

# 光纤法布里-珀罗传感器研究进展

陈伟民<sup>1,2</sup>, 雷小华<sup>1,2</sup>, 张伟<sup>1,2</sup>, 刘显明<sup>1,2</sup>, 廖昌荣<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

<sup>2</sup>重庆大学光电工程学院, 重庆 400044

**摘要** 光纤法布里-珀罗传感器作为一种干涉型的光纤传感器,近 10 余年来进入了高速发展期,在航空航天、石油化工、能源、土木和其他特殊行业得到应用,尤其是在高温、高压、强辐射、狭小空间等特殊工作环境下展现出独特优势。从光纤法布里-珀罗传感器的基本原理出发,回顾了其发展历史,并分别从传感器、解调方法、硬件系统、应用技术等几个方面详细介绍了近期的技术进展以及未来的发展趋势。

**关键词** 传感器; 光纤光学; 法布里-珀罗腔; 解调算法; 硬件解调

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328010

## Recent Progress of Optical Fiber Fabry-Perot Sensors

Chen Weimin<sup>1,2</sup>, Lei Xiaohua<sup>1,2</sup>, Zhang Wei<sup>1,2</sup>, Liu Xianming<sup>1,2</sup>, Liao Changrong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>The Key Laboratory for Optoelectronic Technology and Systems of Ministry of Education,

Chongqing University, Chongqing 400044, China;

<sup>2</sup>College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University,

Chongqing 400044, China

**Abstract** The Fabry-Perot interferometer based fiber optical sensor (FP sensor) was first known in the early of 1980 s. It has been experienced high speed development in recent 10 years and gradually shows the superiority in special applications such as aviation, oil exploration, source of energy and civil engineering. Because it has excellent reliability, and high sensitivity in harsh environments such as high temperature, high pressure, strong radiation and narrow space. This paper firstly reviews the history of fiber Fabry-Perot sensor, then introduces its recent progress and future development trends from the aspects of sensors, demodulation methods, hardware systems and applications based on the principle of fiber optical sensor.

**Key words** sensors; fiber optics; Fabry-Perot cavity; demodulation algorithm; hardware demodulation

**OCIS codes** 280.4788; 060.2310; 120.2230; 220.4000; 060.2370; 070.4790

## 1 引 言

光纤法布里-珀罗(F-P)传感器作为光纤传感器家族的一员,分别由 Franzen、Yoshino 等多位学者于 20 世纪 80 年代初提出的<sup>[1-4]</sup>。相比其他光纤传感器,其具有特殊的传感器结构,在耐受恶劣工作环境、长期稳定性、结构尺寸等方面具有独特的优势。近 20 年来发展迅速,并应用在航空航天、石油化工、能源、土木等特殊行业。本文从其基本原理出发,回顾了其发展历史,并分别从传感器、解调方法、硬件系统、应用技术等方面详细介绍了近期的技术进展

以及未来的发展趋势。

## 2 光纤 F-P 的研究概况及其基本原理

### 2.1 基本原理

光纤 F-P 传感器及其系统的原理如图 1 所示,主要由光源模块、探测和信号处理模块以及光纤 F-P 传感器组成,其中 SMF 为单模光纤。在光纤 F-P 传感器中,两个反射面(其反射率分别为  $R_1$  和  $R_2$ )形成一个长为  $L$  的 F-P 腔,若  $R_1=R_2=R$  且 F-P 腔的折射率为  $n$ ,当强度及波长分别为  $I_0$  和  $\lambda$  的光束入射到 F-P 腔内时,其反射光强  $I_R$  为<sup>[5]</sup>

收稿日期: 2017-11-24; 收到修改稿日期: 2017-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(51675068)

作者简介: 陈伟民(1955—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电技术及系统、光纤传感及系统、精密测试及仪器等方面的研究。E-mail: wmchen@cqu.edu.cn

$$I_R = \frac{2R[1 - \cos(4\pi nL/\lambda)]}{1 + R^2 - 2R \cos(4\pi nL/\lambda)} \cdot I_0 \quad (1)$$

当反射面的反射率  $R$  较小时,成为低精细度 F-P腔,多光束干涉退化为双光束干涉,其反射光强  $I_R$  可以简化为

$$I_R = 2R[1 - \cos(4\pi nL/\lambda)] \cdot I_0 \quad (2)$$

一般情况下,基于双光束干涉原理的低精细度型 F-P 传感器制作成本更低,并且相关研究表明,其在恶劣环境中的可靠性更好<sup>[6]</sup>,成为主流的研究方向。

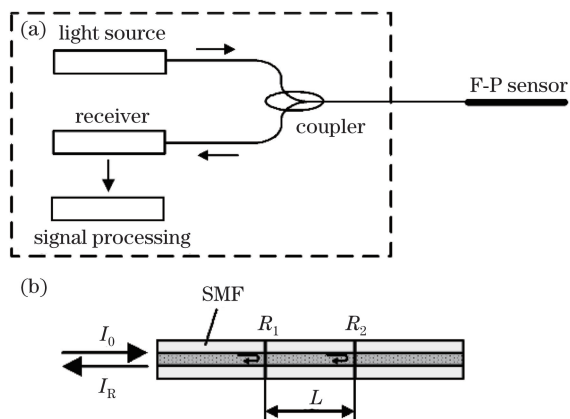


图 1 (a) 光纤 F-P 传感系统; (b) 光纤 F-P 传感器  
Fig. 1 (a) Optical fiber F-P sensing system;  
(b) optical fiber F-P sensor

## 2.2 研究概况

由于光纤 F-P 传感器的结构及原理非常简单,在 1999 年以前,国内外期刊上公开发表的研究文献非常有限。但由于其在耐受恶劣工作环境、长期稳定性、结构尺寸等方面的独特优势,特别适合高温、高压、强辐射、狭小空间等特殊工作环境,在进入 2000 年及 2010 年代以后,研究论文的数量呈爆炸性增长[图 2(a)],并涌现出了美国弗吉利亚理工大学、美国斐索公司以及重庆大学、电子科技大学、深圳大学、北京理工大学、燕山大学和天津大学等研究团队。统计数据还表明,海内外华人对于光纤 F-P 传感器的发展做出了突出贡献,如图 2(b)所示。

近 20 年来,光纤 F-P 传感器的进展主要体现在 F-P 腔的加工、传感器的信号解调、特殊应用及系统等方面,本文分别进行回顾总结。

## 3 光纤 F-P 腔的加工方法

由图 1 可知,光纤 F-P 腔是传感系统感受外界作用参量、实现传感功能的源头,因此光纤 F-P 腔的结构及加工工艺是光纤传感器系统研究的重要内容之一。

### 3.1 本征型光纤 F-P 腔加工新方法

本征型光纤 F-P 腔是其最主要的形式之一,其

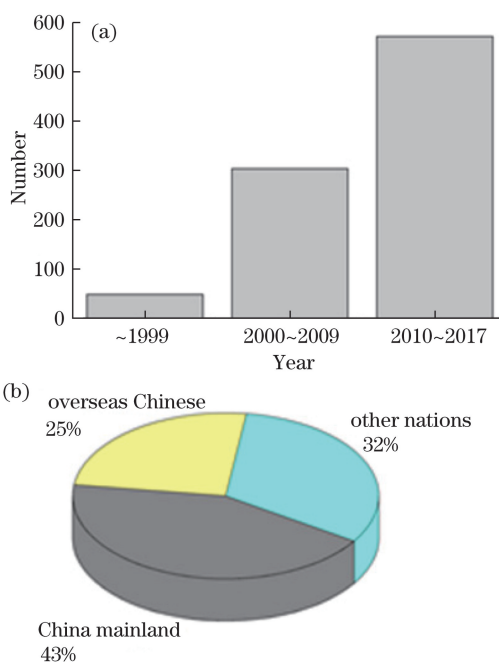


图 2 SCI, EI, CNKI 检索的光纤 F-P 传感器文章统计。  
(a) 近年发文数量统计; (b) 第一作者所属地区统计

Fig. 2 Statistics of optical fiber F-P sensor articles indexed by SCI, EI, and CNKI. (a) Number of the articles in recent years; (b) district statistics of the first author  
工艺关键是如何在纤芯内加工出反射面。

创新性地利用飞秒激光器加工光纤反射面,可简化 F-P 腔的加工工艺,如图 3(a)所示。利用聚焦飞秒激光束从侧面直接照射光纤某个局部点,从而在该点形成具有一定反射能力的光纤内部反射面<sup>[7]</sup>。

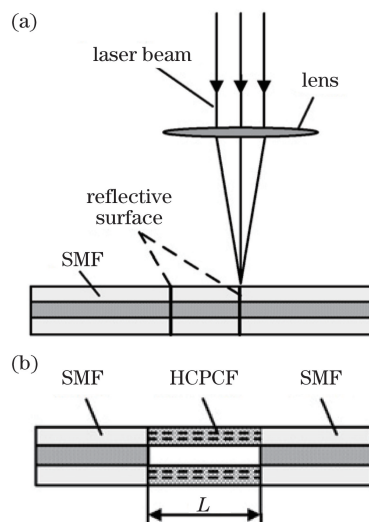


图 3 本征型光纤 F-P 腔加工新方法。  
(a) 飞秒激光侧面照射; (b) 空芯光纤

Fig. 3 New method of processing the intrinsic optical fiber F-P cavity. (a) Femtosecond laser irradiation on the side; (b) hollow fiber

