

## 激光与光电子学进展

## 高温高压环境下光纤法布里-珀罗传感技术研究现状

王宁\*, 朱永, 张洁

重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

**摘要** 白光干涉型法布里-珀罗(F-P)传感技术能够实现间隙值的绝对测量。本文综述了基于白光干涉的光纤F-P传感技术领域的研究工作,重点阐述了高温高压极端环境下光纤F-P传感器及其解调技术的研究现状。目的是分析高温高压环境下基于光纤F-P传感技术的物理参数测量的原理与方法,实现基于白光干涉的光纤F-P传感技术的实用化和工程化。

**关键词** 法布里-珀罗; 白光干涉; 高温高压环境

中图分类号 S951.4+3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230722

## Research Status of Fiber Fabry-Perot Sensing Technology Under High Temperature and High Pressure Environment

Wang Ning\*, Zhu Yong, Zhang Jie

Key Laboratory of Optoelectronic Technology & System (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400044, China

**Abstract** The white light interference type Fabry-Perot sensing technology can achieve absolute measurement of gap value. Research work in the field of fiber optic Fabry-Perot sensing technology based on white light interference is reviewed, research status of fiber optic Fabry-Perot sensor and its demodulation technology under extreme environments of high temperature and high pressure are focused on. The purpose is to analyze the principle and method of physical parameter measurement based on optical fiber Fabry-Perot sensing technology under high temperature and high pressure environment, and realize the practicality and engineering of optical fiber Fabry-Perot sensing technology based on white light interference.

**Key words** Fabry-Perot; white light interference; high temperature and high pressure environment

## 1 引言

光纤具有电绝缘性好、抗电磁干扰能力强、体积小、重量轻、耐腐蚀性能好等优点,因此光纤传感技术得到了广泛的研究和应用<sup>[1]</sup>。目前,光纤传感技术主要分为两大类:一类是分布式光纤传感技术,如干涉型分布式光纤传感技术<sup>[2-3]</sup>和散射型分布式光纤传感技术<sup>[4-5]</sup>;另一类是点式光纤传感技术,如光纤法布里-珀罗(F-P)类传感技术<sup>[6-7]</sup>和光纤光栅(FBG)类传感技术<sup>[8-9]</sup>。分布式光纤传感技术适用于管线安全、周界防范、桥梁健康监测等需要大范围监测的领域,而点式光纤传感技术则更适用于局部物理量的检测。

相比传统电类传感技术,点式光纤传感技术在高

温、高压、强辐照以及强干扰等极端环境下更具优势,因此在核电、航空航天、石化、电力等领域<sup>[10-12]</sup>具有很大的研究价值和应用前景。与FBG类传感器不同,光纤F-P类传感器本质是实现微间隙的检测,不仅具有传感头结构灵活多样、环境适应性强的特点,还能够实现微间隙的精密测量。

由于点式光纤传感器的解调仪表主要来源于国外,其技术参数大部分都是确定的,在高温、高压等极端环境下,传感器的参数与仪表存在不匹配的问题,从而限制了点式光纤传感器在国内的应用。近年来,随着国产解调仪表的逐步自主可控<sup>[13-15]</sup>,点式光纤传感技术正越来越多地用于极端环境下的工程应用。

本文针对基于白光干涉间隙测量的光纤F-P传感技术进行概述,对高温、高压、强辐照等极端环境下光

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-04-26; 录用日期: 2023-05-06; 网络首发日期: 2023-05-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875067)

通信作者: \*ningw@cqu.edu.cn

纤传感技术的应用及发展进行了分析与介绍。

## 2 高温高压环境下光纤 F-P 传感器研究现状

光纤 F-P 传感器属于干涉型光纤传感器,其原理是将外界物理量(如:温度、压力、力、应变、加速度等)的变化转换成 F-P 腔腔长的变化,利用白光干涉解调方法实现 F-P 腔腔长的解调,从而实现外界物理量的测量。采用不同的 F-P 腔腔长变化形式,不仅能够实现多种物理量的测量,还能使传感器的封装形式更加灵活,并同时增强传感器的环境适应性。在高温、高压、强辐照等极端环境下,电类传感器大部分情况下都会失效,无法实现测量,而光纤 F-P 传感器则能够在这些极端环境下有效工作,实现被测件的测量。国内外的研究人员开展了许多在高温、高压等极端环境下的光纤 F-P 传感器的研究工作。

### 2.1 高温光纤压力传感器研究现状

实现光纤高温压力传感器时,大都是选用耐高温材料如硅、硼硅玻璃、石英、碳化硅(SiC)、蓝宝石等,利用激光加工技术(飞秒激光加工、激光焊接等)或是微机电系统(MEMS)加工工艺(腐蚀、键合等)实现耐高温压力或是加速度芯片的加工。不同敏感材料和加工工艺会导致传感器的工作温度不同。

利用阳极键合工艺将硅和硼硅玻璃键合在一起能

够使压力传感器的工作温度达到 350 °C。中北大学 Jia 等<sup>[16]</sup>在玻璃基底上腐蚀出凹槽,利用加工工艺与硅敏感膜片键合,制作出了能够工作在 350 °C 的压力芯片(图 1),其最大非线性度为 0.4%。

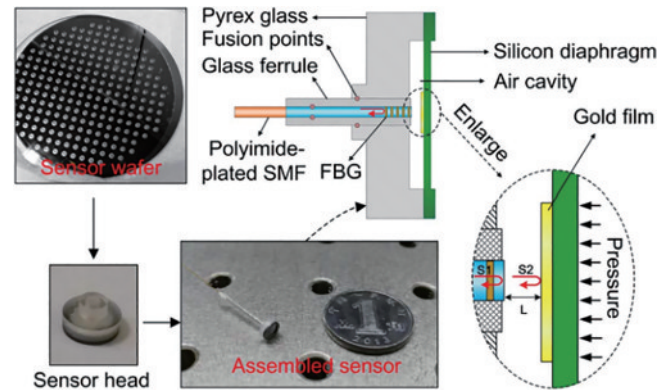


图 1 硅-硼硅玻璃光纤 F-P 压力传感器<sup>[16]</sup>

Fig. 1 Silicon-borosilicate glass fiber F-P pressure sensor<sup>[16]</sup>

由于单晶硅的融化温度可以达到 1000 °C 以上,采用原子扩散键合工艺实现硅-硅键合,能够使压力芯片工作在 700 °C 以上。中北大学 Li 等<sup>[17]</sup>利用该方法研制出了全硅敏感结构,传感器能够稳定工作在 800 °C,敏感度达到 3.25 μm/MPa[图 2(a)]。天津大学 Wang 等<sup>[18]</sup>研制的全硅压力传感器通过了 700 °C 高温下的测试[图 2(b)]。

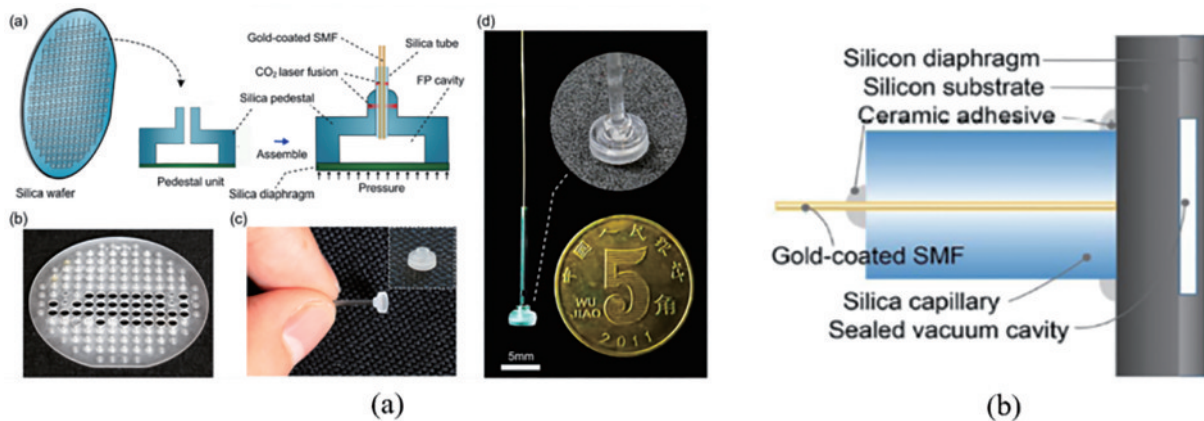


图 2 单晶硅 MEMS 光纤 F-P 高温压力传感器。(a) SiC 传感器头和测量方案示意图<sup>[17]</sup>;

(b) 全硅基双腔光纤压力传感器结构示意图<sup>[18]</sup>

Fig. 2 Monocrystalline silicon MEMS optical fiber F-P high-temperature pressure sensor. (a) Schematic diagram of SiC sensor head and measurement scheme<sup>[17]</sup>; (b) structural diagram of all silicon based dual cavity optical fiber pressure sensor<sup>[18]</sup>

碳化硅在 1600 °C 时能够保持良好的机械特性,因此利用碳化硅制作的压力传感芯片具有很高的工作温度。北京航空航天大学的 Jiang 等<sup>[19]</sup>在 2016 年利用超声振动铣磨工艺和镍扩散焊接技术实现了基于碳化硅的压力芯片制作,并在 600 °C 的高温环境下进行了传感器的测试,该传感器的灵敏度为 104.42 nm/MPa [图 3(a)]。中北大学的 Liang 等<sup>[20]</sup>在 2022 年利用放电等离子体刻蚀工艺制作基于碳化硅的传感芯片,该芯片能够稳定工作在 400 °C 的高温环境下[图 3(b)]。

