

光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器研究进展

李爱武 单天奇 国旗 潘学鹏 刘善仁 陈超 于永森

Research progress of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors

LI Ai-wu, SHAN Tian-qi, GUO Qi, PAN Xue-peng, LIU Shan-ren, CHEN Chao, YU Yong-sen

引用本文:

李爱武, 单天奇, 国旗, 潘学鹏, 刘善仁, 陈超, 于永森. 光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器研究进展[J]. 中国光学, 2022, 15(4): 609-624. doi: 10.37188/CO.2021-0219

LI Ai-wu, SHAN Tian-qi, GUO Qi, PAN Xue-peng, LIU Shan-ren, CHEN Chao, YU Yong-sen. Research progress of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors[J]. Chinese Optics, 2022, 15(4): 609-624. doi: 10.37188/CO.2021-0219

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0219>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光纤光栅与受激布里渊信号的耦合特性

Coupling characteristics between fiber grating and stimulated Brillouin signal

中国光学. 2017, 10(4): 484 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0484>

金属等离子激元调控Fabry-Perot微腔谐振模式研究

Resonant mode of Fabry-Perot microcavity regulated by metal surface plasmons

中国光学. 2019, 12(3): 649 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0649>

长周期光栅生物传感器研究进展

Research progress of biosensors based on long period fiber grating

中国光学. 2018, 11(3): 475 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0475>

高温下数字图像相关散斑最优成像探究

Optimal imaging of digital image correlation speckle under high temperature

中国光学. 2018, 11(5): 728 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0728>

光纤生物传感器在HER3抗体药物定量检测中的应用

Application of optical fiber biosensor in quantitative detection of HER3 antibody

中国光学. 2018, 11(3): 503 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0503>

ZnS:Cu电致发光电压传感器及其温度漂移补偿

ZnS:Cu electroluminescent voltage sensor and its temperature drift compensation

中国光学. 2017, 10(4): 514 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0514>

光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器研究进展

李爱武¹, 单天奇¹, 国 旗¹, 潘学鹏¹, 刘善仁¹, 陈 超², 于永森^{1*}

(1. 吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子国家重点实验室, 吉林 长春 130012;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器具有体积小、制作简单、灵敏度高、耐高温和抗电磁干扰等优点, 广泛应用于航空航天、能源工业及环境监测等领域。本文首先介绍了光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器的传感原理、传感性能、传感特性和制备方法。然后对其温度、压力和应变的灵敏度和测量范围等特征参数进行了归纳。总结了光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器的国内外研究进展及性能参数。介绍了光纤法布里-珀罗干涉仪传感器温度和压力的交叉敏感问题及解决方法和基于不同种类光纤的法布里-珀罗干涉仪高温传感特性。针对近几年光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器的研究进展, 介绍了多种用于双参数测量的光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器。最后对光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器的未来发展趋势和前景进行了展望。

关 键 词: 光纤法布里-珀罗干涉仪; 高温传感器; 高温压力测量

中图分类号: TN253 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2021-0219

Research progress of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors

LI Ai-wu¹, SHAN Tian-qi¹, GUO Qi¹, PAN Xue-peng¹, LIU Shan-ren¹, CHEN Chao², YU Yong-sen^{1*}

(1. *State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;*
2. *State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)
* Corresponding author, E-mail: yuys@jlu.edu.cn

Abstract: The high temperature sensor of the optical fiber Fabry-Perot interferometer has the advantages of small size, a simple manufacturing process, high sensitivity, high temperature resistance and anti-electromagnetic interference, which make it widely used in the aerospace energy industry, environmental monitoring and other fields. Firstly, this paper introduces the sensing principle, sensing performance, sensing characteristics and fabrication method of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors. Secondly, the temperature, pressure and strain sensitivity and measurement range are summarized and the domestic and

收稿日期: 2021-12-13; 修订日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 91860140, No. 61874119, No. 61905244); 吉林省科技发展规划项目 (No. 20180201014GX)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 91860140, No. 61874119, No. 61905244);
Science and Technology Development Project of Jilin Province (No. 20180201014GX)

foreign research progress and the performance parameters of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors are summarized. Thirdly, the cross-sensitivity problems of temperature and pressure of optical fiber Fabry-Perot interferometer sensors and its solutions, and the high-temperature sensing characteristics of Fabry-Perot interferometers based on different kinds of optical fibers are introduced. Fourthly, according to the recent research progress of fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors, several fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors for two-parameter measurement are introduced. Finally, the future development trend and prospect of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors are prospected.

Key words: optical fiber Fabry-Perot interferometer; high temperature sensors; high temperature pressure measurement

1 引言

光纤传感技术是光电子技术的一个重要分支,在光电子领域扮演着十分重要的角色。近十多年来,随着光纤通信技术^[1]和半导体光电技术^[2]等相关技术的快速发展,光纤传感技术日渐成熟^[3]。与传统的电传感器相比,光纤传感器具有抗电磁干扰能力强、灵敏度高、体积小、重量轻、可远程监控和可分布式传感等优点^[4-6],这使其广泛应用于军事领域、能源领域、电力工业领域和周界安全领域等方面。

光纤传感技术主要涉及不同类型光纤传感器的开发和应用。在目前已经开发出的各种类型光纤传感器中应用比较广泛的有光纤布拉格光栅^[7-8](Fiber Bragg Grating, FBG)、长周期光纤光栅^[8-9](Long Period Fiber Grating, LPFG)和几种基于干涉原理的传感器,包括马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)、迈克尔逊干涉仪(Michelson Interferometer, MI)和法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot Interferometer, FPI)等。

反射型光纤传感器在环境动态监测中具有较大的优势,特别是基于FBG和FPI结构的高温传感探头^[10-12]已经引起国内外学者的广泛关注。其中FPI传感器具有尺寸小、结构简单和灵敏度高优点,常被用于测量折射率^[13]、温度^[14]和压力^[15]等参数,特别是当测试位置在狭窄且封闭的空间时,FPI传感器能最大程度地发挥其优势。

本文从光纤FPI高温传感器的传感原理、传感性能和传感特性出发,对其温度、压力和应变的灵敏度和测量范围等特征参数进行归纳。总结

了光纤FPI高温传感器的国内外研究进展及性能参数。详细介绍了光纤FPI传感器温度和压力的交叉敏感问题及解决方法和基于不同种类光纤的FPI高温传感特性。总结了湿法化学腐蚀制备法、电弧放电制备法和飞秒激光加工制备法等光纤FPI高温传感器的制作方法。另外针对近几年光纤FPI高温传感器的研究进展介绍了多种可用于双参数测量的光纤FPI高温传感器。最后对光纤FPI高温传感器未来发展趋势和前景进行了展望。

2 光纤法布里-珀罗干涉仪传感器传感原理

光纤FPI传感器是基于多光束干涉原理,其中多光束干涉是指一组相互平行并且任意两束光之间光程差都相同且频率相同的光束相干叠加。典型的FPI通常由两个平行的反射面构成,如图1所示,当一束光以倾角 θ 入射到厚度为 L 的平行玻璃板时,光会发生多次反射,从而形成多光束干涉。

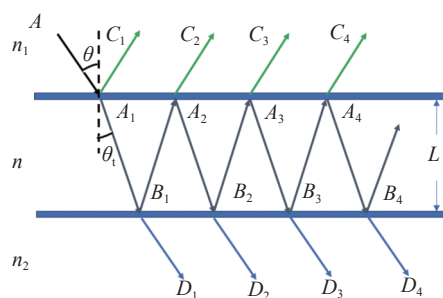


图1 多光束干涉原理图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-beam interference

并且无论是反射光还是透射光, 任意两束相邻光束之间的相位差 δ 可都是相同的。相位差 δ 可由公式 (1) 计算:

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda_0} nL \cos \theta_t, \quad (1)$$

在公式 (1) 中, λ_0 为光的波长, n 为玻璃板的折射率, θ_t 为射入玻璃板光束的折射角, L 为玻璃板的厚度。反射面上的光强为:

$$I_r = \frac{4R \sin^2 \frac{\delta}{2}}{T^2 + 4R \sin^2 \frac{\delta}{2}} I_0, \quad (2)$$