采用空芯光纤制作光纤 F-P 腔可改善本征型光纤 F-P 腔反射面质量,如图 3(b)所示。将一段空芯光纤或空芯的光子晶体光纤与 SMF 熔接,利用空芯光纤与 SMF 的纤芯界面形成反射面,构成光纤 F-P 腔<sup>[8,9]</sup>。其反射面的反射率  $R$  只与 SMF 的纤芯折射率  $n$  有关,不受电极或激光熔接参数的影响,因而能提升 F-P 腔的信号质量。但在空芯光纤与 SMF 焊点处的塌陷,会对传感器的干涉输出信号质量产生一定影响,因而精确控制其塌陷区长度是难点。

另外,将两个布拉格波长相同的光纤光栅串联也可以形成一个 F-P 腔,其工作波长为  $\lambda_B$ 、腔长为两光纤光栅的间距;这种 F-P 腔的腔长可达数百上千毫米,通过增加其结构尺寸的方式,获得极高的传感灵敏度;还可以利用光纤光栅与 F-P 腔不同的解调原理,实现温度与应变的双参数同时解调<sup>[10]</sup>。

### 3.2 非本征型光纤 F-P 腔加工新方法

非本征型光纤 F-P 腔是另一类重要形式,可以采用不同的工艺加工制作不同结构的非本征型光纤 F-P 腔,此为近年研究的热点。

采用硅微结构加工工艺可以确保 F-P 腔的尺寸及其信号质量,如图 4(a)所示。通过硅材料的腐蚀/生长工艺获得一个硅结构微杯,再将一片超薄的硅膜片与之键合,形成封闭的硅微 F-P 腔,最后将光纤与之耦合固定而成<sup>[11]</sup>。利用半导体加工工艺可以在一块硅片上同时加工出数十个硅微 F-P 腔,既可保证 F-P 腔的加工质量的一致性,又可提高生产效率,降低加工成本,实现产业化。此外,还可以用硼硅玻璃平板替代硅基底,将其与二氧化硅膜片结合成如图 4(b)所示的形式;或者采用如图 4(c)所示的 SU-8 胶等有机高分子材料制作 F-P 腔,以降低微杯的制造成本,提升膜片的传感灵敏度<sup>[12]</sup>。

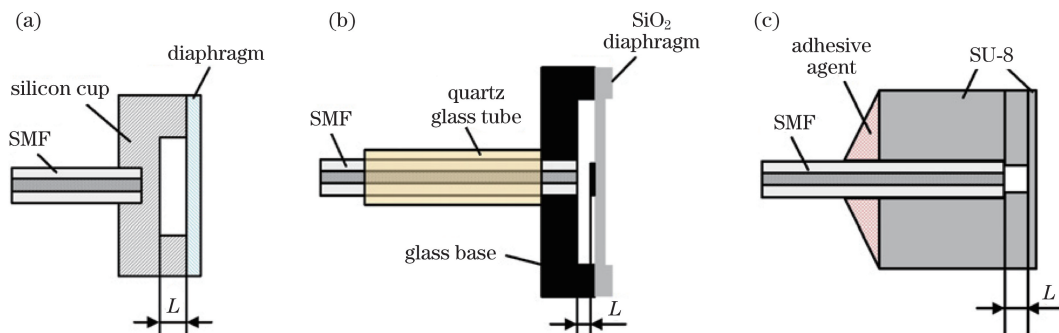


图 4 基于微结构加工工艺的非本征 F-P 腔。(a)全硅微结构;(b)硼硅玻璃与二氧化硅膜;(c) SU-8 胶法  
Fig. 4 Extrinsic F-P cavity based on microstructure processing technology. (a) Silicon substrate; (b) borosilicate glass and SiO<sub>2</sub> diaphragm; (c) SU-8 photoresist

采用飞秒加工或者用化学腐蚀工艺,可以将光纤端面加工出一个微型凹坑,然后将其与另外一段光纤焊接,形成一个光纤内部的 F-P 腔,如图 5(a)、(b)所示<sup>[13-14]</sup>。而将端面有微型凹坑的光纤与石墨烯薄膜“贴合”构成图 5(c)所示的光纤 F-P 腔,可利用石墨烯薄膜优异的力学特性实现超灵敏的压力传感<sup>[15]</sup>。采用飞秒加工或金刚石刀具工艺进行磨削,可以对光纤的侧面进行微加工,形成如图 6 所示的敞式全光纤 F-P 腔<sup>[16-17]</sup>,可用于气体传感、加速度传感等。但这种敞式全光纤 F-P 腔使纤细脆弱的光纤受到严重机械损伤,因而比光纤更为脆弱易损。

除此之外,利用光纤熔接机进行过度熔接的加工工艺,形成气泡型光纤 F-P 腔也是一个非常有创意的突破。将一段空芯光纤或空芯光子晶体光纤与 SMF 焊接在一起,然后用电极对光纤进行放电熔

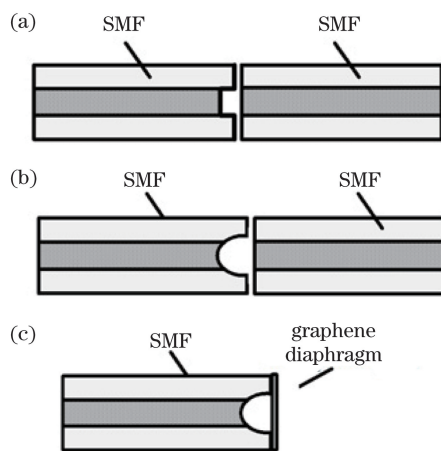


图 5 光纤端面微加工 F-P 腔。(a)飞秒激光加工; (b)化学腐蚀加工;(c)石墨烯薄膜  
Fig. 5 Micro fabrication of F-P cavity on fiber end face. (a) Treated with femtosecond laser; (b) treated with chemical etch; (c) graphene diaphragm

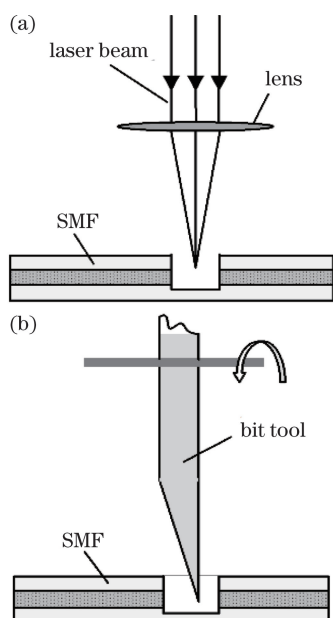


图 6 光纤侧面微加工 F-P 腔。(a) 飞秒激光加工; (b) 磨削加工  
Fig. 6 Micro-machining of F-P cavity on fiber side face.

(a) Femtosecond laser processing; (b) grinding processing  
融,使光纤收缩、熔断、密封,成为一个如图 7 所示的气泡型光纤 F-P 腔<sup>[18]</sup>。

采用图 8 所示的方法,将两段光纤端面涂上硅油之后进行熔接,利用硅油的隔离作用,使得两段光

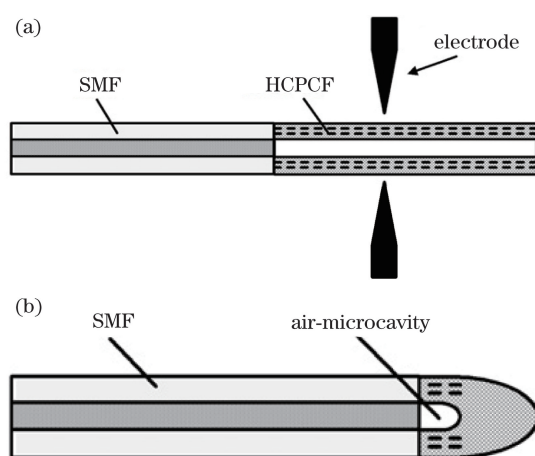


图 7 空芯光纤的气泡 F-P 腔。(a) 放电处理; (b) 形成气泡

Fig. 7 Fabrication of fiber bubble F-P cavity on hollow fiber.  
(a) Discharge treatment; (b) formation of bubble

纤的端面无法充分接触,从而在熔接过程中形成气泡;对此气泡继续熔融,使其收缩并拉断,在两段光纤端面各自形成一个光纤气泡 F-P 腔<sup>[19]</sup>。改变熔接工艺参数(如端面油膜、电弧放电、拉伸甚至挤压等),可以获得不同形状或尺寸的气泡型 F-P 腔,但因电弧放电的不稳定性,这类 F-P 腔的参数难以准确控制,且玻璃气泡极为脆弱、容易损坏。

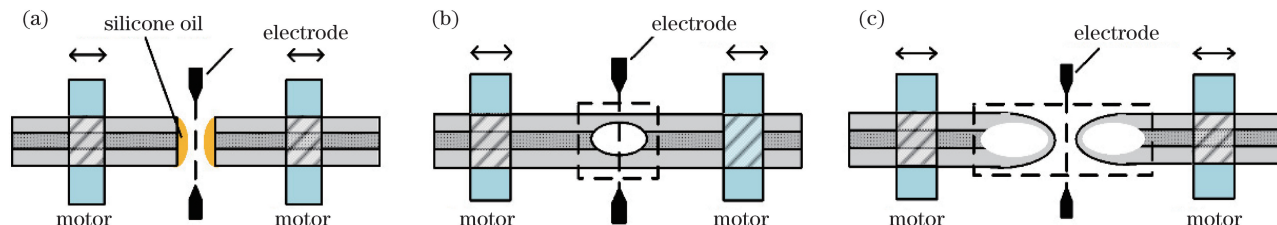


图 8 浸油光纤的气泡 F-P 腔加工过程示意图

Fig. 8 Fabrication of fiber bubble F-P cavity with oil immersed fiber

#### 4 光纤 F-P 传感器的信号解调方法

光纤 F-P 传感器的信号解调,就是要从其输出的信号中解算出腔长  $L$ 。在低精细度情况下,理想均匀宽光谱条件下光纤 F-P 腔输出的  $I_R$  即(1)式,而其对应的波形为图 9 所示有啁啾的类余弦函数<sup>[20]</sup>。强度解调与相位解调是两大基本解调方法。