利用石英构建光学 F-P 腔可使传感器能够工作在 700 °C 的高温。弗吉尼亚理工大学的 Zhu 等<sup>[21]</sup>在 2006 年采用湿法腐蚀工艺,利用单模光纤制作出的压力传感器能够工作在 710 °C,重复性优于 1.4% [图 4(a)]。成都电子科技大学的 Ran 等<sup>[22]</sup>在 2009 年利用激光加工技术在石英光纤中制作出全石英微型压力传感器,该传感器能够工作在 700 °C,压力灵敏度为 83.3 pm/MPa [图 4(b)]。密苏里科技大学的 Zhang 等<sup>[23]</sup>在 2014 年利用飞秒激光加工的方式在石英光纤上制作出了能够工

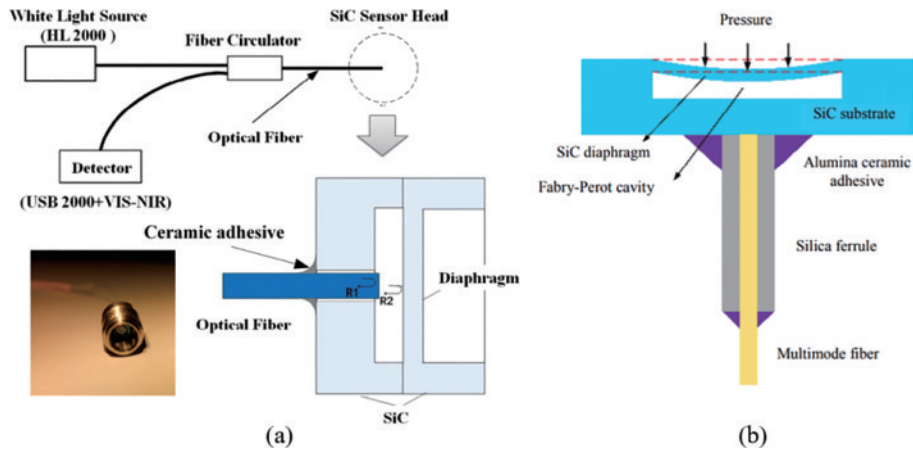


图 3 SiC 光纤 F-P 高温压力传感器<sup>[19-20]</sup>

Fig. 3 SiC optical fiber F-P high temperature pressure sensor<sup>[19-20]</sup>

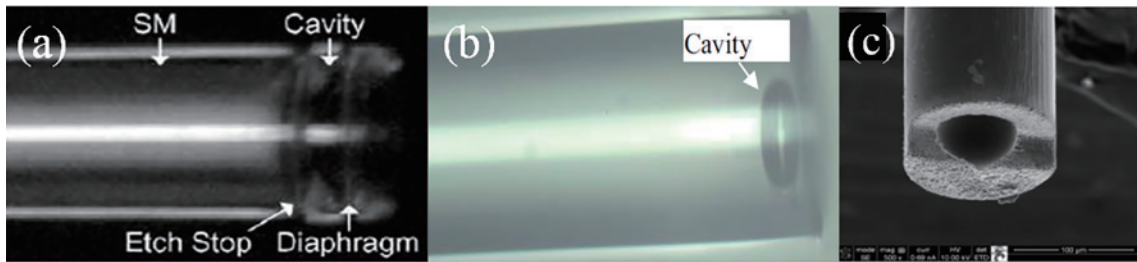


图 4 光纤端面压力传感器。(a)利用单模光纤制作出的压力传感器<sup>[21]</sup>；(b)利用激光加工技术制作的全石英微型压力传感器<sup>[22]</sup>；(c)利用飞秒激光加工的方式制作的压力传感器<sup>[23]</sup>

Fig. 4 Fiber end face pressure sensor. (a) Pressure sensor made of single-mode fiber<sup>[21]</sup>; (b) all quartz micro pressure sensor made of quartz fiber using laser processing technology<sup>[22]</sup>; (c) pressure sensor made of quartz fiber using femtosecond laser processing method<sup>[23]</sup>

作在 700 °C 的压力传感器,其灵敏度为  $2.8 \times 10^{-4}$  nm/Pa [图 4(c)]。

经过多年的研究,高温光纤 F-P 压力芯片的研制取得了较好的结果,芯片能够承受超过 1000 °C 的高温,但是现阶段高温高压封装技术是限制高温光纤压力传感器走向实用化的关键问题,目前需要在高温高压封装技术方面进行突破。

### 2.2 高温光纤应变传感器研究现状

2021 年,武汉理工大学的 Xia 等<sup>[24]</sup>提出并研究了一种能够在高温下进行超大应变测量的光子晶体光纤 F-P 传感器(图 5),该传感器在 1000 °C 的高温下,可以准确检测到 9436.66  $\mu\epsilon$  的大机械诱导应变。

2019 年北京航空航天大学的 Zhang 等<sup>[25]</sup>提出了一种基于蓝宝石衍生光纤的 F-P 干涉仪,传感器结构如图 6 所示,该结构在高温高达 950 °C,应变范围为 0~1000  $\mu\epsilon$  时,应变灵敏度分别达到 1.19 pm/ $\mu\epsilon$  和 1.06 pm/ $\mu\epsilon$ 。

同年电子科技大学的 Yang 等<sup>[26]</sup>提出了温度补偿型全光纤传感器(图 7),其灵敏度可通过控制腔长和光纤材料来调节,工作温度可达 400 °C,应变灵敏度为 41.6 pm/ $\mu\epsilon$ 。

2020 年北京航空航天大学的 Zhang 等<sup>[27]</sup>提出了一种基于蓝宝石衍生纤维的空气复合 F-P 干涉仪(图 8),

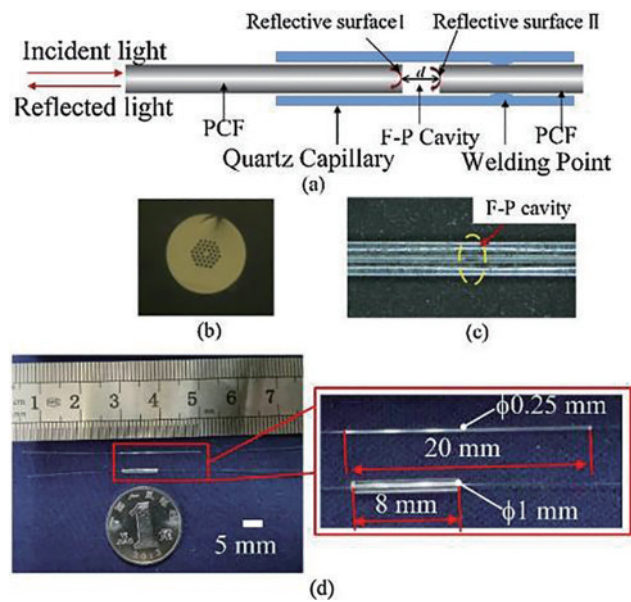


图 5 光子晶体光纤 F-P 传感器<sup>[24]</sup>

Fig. 5 Photonic crystal fiber F-P sensor<sup>[24]</sup>

用于同时测量应变和温度,在 0~500  $\mu\epsilon$  的范围内应变灵敏度为 5.38 pm/ $\mu\epsilon$ 。

2022 年重庆大学 Jiao 等<sup>[28]</sup>开展了用于燃料组件热工水力实验的 300 °C、4 MPa 光纤 F-P 力应变传感器的研究,在燃料组件热工水力实验中取得了良好的实验

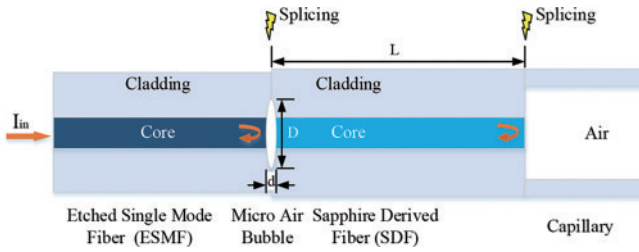


图 6 蓝宝石衍生光纤传感器结构图<sup>[25]</sup>

Fig. 6 Structure diagram of sapphire-derived fiber sensor<sup>[25]</sup>

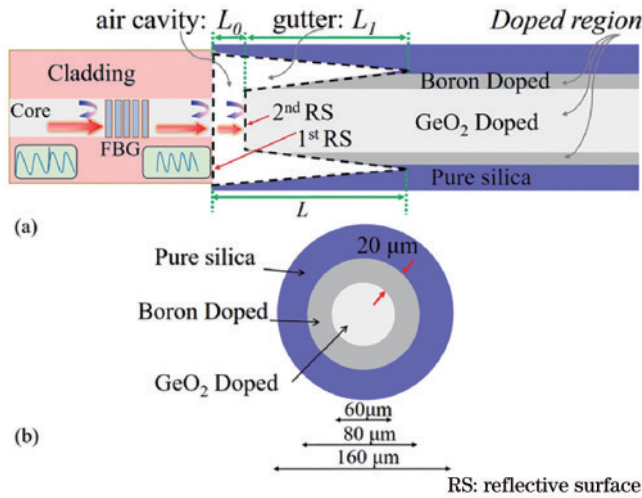


图 7 传感器原理图和相关示意图。(a)传感器原理图;(b)大直径光纤截面示意图<sup>[26]</sup>

Fig. 7 Sensor schematic diagram and related schematic diagram (a) Schematic of sensor; (b) schematic of large diameter fiber<sup>[26]</sup>