其中 I_0 为初始光源。透射面上的光强为:

$$I_t = \frac{T^2}{T^2 + 4R \sin^2 \frac{\delta}{2}} I_0, \quad (3)$$

其中 T 是玻璃板单面的透射率, R 是玻璃板单面的反射率。从公式 (1) 可知, 任意两个相邻光束的相位差 δ 由入射光的波长 λ_0 , 玻璃板的折射率 n , 玻璃板的厚度 L 和进入玻璃板光束的折射角 θ_t 共同决定。

光纤 FPI 传感器的两个反射面可近似看作玻璃板的上下表面。当传感器受到环境的影响时, 法珀腔内部的折射率或腔长发生变化, 表现为其反射谱的反射峰发生红移或蓝移。当反射率非常低时, 可以将多光束干涉近似地视为双光束干涉。此时, FPI 干涉光谱的光强公式可以表示为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi, \quad (4)$$

其中, I_1 和 I_2 分别是 FPI 两个反射面反射的光的强度, 而 ϕ 是 FPI 随压力和温度变化引起的相变, 可以表示为:

$$\phi = 4\pi n_1 L / \lambda + \phi_0, \quad (5)$$

其中 n_1 是 FPI 中法珀腔内部的折射率, ϕ_0 是初相位, L 是法珀腔的腔长, λ 是入射光的波长。FPI 干涉光谱的自由光谱范围 (Free Spectrum Range, FSR) 为:

$$FSR = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2n_1 L}, \quad (6)$$

其中 λ_1 是干涉波谷的波长, λ_2 是 λ_1 相邻干涉波谷

的波长。

2.1 光纤 FPI 传感器的温度传感原理

当外界温度改变时, 光纤的折射率以及长度会发生变化, 从而导致 FPI 的相位发生变化, 引起光纤 FPI 的干涉谱发生移动。因此可以通过检测其干涉谱的移动来感知外界温度的变化。FPI 的干涉波谷的波长可以表示为:

$$\lambda = \frac{2n_1 L}{m}, \quad (7)$$

其中 m 为干涉级数, L 为法珀腔的腔长。所以其温度灵敏度可以表示为:

$$\frac{\Delta \lambda}{\Delta T} = \left(\frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T} + \frac{1}{n_1} \frac{\Delta n_1}{\Delta T} \right) \lambda = (\alpha + \kappa) \lambda, \quad (8)$$

其中 $\Delta \lambda$ 为波长的变化量, Δn_1 为折射率的变化量, ΔL 为 FPI 腔长的变化量, ΔT 为温度的变化量, L 为 FPI 的腔长, α 为热膨胀系数, κ 为热光系数。

2.2 光纤 FPI 传感器的应变/压力传感原理

当外界的应变或压力作用于光纤时, 光纤的直径和长度将会发生变化, 从而导致 FPI 的相位发生变化, 引起 FPI 干涉谱发生移动。因此可以通过检测其干涉谱线的移动来感知外界应变或压力的变化。其相位的变化可以表示为:

$$\Delta \phi = \frac{4\pi n_1}{\lambda} \Delta L, \quad (9)$$

其中 $\Delta \phi$ 为相位的变化量, λ 是光的波长, ΔL 为腔长的变化量。

3 光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器传感性能和传感特性

3.1 光纤 FPI 高温传感器传感性能

3.1.1 光纤 FPI 传感器的分类及传感性能

根据光纤 FPI 中法珀腔的结构可以将 FPI 分为本征型法布里-珀罗干涉仪 (Intrinsic Fabry-Perot Interferometer, IFPI)、非本征型法布里-珀罗干涉仪 (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer, EFPI) 和具有复合腔的在线型法布里-珀罗干涉仪 (In Line Fabry-Perot Interferometer, ILFPI)。

图 2(a)(彩图见期刊电子版) 为典型的以光纤本身为腔的本征型光纤法布里-珀罗干涉仪, 图 2(b)(彩图见期刊电子版) 为典型的具有空气腔

的非本征型光纤法布里-珀罗干涉仪, 图 2(c)(彩图见期刊电子版) 为典型的具有复合腔的在线型法布里-珀罗干涉仪。表 1、表 2 和表 3 分别是对近些年 IFPI、EFPI 和 ILFPI 高温传感器温度、压力和应变的测量范围和灵敏度进行的总结归纳。

受热光效应影响, 相较于应变或压力, IFPI 对温度更加敏感。从表 1 可以看出 IFPI 常被用于温度传感, 而较少被用于应变或压力传感, 并且温度灵敏度通常为 10~20 pm/°C。

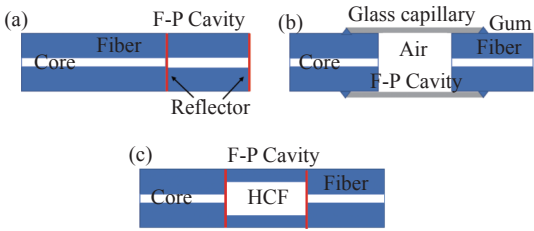


图 2 典型的(a)IFPI、(b)EFPI 和(c)ILFPI 结构图

Fig. 2 Structure diagrams of a typical (a) IFPI, (b) EFPI and (c) ILFPI

表 1 不同 IFPI 的参数对比

Tab. 1 Comparison of parameters of various IFPIs

IFPI	温度测量范围	温度灵敏度	应变/压力测量范围	应变/压力灵敏度
2009 ^[16]	25~600 °C	68.6 pm/°C		
2010 ^[17]	23~1 200 °C	17.5 nm/°C(OPD)		
2011 ^[118]	200~1 000 °C	1.75×10 ⁻⁵ °C		
2012 ^[19]	25~1 100 °C	39.1 nm/°C(OPD)		
2013 ^[20]	24~1 000 °C	17.7 pm/°C		
2014 ^[21]	30~900 °C	13.9 pm/°C		
2015 ^[22]	400~1 000 °C	40.7 pm/°C(OPD)		
2015 ^[23]	17~1 200 °C	10 pm/°C		
2018 ^[24]	25~1 000 °C	13.6 pm/°C		
2018 ^[25]	500~1 000 °C	18.6 pm/°C		
2018 ^[26]	20~1 000 °C	13.57 pm/°C		
2018 ^[27]	300~1 200 °C	15.61 pm/°C		
2019 ^[28]	100~1 100 °C	16.92 pm/°C		
2019 ^[4]	400~1 100 °C	15.88 pm/°C		
2019 ^[29]	400~1 100 °C	16.36 pm/°C	0~2000 με	1.06 pm/με
2019 ^[30]	300~1 200 °C	15.68 pm/°C		
2019 ^[31]	0~1 600 °C	13.2 pm/°C(1 200 °C)		
2019 ^[32]	32~1 200 °C	15.6 pm/°C	0~3 000 με	1.5 pm/με(900 °C)
2020 ^[33]	100~1 000 °C	15.34 pm/°C		
2020 ^[14]	15~1 000 °C	15.4 pm/°C	0~2 800 με	1.04 pm/με
2020 ^[34]	25~1 550 °C	32.5 pm/°C(1 550 °C)		
2020 ^[35]	20~800 °C	24.52 pm/°C		
2020 ^[36]	50~800 °C	12.51 pm/°C(800 °C)		
2020 ^[37]	200~1 200 °C	15.42 pm/°C		
2020 ^[38]	23~1 000 °C	17.15 nm/°C(OPD)		
2020 ^[39]	400~1 000 °C	17.1 pm/°C		

注: 表中在灵敏度后标注的OPD(Optical Path Difference)为光程差, 是通过测量FPI的腔长变化来对外界环境参数进行传感。未进行标注的则是通过测量反射峰的漂移来对外界环境参数进行传感。