强度解调方法是在入射光为单波长  $\lambda$  情况下,测出光强值  $I_R$ ,然后直接利用(1)式求解出腔长值  $L$ <sup>[21]</sup>。其具有硬件和软件简单、解调速度高的优点。但受入射光波长  $\lambda$  及强度  $I_0$  波动的影响,其解调精度低,且影响(1)式的周期性特性,使其测量范围小 ( $L < l/4$ )、实用性差。虽然报道过双腔长、双波长等补偿方法,但几乎没有后续的研究。

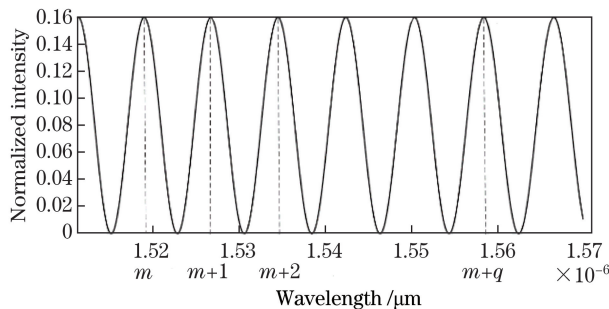


图 9 F-P 腔的理想干涉输出光谱

Fig. 9 Ideal interference output spectrum of F-P cavity

相位解调能够消除光源波动、扩展测量范围,因而成为主流的解调算法。而条纹峰值追踪法、傅里叶变换解调法、相关解调法是相位解调最具代表性的方法。

### 4.1 峰值追踪法

忽略啁啾效应,将图 9 所示的 F-P 腔干涉光谱信号视为标准余弦函数时,其周期  $T$  与腔长  $L$  具有明确的对应关系,利用干涉条纹的峰值  $\lambda_p$ ,计算其近似周期值  $T$ ,即可解调出腔长  $L$ 。具体方法有单峰法、双峰法和多峰法。

单峰法是根据干涉光谱中某一峰值  $\lambda_m$  随腔长  $L$  的变化关系式  $L = m\lambda_m/2$ ,通过追踪该干涉条纹的峰值变化量  $\Delta\lambda_m$ ,由(3)式求其解腔长的变化值  $\Delta L$ 。其特点是计算简单、运算速度快;但缺点是精度低,且只能求出腔长增量  $\Delta L$ ,不能求出腔长  $L$ <sup>[22]</sup>。

$$\Delta L/L = \Delta\lambda_m/\lambda_m. \quad (3)$$

多峰法是根据图 9 的理想干涉光谱中第  $m$ 、 $m+q$  级极大值对应的波长  $\lambda_m$ 、 $\lambda_{m+q}$ ,由(4)式求得腔长  $L$ 。而当(4)式中的  $q=1$  时,多峰法则退化成双峰法<sup>[23]</sup>。

峰值追踪法的解调精度完全依赖于峰值波长  $\lambda_i$  的求解精度,因而极易受到信号的噪声影响。而根据干涉极小值(波谷)的波长  $\lambda'_m$ 、 $\lambda'_{m+q}$ ,由(4)式求

出另一个腔长值  $L'$ ,并将之与波峰求出的腔长  $L$  值进行平均,则可降低噪声影响、提高解调精度<sup>[24]</sup>。

$$L = \frac{q}{2} \left( \frac{\lambda_{m+q}\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_{m+q}} \right). \quad (4)$$

### 4.2 变换解调与相关解调法

由于(1)式是图 9 所示有啁啾的余弦函数,而傅里叶变换法是分析其周期特性的有效手段,若利用光波长  $\lambda$  与光频  $\nu$ 、光速  $c$  之间的关系  $\nu = c/\lambda$ ,将干涉光谱的波长  $\lambda$  转换为频率  $\nu$ ,并令等效频域的角频率  $\omega_L = 4\pi L/c$ ,则(2)式化为

$$I_R = D + C \cos(4\pi L\nu/c) = D + C \cos(\omega_L\nu) = I_R(\nu), \quad (5)$$

对其进行傅里叶变换得到:

$$\mathcal{F}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I_R(\nu) \exp(-j\omega\nu) d\nu, \quad (6)$$

其相应的频谱如图 10(a)所示。在频谱域中找出峰值  $\omega_L$ ,即可由  $L = c\omega_L/4\pi$  求出腔长  $L$ 。

由于傅里叶变换需要对空间频率  $\nu$  进行均匀采样,而实际光谱是对波长  $\lambda = c/\nu$  进行均匀采样,因而会引入解调误差<sup>[25]</sup>。

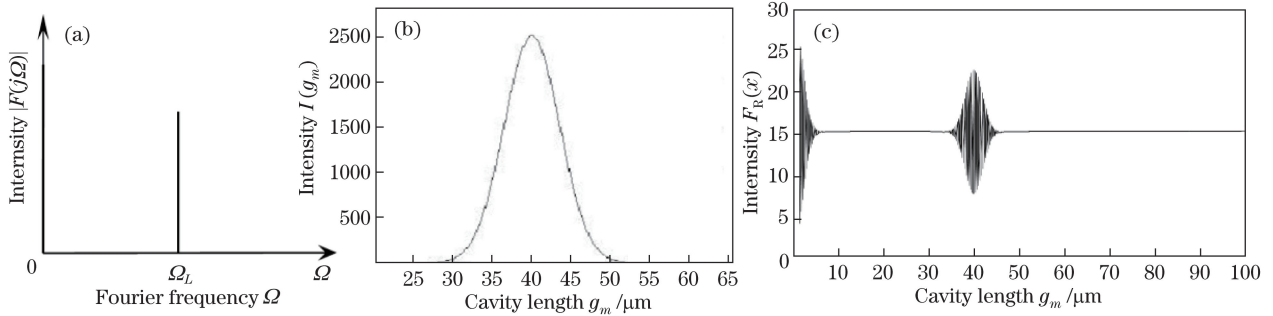


图 10 干涉信号解调输出图。(a)傅里叶变换频谱图;(b)离散腔长变换结果图;(c)相关解调结果图

Fig. 10 Demodulation outputs of interference signal. (a) Fourier transform spectrogram;

(b) discrete cavity length conversion results; (c) correlation demodulation results

为了解决这一问题,参照傅里叶变换思想,构建一个包含可变腔长  $g_m$  的指数函数  $\exp(j4\pi g_m/\lambda)$ ,将其与 F-P 腔的干涉光谱信号进行离散类傅里叶变换得到<sup>[26-27]</sup>:

$$I(g_m) = \sum_{n=1}^N 2R \left[ 1 - \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) \right] \exp\left(j \frac{4\pi g_m}{\lambda}\right). \quad (7)$$

当  $g_m = L$  时,  $|I(g_m)|$  最大;可通过搜索  $|I(g_m)|$  的最大值实现解调。其不需要对传感器输出光谱进行等频率间隔插值,解调精度得以提高,但速度相对于傅里叶变换算法较低。

另外,根据相关原理可以构造一个包含可变腔长  $x$  的类余弦函数与传感器信号进行相关运算,当其腔长匹配(即  $L = x$ )时输出值最大,由此产生了

虚拟腔长匹配的相关解调法<sup>[25]</sup>,并可根据相关计算中的峰值点求出 F-P 腔的腔长  $L$ 。

$$F_R(x) = A \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ D + C \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) \right] \cdot \left[ \cos \frac{4\pi}{\lambda} \cdot x \right] d\lambda. \quad (8)$$

由于该积分自变量为波长  $\lambda$ ,可避免傅里叶变换在自变量频率域  $d\nu$  的非均匀采样问题,能提高解调计算的精度,还可以降低因图 9 的啁啾性质引起的傅里叶变换解调误差。但其计算量大于傅里叶变换,因而解调速度较低。

在实际系统中,由于光源非均匀光谱分布  $A(\lambda)$  的影响,(2)式改为

$$I_R = [D + C \cdot \cos(4\pi L/\lambda)] \cdot A(\lambda). \quad (9)$$

因干涉信号的畸变与噪声,使图 9 的理想干涉光谱变为图 11 的实际干涉输出光谱,从而对解调计算精度产生影响<sup>[25,28]</sup>;此外,实际光源的光谱范围

受限,无法满足傅里叶变换光谱积分区域无穷大的要求,也会使解调结果产生误差<sup>[5,29]</sup>。采用光谱延拓、光谱平移等方法,可降低这些误差<sup>[24,30]</sup>。

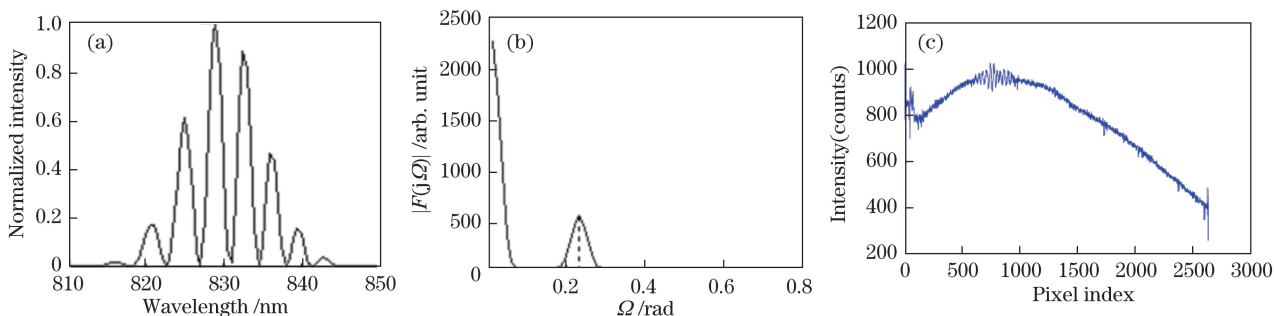


图 11 实际光源光谱条件下(a)F-P腔输出的光谱;(b)傅里叶变换结果;(c)相关解调结果

Fig. 11 Influence of actual spectrum source on (a) F-P cavity output spectrum, (b) Fourier transform results, and (c) correlation demodulation results