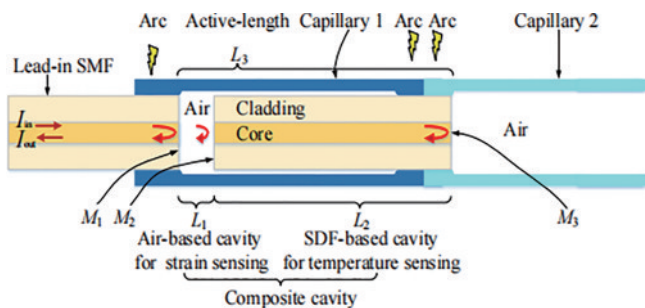


图 8 空气纤维基复合材料光纤 F-P 干涉仪示意图<sup>[27]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of air fiber matrix composite optical fiber F-P interferometer<sup>[27]</sup>

结果。

该传感器(图 9)利用增敏结构实现传感器的高灵敏度,经测试灵敏度达到了  $12.6 \text{ nm}/\mu\epsilon$ 。利用纳米银烧结工艺将镀金光纤构成的 F-P 腔烧结在了增敏结构上,使得传感器可以稳定工作在  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  温度下。利用激光焊接工艺将增敏结构密封在承压壳体内,使得传感器能够工作在  $4 \text{ MPa}$  的水压下。

当利用光纤 F-P 进行高温高压应变测量时,关键问题在于如何选择合适的封装材料、封装结构以及光纤与封装结构的连接方式来实现传感器在高温高压下

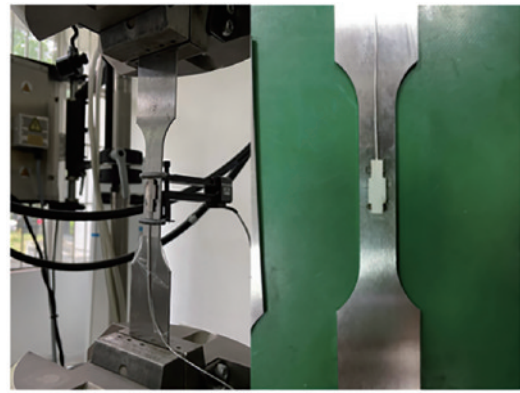


图 9 微型光纤 F-P 力传感器<sup>[28]</sup>

Fig. 9 Micro-fiber F-P force sensor<sup>[28]</sup>

的耐温、耐压以及高灵敏度。因此对于高温光纤 F-P 应变传感器,光纤与封装结构的连接方式以及封装材料和结构是目前需要解决的关键问题。

### 2.3 高温光纤加速度传感器研究现状

在电磁干扰强的环境下,相比于电类加速度传感器,光纤加速度传感器具有底噪低的优点。北京理工大学的 Cui 等<sup>[29]</sup>提出一种具有外征 F-P 干涉仪结构的蓝宝石光纤高温加速度传感器,传感器的 F-P 腔由蓝宝石光纤端面和振动膜片的抛光表面组成,可以在  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$  下工作,加速度灵敏度为  $20.91 \text{ nm/g}$ (图 10)。

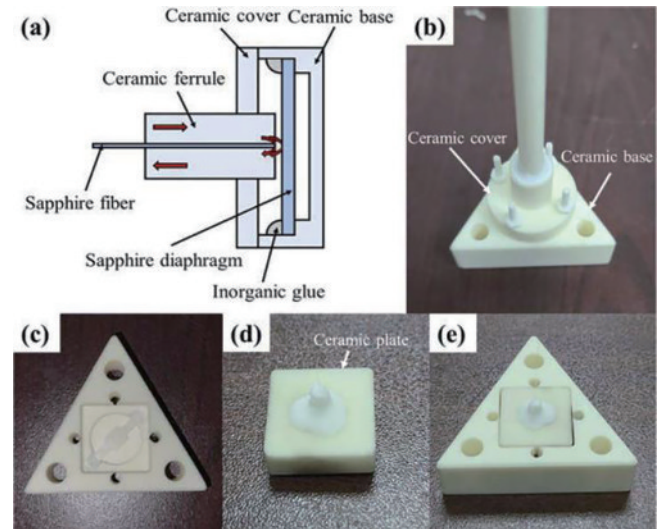


图 10 蓝宝石光纤振动传感器<sup>[29]</sup>。(a)配置;(b)物理布局;

(c)陶瓷底座;(d)陶瓷板;(e)陶瓷组件

Fig. 10 Sapphire fiber vibration sensor<sup>[29]</sup>. (a) Configuration;

(b) physical layout; (c) ceramic base; (d) ceramic plate;

(e) ceramic assembly

武汉理工大学的 Mahissi 等<sup>[30]</sup>利用 MEMS 工艺支撑悬臂梁,与收集光纤端面形成 F-P 腔,使其能够工作在  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  环境中,灵敏度约为  $370 \text{ mV/g}$ ,工作频率范围为  $100 \sim 1000 \text{ Hz}$ ,如图 11 所示。

### 2.4 蓝宝石光纤传感技术研究现状

超高温下的测量对于航空/航天发动机的研制具有重要作用。超高温下的测量对传感器的材料提出了挑

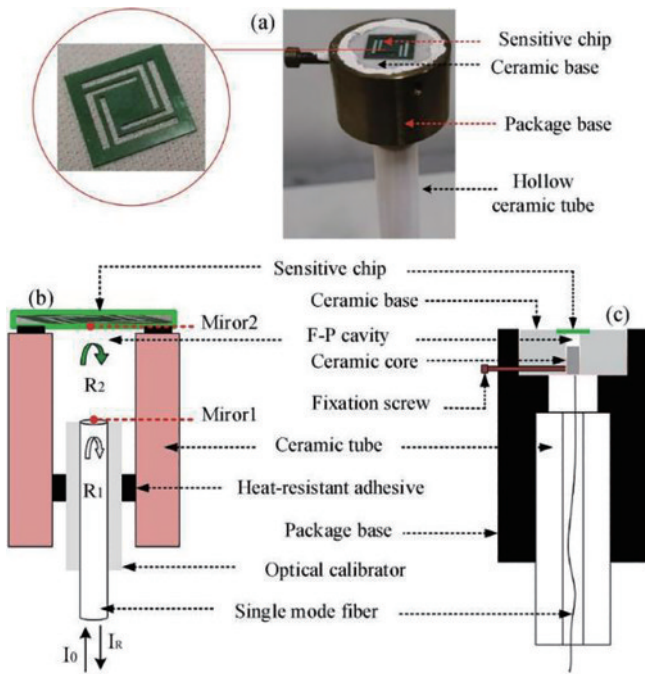


图 11 传感器<sup>[30]</sup>。(a)传感器的物理照片;(b)探头腔的结构图;(c)光纤 F-P 传感器结构图

Fig. 11 Sensor<sup>[30]</sup>. (a) Physical photo of the sensor; (b) structure of the probe cavity; (c) structure of the fiber F-P sensor

战,蓝宝石具有优良的光学性能,其熔点约为 2050 °C,具有很好的耐温特性,因此研究基于蓝宝石的压力芯片制作方法是目前高温光纤压力芯片的研究重点和热点,蓝宝石压力芯片的加工工艺也是目前亟须解决的问题。

北京航空航天大学的王ang等<sup>[31]</sup>利用蓝宝石晶圆的两个端面构成的 F-P 腔制作了温度传感器,采用蓝宝石光纤进行干涉光的收集,传感器的工作温度可达 1550 °C,温度灵敏度为 32.5 pm/°C[图 12(a)];天津大

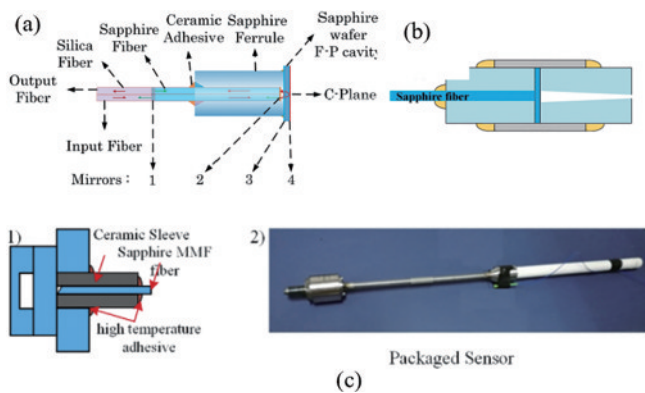


图 12 蓝宝石光纤传感器。(a)北京航空航天大学提出的蓝宝石光纤 F-P 温度传感器<sup>[31]</sup>; (b)天津大学提出的蓝宝石光纤 F-P 温度传感器<sup>[32]</sup>; (c)蓝宝石光纤压力传感器<sup>[33]</sup>

Fig. 12 Sapphire fiber optic sensor. (a) Sapphire fiber optic F-P temperature sensor proposed by Beijing University of Aeronautics and Astronautics<sup>[31]</sup>; (b) sapphire fiber optic F-P temperature sensor proposed by Tianjin University<sup>[32]</sup>; (c) sapphire fiber optic pressure sensor<sup>[33]</sup>