表 2 不同 EFPI 的参数对比
Tab. 2 Comparison of parameters of various EFPIs

EFPI	温度测量范围	温度灵敏度	应变/压力测量范围	应变/压力灵敏度
2005 ^[40]	230~1 600 °C	2.798 nm/°C		
2010 ^[41]	20~1 050 °C	20 pm/°C(OPD)		
2012 ^[42]	100~700 °C	0.98 pm/°C	0~800 με	3.14 pm/με
2013 ^[43]	20~700 °C	4.44 pm/°C	0~689.5 kPa	0.28 pm/Pa
2014 ^[44]	20~800 °C	0.59 pm/°C	0~3 700 με	1.5 pm/με
2016 ^[45]	23~600 °C	12.3 pm/°C	0~2 104 με	1.74 pm/με
2017 ^[46]	23~600 °C	0.51 pm/°C	0~3 MPa	1.53 nm/MPa(600 °C)
2017 ^[47]	23~1 000 °C	20.31 pm/°C		
2017 ^[48]	19~1 000 °C	14.68 pm/°C		
2017 ^[49]	20~900 °C	0.044 pm/°C	0.1~0.7 MPa	1.14 nm/MPa(800 °C)
2018 ^[50]	20~600 °C	0.17 pm/°C	0~1.0 MPa	-5.912 nm/MPa(600 °C)
2018 ^[51]	20~800 °C	14.8 pm/°C	0.1~0.7 MPa	4.28 nm/MPa
2018 ^[15]	20~800 °C	19.8 nm/°C(OPD)	0~10 MPa	98 nm/MPa
2019 ^[12]	100~1 080 °C	4.786 nm/°C(OPD)		
2019 ^[52]	100~800 °C	14.31 pm/°C		
2019 ^[53]	20~1 000 °C	12.26 nm/°C		
2019 ^[6]	20~1 000 °C	108.11 pm/°C(OPD)	0~10 MPa	70.85 nm/MPa
2019 ^[5]	20~800 °C	1.25 nm/°C(OPD)	20~700 kPa	2.768 μm/MPa(OPD)
2019 ^[54]	20~700 °C	0.215 nm/°C	0~500 kPa	5.22 nm/MPa
2019 ^[55]	20~1 000 °C	15.41 pm/°C	0~1 000 με	1.19 pm/με(900 °C)
2020 ^[56]	25~1 000 °C	0.77 pm/°C		
2020 ^[10]	-50~1 200 °C	23 pm/°C	0.4~4.0 MPa	1.2 nm/MPa(1 200 °C)
2020 ^[11]	23~1 455 °C	1.32 nm/°C(OPD)		
2020 ^[57]	100~800 °C	10.74 pm/°C	0~900 με	21.46 μm/με(800 °C)
2020 ^[58]	100~1 000 °C	18.01 pm/°C	0~450 με	2.17 pm/με(800 °C)
2021 ^[59]	200~800 °C	29.9 pm/°C		

具有空气腔的 EFPI 在受到外界应变或压力作用时相较于 IFPI 更容易发生形变,因此其对应变或压力更加敏感。从表 2 也可以看出,EFPI 常被用于高温应变和高温压力传感。并且可以通过设计 EFPI 空气腔的尺寸以及形状提高其对外界应变或压力的灵敏度,使其温度灵敏度和压力灵敏度相差几个数量级,减小温度对压力测量产生的交叉干扰。ILFPI 是一种复合形式的光纤 FPI 传感器,其在高温应变和高温压力传感方面的性能参数如表 3 所示。与 IFPI 和 EFPI 相比,

具有复合腔的 ILFPI 综合了 IFPI 和 EFPI 的特点,可以根据不同的应用场景灵活设计不同的结构。

3.1.2 光纤 FPI 传感器高温和应变/压力交叉敏感问题

光纤 FPI 传感测量中的交叉敏感问题是光纤 FPI 传感器实用化中的一个关键问题。对光纤 FPI 传感器的温度和应变/压力的交叉敏感度进行了总结,如表 4 所示。在 FPI 中常用温度补偿的方法减小交叉灵敏度。温度补偿是通过对比法

表 3 不同 ILFPI 的参数对比
Tab. 3 Comparison of parameters of various ILFPIs

ILFPI	温度测量范围	温度灵敏度	应变/压力测量范围	应变/压力灵敏度
2009 ^[60]	100~600 °C	1.4 nm/°C	0~400 με	5.95 nm/με
2011 ^[61]	50~750 °C	0.6 pm/°C	0~950 με	2.3 pm/με
2011 ^[62]	25~700 °C	13.7 pm/°C	0~40 MPa	-5.8 pm/MPa
2015 ^[63]	0~700 °C	0.45 pm/°C	0~10 MPa	54.7 pm/MPa
2015 ^[64]	250~1 050 °C	1.019 nm/°C(1 050 °C)		
2015 ^[65]	23~900 °C	0.85 pm/°C	0~1 000 με	13.9 pm/με
2016 ^[66]	17~900 °C	13.97 pm/°C	0~600 με	1.23 pm/με
2018 ^[67]	100~800 °C	17 nm/°C(OPD)	0~10 MPa	1.336 μm/MPa
2018 ^[68]	0~1 005 °C	33.4 pm/°C	0~1 400 με	0.46 pm/με
2019 ^[69]	20~900 °C	0.82 pm/°C	0.3~2.7 MPa	4.24 nm/MPa
2019 ^[70]	24~1 000 °C	535.16 pm/°C		
2020 ^[71]	20~1 000 °C	0.64 pm/°C	0~1 000 με	1.23 pm/με
2020 ^[72]	100~1 100 °C	16.91 pm/°C	0~2 400 με	1 pm/με
2020 ^[73]	40~1 000 °C	25.3 nm/°C	0~10 MPa	356.5 nm/MPa(1 000 °C)

珀腔的结构进行特殊设计,使其对温度不敏感,而对应变/压力敏感,从而达到测量应变/压力或同时测量温度和应变/压力的目的。该方法常被用于具有空气腔的 EFPI^[5-6]。

对于传感应用中的交叉敏感问题,可以通过在 FPI 传感器内制备两个具有不同参数的法珀腔来解决。因为不同参数的法珀腔对温度和应变/压力的灵敏度各不相同,可以通过解如下灵敏度矩阵的方式解决交叉敏感问题^[10]。以高温压力

测量为例:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{Q} \begin{bmatrix} K_{T2} & -K_{T1} \\ -K_{P2} & K_{P1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{FPI1} \\ \Delta\lambda_{FPI2} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中 ΔP 为传感环境的压力变化量, ΔT 为传感环境的温度变化量, K_{T1} 和 K_{P1} 为其中一个法珀腔的温度灵敏度和压力灵敏度, K_{T2} 和 K_{P2} 为另一个法珀腔的温度灵敏度和压力灵敏度, $Q=K_{T2}K_{P1}-K_{T1}K_{P2}$, $\Delta\lambda_{FPI1}$ 和 $\Delta\lambda_{FPI2}$ 分别为两个法珀腔对应的干涉波长的变化量。

表 4 FPI 高温应变/压力传感器交叉灵敏度对比
Tab. 4 Comparison of cross-sensitivity of FPI high temperature strain/pressure sensors

FPI	温度灵敏度	应变/压力灵敏度	交叉灵敏度
2011 ^[61]	0.6 pm/°C	2.3 pm/με	4 με/ °C
2013 ^[43]	4.44 pm/°C	0.28 pm/Pa	15.86 Pa/ °C
2015 ^[65]	0.85 pm/°C	13.9 pm/με	0.18 με/ °C
2018 ^[15]	19.8 nm/°C(OPD)	98 nm/MPa	1 490 Pa/ °C
2018 ^[67]	17 nm/°C	1.336 μm/MPa	-15 Pa/ °C, 0.3 °C/MPa
2019 ^[6]	108.11 pm/°C(OPD)	70.85 nm/MPa	1 525 Pa/ °C
2019 ^[55]	0.215 nm/°C	5.22 nm/MPa	67.6 Pa/ °C
2019 ^[69]	0.82 pm/°C	4.24 nm/MPa	192 Pa/ °C
2020 ^[10]	23 pm/°C	1.2 nm/MPa	2×10 ⁴ Pa/ °C

此外, 还可以通过将 FPI 和其他光纤传感器级联的方法解决交叉敏感问题。以 FPI 级联 FBG 为例, 因为 FPI 和 FBG 的温度和应变/压力的灵敏度各有差异, 可通过解如下灵敏度矩阵来解决此问题^[45], 其灵敏度矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} K_{\text{FPI}T} & -K_{\text{FBG}T} \\ -K_{\text{FPI}P} & K_{\text{FBG}P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{\text{FBG}} \\ \Delta \lambda_{\text{FPI}} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中 $K_{\text{FPI}T}$ 和 $K_{\text{FPI}P}$ 为法珀腔的温度灵敏度和压力灵敏度, $K_{\text{FBG}T}$ 和 $K_{\text{FBG}P}$ 为 FBG 的温度灵敏度和压力灵敏度, $M = K_{\text{FPI}T}K_{\text{FBG}P} - K_{\text{FBG}T}K_{\text{FPI}P}$, $\Delta \lambda_{\text{FPI}}$ 和 $\Delta \lambda_{\text{FBG}}$ 分别为 FPI 和 FBG 对应的波长的变化量。