### 4.3 多 F-P 腔的复用解调算法

当两只光纤 F-P 腔如图 12(a)并联时,其合成的干涉光谱输出就是各 F-P 腔输出(2)式的简单代数,相应的光谱信号波形如图 12(b)所示<sup>[31-34]</sup>。但两只 F-P 传感器如图 13(a)那样串联时,则合成干涉光谱输出式形式更复杂:

$$P = \left[ (A_1 + A_2) + (B_1 + B_2) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} l_1\right) + C_2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} l_2\right) \right] + D_2 \left\{ \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} (l_1 - l_2)\right] + \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} (l_1 + l_2)\right] \right\}. \quad (10)$$

相应的光谱信号波形则如图 13(b)所示<sup>[34-35]</sup>。由于干涉信号的周期性特征,不同频率的叠加信号可以在频谱域分离,因此图 12(b)、13(b)并联与串联复用的输出信号,都可以通过傅里叶变换、离散腔长变换、相关计算等积分变换的方法,获得图 12(c)、图 13(c)频谱函数,而其频谱峰值就对应于各 F-P 腔的腔长。在串联复用的(10)式与图 13(c)中,除

了  $L_i$  对应的几个主要频谱峰值项之外,还有与  $\Delta L_{ij} = L_i - L_j$  及  $\bar{L}_{ij} = L_i + L_j$  对应的几个次要频谱峰值,这些次峰极易与主峰产生频谱混叠,影响解调精度,因此串联复用解调的精度一般都低于并联复用的解调精度。而在多腔串联复用时,(10)式和图 13(c)中几个次峰的数量会呈几何级数大幅增加,导致频谱混叠加剧、腔长解调精度急剧下降<sup>[28]</sup>,因而对宽光谱的 F-P 腔进行串联复用,其复用的极限数量一般不宜超过 3。

除此之外,还可以通过对图 13(b)的信号处理,提出包络信号图 13(d),并分别对各个包络信号采用干涉级次拟合算法,求出其峰值  $\lambda_m$  的干涉级次  $m$ ,结合各 F-P 腔的折射率  $n_i$ ,由  $L_i = m \cdot \lambda_m / (2n_i)$  求解出其腔长  $L_i$ <sup>[36]</sup>。

对于由两只布拉格波长同为  $\lambda_{B_i}$  的光纤光栅组成的光纤 F-P 腔而言,当多个不同波长  $\lambda_{B_i}$  ( $\lambda_{B_i} \neq \lambda_{B_j}$ ) 的光纤光栅 F-P 腔串联起来时,因每个 F-P 腔

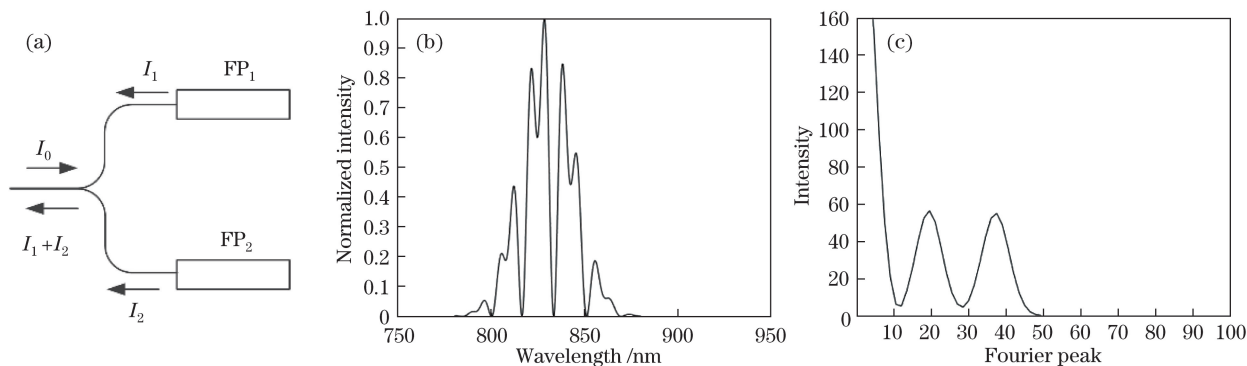


图 12 F-P腔并联复用解调原理。(a)双 F-P腔并联;(b)干涉输出信号;(c)傅里叶变换频谱

Fig. 12 Principle of demodulation for parallel multiplex F-P cavities. (a) Parallel multiplex of twin F-P cavities; (b) interferometric output signals; (c) Fourier transform spectrum

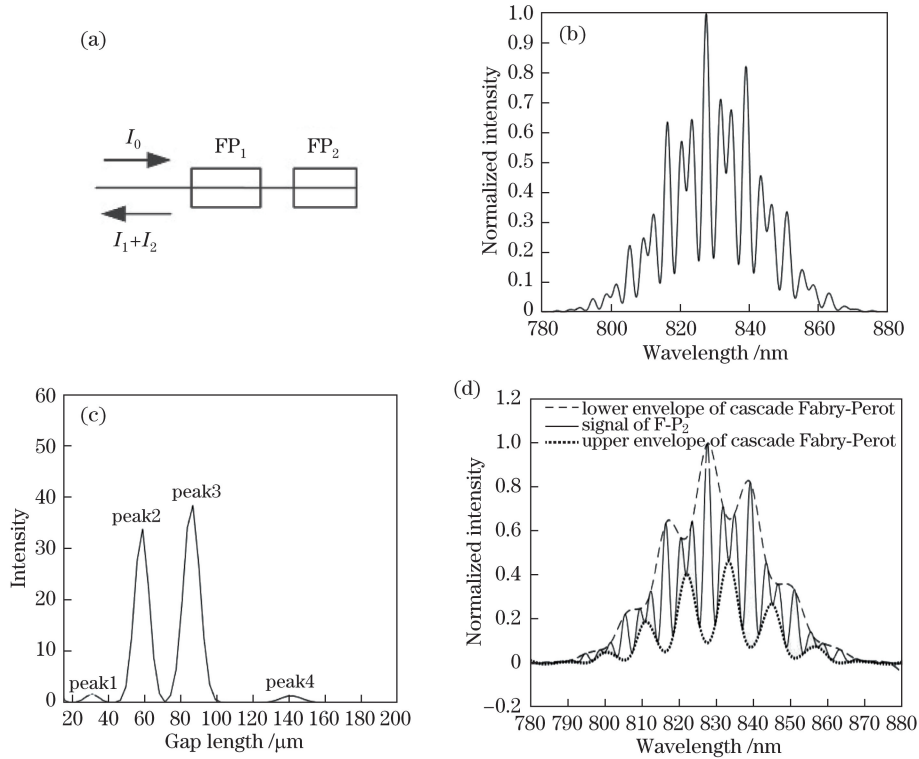


图 13 F-P 腔串联复用解调原理。(a) 双 F-P 腔串联; (b) 干涉输出信号; (c) 傅里叶变换频谱; (d) 干涉信号包络

Fig. 13 Principle of demodulation for series multiplex F-P cavities. (a) Series multiplex of twin F-P cavities;

(b) interferometric output signals; (c) Fourier transform spectrum; (d) envelopes of interferometric output signals

的工作波长  $\lambda_{B_i}$  不同, 其单波长干涉输出信号互不干扰, 可以通过频谱变换将各个波长 F-P 腔的 F-P<sub>i</sub> 在频谱域分开, 实现多 F-P 腔的复用解调, 因而能突破宽带光纤 F-P 串联复用数量的瓶颈, 实现十数只 F-P 腔的串联复用解调<sup>[10, 37-40]</sup>。

#### 4.4 相位生成载波及外差调制解调方法

相位生成载波解调 (PGC) 技术与外差调制解调技术, 是针对光纤光栅 F-P 腔这类单波长 F-P 腔的专用解调方法。通过对 F-P 腔入射光进行幅值为  $C$ 、频率为  $\omega_c$  的交流调制, 使 (2) 式化为频率为  $\omega_c$  的交变信号<sup>[41]</sup>:

$$I_R = A + B \cdot \cos(C \cdot \cos \omega_c t + 4\pi L/\lambda)。 \quad (11)$$

将 (11) 式用贝塞尔函数展开为

$$I_R = A + B \left\{ \left[ J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \cdot J_{2k}(C) \cdot \cos 2k\omega_c t \right] \cdot \cos(4\pi L/\lambda) - \left[ 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \cdot J_{2k-1}(C) \cdot \cos(2k-1)\omega_c t \right] \cdot \sin(4\pi L/\lambda) \right\}, \quad (12)$$