学 Yu 等<sup>[32]</sup>采用蓝宝石晶片与蓝宝石光纤端面形成了 F-P 腔,同时蓝宝石光纤也作为传光光纤,该传感器能够工作在 1080 °C[图 12(b)];中国电子科技集团公司第四十九研究所 Shao 等<sup>[33]</sup>利用 MEMS 湿法刻蚀技术制备了低表面粗糙度蓝宝石压敏膜片,采用直接键合工艺将蓝宝石敏感膜片和基板键合在一起制成了压力芯片,该结构提升了复合 F-P 腔结构传感器的稳定性和灵敏度,使其可以稳定工作在 1200 °C 环境中,压力灵敏度可达 15 nm/MPa[图 12(c)]。

### 3 光纤 F-P 传感器解调系统研究现状

解调是实现光纤 F-P 传感器测量的关键技术,解调方法的稳定性、准确性以及精度直接影响传感器测量结果。同时解调系统的国产化也是推动单点光纤传感器走向应用的关键问题。根据解调原理不同,光纤 F-P 传感器的解调分为强度解调<sup>[34-35]</sup>和相位解调<sup>[36-37]</sup>两大类。

#### 3.1 强度解调方法

强度解调方法是指:相干光源经 F-P 腔调制后,反射光或透射光强度随腔长变化而周期性改变,利用腔长和强度一对一的关系进行 F-P 腔腔长的解调。Ranade 等<sup>[38]</sup>最早提出光纤 F-P 传感器强度解调方法,但是该方法受激光器强度变化的影响,解调精度不够。针对该问题,Wang 等<sup>[39]</sup>提出了基于白光的自补偿式强度解调方法,有效降低了光源强度变化对解调精度的影响,但是该方法需要将腔长变化控制在 1/4 光源中心波长内。Kersey 等<sup>[40]</sup>首次提出双波长强度解调法,采用相位正交的两路干涉信号来实现 F-P 腔动态变化的解调,有效地提高了 F-P 腔的变化范围,但是相位正交条件实现起来非常困难。为此 Schmidt 等<sup>[41]</sup>提出了三波长强度解调法,该方法稳定性好、分辨率高、解调速度快,但是在 F-P 腔腔长发生较大变化时,测量误差将增大。

近年来,国内对强度解调法的研究热点在于如何扩大 F-P 腔的腔长变化范围以及如何消除光源强度变化和光源传输损耗对解调精度的影响。大连理工大学的 Liu 等<sup>[42]</sup>提出共光路双波长正交相位解调技术,解决了传统双波长解调技术中双光路及探测器引入的强度失衡以及传感器腔长和波长必须相互匹配的限制等问题。北京理工大学的 Jia 等<sup>[43]</sup>先后对双波长及三波长解调技术进行了研究,解决了解调过程中传感器腔长和光源波长必须匹配以及干涉条纹的直流分量需要被去除的问题。

#### 3.2 相位解调方法

相位解调法采用的是白光光源,与强度解调不同,相位解调法的输出光强不仅与腔长  $L$  有关还与输入光波长有关,可大幅提升测量精度与稳定性。目前研究较多的相位解调方法分为光谱解调法<sup>[44-45]</sup>与相关解调法<sup>[46-47]</sup>。

其中光谱解调法采用白光作为光源,主要有条纹计

数法和傅里叶变化法。条纹计数法是光源经过 F-P 腔干涉,在光谱域反射光后,利用透射光的强度与光源波长  $\lambda$  的函数关系来实现 F-P 腔  $L$  的解调。根据白光干涉理论,在波长域找到相邻的两个强度极大值对应的波长  $\lambda_m$  和  $\lambda_{m+q}$  以及相应的干涉级次  $m$  级和  $m+q$  级,得到 F-P 腔腔长  $L = (q/2) \cdot [(\lambda_{m+q} \cdot \lambda_m) / (\lambda_m - \lambda_{m+q})]$ ,  $q = 1, 2, 3, \dots$ 。

基于傅里叶变换的解调光路结构如图 13 所示,利用光谱仪采集得到 F-P 腔的干涉图谱,对干涉图谱进行相关的预处理(滤波、归一化等),再利用傅里叶变化求解 F-P 腔的腔长。美国弗吉尼亚理工大学的 Shen 等<sup>[48]</sup>于 2005 年开展了快速傅里叶变换解调技术的研究,前期研究得到的解调分辨率只能达到数百纳米,精度较低。后续很多研究人员对该方法的解调速度和解调精度进行了优化,但是制约该解调技术的关键问题是相位跳变导致的解调误差。

加拿大光学中心<sup>[49]</sup>于 1993 年首次提出基于 Fizeau 干涉的光纤 F-P 相关解调法,该方法又称腔长

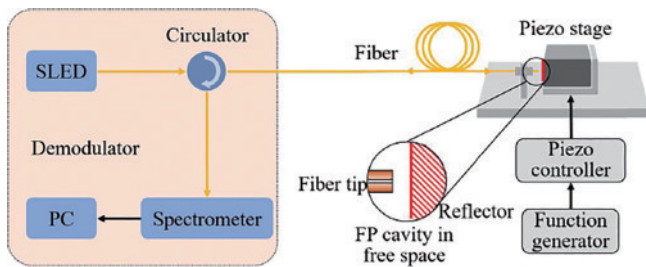


图 13 基于傅里叶变换的解调光路<sup>[48]</sup>

Fig. 13 Demodulation optical path based on Fourier transform<sup>[48]</sup>

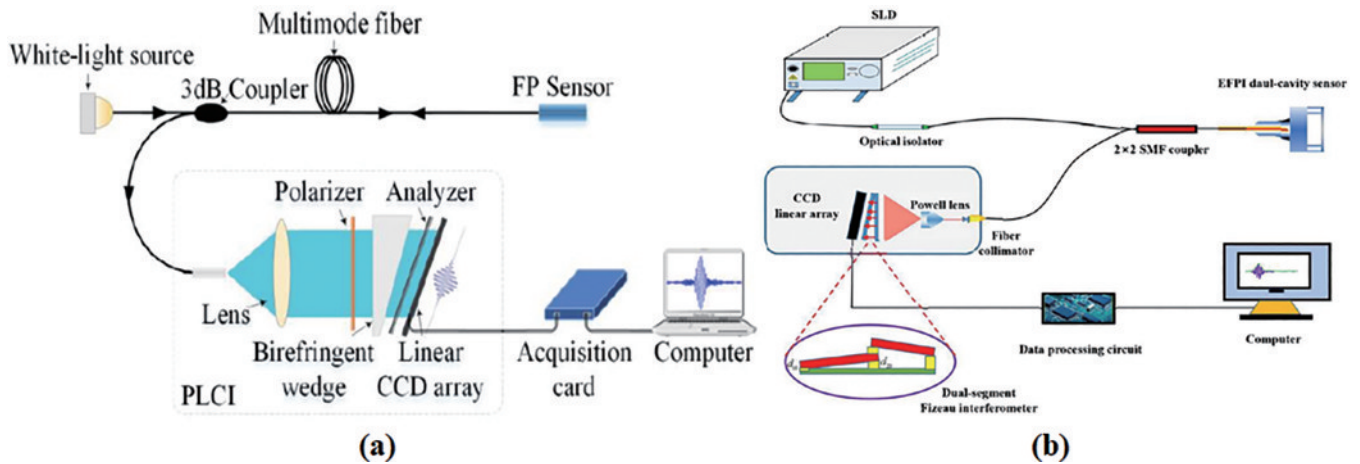


图 15 偏振低相干干涉解调技术<sup>[50-51]</sup>

Fig. 15 Polarization-low coherence interference demodulation technique<sup>[50-51]</sup>

2022 年,海南大学 Chen 等<sup>[52]</sup>使用阵列波导光栅(AWG)得到 F-P 传感器的反射光谱,再利用多峰解调方法计算得到 F-P 腔的腔长,其系统如图 16 所示。利用网络模型来训练大规模数据集,将实际得到的

匹配法,它是利用互相关运算实现 F-P 腔腔长的解调。相关解调法分为扫描式相关解调法和非扫描式相关解调法,扫描式解调法是利用一个可变腔长的解调器(如可调谐 F-P 滤波器),将经测量 F-P 腔干涉后的光通过可调谐 F-P 滤波器,当滤波器的长度与测量 F-P 腔的腔长一致时则会出现强度的最大值,从而实现 F-P 腔的解调。为了提高解调系统的精度,加拿大的 FISO 公司开发了非扫描式相关解调系统,如图 14 所示。

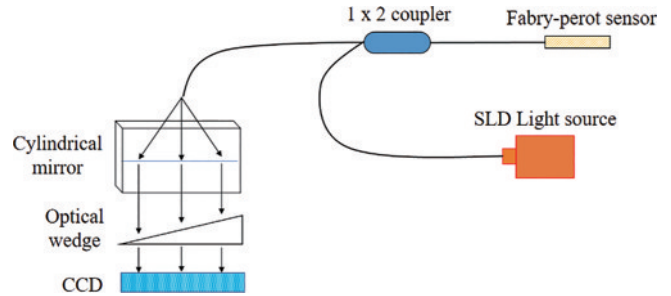


图 14 非扫描式解调系统框图<sup>[49]</sup>

Fig. 14 Block diagram of the non-scanning demodulation system<sup>[49]</sup>

该系统的优点是稳定性好,其关键器件是在光路上实现光学相关运算的光楔,光楔的高度差限定了可解调的 F-P 腔的腔长范围,光楔的面型质量限定了信号的对比度,CCD 的像元个数限定了解调分辨率,CCD 的帧频限定了解调速度。