3.2 基于不同种类光纤的 FPI 高温传感特性

在光纤中通过一定的方法制作特定的结构, 光纤同时起到传感元件和传输光信号的作用, 因此光纤的结构和材料都对光纤传感器的性能起着决定性的作用。普通的单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) 纤芯由掺锗的石英玻璃制成, 可以在 800 °C 甚至更高的温度下进行传感^[4, 14, 28-29]。但是 SMF 掺杂的纤芯在高温情况下会发生一定的元素扩散, 从而限制了 SMF 在更高温度传感方面的应用。相比于传统的芯掺杂光纤, 由纯石英制成的 PCF 和 HCF 可以在 1200 °C 下进行传感^[30, 37]。使用电弧放电法熔接 SMF 和 PCF 或 HCF 制备的光纤 FPI 传感器具有体积小、重复性高等优点, 这使得其在高温传感领域具有广阔的应用前景^[24, 27, 33]。但是受石英软化点的限制, 基于石英光纤的传感器很难应用在大于 1200 °C 的高温环境。

由于单晶蓝宝石具有超高的熔点、稳定的化学性能和机械强度, SF 成为光纤超高温传感器的首选材料。2009 年 Lally 等人首次将反应性离子蚀刻工艺和直接键合制作工艺相结合制备了一个全蓝宝石 FPI 高温压力传感器^[74]。2011 年, 他们又通过将两个蓝宝石晶片粘合, 成功地制备了基于蓝宝石的光纤 FPI 压力传感器, 该传感器能在 0.04~1.38 MPa 的压力范围内进行传感^[18]。同年他们使用电子束蒸镀法在抛光 SF 的端面沉积了一层五氧化二钽薄膜制备了微型 FPI 传感器, 该传感器仅为 75 μm, 可在 200~1000 °C 的温度范围内进行温度测试^[18]。

2016 年, 弗吉尼亚理工大学王安波等人^[75]使

用氧化铝套管固定 SF 和蓝宝石晶片制备了用于超高温传感的无源 EFPI 传感器, 如图 3(a) 所示。该传感器基于环境热辐射干涉原理, 实现了 1593 °C 的超高温传感, 分辨率可达 1 °C, 并且其在 1593 °C 时温度灵敏度为 3.135 nm/°C。

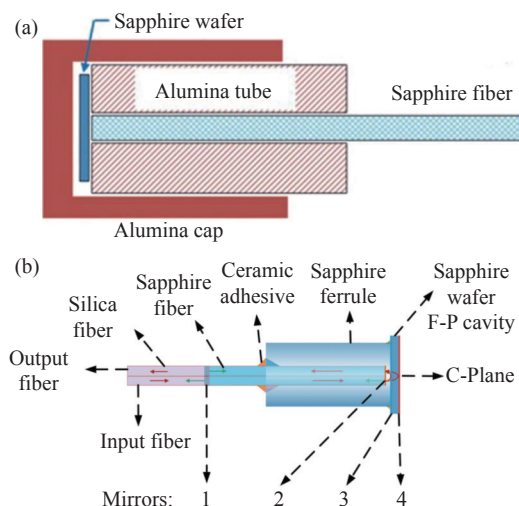


图 3 (a) 基于 SF 和蓝宝石晶片制备的无源 EFPI 高温传感器^[75]; (b) 双 SF 和蓝宝石晶片制备的自滤波 EFPI 高温传感器^[12]

Fig. 3 (a) Sourceless EFPI high temperature sensor based on sapphire fiber and sapphire wafer^[75]; (b) self-filtering EFPI high temperature sensor fabricated by double sapphire fiber and sapphire wafer^[12]

2019 年, 天津大学江俊峰等人^[12]使用两根 SF 并固定在蓝宝石套管内, 与蓝宝石晶片组合成了具有高分辨率的自滤波 EFPI 传感器, 如图 3(b) 所示, 其中两根 SF 分别作为输入光纤和输出光纤。该传感器在 1000 °C 时温度灵敏度为 4.786 nm/°C, 分辨率为 0.25 °C。

2020 年, 北京航空航天大学丁铭等人^[34]使用 SF 和蓝宝石晶片制作了晶片式的光纤 FPI 传感器, 如图 4(a) 所示。该传感器在 1550 °C 时的温度灵敏度为 32.5 pm/°C。除此之外, 该传感器被封装在氧化铝陶瓷管中, 具有高度的稳定性, 在航空发动机和燃气轮机等极端环境具有重要的应用价值。同年, 庞拂飞等人^[10]使用 SF 和三层蓝宝石晶片制作了用于高温压力测量的 FPI 传感器, 如图 4(b) 所示。作者还使用氧化铝套管对该传感器进行封装, 提高了传感器的稳定性, 使其更好地应用于恶劣环境。

2020 年, 弗吉尼亚理工大学王安波等人^[11]使

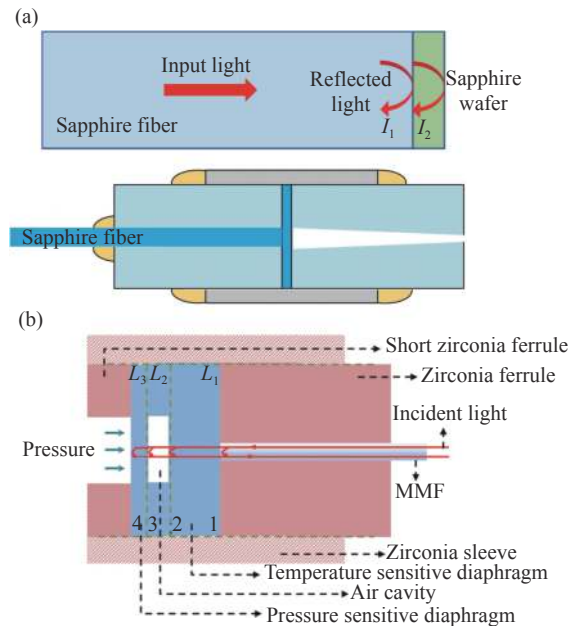


图 4 (a) 基于 SF 和蓝宝石晶片制备的 FPI 高温传感器^[34]; (b) 使用三层蓝宝石晶片直接键合制备的 EFPI 高温传感器^[10]

Fig. 4 (a) FPI high temperature sensor based on sapphire fiber and sapphire wafer^[34]; (b) EFPI high temperature sensor fabricated by direct bonding of three-layer sapphire wafers^[10]

用飞秒激光在 SMF 端面加工出圆柱形微气腔并使用 CO₂ 激光熔接技术制备了一种用于高温测量的全蓝宝石微型光纤 FPI 传感器, 该传感器在 1455 °C 时温度灵敏度为 2.45 nm/°C, 平均温度分辨率为 0.68 °C。作者还对该传感器的热响应进行了仿真分析, 并通过实验证明其响应时间约为 1.25 ms, 与仿真结果基本吻合。

但是蓝宝石光纤因缺少包层并且高度多模^[11], 在传输过程中会引入模间干涉, 需要对光谱进行傅立叶变换, 解调出蓝宝石光纤传输的干涉信号^[3], 因此制作长期稳定的封装结构以及减少其模式使其与单模光纤更好地匹配将是基于 SF 的光纤 FPI 高温传感器的重要研究方向。

通过熔融芯法制备的蓝宝石晶体衍生光纤^[76](Sapphire Derived Fiber, SDF) 进一步扩展了蓝宝石光纤的应用范围^[55]。通过电弧放电的方法可以在蓝宝石晶体衍生光纤内部析出莫来石晶体^[3], 使光纤纤芯折射率发生改变以形成 FPI 并用于高温传感, 该传感器能够承受高达 1600 °C 的高温^[31], 这是目前非晶光纤工作的最高温度。

4 光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器的制备

光纤 FPI 传感系统主要由光纤 FPI 传感探头和传感解调装置两部分构成。其中光纤 FPI 传感探头是光纤 FPI 传感器系统的核心部分, 直接影响传感器的传感性能。本文对常用的 FPI 高温传感探头的制备方法进行总结。

