 \text{ cm}$ ,空间半峰全宽 $B_x = 1.5 \text{ cm}$ 。为避免光谱截断对仿真结果的影响,选择的仿真计算光谱范围较宽,覆盖 $650 \sim 1050 \text{ nm}$ 。获得复合式法布里-珀罗腔在光楔不同位置处的光强分布曲线,如图4所示,其中,左边干涉条纹为空气腔的相关干涉信号,右边干涉条纹为基底腔的相关干涉信号。

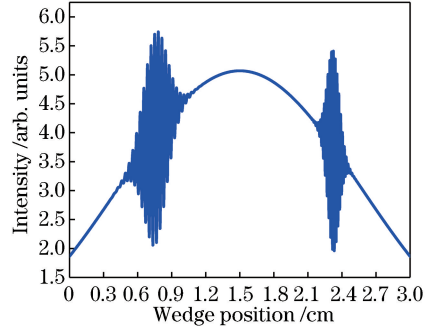


图4 复合式光纤法布里-珀罗传感器相关干涉信号在光楔不同位置处的光强分布

Fig. 4 Light intensity distribution of correlation interferometric signal at different positions of optical wedge for compound fiber optic Fabry-Perot sensor

根据非扫描相关解调原理及(2)式,相关干涉信号峰值位置对应的楔厚为此时的法布里-珀罗腔对应的光学厚度。对于固定的光楔参数,腔长 $L_i$ 增大时,相关干涉信号峰值对应应在光楔上的位置 $x_i$ 也会随之增大。为了验证其正确性,仿真分析了基底腔及空气腔初始腔长分别为 $600 \mu\text{m}$ 和 $80 \mu\text{m}$ 时,相关干涉信号光强分布曲线峰值位置随腔长的变化趋势,如图5(a)、(b)所示。可以看出,当腔长逐渐增大时,相关干涉信号峰值位置向光楔厚度增加的方向移动,即对应应在光楔上的位置逐渐增大,仿真结果与理论分析一致。

进一步,给出了基底腔、空气腔腔长与相关干涉信号峰值位置的关系曲线,如图6(a)、(b)所示。可以看出,两者呈良好的线性关系。

假定所考虑感光长度为3 cm的线阵CCD的像素数量为3648,单个像素单元宽度为 $8 \mu\text{m}$ (如东芝公司的TCD1304DG线阵CCD)。不考虑任何附加算法,若采用单一光楔对复合式光纤法布里-珀罗传感器进行解调,光楔厚度变化范围为 $0 \sim 1080 \mu\text{m}$ ,根据(3)式,单位像素点对应的腔长分辨率为 $296 \text{ nm}$ 。同样,若采用本研究设计的复合式光楔进行解调,设空气腔第一段光楔厚度变化范围为 $70 \sim 90 \mu\text{m}$ ,单位像素点对应的腔长分辨率为 $11.0 \text{ nm}$ ;

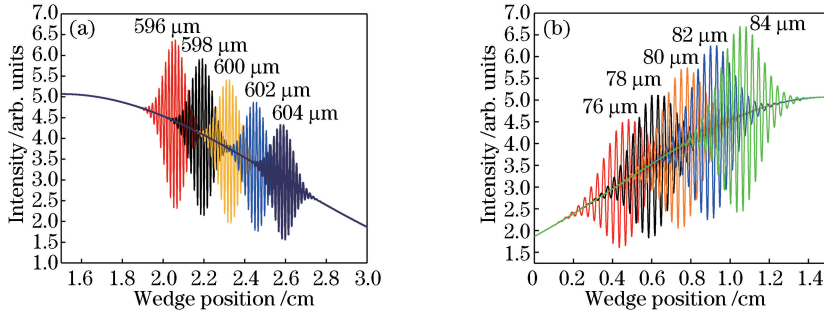


图 5 腔长变化时相关干涉信号的光强分布曲线。(a)基底腔;(b)空气腔

Fig. 5 Light intensity distributions of correlation interference signal with change of cavity length.

(a) Basal cavity; (b) air cavity

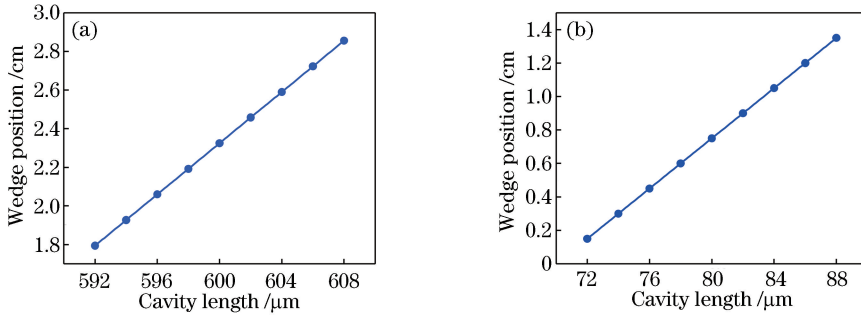


图 6 腔长与相关干涉信号峰值位置的对应关系。(a)基底腔;(b)空气腔

Fig. 6 Relationship between cavity length and peak position of correlated interference signal. (a) Basal cavity; (b) air cavity