基于偏振低相干干涉的解调方法降低了对光楔面型精度的要求,天津大学的王雪<sup>[50]</sup>以及西安工业大学的 Ma 等<sup>[51]</sup>均对该方法进行了研究,光路结构如图 15 所示。但是,在该方法中 o 光和 e 光在材料中折射率相差很小,因此解调动态范围较小。

结果与模型中的数据进行对比来提高解调精度。这种方法将传统的多峰解调方法与机器学习相结合,提高了解调精度,理论上解调精度可以达到 pm 级别。

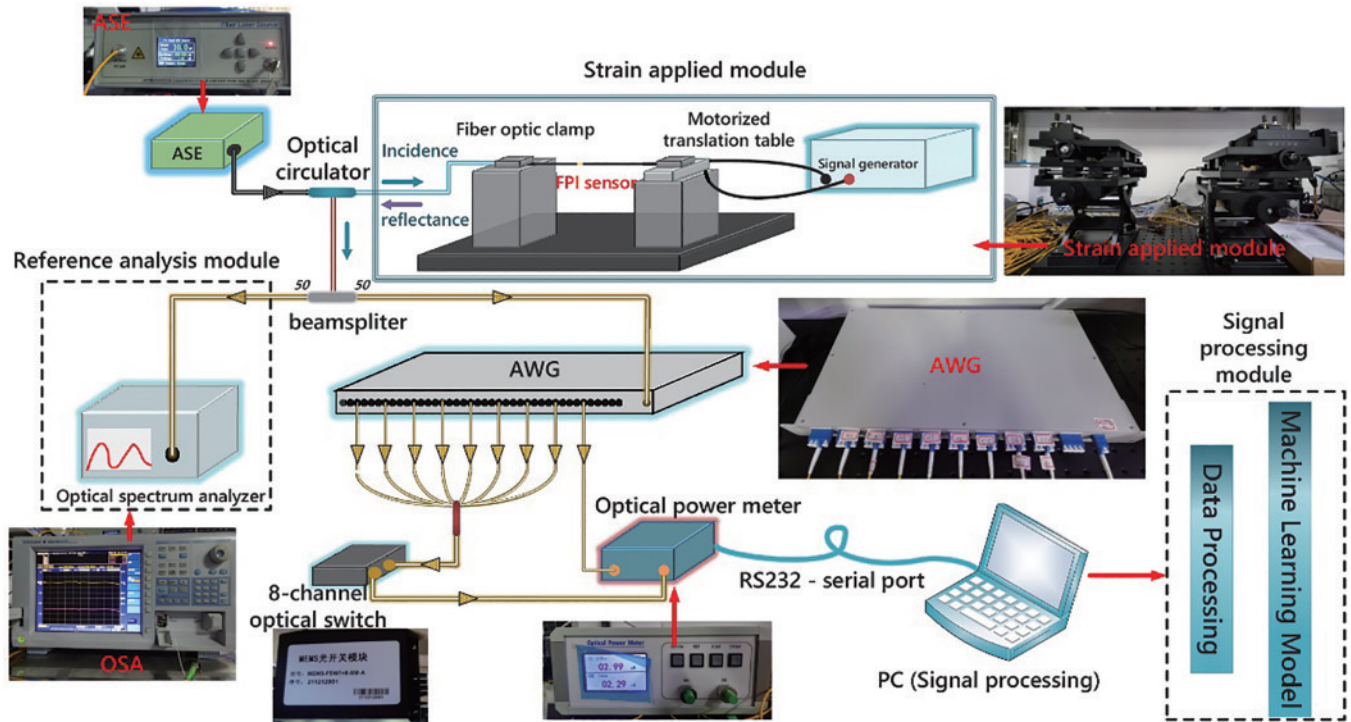


图 16 基于 AWG 的 F-P 解调系统<sup>[52]</sup>  
 Fig. 16 F-P demodulation system based on AWG<sup>[52]</sup>

重庆大学对光纤 F-P 相位解调方法进行了系统研究:首先分析了光源谱分布<sup>[53]</sup>以及采样方式<sup>[54]</sup>对傅里叶变化法解调精度的影响;其次,针对多个 F-P 腔复用的应用,改进了傅里叶变化法<sup>[54]</sup>实现了两个 F-P 腔的复用;然后采用离散腔长变换法<sup>[55]</sup>直接将光谱信

号从波长域变换到腔长域,有效地避免了傅里叶变化由于插值拟合引起的误差;最后提出了可调谐 F-P 腔解调法,并进行了相关解调算法的研究,实现了光纤 F-P 应变传感器的解调,并将该系统应用于桥梁结构健康监测,如图 17 所示。

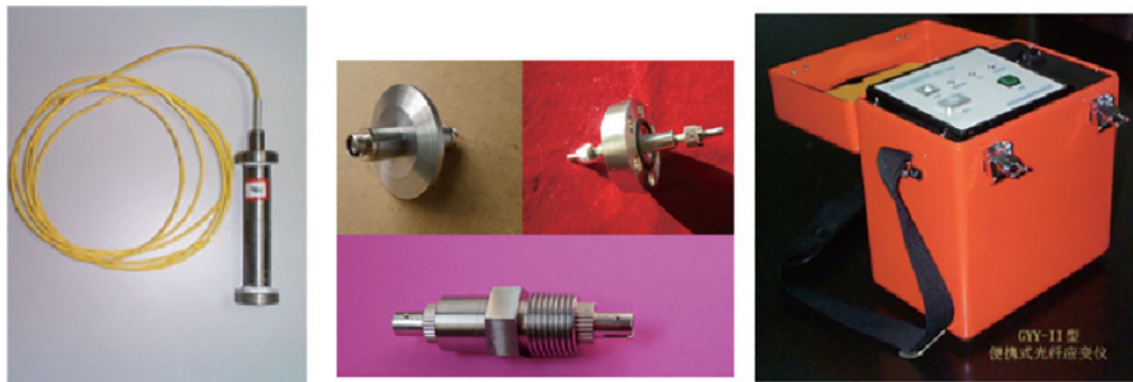


图 17 光纤 F-P 应变传感及应变仪<sup>[55]</sup>  
 Fig. 17 F-P fiber strain sensor and strain instrument<sup>[55]</sup>

针对基于菲佐干涉仪的非扫描式相关解调法解调速度慢,无法实现小间隙测量的问题,刘松瓚<sup>[56]</sup>和李钧寿等<sup>[57]</sup>提出了利用高功率谱密度的光源(激光二极管、超连续谱光源等)作为工作光源来提高非扫描式相关解调的采样速度。系统研究了光源带宽、中心波长、光谱分布以及菲佐干涉膜系对解调精度的影响。在此基础上成功研制了一系列满足不同应用需求的解调仪。

玻璃片工作面表面粗糙度和面型精度对小量程菲佐干涉仪测量精度影响的基础上,提出当玻璃片表面粗糙度优于 0.4 nm,面型精度优于 30 nm 时,干涉仪才能在小量程内实现间隙的高精度测量。同时为了提高采样频率,采用超连续谱光源作为工作光源,分析出当具有相干性的超连续谱光源在入射到多模光纤时,传输模式间的干涉以及色散使得光纤在光能传输时易受到外界的微扰动,从而导致间隙测量分辨率和精度的降低。根据分析结果提出了相应的解决方案,

2022 年,重庆大学的 Tan 等<sup>[58]</sup>在分析菲佐干涉仪

最终在 3~6  $\mu\text{m}$  的量程范围内实现了 0.3 nm 的间隙分辨率,采样速度能够达到 5 kHz,结果如图 18 所示,

该系统可用于近场光学中工件台  $z$  方向的位移检测。

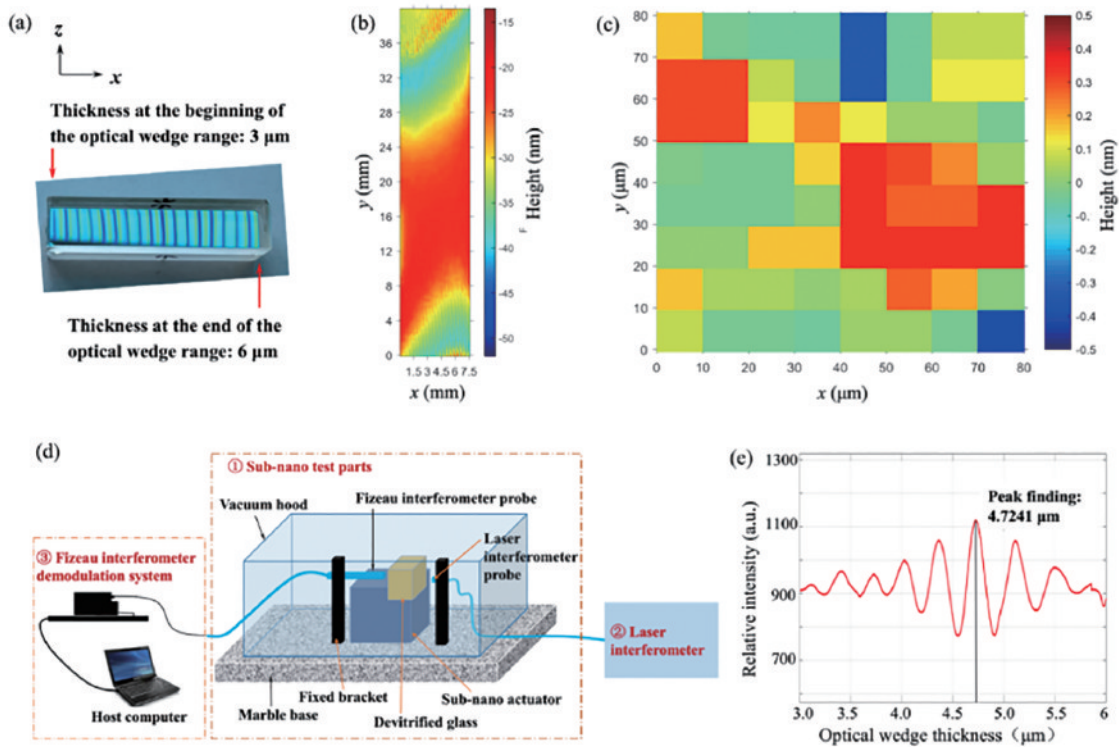


图 18 小量程菲佐干涉仪面型对测量精度影响的分析<sup>[58]</sup>

Fig. 18 Analysis of the influence of small range Fizeau interferometer's surface shape on measurement accuracy<sup>[58]</sup>