4.1 湿法化学腐蚀制备法

湿法化学腐蚀通常是使用化学腐蚀剂有选择性地腐蚀光纤, 由于光纤纤芯和包层的掺杂浓度不同, 导致其化学活性不同, 使腐蚀速度存在差异。在进行了一定时间的腐蚀后可以通过熔接方法在光纤中引入气泡, 形成光纤微腔^[52]。通过湿法化学腐蚀制备 FPI 是比较常见的制备方法, 该方法直接使用化学腐蚀剂有选择性地腐蚀光纤, 具有制作简单和成本较低等优点。但是在腐蚀过程中需要考虑有效的腐蚀剂和腐蚀剂的选择性, 并且要求精确的控制腐蚀速率和时间^[77]。

4.2 电弧放电制备法

相比于湿法化学腐蚀制备法, 通过电弧放电制备 FPI 传感器具有更便捷和更高效的优势。该方法通过将光纤置于光纤熔接机的电极中间, 调节放电电流和放电时间, 然后重复放电制作微腔^[50], 最后对光纤进行切割制备出 FPI 传感探头。通过电弧放电法制备的具有微气腔的 EFPI 传感器具有较高的应变灵敏度和压力灵敏度, 并且温度和压力的交叉干扰小, 但该方法重复性较差, 光纤的机械强度会降低^[78]。另外一种电弧放电制备法是使用熔接机熔接不同种类 (例如 PCF、HCF 和 SDF 等) 的光纤^[19, 21, 27, 31], 通过将光纤熔接处和光纤与空气的接触面作为反射面制备 FPI 传感探头。

通过熔接不同类型光纤制备的 FPI 传感器具有尺寸小和制作简单等优点, 但是通过此方法制备的 FPI 传感器的一个反射面是光纤和空气的接触面, 容易受到空气中的接触介质 (例如液体、灰尘杂质等) 的干扰。所以对于使用该方法制作的 FPI 传感器, 为了确保测量数据的可靠性, 传感器的封装设计必不可少。

4.3 飞秒激光加工制备法

飞秒激光具有快速和高精度的材料加工能

力,是制备光纤 FPI 传感器的一种非常有效的工具。通过飞秒激光扫描可以在光纤内部产生一定程度的折射率调制区域,飞秒激光经过物镜聚焦到光纤纤芯,产生两个或多个折射率调制区域形成反射面从而制备 IFPI 传感器^[25]。另外一种常见的飞秒激光加工制备法是使用飞秒激光在光纤内部进行刻槽形成微腔^[6],然后对微腔进行抛光和熔接制备 EFPI 传感器。

使用飞秒激光加工制备法制作的 FPI 传感器具有结构简单、尺寸小和性能稳定等优点。虽然飞秒激光加工系统成本相对较高但是通过该方法制作的光纤传感器可设计性强,目前已广泛应用于各类光纤传感器的制作。

5 光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器的应用

光纤法布里-珀罗干涉仪传感器具有体积小、制作简单和灵敏度较高等优点,在苛刻环境下的温度压力测量中具有重要的应用价值。在应力测量方面,重庆大学朱永等人^[79]开发了混凝土专用温度自补偿型光纤 FPI 应变传感器,并将其应用于桥梁的结构健康监测。在压力测量方面,针对航空航天领域的特殊需求,2005 年,重庆大学佟艳群等人^[80]联合开展了基于光纤 FPI 传感器的光纤智能夹层的研究,并对其进行了弯曲试验,证明了光纤智能夹层对结构应变监测的可行性。2009 年,西北工业大学的单宁等人^[81]将光纤 FPI 传感器用于飞机发动机叶片裂纹的检测,该传感器可以根据反射信号判断叶片是否存在裂纹。2011 年, Fusiek 等人^[82]制备了用于石油井下的温度和压力测量的光纤 FPI 传感器。该传感器可在 350 °C 下、0~68.95 MPa 的压力范围内进行石油井下的环境检测。对国内外光纤 FPI 高温传感器在双参数测量方面的应用进行总结如下。

5.1 高温应变测量

光纤 FPI 高温传感探头具有较好的稳定性和重复性,常被用于高温环境下的应变测量。使用电弧放电制备法将 SMF 和其他具有空气芯的特种光纤(例如 PCF 和 HCF 等)熔接制备的具有复合腔的 ILFPI 具有较好的机械强度,常被用于

高温应变测量。2018 年, Liu 等人^[68]通过在两根 SMF 之间熔接一段 HCF 制备了 ILFPI 高温应变传感器,如图 5(a)(彩图见期刊电子版)所示。该传感器具有 23 nm 的自由光谱范围,26 dB 的消光比和高质量的光谱,这提高了该传感器温度和应变的测量范围和精度。该传感器在从室温到 1000 °C 的温度范围内温度灵敏度高达 33.4 pm/°C,并且在 503 °C 下应变灵敏度为 0.64 pm/μ ϵ ,极大地减小了温度和应变的交叉干扰,实现了温度和应变双参数测量。

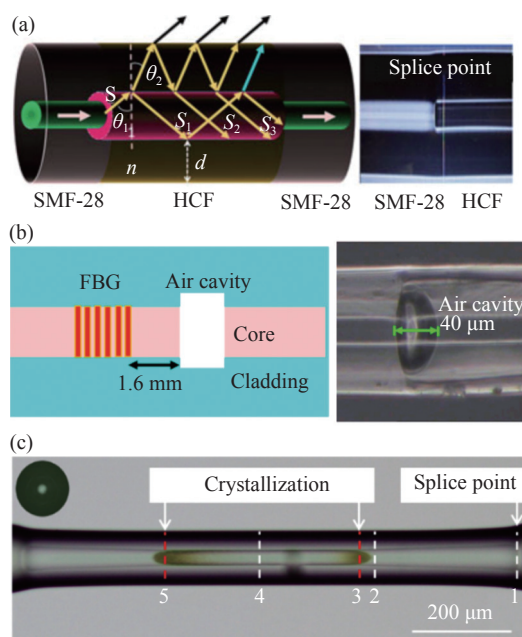


图5 (a)使用 SMF 和 HCF 熔接制备的 ILFPI 传感器^[68]; (b)使用 FBG 和 FPI 级联制备的混合光纤传感器^[83]; (c)使用 CDF 制备的光纤 FPI 传感器^[32]

Fig. 5 (a) ILFPI sensor fabricated by fusion of SMF and HCF^[68]; (b) hybrid fiber-optic sensor fabricated by cascade of FBG and FPI^[83]; (c) fiber-optic FPI sensor fabricated by CDF^[32]

另外,可以通过将 FPI 和其他光纤传感器级联制备成混合光纤高温应变传感器。2018 年,电子科技大学冉曾令等人^[83]通过将 FBG 和 EFPI 级联制备了用于双参数测量的混合光纤传感器,如图 5(b)(彩图见期刊电子版)所示。该传感器的温度测量由 FBG 实现,应变测量则由 EFPI 实现,因此该传感器可以用于温度应变双参数测量。该传感器在 500 °C 时应变灵敏度为 5.34 pm/μ ϵ 。

2019 年,庞拂飞等人^[32]通过在两根 SMF 之间熔接一段新型的用于高温应变传感的氧化铝陶

瓷衍生光纤 (Ceramic Derived Fiber, CDF) 制作了用于高温应变测量的 FPI 传感器, 如图 5(c)(彩图见期刊电子版) 所示。该传感器在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下和在 $0\sim 3000\text{ }\mu\text{e}$ 的应变范围内应变灵敏度为 $1.5\text{ pm}/\mu\text{e}$, 实现了在高温环境下应变的测量, 扩大了高温和应变双参数测量的范围。

5.2 高温压力测量

具有空气腔的 EFPI 在受到外界压力作用时相较于 IFPI 更容易发生形变, 因此其对压力更加敏感。通过对 EFPI 的空气腔进行特殊的设计还可以提高其压力灵敏度, 因此其常被用于高温环境下的压力测量。