式中  $J_k(C)$  为第  $k$  阶贝塞尔函数。分别用幅值为  $G$  及  $H$  的交流信号  $G \cos(\omega_c t)$  与  $H \cos(2\omega_c t)$  与 (12) 式混频, 并用低通滤波器滤除高频项, 得到两个直流项为

$$I_{D1} = -B \cdot G \cdot J_1(C) \sin(4\pi L/\lambda), \quad (13)$$

$$I_{D2} = -B \cdot H \cdot J_2(C) \cos(4\pi L/\lambda)。 \quad (14)$$

将 (13)、(14) 式分别微分, 得到:

$$I_{d1} = -B \cdot G \cdot J_1(C) \cos(4\pi L/\lambda) \cdot (4\pi L/\lambda), \quad (15)$$

$$I_{d2} = B \cdot H \cdot J_2(C) \sin(4\pi L/\lambda) \cdot (4\pi L/\lambda)。 \quad (16)$$

再联立 (13)~(16) 式, 则

$$S = B^2 \cdot G \cdot H \cdot J_1(C) \cdot J_2(C) \cdot (4\pi L/\lambda)。 \quad (17)$$

由于  $B^2 \cdot G \cdot H \cdot J_1(C) \cdot J_2(C)$  为常数, 因此可以由 (17) 式求解出腔长  $L$ 。

## 5 光纤 F-P 解调的硬件系统

光纤 F-P 解调的硬件系统, 是获取光纤 F-P 传感器的光谱信息、完成信号解调计算的硬件系统, 它主要包含宽带光源、光谱采集、数据处理等部分。采用不同的原理及其相应的元器件, 形成不同的解调系统。

### 5.1 光谱探测型

光谱探测型解调系统是光纤 F-P 解调仪的主流形式, 主要是针对峰值追踪法、傅里叶变化解调法、相关解调法等解调方法的需求, 利用光谱仪器获取光纤 F-P 腔的输出干涉光谱。其主要有光谱接收

型与光源扫频型两类。

光谱接收型如图 14(a) 所示,将宽带光源注入光纤 F-P 腔,并采用光谱接收仪器获取其输出的干涉光谱。其光源一般采用超辐射发光二极管(SLD)、放大自发辐射(ASE)等宽带光源。而光谱接收仪器则有两种选择:1)在实验室的科研场合直接采用高精度的商用光谱仪;2)对于实用型光纤 F-P 测量仪,采用如图 14(b)所示的高精细度可调 F-P 滤波器与光电探测器的组合<sup>[42-44]</sup>。

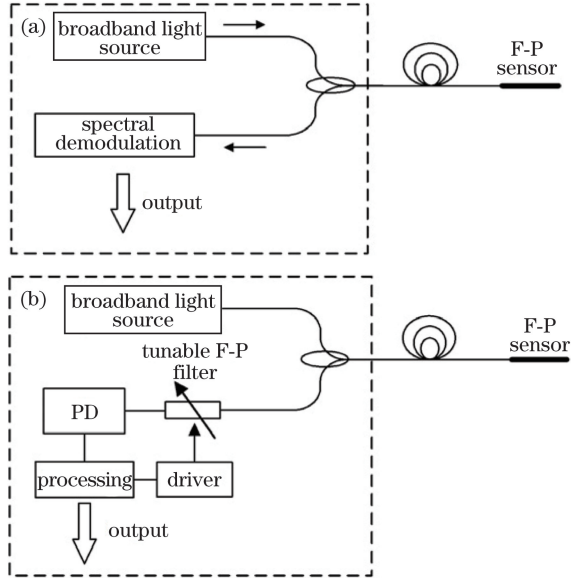


图 14 (a)光谱接收型解调系统;(b)基于高精细度可调光谱滤波器的解调系统

Fig. 14 Demodulation system with (a) a spectrometer as a spectral receiver and (b) a high fineness tunable filter as a spectral receiver

光源扫频型如图 15 所示,利用扫频激光器或其他扫频光源替代普通宽带光源,实现光谱的扫描,因而其在信号接收端只需一个光电探测器。由于扫频激光器的出纤光功率远强于宽带光源,因而具有反射光谱信号质量好、复用数量多等优点。

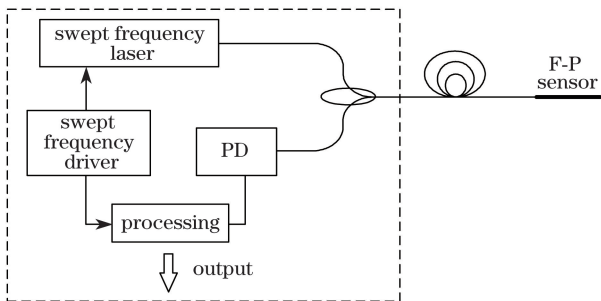


图 15 光源扫频型解调系统

Fig. 15 Demodulation system with a swept frequency light source

由于这类系统不仅要在硬件上进行全光谱数据采集,还要在软件上进行全光谱分析计算,因此其耗时较多,主要用于静态参量的测量。

### 5.2 相关解调型

相关解调型解调系统是专门针对相关解调方法的需求,以硬件相关替代了算法相关,因而提高了解调速度,可用于动态测量。其主要有扫描型与非扫描型两类,且一般要求采用白炽灯这类的超宽光谱光源。

扫描型相关解调系统如图 16 所示。采用低精细度的可调 F-P 腔 F-P<sub>2</sub>,通过对 L<sub>2</sub> 的机械扫描完成与 L<sub>1</sub> 的腔长匹配,获得最大信号输出,实现 F-P<sub>1</sub> 的腔长值 L<sub>1</sub> 解调<sup>[41-42]</sup>。但其解调速度与解调精度受限于可调 F-P 滤波器压电陶瓷元件的扫描速度、迟滞与非线性特性。

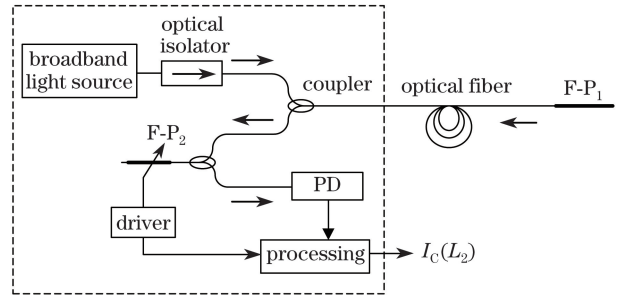


图 16 扫描型相关解调系统原理图

Fig. 16 Schematic of scanning correlation demodulation system

非扫描型相关解调系统如图 17(a) 所示,它用楔形平板替代图 16 中的可调 F-P 腔 F-P<sub>2</sub> 作为相关匹配器,楔形平板的厚度  $h(x)$  随光楔长度方向  $x$  的位置变化关系式为

$$L_2 = h(x) = x \cdot \tan \alpha. \quad (18)$$

利用(18)式,使(8)式的相关函数变为

$$F_R(x) = A \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} [D + C \cdot \cos(4\pi L/\lambda)] \cdot [\cos(4\pi \cdot n \cdot x \cdot \tan \alpha/\lambda)] d\lambda. \quad (19)$$

采用光电探测器阵列获得图 17(c) 所示空间一维光强分布的相关输出,通过光电探测器阵列的读出电路,找到光强分布极值点所对应的像元素位置  $x$  值,即可由(18)式求出对应的 F-P 腔腔长值  $L$ 。由于 F-P 腔没有机械扫描运动,不存在压电陶瓷元件的迟滞与非线性,其解调速度与精度都得到提升,可以实现数 kHz 的高速信号解调<sup>[45-46]</sup>。

相关解调的精度严重依赖于光源的光谱带宽。虽然白炽灯这类白光光源的光谱最宽,解调精度最高,但其在使用寿命、信号强度等方面存在着致命的缺陷;而 LED、ASE 等光源虽然在信号强度与使用



寿命方面有优势,但其解调精度不如白炽灯光源。

若将图 17 中的普通光楔改为  $o$  光与  $e$  光(折射率分别为  $n_o$ 、 $n_e$ )的双折射晶体光楔,在其前后增加起偏器  $P_1$  与检偏器  $P_2$ ,使得光楔的等效厚度变为了  $(n_o - n_e)h(x)$ ,构成图 18(a)所示的结构,则可以将 F-P<sub>1</sub>腔长  $L$  解调的极限分辨力  $\delta L$  提升  $1/(n_o - n_e)$  倍<sup>[47-49]</sup>。

若将图 17(a)中光楔的正入射与透射接收方式改为图 18(b)所示的倾斜入射、反射接收方式,则不

仅会大幅改善信号的对比度,还能将 F-P<sub>1</sub>腔长  $L$  解调的极限分辨力  $\delta L$  提升  $1/\cos\theta$  倍( $\theta$ 为斜入射的倾斜角)<sup>[50]</sup>。

### 5.3 调制解调型

调制解调型解调系统是专门针对光纤光栅 F-P 腔的解调系统,包含相位生成载波解调(PGC)与外差调制解调两类,主要用于超声传感等动态信号应用场合,其系统原理如图 19 所示。

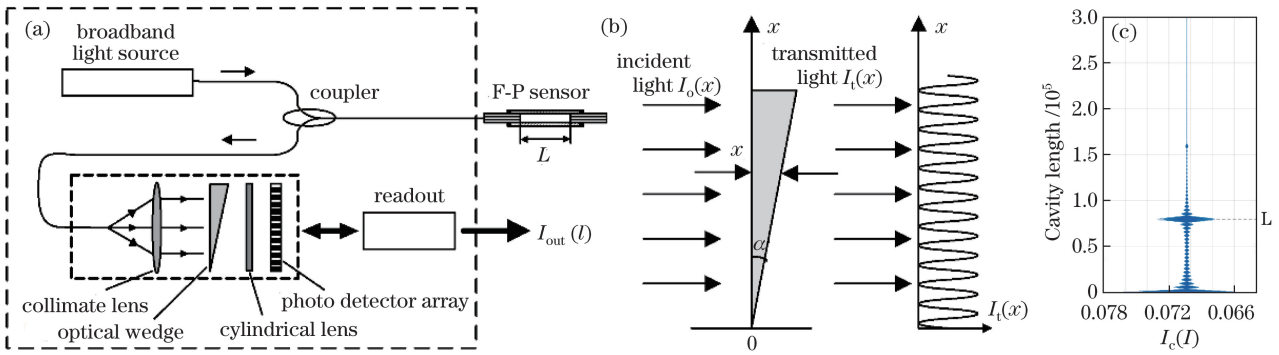


图 17 非扫描型相关解调系统。(a)系统原理图;(b)楔形平板等厚干涉;(c)输出信号

Fig. 17 Non-scanning correlation demodulation system. (a) System principle diagram; (b) interference fringe of optical wedge; (c) output signal