## 4 光纤 F-P 传感技术在高温高压等环境下的应用现状

相比于电类传感系统,单点干涉型光纤传感技术在极端环境(如高温、高压、强辐照、流体等)下的测量更具优势,在这类环境下电类传感器会发生测量失效,无法实现有效测量,而单点干涉型光纤传感器在进行有效封装的基础上能够实现这些测量需求,有效解决极端环境下无法测量的问题。近年来,单点干涉型光纤传感技术在航空发动机检测、核电设备检测以及工件台高精度位移检测等领域有了重要的应用。

### 4.1 航空发动机检测

动态压力测试是进行压气机喘振、燃烧室/加力燃烧室燃烧稳定性监测及涡轮级间动态流场特性研究的重要实验手段,目前没有设计方法可以完全取代动态压力测试实验。国外已经有相关的光纤压力技术方案进行相关的测试,而国内还处于光纤压力传感系统研究阶段,尚未达到工程测试的要求。

2013 年,英国 Oxsensis 有限公司的 Pechstedt<sup>[59]</sup> 采用多腔设计的蓝宝石材料制作出了蓝宝石高温压力与温度传感器,如图 19 所示。该公司对双波长解调法进行了深入的研究,成功研发出了用于测量燃气轮机燃烧室的高温光纤压力传感系统,能够实现频响达 20 kHz 的传感器的解调(PT1100)。

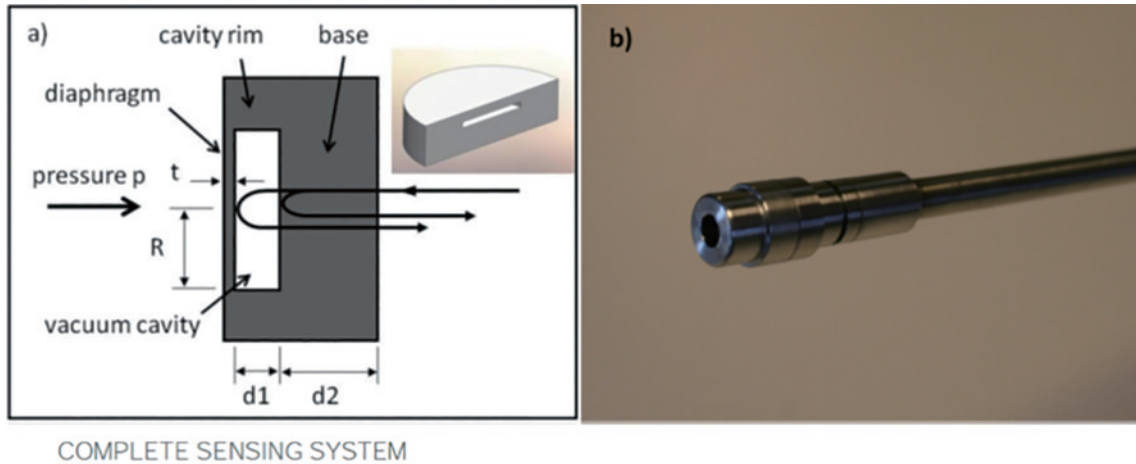
该系统用于燃气轮机测试时,实现了在 700  $^{\circ}\text{C}$  下超过 6 MPa 的压力测量,在整个温度范围内压力测量线性度为  $\pm 0.1\%$  FS。

2006 年 Luna 创新公司的 Palmer 等<sup>[60]</sup> 开发了一种压力传感器,以监测燃气涡轮发动机涡轮入口和燃烧动态压力波动。该传感器采用了单晶蓝宝石膜片作为压力敏感单元,使用膜片、陶瓷套管与光纤端面构成 F-P 腔结构,通过解调光学信号达到压力测量的目的,如图 20 所示。传感器在 800  $^{\circ}\text{C}$  上的应用已经成熟。在 1050  $^{\circ}\text{C}$  的高温环境中进行了 0~3.5 MPa 范围内动态压力的测量,温度校准在  $\pm 0.15\%$  范围内,一个压力循环迟滞为 0.3% FS,三个压力循环的传感器的重复性是  $\pm 0.25\%$  FS。

### 4.2 核电设备组件检测

对核电关键组件进行热工水力实验,测试其在该条件下的结构和材料损伤,这对于评估组件的寿命、优化组件的设计、保证核电站的安全运行具有重要的作用和意义。对组件的测试主要是用应变、压力、加速度传感器来获取组件在工作时的结构参数,建立寿命预测模型。核电组件的测试是在高温高压液体(压水堆: 350  $^{\circ}\text{C}$ , 17 MPa。铅铋堆: 550  $^{\circ}\text{C}$ , 2 MPa)环境下进行的,传统的电类传感器在该类环境下会发生测量失效(或被国外限运)。为此,开展基于光纤 F-P 的高温高压传感系统研究具有重要的意义。





COMPLETE SENSING SYSTEM

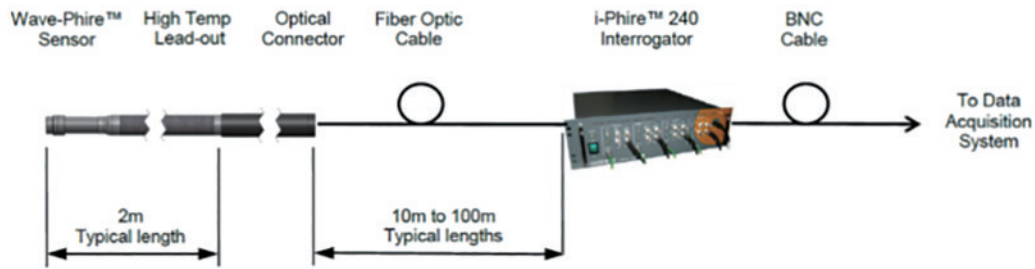


图 19 Oxsensis 公司研发的蓝宝石光纤 F-P 传感系统<sup>[59]</sup>

Fig. 19 Sapphire fiber F-P sensing system produced by Oxsensis<sup>[59]</sup>

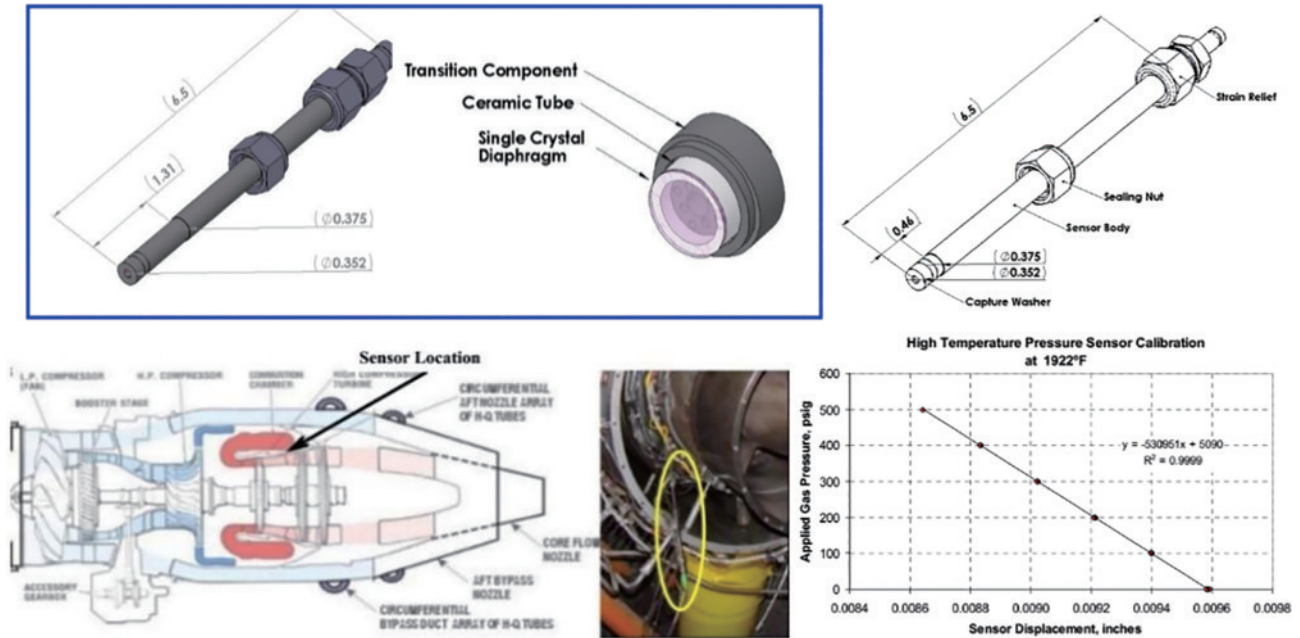


图 20 蓝宝石光纤 F-P 传感器及其应用<sup>[60]</sup>

Fig. 20 Sapphire fiber F-P sensor and its application<sup>[60]</sup>

重庆大学与中国核动力研究设计院针对该需求开展了相关传感系统的研制测试工作。2018 年利用研制的微型光纤 F-P 传感系统在“华龙一号”流致振动实验中完成了传热管撞击力的测量,是国内首次采集到传热管径向撞击力信号,有助于分析传热管与支撑管座之间的磨损状态,如图 21<sup>[61]</sup>所示。