2018 年, 中北大学贾平岗等人^[51] 通过将光纤布拉格光栅和空芯石英管 (Hollow Silica Tube, HST) 从两侧插入到石英套管中制备了 FPI 高温压力传感器, 如图 6(a)(彩图见期刊电子版) 所示。该传感器在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下和在 $0.1\sim 0.7\text{ MPa}$ 的压力范围内压力灵敏度为 $1.15\text{ nm}/\text{MPa}$ 。由于

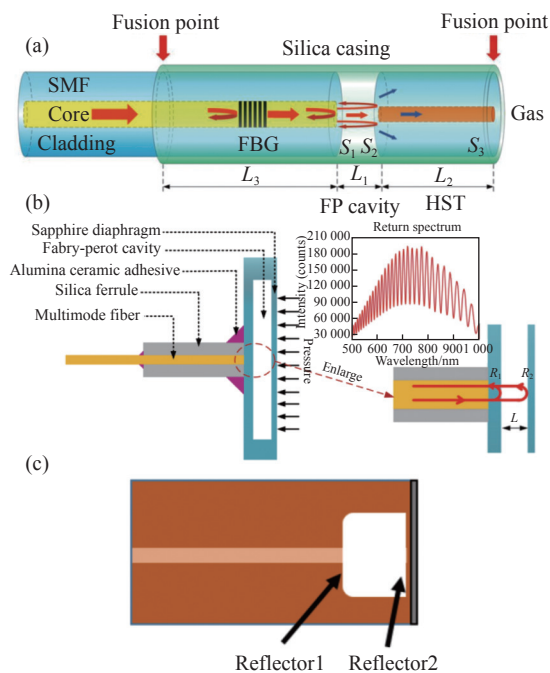


图 6 (a)使用 FBG 和 HST 插入石英套管制备的 FPI 传感器^[51]; (b)使用蓝宝石晶片直接键合制备的 FPI 传感器^[5]; (c)使用飞秒激光对 SMF 进行刻槽, 然后通过抛光和熔接制备 FPI^[6]

Fig. 6 (a) FPI sensor fabricated by inserting FBG and HST into quartz sleeve^[51]; (b) FPI sensor fabricated by direct bonding of sapphire wafer^[5]; (c) SMF grooved by femtosecond laser, then FPI fabricated by polishing and welding^[6]

该传感器的温度测量由 FBG 实现, 高温环境下的压力测量由 FPI 实现, 减小了温度和压力之间的交叉干扰, 实现了温度和压力双参数的测量。

2019 年, 中北大学梁庭等人^[5] 通过蓝宝石晶片和具有刻蚀腔的蓝宝石晶片直接键合制备了光纤 FPI 高温压力传感器, 如图 6(b)(彩图见期刊电子版) 所示, 该传感器在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, $20\sim 700\text{ kPa}$ 的压力范围内压力灵敏度为 $2.768\text{ }\mu\text{m}/\text{MPa}$ 。值得一提的是, 该传感器通过蓝宝石晶片直接键合制备, 没有任何中间层, 避免了在高温环境下不同材料之间热膨胀系数不匹配产生的传感器不稳定问题, 实现了温度和压力的双参数测量。

同年, 江毅等人^[6] 使用飞秒激光加工形成空气腔的 SMF 和无芯光纤熔接制备了用于高温高压测量的 EFPI 传感器, 另外需要对无芯光纤进行切割、抛光减薄和飞秒激光加工粗糙处理, 最后厚度仅为 $3.8\text{ }\mu\text{m}$, 其结构如图 6(c)(彩图见期刊电子版) 所示。该传感器在最高 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下和 $0\sim 10\text{ MPa}$ 的压力范围内压力灵敏度为 $70.8\text{ nm}/\text{MPa}$, 同时具有 0.02 MPa 的分辨率和 0.2 MPa 的测量误差, 实现了温度和压力的双参数测量。

2020 年, 庞拂飞等人^[10] 使用蓝宝石晶片制作的 FPI 传感器如图 4(b) 所示。该传感器在 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下和在 $0.4\sim 4.0\text{ MPa}$ 的压力范围内压力灵敏度为 $1.20\text{ nm}/\text{MPa}$, 扩大了温度和压力双参数测量的范围。

具有空气腔的光纤 EFPI 高温压力传感器具有较高的压力灵敏度, 并且温度和压力的交叉干扰小, 在苛刻环境下的高温压力测量中具有重要的应用价值。

5.3 高温振动测量

高温振动传感器在航天、油气管道运输、火山地震活动检测、煤矿开采等领域的设施设备维护和故障检测等方面具有重要的应用价值。光纤 FPI 高温传感器不仅可以在高温环境下测量压力和应变, 还可以对振动参数进行测量。当光纤 FPI 振动传感器受到外界振动信号作用时, 其法珀腔的腔长会发生变化, 引起其干涉谱发生变化, 可通过对其干涉谱进行检测实现对振动参数的测量。

2019 年, 武汉理工大学童杏林等人^[84] 利用由微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System,

MEMS) 加工出的温度敏感膜片与 SMF 相结合制备了 FPI 高温振动传感器, 如图 7 所示。在高温铸造现场的振动测试表明, 该传感器在 800 °C 和 100~1000 Hz 的工作环境下, 测量频率的相对误差为 1.56%。

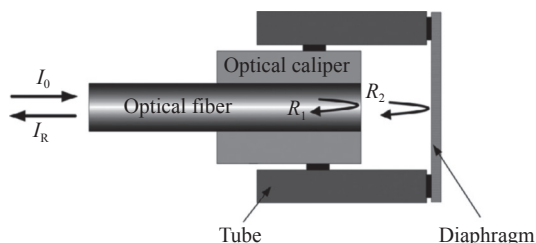


图 7 光纤 FPI 高温加速传感器示意图^[84]

Fig. 7 Schematic diagram of optical fiber FPI high temperature acceleration sensors^[84]

2019 年, 北京理工大学江毅等人^[85] 使用飞秒激光加工技术制备了具有悬臂梁的 FPI 高温振动传感器, 如图 8 所示。该传感器由单模光纤, 空芯光纤和无芯光纤熔接制备, 另外需要对无芯光纤进行飞秒激光微加工和粗糙化处理制成长度为 80 μm 的悬臂梁。该传感器在室温至 800 °C 的温度范围内温度灵敏度为 84.8 $\text{pm}/^\circ\text{C}$, 在频率为 300 Hz 时其加速度灵敏度为 11.1 mV/g 。

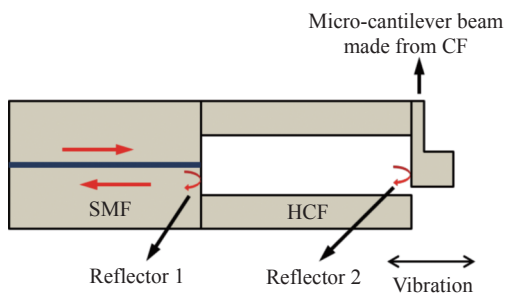


图 8 具有悬臂梁的 FPI 高温振动传感器示意图^[85]

Fig. 8 Schematic diagram of FPI high temperature vibration sensors based on micro-cantilever beam^[85]

2020 年, 清华大学唐飞等人^[86] 使用 SF 和具有悬臂梁的 6H-SiC 振动敏感元件制备了可以在 1200 °C 下工作的 6H-SiC 蓝宝石光纤振动传感器, 其中 6H-SiC 振动敏感元件的悬臂梁结构是利用纳秒激光制备的, 其结构如图 9 所示。该传感器通过 FPI 将振动信号转换为光信号, 并通过光学解调获得振动参数。在室温到 1200 °C 的温度范围内其振动频率测量灵敏度为 0.9997 Hz/Hz , 并且在 800 °C 下其加速度灵敏度为 17.86 mV/g 。

该传感器在高温铸造现场应用时最大频率测量误差仅为 4.72 Hz, 可实现高温环境下振动参数的测量。

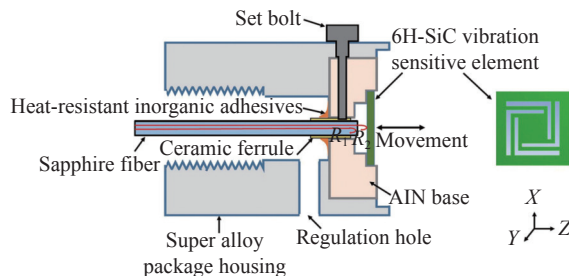


图 9 6H-SiC 蓝宝石光纤高温振动传感器示意图^[86]