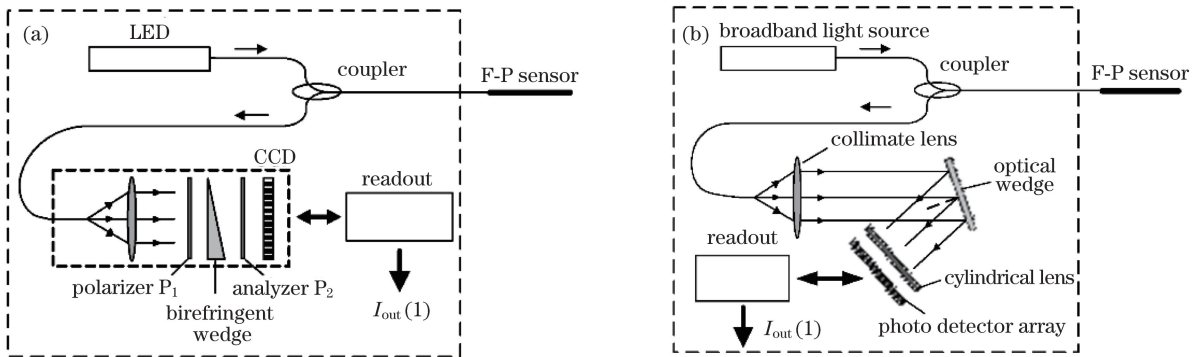


图 18 相关解调系统的改进。(a)双折射光楔偏振检测方案;(b)光楔倾斜入射与反射方案

Fig. 18 Improved correlation demodulation system. (a) Birefringence wedge and polarization detection; (b) inclined incidence and reflection

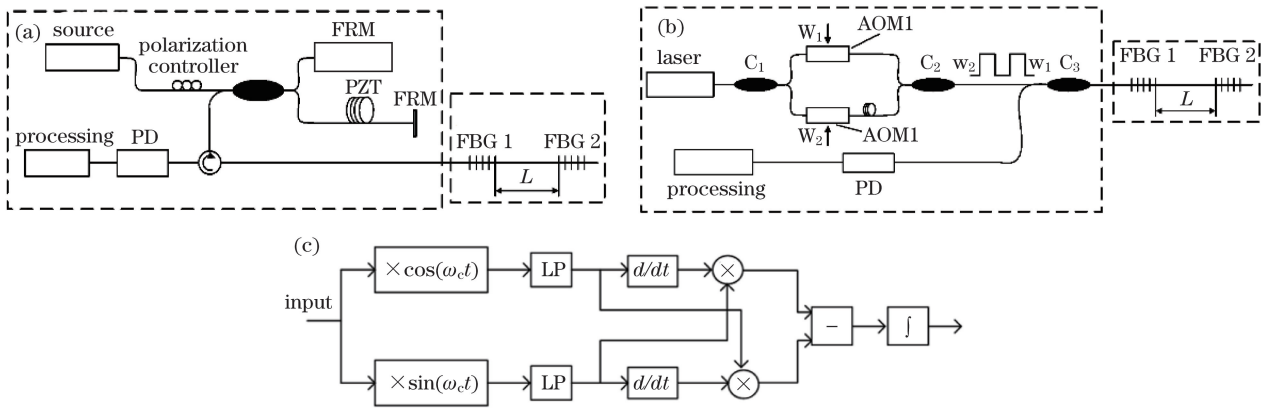


图 19 相位调制解调型系统。(a)相位生成载波解调系统;(b)外差调制解调系统;(c)信号处理

Fig. 19 Demodulating system for phase modulation. (a) Phase generation carrier; (b) heterodyne; (c) signal processing

## 6 光纤 F-P 传感器的应用技术

光纤 F-P 传感器最突出的优势是其具有适应极端恶劣工作环境的特质,因此光纤 F-P 腔的应用技术主要集中于这些领域。

### 6.1 温度/压力传感

温度与压力是工业界两大主要过程参量,在光纤 F-P 传感器的应用研究中占有重要地位。

在温度测量方面,航空航天、油井井下、电力能源等场合往往会面临数百甚至上千摄氏度的高温,因此高温光纤 F-P 传感器成为研究热点。各种实验研究表明,一次被覆层是最薄弱的环节,其极限耐受温度一般都不超过 100 °C,采用丙烯酸(酯)树脂涂层、聚酰亚胺涂层、镀金涂层,可分别将耐温极限提升至 250、400 和 800 °C<sup>[51]</sup>。而对于光纤 F-P 腔而言,由于光纤的纤芯掺杂,SMF 耐温的极限不超过 600 °C;对 F-P 腔的退火处理或采用光子晶体光纤,耐温极限可以接近 800 °C<sup>[52]</sup>;而采用蓝宝石光纤的 F-P 腔,则可进一步将耐温极限提升到 1000 °C 以上<sup>[53-54]</sup>。

在压力测量方面,传感器的封装与现场应用、温度与压力双参数同时测量、测量系统的可靠性是 3 大关键技术难题。针对航空航天领域的特殊需求,梁大开等<sup>[55]</sup>将光纤 F-P 腔植入复合材料夹层中,探索了飞机蒙皮的结构损伤在线实时监测的可行性;刘铁根等<sup>[56-58]</sup>开发出了微型光纤 F-P 压力传感器、声压传感器以及相应的多通道解调仪,还进行了传感器封装参数实验,完成了苛刻的环境考核,如图 20 所示。单宁等<sup>[59]</sup>针对飞机发动机叶片裂纹检测需求,研究了利用光纤 F-P 声压传感器探测脉冲激光照射叶片产生的超声信号,探索了飞机发动机叶片裂纹的非接触检测。Fusiek 等<sup>[60]</sup>针对石油井下的压力测量,研制了专用光纤 F-P 压力传感器、温度传感器,并实际应用于井下的现场实用考核。黎凌浩等<sup>[61]</sup>针对煤层气井的液位测量,研制了专用光纤 F-P 压力传感器,并经过了实验室模拟考核。

### 6.2 应力/应变传感

应力/应变是最基本的力学参量,也是光纤 F-P 传感器应用最早、最成功的领域之一。主要以图 7 的非本征型光纤 F-P 腔为基础,通过特殊封装后安装在被测对象上,获取被测对象的受力特性。朱永等<sup>[62-63]</sup>开发了混凝土专用的埋入式光纤 F-P 应变传感器以及实用化解调仪,并大规模应用于大型桥

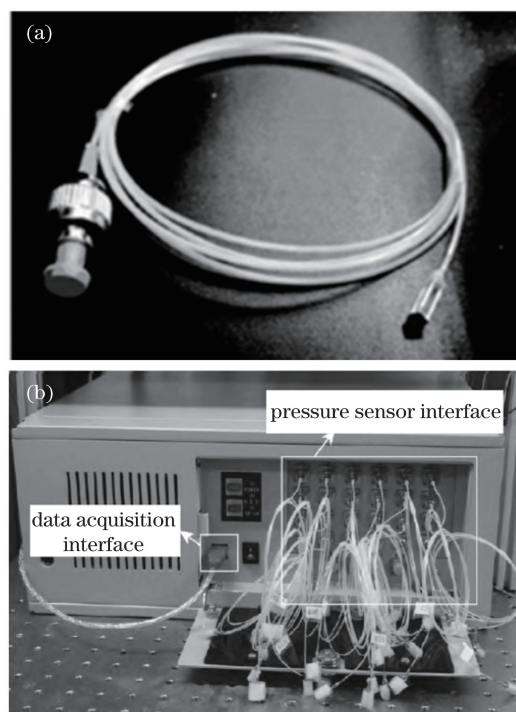


图 20 航空器光纤压力传感系统。(a)微型光纤 F-P 压力传感器;(b)多通道光纤 F-P 测量仪

Fig. 20 Fiber F-P sensing system for aircraft.