2022 年利用研制的高温光纤应变传感器,在燃料组件热工水力实验中进行了片式燃料组件的流致振动测试,获取了片式燃料组件的受力信息,为分析片式组件的状态提供了实验数据,如图 22<sup>[28]</sup>所示。

通过前期在核电设备热工水力实验中的应用,验证了光纤传感器在解决核电领域高温高压环境下的可

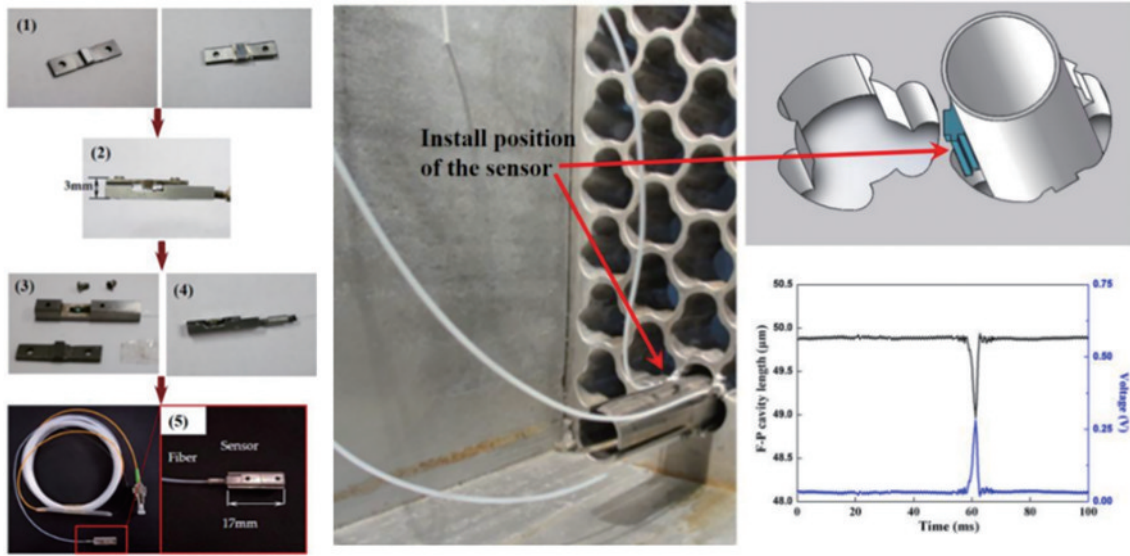


图 21 传热管流致振动测试<sup>[61]</sup>  
 Fig. 21 Flow-induced vibration test of the heat transfer pipe<sup>[61]</sup>

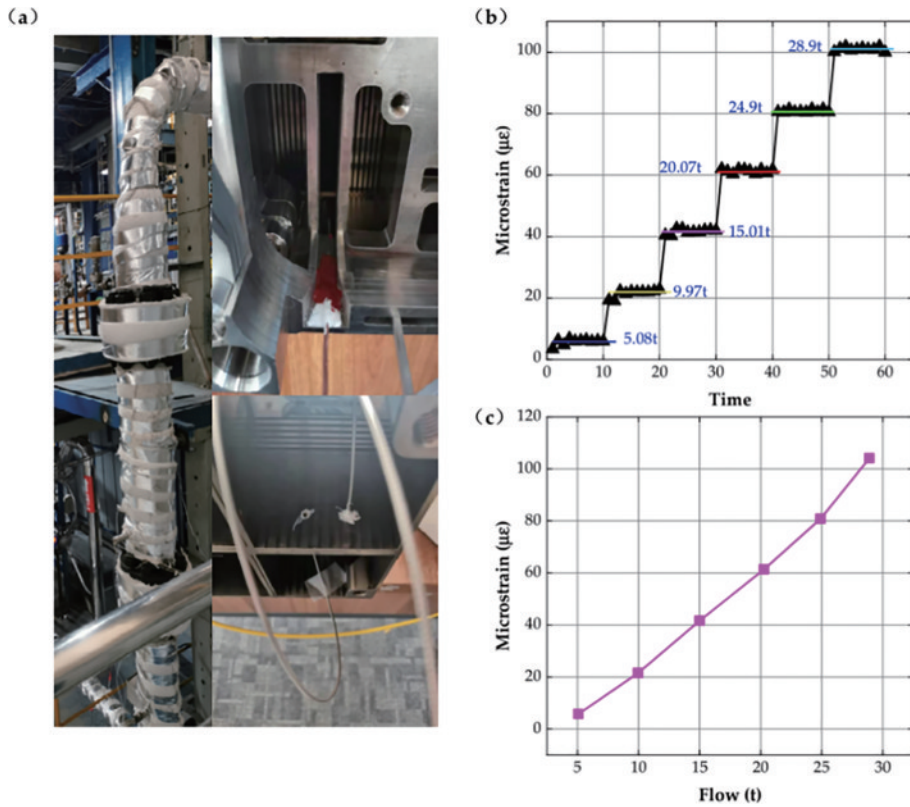


图 22 燃料组件热工水力实验<sup>[28]</sup>  
 Fig. 22 Thermal and hydraulic experiment of fuel assembly<sup>[28]</sup>

用性。同时也解决了光纤传感器用于核电设备的耐高温高压封装问题,使得光纤传感器有望逐步取代现有的传感器,实现传感器在核电领域的自主可控,解决核电领域之前“想测测不到”的问题,提升核电设备的可靠性。

## 5 结束语

本文详细阐述了国内外基于白光干涉的光纤 F-P

传感技术在高温高压环境下的研究现状,重点分析了在极端环境下光纤 F-P 传感技术的基本原理及特性。随着封装技术与材料在高温高压强辐照等极端环境下的突破,光纤 F-P 传感技术在核电、航空航天、石油勘探等领域的应用将发挥越来越重要的作用。根据极端环境下光纤 F-P 传感器的研究现状可知,未来需要在如下几个方面开展进一步的研究,以使光纤 F-P 传感技术在测量精度和可靠性方面进一步提高:1)研究耐高

温高压抗辐照的封装材料和工艺,提高光纤 F-P 传感器在极端环境下的可靠性;2)研究能够提高极端环境下传感器测量灵敏度和精度的敏感结构,提高传感的测量精度和准确性;3)结合光集成芯片等新研究方法,实现解调系统的微型化,提高测量系统的环境适用性。