设基底腔第二段光楔厚度变化范围为  $1040 \sim 1080 \mu\text{m}$ ,同时考虑基底材料的折射率,单位像素点对应的腔长分辨率为  $12.4 \text{ nm}$ 。显然,对于腔长相差较大的复合式光纤法布里-珀罗传感器而言,采用复合式光楔可以显著提高腔长的解调分辨率。

## 5 结 论

针对复合式光纤法布里-珀罗传感器的解调,提出了一种基于新型复合式光楔的非扫描相关解调方案。利用非扫描相关解调原理,采用两段倾角与厚度范围不同的复合式光楔,对基底腔为  $600 \mu\text{m}$ 、空气腔为  $80 \mu\text{m}$  的复合式光纤法布里-珀罗传感器进行解调仿真,进行了深入的理论计算与分析,实现了对双腔长复合式光纤法布里-珀罗传感器的同步解调,并大幅提高了腔长分辨率,证明了该方法在复合式光纤法布里-珀罗传感器解调中的优越性与可行性。该结构解决了传统非扫描相关解调技术被应用到两个法布里-珀罗腔腔长或光程差相差较大的复合式光纤法布里-珀罗传感器时测量范围与解调分辨率之间的矛盾,可为复合式光纤法布里-珀罗传感器的高精度解调提供借鉴。

## 参 考 文 献

- [1] Han M, Zhang Y, Shen F B, *et al.* Signal-processing algorithm for white-light optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. Optics Letters, 2004, 29(15): 1736-1738.
- [2] Liu T, Fernando G F. A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry-Perot sensor system for strain and displacement measurements [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(3): 1275-1278.
- [3] Duan D W, Rao Y J, Zhu T, *et al.* Study of fabrication and application of hollow-core photonic crystal fiber based in-line fiber-optic etalon [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(10): 2554-2559.  
段德稳, 饶云江, 朱涛, 等. 基于空芯光子晶体光纤的在线法-珀标准件制作与应用 [J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2554-2559.
- [4] Krisch H, Fernandes N, Gossner K, *et al.* High-temperature fiber-optic sensor for low-power measurement of wide dynamic strain using interferometric techniques and analog/DSP methods [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 33-38.

- [5] Liu D, Jiang J F, Liu T G, *et al.* Research on data acquisition of optical fiber F-P interferometer sensing signal with wavelet transform [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2012, 23(1): 79-82.  
刘盾, 江俊峰, 刘铁根, 等. 光纤 F-P 传感低相干信号的小波提取研究 [J]. 光电子 • 激光, 2012, 23(1): 79-82.
- [6] Song N F, Cui R Q, Yang Y J, *et al.* Fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer sensors with multi-wavelength intensity demodulation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 470: 630-635.
- [7] Liao H, Lu P, Liu L, *et al.* Phase demodulation of short-cavity Fabry-Perot interferometric acoustic sensors with two wavelengths [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 7102207.
- [8] Onodera R, Sakuyama M, Ishii Y. Fringe counting method for synthetic phase with frequency-modulated laser diodes [J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(9): 093104.
- [9] Tao J, Chen Y L, Lu J Q. Method of the cavity length demodulation for optical fiber F-P sensors based on sparse fast Fourier transform [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0510001.  
陶珺, 陈杨黎, 卢景琦. 基于稀疏快速傅里叶变换的光纤 F-P 传感器腔长解调方法 [J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0510001.
- [10] Jiang Y. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2): 75-77.
- [11] Rao Y J. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. Optical Fiber Technology, 2006, 12(3): 227-237.
- [12] Liu H Y, Miller D W. System model identification of a Fabry-Perot fiber optic sensing system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(3): 413-419.
- [13] Song N F, Song P, Song J M, *et al.* Design of apochromatic optical path in polarization cross-correlation demodulation system based on fiber Fabry-Perot sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1206005.  
宋凝芳, 宋鹏, 宋镜明, 等. 光纤法布里-珀罗传感器偏振互相关解调系统的复消色差光路设计 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1206005.
- [14] Li M, Wang M, Li H P. Optical MEMS pressure sensor based on Fabry-Perot interferometry [J]. Optics Express, 2006, 14(4): 1497-1504.
- [15] Zhang W H, Jiang J F, Wang S, *et al.* Fiber-optic Fabry-Perot high-pressure sensor for marine applications [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206001.  
张伟航, 江俊峰, 王双, 等. 面向海洋应用的光纤法布里-珀罗高压传感器 [J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206001.
- [16] Jiang X F, Lin C, Xie H H, *et al.* Optic fiber MEMS pressure sensor based on white light interferometry [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(10): 1006003.  
江小峰, 林春, 谢海鹤, 等. 白光干涉解调光纤 MEMS 压力传感器 [J]. 光子学报, 2014, 43(10): 1006003.
- [17] Chen Q Q, Tang Y, Wang K N, *et al.* Characteristic analysis of correlation interference signals in optical wedge type fiber Fabry-Perot sensors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110603.  
陈青青, 唐瑛, 王可宁, 等. 光楔式光纤法布里-珀罗传感器相关干涉信号特性分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110603.
- [18] 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.
- [19] Zhao Y, Wang D H. Mathematical model of optical wedges for cross-correlation demodulation of cavity length of optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0106007.  
赵艳, 王代华. 用于光纤法布里-珀罗传感器腔长互相关解调的光楔的数学模型研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0106007.
- [20] 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.