(a) Micro fiber F-P pressure sensor; (b) multi-channels fiber F-P demodulation system

梁、铁道等长期结构健康监测,如图 21 所示;还开发了光纤 F-P 应变传感器的专用加工设备、标定系统,提出了混凝土结构热胀冷缩的补偿技术<sup>[64-66]</sup>;开发了廉价的多通道解调仪、加速度传感器<sup>[67]</sup>。

除此之外,光纤 F-P 传感器还在电力系统局部绝缘击穿放电监测、静电电压监测、聚焦超声监测、气体折射率传感等特殊应用方面,取得了很多成功的工程应用进展<sup>[68-72]</sup>。

## 7 结束语

2000 年以后,光纤 F-P 传感器在 F-P 腔的加工技术、解调的方法、解调的硬件等方面硕果累累,在高温传感、压力传感、应变传感,以及水声传感、超声传感、振动传感、高频放电等特殊传感器方面取得了重大进展,并在大型桥梁、石油煤矿、航空航天等方面得以成功应用,显示出明显的优势。光纤 F-P 传感器在特殊、恶劣环境中最能体现其优势,随着应用的深入,其今后的发展方向将围绕恶劣或特殊环境的应用需求,重点研究 F-P 腔的规模化生产工艺、传感器的特种封装与现场安装技术、传感系统的长期稳定性与可靠性、大规模现场应用的工艺技术等,并必将取得更多更大的突破。

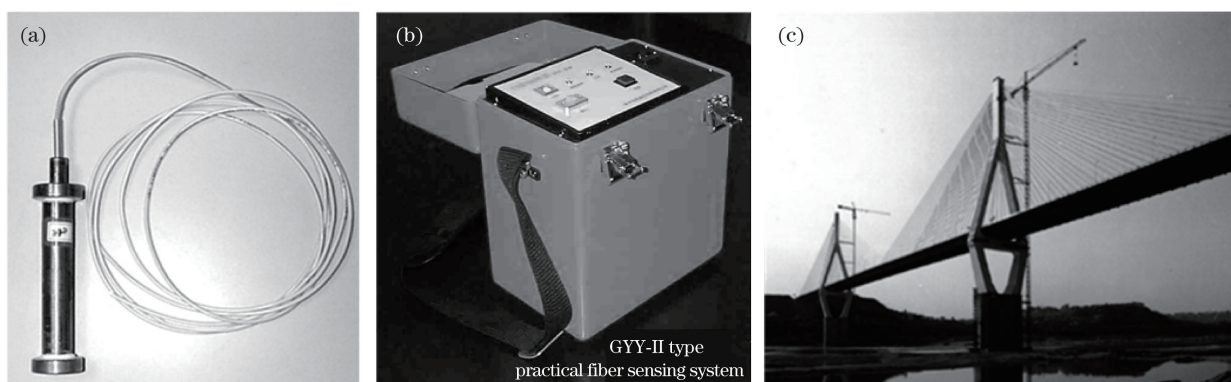


图 21 光纤 F-P 应变传感器系统及其工程应用。(a)混凝土埋入式光纤 F-P 应变传感器;(b)光纤 F-P 应变得调仪;  
(c)光纤 F-P 传感器系统应用于大型桥梁结构健康监测

Fig. 21 Fiber F-P strain sensor system and its application. (a) Embedded fiber F-P strain sensor for concrete;  
(b) fiber F-P strain demodulator; (c) its application to structural health monitoring system for long-span bridges

### 参 考 文 献

- [1] Yoshino T, Kurosawa K, Itoh K, *et al.* Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(10): 1624-1633.
- [2] Franzen D L, Kim E M. Long optical-fiber Fabry-Perot interferometers[J]. Applied Optics, 1981, 20(23): 3991-3992.
- [3] Kersey A D, Jackson D A, Corke M. A simple fiber Fabry-Perot sensor[J]. Optics Communications, 1983, 45(2): 71-74.
- [4] Leilabady P A, Corke M. All-fiber-optic remote sensing of temperature employing interferometric techniques[J]. Optics Letters, 1987, 12(10): 772-774.
- [5] Sun J Y, Chen W M, Zhu Y, *et al.* Influence of optical source spectrum on optical fiber F-P strain sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(5): 596-600. 孙吉勇, 陈伟民, 朱永, 等. 光源光谱对光纤法布里-珀罗应变传感系统的影响[J]. 光学学报, 2002, 22(5): 596-600.
- [6] Ma C, Wang A B. Signal processing of white-light interferometric low-finesse fiber-optic Fabry-Perot sensors[J]. Applied Optics, 2013, 52(2): 127-138.
- [7] Wang W Y, Wen J X, Pang F F, *et al.* All single-mode fiber Fabry-Perot interferometric high temperature sensor fabricated with femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1005001. 王文轅, 文建湘, 庞拂飞, 等. 飞秒激光制备的全单模光纤法布里-珀罗干涉高温传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1005001.
- [8] Sirkis J S, Brennan D D, Putman M A, *et al.* In-line fiber étalon for strain-measurement[J]. Optics Letters, 1993, 18(22): 1973-1975.
- [9] Duan D W, Zhu T, Rao Y J, *et al.* A miniature extrinsic Fabry-Perot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 17-20. 段德稳, 朱涛, 饶云江, 等. 基于空芯光子晶体光纤的微小型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 17-20.
- [10] Rao Y J, Cooper M R, Jackson D A, *et al.* Absolute strain measurement using an in-fibre-Bragg-grating-based Fabry-Perot sensor[J]. Electronics Letters, 2000, 36(8): 708-709.
- [11] Donlagic D, Cibula E. All-fiber high-sensitivity pressure sensor with SiO<sub>2</sub> diaphragm[J]. Optics Letters, 2005, 30(16): 2071-2073.
- [12] Shang Y N, Ni Q Y, Ding D, *et al.* Fabrication of optical fiber sensor based on double-layer SU-8 diaphragm and the partial discharge detection[J]. Optoelectronics Letters, 2015, 11(1): 61-64.
- [13] Chen X P, Shen F B, Wang Z A, *et al.* Micro-air-gap based intrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-optic sensor[J]. Applied Optics, 2006, 45(30): 7760-7766.
- [14] Tang Q T. Study on strain/temperature characteristics and demodulation methods of Fabry-Perot cavities fabricated by a femtosecond laser[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. 唐庆涛. 飞秒激光加工的光纤法珀腔应变温度特性及复用解调方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [15] Li C, Guo T T, Xiao J, *et al.* Interference characteristics analysis of optical fiber Fabry-Perot cavity with graphene diaphragm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(4): 574-579. 李成, 郭婷婷, 肖俊, 等. 基于石墨烯膜的光纤 Fabry-Perot 腔干涉特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(4): 574-579.
- [16] Jung E J, Kim M J, Kwang S H, *et al.* Air cavity-based Fabry-Perot interferometer sensor fabricated using

- a sawing technique for refractive index measurement[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(1): 017104.
- [17] Jáuregui-Vázquez D, Estudillo-Ayala J M, Rojas-Laguna R, *et al.* An all fiber intrinsic Fabry-Perot interferometer based on an air-microcavity[J]. *Sensors*, 2013, 13(5): 6355-6364.
- [18] Liao C R, Liu S, Xu L, *et al.* Sub-micron silica diaphragm-based fiber-tip Fabry-Perot interferometer for pressure measurement[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2827-2830.
- [19] Liu S, Yang K M, Wang Y P, *et al.* High-sensitivity strain sensor based on in-fiber rectangular air bubble[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 7624.
- [20] Stacey D. The Fabry-Perot interferometer: history, theory, practice and applications[J]. *Optica Acta International Journal of Optics*, 1989, 37(7): 1279-1280.
- [21] Eric U. *Fiber optics sensors: an introduction for engineers and scientists*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [22] Meller S A. Extrinsic Fabry-Perot interferometer system using wavelength modulated source[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [23] Feng J. Investigation of the accuracy of FP strain gauge and its application on the bridge health monitoring[D]. Chongqing: Chongqing University, 2000.  
封君. 光纤法珀应变仪的精度研究及其在桥梁结构健康监测中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2000.
- [24] Xu H Y, Lei X H, Chen W M, *et al.* Demodulation error of fringe counting method for optical fiber Fabry-Perot sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(12): 1207003.  
许亨艺, 雷小华, 陈伟民, 等. 光纤法布里-珀罗传感器的条纹计数法解调误差研究[J]. *光子学报*, 2016, 45(12): 1207003.
- [25] Zhang P. Study on transform demodulation theory of optical fiber Fabry-Perot sensor and implementation of embedded system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.  
章鹏. 光纤法-珀传感器变换解调原理研究及嵌入式系统实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [26] Musa S M, Claus R O, Reed J H, *et al.* Real-time signal processing and hardware development for a wavelength modulated optical fiber sensor system[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [27] Wang N. Fiber Fabry-Perot strain gauge based on the technology of wavelength analysis for bridge health monitoring[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.  
王宁. 基于波形分析的光纤法珀应变仪在桥梁在变监测中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [28] Chen Y S. Algorithms and multiplexing of fiber Fabry-Perot strain sensor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003.  
陈雨森. 光纤法珀应变传感器的解调算法改进和复用技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [29] Chen W M, Wang N, Zhu Y, *et al.* Experimental study on the affection of Gaussian spectrum of light source on the optical fiber F-P strain sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(1): 88-92.  
陈伟民, 王宁, 朱永, 等. 实际光源光谱分布对相位型光纤法-珀应变传感器的影响及其实验研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(1): 88-92.
- [30] Chen T, Xie L H, Xie L, *et al.* Optical fiber Fabry-Perot sensing system based on blackbody radiation in high temperature applications[C]. *SPIE*, 2017, 10382: 103820C.
- [31] 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.
- [32] Tuck C J, Fernando G F. Multiplexed optical fiber Fabry-Perot sensors for strain metrology[J]. *Smart Materials & Structures*, 1999, 8(5): 549-553.
- [33] 章鹏, 朱永, 唐晓初, 等. 光纤法布里-珀罗传感器的并联复用研究[C]. 大珩先生九十华诞文集暨中国光学学会学术大会, 2004.
- [34] Jones M E, Grace J L, Greene J A, *et al.* Multiplexed absolute strain measurements using extrinsic Fabry-Perot interferometers[C]. *SPIE*, 1995, 2444: 267-275.
- [35] Chen W M, Zhu Y, Tang X C, *et al.* Study on the serial multiplex of optical fiber Fabry-Perot strain sensors with Fourier transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(11): 1481-1486.  
陈伟民, 朱永, 唐晓初, 等. 光纤法布里-珀罗传感器串连复用的傅里叶变换解调方法初探[J]. *光学学报*, 2004, 24(11): 1481-1486.
- [36] Jiang L J, Jiang J F, Liu T G, *et al.* Demodulation of cascade optical fiber Fabry-Perot pressure sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(3): 283-287.  
姜丽娟, 江俊峰, 刘铁根, 等. 具有复合式法珀腔的光纤压力传感器的解调[J]. *光子学报*, 2012, 41(3): 283-287.
- [37] Rao Y, Zhou C, Zhu T. A novel chirped-FBG-based F-P sensor network using SFDM/WDM[C]. *Optical Fiber Sensors*, Optical Society of America, 2006: FA6.
- [38] Wu Z X, Wu F, Cai L L, *et al.* Strain measurement using a fiber Bragg grating Fabry-Perot sensor[J].