## 参 考 文 献

- [1] Giallorenzi T G, Bucaro J A, Dandridge A, et al. Optical fiber sensor technology[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(4): 626-665.
- [2] Hong X B, Wu J, Zuo C, et al. Dual Michelson interferometers for distributed vibration detection[J]. Applied Optics, 2011, 50(22): 4333-4338.
- [3] Zhang G, Xi C, Liang Y J, et al. Dual-Sagnac optical fiber sensor used in acoustic emission source location[C]// Proceedings of 2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference, July 26-30, 2011, Harbin, China. New York: IEEE Press, 2011: 1598-1602.
- [4] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Distributed sensing at centimeter-scale spatial resolution by BOFDA: measurements and signal processing[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(1): 48-56.
- [5] Soto M A, Nannipieri T, Signorini A, et al. Raman-based distributed temperature sensor with 1 m spatial resolution over 26 km SMF using low-repetition-rate cyclic pulse coding[J]. Optics Letters, 2011, 36(13): 2557-2559.
- [6] Wang Z, Chen J, Wei H, et al. Sapphire Fabry - Perot interferometer for high-temperature pressure sensing[J]. Applied Optics, 2020, 59(17): 5189-5196.
- [7] Qi X G, Wang S, Jiang J F, et al. Fiber optic Fabry-Perot pressure sensor with embedded MEMS micro-cavity for ultra-high pressure detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(11): 2719-2725.
- [8] Guo K K, He J, Li H, et al. High-spatial-resolution high-temperature sensor based on ultra-short fiber Bragg gratings with dual-wavelength differential detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(7): 2166-2172.
- [9] Nan J, Zhang D S, Wen X Y, et al. Elimination of thermal strain interference in mechanical strain measurement at high temperature using an EF-PI-RFBG hybrid sensor with unlimited cavity length[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(10): 5270-5276.
- [10] 刘铁根, 刘琨, 江俊峰, 等. 天津大学光纤传感技术研究部分最新进展[J]. 光电工程, 2010, 37(3): 1-6, 38.  
Liu T G, Liu K, Jiang J F, et al. Partial latest progress of fiber sensing techniques in Tianjin university[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(3): 1-6, 38.
- [11] 何慧灵, 赵春梅, 陈丹, 等. 光纤传感器现状[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(3): 39-41, 38.  
He H L, Zhao C M, Chen D, et al. Present status of optic fiber sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(3): 39-41, 38.
- [12] 林之华, 李朝锋, 刘甲春. 光纤传感技术及其军事应用[J]. 光通信技术, 2011, 35(7): 4-6.  
Lin Z H, Li C F, Liu J C. Optical fiber sensing technology and its application in military[J]. Optical Communication Technology, 2011, 35(7): 4-6.
- [13] Wang S A, Zhou J E, Jiang J F, et al. Multi-channel polarized low-coherence interference synchronous demodulation system based on a matrix charge-coupled device[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(7): 071202.
- [14] 张树桓, 江毅. 非本征法布里-珀罗干涉型传感器非周期信号的相位解调方法[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0906002.  
Zhang S H, Jiang Y. Phase demodulation method for non-periodic signal in extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0906002.
- [15] Wang N, Zhu Y, Gong T C, et al. Multichannel fiber optic Fabry-Perot non-scanning correlation demodulator[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(7): 70601-70603.
- [16] Jia P G, Liang H, Fang G C, et al. Batch-producible MEMS fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor for high-temperature application[J]. Applied Optics, 2018, 57(23): 6687-6692.
- [17] Li J S, Jia P G, Fang G C, et al. Batch-producible all-silica fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor for high-temperature applications up to 800 °C [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 334: 113363.
- [18] Wang X, Jiang J F, Wang S, et al. All-silicon dual-cavity fiber-optic pressure sensor with ultralow pressure-temperature cross-sensitivity and wide working temperature range[J]. Photonics Research, 2021, 9(4): 521-529.
- [19] Jiang Y G, Li J A, Zhou Z W, et al. Fabrication of all-SiC fiber-optic pressure sensors for high-temperature applications[J]. Sensors, 2016, 16(10): 1660.
- [20] Liang T, Li W W, Lei C, et al. All-SiC fiber-optic sensor based on direct wafer bonding for high temperature pressure sensing[J]. Photonic Sensors, 2022, 12(2): 130-139.
- [21] Zhu Y Z, Cooper K L, Pickrell G R, et al. High-temperature fiber-tip pressure sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(2): 861-869.
- [22] Ran Z L, Rao Y J, Zhang J, et al. Laser-machined all-fiber in-line tip pressure sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 75032X.
- [23] Zhang Y N, Yuan L, Lan X W, et al. High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric pressure sensor fabricated by femtosecond laser: erratum[J]. Optics Letters, 2014, 39(1): 17.
- [24] Xia P, Tan Y G, Li T L, et al. A high-temperature resistant photonic crystal fiber sensor with single-side sliding Fabry-Perot cavity for super-large strain measurement [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 318: 112492.
- [25] Zhang P H, Zhang L, Wang Z Y, et al. Sapphire derived fiber based Fabry-Perot interferometer with an etched micro air cavity for strain measurement at high temperatures[J]. Optics Express, 2019, 27(19): 27112-27123.
- [26] Yang T T, Ran Z L, He X, et al. Temperature-

- compensated multifunctional all-fiber sensors for precise strain/high-pressure measurement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4634-4642.
- [27] Zhang P H, Zhang L, Wang Z Y, et al. A Fabry-Perot interferometer for simultaneous measuring temperature and strain based on sapphire-derived fiber-air[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11569: 115690E.
- [28] Jiao J N, Chen J J, Wang N, et al. Study of a fiber optic Fabry-Perot strain sensor for fuel assembly strain detection[J]. *Sensors*, 2022, 22(23): 9097.
- [29] Cui Y, Jiang Y, Zhang Y T, et al. Sapphire optical fiber high-temperature vibration sensor[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 1056-1065.
- [30] Mahissi M, Tong X L, Zhang C, et al. Study on the vibration performances for a high temperature fiber F-P accelerometer[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 62: 102471.
- [31] Wang B T, Niu Y X, Zheng S W, et al. A high temperature sensor based on sapphire fiber Fabry-Perot interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(2): 89-92.
- [32] Yu X, Wang S, Jiang J F, et al. Self-filtering high-resolution dual-sapphire-fiber-based high-temperature sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1408-1414.
- [33] Shao Z Q, Wu Y L, Wang S, et al. All-sapphire fiber-optic pressure sensors for extreme harsh environments[J]. *Optics Express*, 2022, 30(3): 3665-3674.
- [34] Meggit B T, Grattan K T V. *Optical fiber sensor technology*[M]. London: Chapman & Hall, 1995.
- [35] Gunderson L C. *Fiber optic sensor applications using Fabry-Perot interferometry*[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1267: 194-204.
- [36] 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.
- 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.
- [37] Musa S A. *Extrinsic Fabry-Pérot interferometer system using wavelength modulated source*[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [38] Ranade J. *Electronic signal processing in an optical fiber-based magnetometer*[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [39] Wang A B, Xiao H, Wang J, et al. Self-calibrated interferometric-intensity-based optical fiber sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(10): 1495-1501.
- [40] Kersey A D, Davis M A, Marrone M J. Differential polarimetric fiber-optic sensor configuration with dual wavelength operation[J]. *Applied Optics*, 1989, 28: 204-206.
- [41] Schmidt M, Fürstenau N. Fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer sensors with three-wavelength digital phase demodulation[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(9): 599-601.
- [42] Liu Q, Jing Z G, Li A, et al. Common-path dual-wavelength quadrature phase demodulation of EF-PI sensors using a broadly tunable MG-Y laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27873-27881.
- [43] Jia J S, Jiang Y, Huang J B, et al. Symmetrical demodulation method for the phase recovery of extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9149-9157.
- [44] Zhang L C, Jiang Y, Gao H C, et al. Simultaneous measurements of temperature and pressure with a dual-cavity Fabry-Perot sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 106-109.
- [45] Yang Y, Ma F X, Chen K, et al. High-speed and high-resolution low-coherence interferometric demodulation without phase jumps[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(20): 12225-12231.
- [46] 李健宁, 朱永, 王宁, 等. 高速多通道光纤法布里-珀罗传感器解调系统研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(s1): s106001.
- Li J N, Zhu Y, Wang N, et al. Research on high speed multichannel fiber optical Fabry-Perot sensor demodulation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s1): s106001.
- [47] 邓益俊. 光纤法-珀非扫描式相关解调系统的关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- Deng Y J. *Research on key technologies of fiber Fabry-Perot non-scanning correlation demodulation system*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [48] Shen F B, Wang A B. Frequency-estimation-based signal-processing algorithm for white-light optical fiber Fabry - Perot interferometers[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(25): 5206-5214.
- [49] Belleville C, Duplain G. *Fabry-Perot optical sensing device for measuring a physical parameter: US5202939* [P]. 1993-04-13.
- [50] 王雪. 基于 MEMS 复合法珀微腔的光纤大气物理参量传感方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- Wang X. *Research on optical fiber sensing method of atmospheric physical parameters based on MEMS composite Fabry-Perot microcavity*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [51] Ma Z B, Cheng S L, Kou W Y, et al. Sensitivity-enhanced extrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-optic microcavity strain sensor[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4097.
- [52] Chen S C, Yao F F, Ren S F, et al. Fabry-Perot interferometric sensor demodulation system utilizing multi-peak wavelength tracking and neural network algorithm [J]. *Optics Express*, 2022, 30(14): 24461-24480.
- [53] 郁道银. *工程光学*[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- Yu D Y. *Engineering optics*[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [54] 程佩青. *数字信号处理教程*[M]. 5 版. 北京: 清华大学出版社, 2017: 211-250.
- Cheng P Q. *Digital signal processing tutorial*[M]. 5th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 211-250.
- [55] 王晓军, 余森, 朱永, 等. 基于离散腔长变换的蓝宝石晶体高温传感器解调研究与改进[C]//中国光学学会

- 2010年光学大会论文集. 北京: 中国光学学会, 2010.
- Wang X J, Yu M, Zhu Y, et al. Research and improvement on demodulation of sapphire crystal high temperature sensor based on discrete cavity length transformation[C]//2010 Optical Congress of Chinese Optical Society. Beijing: The Chinese Optical Society, 2010.
- [56] 刘松瓚. 压水堆蒸汽发生器传热管振动疲劳损伤应变监测传感系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- Liu S Z. Study on monitoring and sensing system for vibration, fatigue, damage and strain of heat transfer tube of PWR steam generator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [57] 李钧寿, 朱永, 王宁, 等. 一种提高快速光纤珞-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.
- Li J S, Zhu Y, Wang N, et al. An algorithm for improving the signal stability of the fast fiber optic Fabry-Perot nonscanning correlation demodulation system[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(1): 0106005.
- [58] Tan J H, Wang Q, Wang N, et al. Hardware optical correlation method for dynamic detection of micrometer gaps with sub-nanometer resolution[J]. Optics Express, 2022, 30(18): 32660-32669.
- [59] Pechstedt R D. Fibre optic pressure and temperature sensor for applications in harsh environments[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8794: 879405.
- [60] Palmer M, Davis M, Fielder R, et al. High-frequency, fiber-optic temperature sensors for characterization of energetic materials[C]//AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 9-12, 2006, Sacramento, California. Reston: AIAA Press, 2013: 4581.
- [61] Huang P J, Wang N, Li J Y, et al. Optical fiber demodulation system with high performance for assessing fretting damage of steam generator tubes[J]. Sensors, 2018, 18(2): 201.