Fig. 9 Schematic diagram of 6H-SiC sapphire fiber vibration sensor^[86]

2021 年, 唐飞等人^[87] 又利用氮化铝和 ZrO_2 套管对 6H-SiC 蓝宝石光纤高温振动传感器进行了封装, 解决了温度剧烈变化时传感器不稳定的问题。

光纤 FPI 振动传感器因具有测量范围广、耐高温、耐腐蚀和抗电磁干扰等优点成为振动传感领域的研究热点。现有的光纤 FPI 振动传感器大都需要依赖外部振动响应结构, 导致温度交叉敏感严重。随着智能时代的到来, 制作出实用的微型化光纤 FPI 振动传感器具有重要的意义, 同时提升传感器的灵敏度和减小传感器的温度交叉敏感性也是研究的重要方面^[88]。

6 结束语

近些年光纤 FPI 高温传感器在制备方法和解调方法等方面发展迅速, 在高温传感、应变传感、压力传感和振动传感等方面取得了重要进展, 并在航空航天、石油开采和能源工程等领域都具有广泛的应用。本文总结了光纤 IFPI 高温传感器、EFPI 高温传感器和 ILFPI 高温传感器的温度、压力和应变的灵敏度和测量范围等性能参数。其次介绍了光纤法布里-珀罗干涉仪传感器温度和压力的交叉敏感问题及解决方法和基于不同种类光纤的 FPI 高温传感特性。总结了湿法化学腐蚀制备法、电弧放电制备法和飞秒激光加工制备法等光纤 FPI 高温传感器制备方法。介绍了可用于高温环境下应变、压力和振动测量的光纤 FPI 传感器。光纤 FPI 高温传感器常被用于特殊、恶劣的

环境下,其今后的发展也会继续围绕苛刻环境下的应用需求展开。同时,光纤 FPI 高温传感器的封装技术、对恶劣环境的耐受性和传感器的长期

稳定性与可靠性等方面也将是研究的重要方面,光纤 FPI 高温传感器仍会是光纤高温传感领域的研究热点。

参考文献:

- [1] 王俊尧, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信组网反射镜联动跟踪控制技术[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 537-546.
WANG J Y, SONG Y S, TONG SH F, *et al.*. Linkage tracking control technology of space laser communication network mirror[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 537-546. (in Chinese)
- [2] 刘野, 刘宇, 肖辉东, 等. 638 nm 光栅外腔窄线宽半导体激光器[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1249-1256.
LIU Y, LIU Y, XIAO H D, *et al.*. 638 nm narrow linewidth diode laser with a grating external cavity[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1249-1256. (in Chinese)
- [3] 庞拂飞, 马章微, 刘奂奂, 等. 蓝宝石衍生光纤及传感器研究进展[J]. 应用科学学报, 2018, 36(1): 59-74.
PANG F F, MA ZH W, LIU H H, *et al.*. Research progress of sapphire-derived fibers and sensors[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2018, 36(1): 59-74. (in Chinese)
- [4] DENG J, WANG D N. Construction of cascaded Fabry-Perot interferometers by four in-fiber mirrors for high-temperature sensing[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(5): 1289-1292.
- [5] LI W W, LIANG T, JIA P G, *et al.*. Fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor based on sapphire direct bonding for high-temperature applications[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(7): 1662-1666.
- [6] MA W Y, JIANG Y, GAO H CH. Miniature all-fiber extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensor for high-pressure sensing under high-temperature conditions[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(2): 025104.
- [7] 敬世美, 张轩宇, 梁居发, 等. 飞秒激光刻写的超短光纤布拉格光栅及其传感特性[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 449-454.
JING SH M, ZHANG X Y, LIANG J F, *et al.*. Ultrashort fiber Bragg grating written by femtosecond laser and its sensing characteristics[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 449-454. (in Chinese)
- [8] 梁居发, 敬世美, 孟爱华, 等. 基于光纤布拉格光栅与长周期光栅并联的集成光学传感器[J]. 中国光学, 2016, 9(3): 329-334.
LIANG J F, JING SH M, MENG A H, *et al.*. Integrated optical sensor based on a FBG in parallel with a LPG[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 329-334. (in Chinese)
- [9] 明昕宇, 国旗, 薛兆康, 等. 飞秒激光刻写低温度灵敏度的细芯长周期光栅[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 737-744.
MING X Y, GUO Q, XUE ZH K, *et al.*. A femtosecond laser-inscribed fine-core long-period grating with low temperature sensitivity[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 737-744. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] YANG SH, FENG Z A, JIA X T, *et al.*. All-sapphire miniature optical fiber tip sensor for high temperature measurement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(7): 1988-1997.
- [12] YU X, WANG SH, 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.
- [13] ZHANG X Y, YU Y S, ZHU C C, *et al.*. Miniature end-capped fiber sensor for refractive index and temperature measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(1): 7-10.
- [14] CUI X L, ZHANG H, WANG D N. Parallel structured optical fiber in-line Fabry-Perot interferometers for high temperature sensing[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(3): 726-729.
- [15] GAO H CH, JIANG Y, CUI Y, *et al.*. Dual-cavity fabry-perot interferometric sensors for the simultaneous measurement of high temperature and high pressure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(24): 10028-10033.
- [16] DONG B, WEI L, ZHOU D P. Miniature high-sensitivity high-temperature fiber sensor with a dispersion compensation fiber-based interferometer[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(33): 6466-6469.
- [17] ZHU T, KE T, RAO Y J, *et al.*. Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high temperature measurement[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(19): 3683-3685.

- [18] WANG J J, LALLY E M, DONG B, *et al.*. Fabrication of a miniaturized thin-film temperature sensor on a sapphire fiber tip[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(12): 3406-3408.
- [19] XU L C, DENG M, DUAN D W, *et al.*. High-temperature measurement by using a PCF-based Fabry-Perot interferometer[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(10): 1391-1396.
- [20] TAN X L, GENG Y F, LI X J, *et al.*. High temperature microstructured fiber sensor based on a partial-reflection-enabled intrinsic Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(34): 8195-8198.
- [21] DU Y Y, QIAO X G, RONG Q ZH, *et al.*. A miniature Fabry-Pérot interferometer for high temperature measurement using a double-core photonic crystal fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(4): 1069-1073.
- [22] LEE D, TIAN ZH P, DAI J X, *et al.*. Sapphire fiber high-temperature tip sensor with multilayer coating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(7): 741-743.
- [23] DING W H, JIANG Y, GAO R, *et al.*. High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(5): 055001.
- [24] CHEN ZH SH, XIONG S S, GAO SH CH, *et al.*. High-temperature sensor based on fabry-perot interferometer in microfiber tip[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 202.
- [25] CHEN P CH, SHU X W. Refractive-index-modified-dot Fabry-Perot fiber probe fabricated by femtosecond laser for high-temperature sensing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5292-5299.
- [26] ZHANG P H, ZHANG L, MOURELATOS Z P, *et al.*. Crystallization-sapphire-derived-fiber-based Fabry-Perot interferometer for refractive index and high-temperature measurement[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(30): 9016-9021.
- [27] YU H H, WANG Y, MA J, *et al.*. Fabry-Perot interferometric high-temperature sensing up to 1200 °C based on a silica glass photonic crystal fiber[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 273.
- [28] DENG J, WANG D N, ZHANG H. Femtosecond laser inscribed multiple in-fiber reflection mirrors for high-temperature sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(21): 5537-5541.
- [29] WANG Q H, ZHANG H, WANG D N. Cascaded multiple Fabry-Perot interferometers fabricated in no-core fiber with a waveguide for high-temperature sensing[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5145-5148.
- [30] LEI X Q, DONG X P. Sensitivity-enhanced fiber interferometric high temperature sensor based on vernier effect[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11144: 1114405
- [31] LIU H, PANG F, HONG L, *et al.*. Crystallization-induced refractive index modulation on sapphire-derived fiber for ultrahigh temperature sensing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6201-6209.
- [32] WANG Z, LIU H, MA Z, *et al.*. High temperature strain sensing with alumina ceramic derived fiber based Fabry-Perot interferometer[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27691-27701.
- [33] ZHANG G, WU X Q, LI SH L, *et al.*. Miniaturized Fabry-Perot probe utilizing PMPCF for high temperature measurement[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(3): 873-877.
- [34] WANG B T, NIU Y X, ZHENG SH W, *et al.*. A high temperature sensor based on sapphire fiber Fabry-Perot interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(2): 89-92.
- [35] LEI J CH, ZHANG Q, SONG Y, *et al.*. Laser-assisted embedding of all-glass optical fiber sensors into bulk ceramics for high-temperature applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 128: 106223.
- [36] SU H Y, ZHANG Y D, MA K, *et al.*. Tip packaged high-temperature miniature sensor based on suspended core optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(15): 4160-4165.
- [37] LEI X Q, DONG X P. High-sensitivity Fabry-Perot interferometer high-temperature fiber sensor based on vernier effect[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(10): 5292-5297.
- [38] WANG M H, YANG Y, HUANG S, *et al.*. Multiplexable high-temperature stable and low-loss intrinsic Fabry-Perot in-fiber sensors through nanograting engineering[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20225-20235.
- [39] NIU Y D, WANG D N, WANG Q H, *et al.*. Cascaded multiple Fabry-Perot interferometers fabricated in multimode fiber with a waveguide[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 58: 102306.
- [40] ZHU Y ZH, HUANG ZH Y, SHEN F B, *et al.*. Sapphire-fiber-based white-light interferometric sensor for high-temperature measurements[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(7): 711-713.
- [41] KOU J L, FENG J, YE L, *et al.*. Miniaturized fiber taper reflective interferometer for high temperature measurement[J].