- Optical Technique, 2003, 31(4): 559-562.
- [39] Koo K P, Leblanc M, Tsai T E, *et al.* Fiber-chirped grating Fabry-Perot sensor with multiple-wavelength-addressable free-spectral ranges[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(7): 1006-1008.
- [40] Jin X D, Sirkis J S, Chung J K, *et al.* Embedded in-line fiber Etalon/Bragg grating hybrid sensor to measure strain and temperature in a composite beam[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1998, 9(9): 171-181.
- [41] Lang J P, Chang T Y, Chen J D, *et al.* Improved phase generated carrier modulation and demodulation method[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(12): 1207004.  
郎金鹏, 常天英, 陈建冬, 等. 改进式相位生成载波调制解调方法[J]. 光子学报, 2016, 45(12): 1207004.
- [42] Shun J Y. Technological study on fiber Fabry-Perot strain sensor demodulated by tunable Fabry-Perot[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.  
孙吉勇. 光纤法珀应变传感器的可调法珀腔解调技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [43] Shun J Y, Chen W M, Zhu Y, *et al.* An optic fiber Fabry-Perot strain sensor system based on tunable Fabry-Perot[J]. Laser Journal, 2002, 23(4): 49-50.  
孙吉勇, 陈伟民, 朱永, 等. 基于可调谐法珀腔解调的光纤法珀应变传感系统[J]. 激光杂志, 2002, 23(4): 49-50.
- [44] Berthold J W. Absolute phase measurement with extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors[J]. Processings of SPIE - The international Society, 1996, 2839: 111-121.
- [45] Hornak J, Duncan J, Gaffan D. Fiber optic sensors for the refinery of the future[C]. IEEE Sensors for Industry Conference, 2002: 40-43.
- [46] Belleville C, Duplain G. White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor[J]. Optics Letters, 1993, 18(1): 78-80.
- [47] Li L, Liu T G, Jiang J F, *et al.* Birefringent wedges effects on cross-correlation polarization demodulation in optical fiber Fabry-Perot sensors[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2012, 23(1): 67-73.  
李磊, 刘铁根, 江俊峰, 等. 光纤 F-P 传感器偏振互相关解调中光楔参数的影响研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(1): 67-73.
- [48] Shi J F, Liu T G, Wang S, *et al.* Spatial electronic scanned low-coherence interference long distance optical fiber sensing and demodulation system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0406001.  
石俊峰, 刘铁根, 王双, 等. 空间电扫描型低相干干涉长距离光纤传感解调系统[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0406001.
- [49] Jiang J F, Liu T G, Liu K, *et al.* High-precision wide-range low-coherent interference shift demodulation device and demodulation method thereof: 102052902A[P]. 2011-05-11.  
江俊峰, 刘铁根, 刘琨, 等. 一种高精度大量程低相干干涉位移解调装置及其解调方法: 102052902A[P]. 2011-05-11.
- [50] Lei X H, Chen T, Chen W M, *et al.* Optical fiber Fabry-Perot sensor demodulation system and method: 106017519A[P]. 2016-10-12.  
雷小华, 陈涛, 陈伟民, 等. 一种光纤法珀传感器解调系统及方法: 106017519A[P]. 2016-10-12.
- [51] Tran T A, Greene J A, Murphy K A, *et al.* EFPI manufacturing improvements for enhanced performance and reliability[C]. Smart Structures and Materials, 1995, 2447: 312-323.
- [52] Xu L C, Deng M, Zhu T, *et al.* Fabry-Perot interferometer sensor for high temperature measurement based on photonic crystal fiber[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(2): 21-25.  
许来才, 邓明, 朱涛, 等. 光子晶体光纤 F-P 干涉式高温传感器研究[J]. 光电工程, 2012, 39(2): 21-25.
- [53] Chen Y. Investigation of multimode and sapphire optic fiber Fabry-Perot sensors[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.  
陈勇. 多模光纤和蓝宝石光纤法珀传感器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [54] Wang J 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.
- [55] Liang D K, Li D S, Pan X W, *et al.* Study of fiber-optic smart layer system based on Fabry-Perot strain sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 226-228.  
梁大开, 李东升, 潘晓文, 等. 基于法珀腔光纤传感器的光纤智能夹层的研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 226-228.
- [56] Liu T G, Wang S, 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.  
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.
- [57] Zhao P, Liu T G, Jiang J F, *et al.* Fiber optic acoustic vibration sensor for the monitoring of water sublimator[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0106003.  
赵鹏, 刘铁根, 江俊峰, 等. 用于水升华器监测的光纤声振动传感器研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0106003.

- [58] Wu Z H, Liu T G, Jiang J F, *et al.* Effect of thermal stress and residual gas pressure on the thermal response of optical fiber Fabry-Perot pressure sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328005.  
吴振海, 刘铁根, 江俊峰, 等. 热应力和残余气压对光纤法布里-珀罗压力传感器温度性能的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0328005.
- [59] Shan N, Shi Y K, Liu X. Detecting crack of aircraft engine blade based on optical fiber F-P sensor[J]. *Nondestructive Testing*, 2009, 31(3): 206-207.  
单宁, 史仪凯, 刘霞. 光纤法-珀传感器在飞机发动机叶片裂纹检测中的应用[J]. *无损检测*, 2009, 31(3): 206-207.
- [60] Fusiek G, Niewczas P, Burt G M. Preliminary evaluation of a high-pressure, high-temperature downhole optical sensor[C]//*Proceedings of 2011 IEEE Sensors*, 2011: 409-412.
- [61] Li L H, Jiang Y, Liu Y W. The fiber-optic technique for the measurement of the liquid surface in coal bed methane well[J]. *Optical Technique*, 2015, 41(5): 442-444.  
黎凌浩, 江毅, 刘曰武. 煤层气井液面的光纤测量技术[J]. *光学技术*, 2015, 41(5): 442-444.
- [62] Zhu Y, Fu Y M, Chen W M, *et al.* A health monitoring system for the Dafosi Yangtze River bridge[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(10): 66-71.  
朱永, 符欲梅, 陈伟民, 等. 大佛寺长江大桥健康监测系统[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(10): 66-71.
- [63] Gan X, Zhu Y, Zhang P, *et al.* Multi-channel fiber optical Fabry-Perot strain testing system for the ShiBanpo Yangtze River bridge[J]. *China Measurement Technology*, 2008, 34(1): 128-130.  
甘雄, 朱永, 章鹏, 等. 石板坡长江大桥多通道光纤法珀应变测量系统[J]. *中国测试技术*, 2008, 34(1): 128-130.
- [64] Li J F. Manufacturing technology for optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer sensor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.  
李竞飞. 非本征型光纤法布里-珀罗传感器制造工艺研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [65] Chen W M, Liu L, Liu X M, *et al.* Stress sensor calibration system: 102156022A[P]. 2011-08-17.  
陈伟民, 刘琳, 刘显明, 等. 应力传感器标定系统: 102156022A[P]. 2011-08-17.
- [66] Zhu Y, Chen W M, Chen X Q. Temperature compensation Fabry-Perot optical fiber strain sensor specially for concrete: 1378078A[P]. 2002-11-06.  
朱永, 陈伟民, 陈小强. 混凝土专用温度自补偿型光纤法珀应变传感器: 1378078A[P]. 2002-11-06.
- [67] Jia P G, Wang D H. Temperature-compensated fiber optic Fabry-Perot accelerometer based on the feedback control of the Fabry-Perot cavity length[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(4): 040601.
- [68] Dong B, Han M, Sun L Q, *et al.* Sulfur hexafluoride-filled extrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-optic sensors for partial discharge detection in transformers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(18): 1566-1568.
- [69] Zhang K Y, Zhao H, Yang Y Q, *et al.* High voltage electrostatic sensor based on Fabry-Perot interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1106002.  
张开玉, 赵洪, 杨玉强, 等. 基于光纤法布里-珀罗干涉仪的高压静电传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1106002.
- [70] Guo S P, Gao Y Y, Xu L N, *et al.* Partial discharges detection system based on fiber Fabry-Perot sensors[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015(12): 61-64.  
郭少朋, 高莹莹, 徐鲁宁, 等. 基于光纤法珀传感器的局部放电测试系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2015(12): 61-64.
- [71] Wang R H. Study on novel optical fiber gas refractometer[D]. Xi'an: Northwest University, 2014.  
王若晖. 新型光纤气体折射率传感器研究[D]. 西安: 西北大学, 2014.
- [72] Zhang J, Zhao C L, Zeng D P, *et al.* Fabry-Perot interferometric fiber-optic ultrasonic hydrophone based on parylene film[J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2012, 34(3): 355-358.  
张洁, 赵纯亮, 曾德平, 等. 基于Parylene膜的法-珀干涉型光纤超声水听器[J]. *压电与声光*, 2012, 34(3): 355-358.