- Optics Express*, 2010, 18(13): 14245-14250.
- [42] TAFULO P A R, JORGE P A S, SANTOS J L, *et al.* Fabry–Pérot cavities based on chemical etching for high temperature and strain measurement[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(6): 1159-1162.
- [43] ZHANG Y N, YUAN L, LAN X W, *et al.* High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric pressure sensor fabricated by femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4609-4612.
- [44] KAUR A, WATKINS S E, HUANG J, *et al.* Microcavity strain sensor for high temperature applications[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(1): 017105.
- [45] JIANG Y J, YANG D X, YUAN Y, *et al.* Strain and high-temperature discrimination using a type II fiber Bragg grating and a miniature fiber Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6341-6345.
- [46] WANG Y C, BAO H H, RAN Z L, *et al.* Integrated FP/RFBG sensor with a micro-channel for dual-parameter measurement under high temperature[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(15): 4250-4254.
- [47] LIU SH H, TIAN J, WANG SH, *et al.* Anti-resonant reflecting guidance in silica tube for high temperature sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(23): 2135-2138.
- [48] LIU ZH W, QIAO X G, WANG R H. Miniaturized fiber-taper-based Fabry-Perot interferometer for high-temperature sensing[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(2): 256-259.
- [49] JIA P G, FANG G CH, LIANG T, *et al.* Temperature-compensated fiber-optic Fabry–Perot interferometric gas refractive-index sensor based on hollow silica tube for high-temperature application[J]. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 2017, 244: 226-232.
- [50] LI Z, JIA P G, FANG G CH, *et al.* Microbubble-based fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor for high-temperature application[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(8): 1738-1743.
- [51] LIANG H, JIA P G, LIU J, *et al.* Diaphragm-free Fiber-Optic fabry-perot interferometric gas pressure sensor for high temperature application[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1011.
- [52] ZHAO L, ZHANG Y D, CHEN Y H, *et al.* Composite cavity fiber tip Fabry-Perot interferometer for high temperature sensing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 50: 31-35.
- [53] ZHU CH, ZHUANG Y Y, ZHANG B H, *et al.* A miniaturized optical fiber tip high-temperature sensor based on concave-shaped Fabry-Perot cavity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 35-38.
- [54] ZHANG Q, LEI J CH, CHEN Y ZH, *et al.* 3D printing of all-glass fiber-optic pressure sensor for high temperature applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23): 11242-11246.
- [55] ZHANG P H, ZHANG L, WANG ZH 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.
- [56] ZHANG F ZH, ZHAO N, LIN Q J, *et al.* The influence of key characteristic parameters on performance of optical fiber Fabry-Perot temperature sensor[J]. *AIP Advances*, 2020, 10(8): 085118.
- [57] NAN J, ZHANG D SH, WEN X Y, *et al.* Elimination of thermal strain interference in mechanical strain measurement at high temperature using an EFPI-RFBG hybrid sensor with unlimited cavity length[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(10): 5270-5276.
- [58] TIAN Q, XIN G G, LIM K S, *et al.* Cascaded Fabry-Perot interferometer-regenerated fiber Bragg grating structure for temperature-strain measurement under extreme temperature conditions[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 30478-30488.
- [59] LYU D J, PENG J K, HUANG Q, *et al.* Radiation-resistant optical fiber Fabry-Perot interferometer used for high-temperature sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(1): 57-61.
- [60] RAO Y J, DENG M, ZHU T, *et al.* In-line Fabry–Perot etalons based on hollow-core photonic bandgap fibers for high-temperature applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(19): 4360-4365.
- [61] DENG M, TANG CH P, ZHU T, *et al.* PCF-based Fabry–Pérot interferometric sensor for strain measurement at high temperatures[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 700-702.
- [62] WU CH, FU H Y, QURESHI K K, *et al.* High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry–Perot interferometer based on photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 412-414.
- [63] RAN Z L, LIU SH, LIU Q, *et al.* Novel high-temperature fiber-optic pressure sensor based on etched PCF F-P interferometer micromachined by a 157-nm laser[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(7): 3955-3958.

- [64] ZHANG P, TANG M, GAO F, *et al.*. Simplified hollow-core fiber-based Fabry–Perot interferometer with modified vernier effect for highly sensitive high-temperature measurement[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 7100210.
- [65] 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.
- [66] LIU H, YANG H ZH, QIAO X G, *et al.*. Strain measurement at high temperature environment based on Fabry-Perot interferometer cascaded fiber regeneration grating[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2016, 248: 199-205.
- [67] ZHANG ZH, HE J, DU B, *et al.*. Measurement of high pressure and high temperature using a dual-cavity Fabry-Perot interferometer created in cascade hollow-core fibers[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 6009-6012.
- [68] LIU D J, WU Q, MEI CH, *et al.*. Hollow core fiber based interferometer for high-temperature (1000 °C) measurement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(9): 1583-1590.
- [69] HE H Y, LIU Y, LIAO Y Y, *et al.*. Simple fiber-optic sensor for simultaneous and sensitive measurement of high pressure and high temperature based on the silica capillary tube[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25777-25788.
- [70] ZHANG G, WU X Q, ZHANG W J, *et al.*. High temperature Vernier probe utilizing photonic crystal fiber-based Fabry-Perot interferometers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 37308-37317.
- [71] TIAN Q, YANG H ZH, LIM K S, *et al.*. Temperature and strain response of in-fiber air-cavity Fabry-Perot interferometer under extreme temperature condition[J]. *Optik*, 2020, 220: 165034.
- [72] ZHANG H, WANG D N, RAHMAN B M A. Parallel structured fiber in-line multiple Fabry-Perot cavities for high temperature sensing[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2020, 313: 112214.
- [73] CUI Y, JIANG Y, LIU T M, *et al.*. A dual-cavity Fabry–Perot interferometric fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of high-temperature and high-gas-pressure[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 80582-80587.
- [74] YI J, LALLY E, WANG A B, *et al.*. Demonstration of an all-sapphire Fabry–Pérot cavity for pressure sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 23(1): 9-11.
- [75] TIAN ZH P, YU ZH H, LIU B, *et al.*. Sourceless optical fiber high temperature sensor[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 195-198.
- [76] DRAGIC P, HAWKINS T, FOY P, *et al.*. Sapphire-derived all-glass optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(9): 627-633.
- [77] 李自亮, 廖常锐, 刘申, 等. 光纤法布里-珀罗干涉温度压力传感技术研究进展[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 070708.
LI Z L, LIAO CH R, LIU SH, *et al.*. Research progress of in-fiber Fabry-Perot interferometric temperature and pressure sensors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 070708. (in Chinese)
- [78] 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): 132-145.
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): 132-145. (in Chinese)
- [79] 朱永, 符欲梅, 陈伟民, 等. 大佛寺长江大桥健康监测监测系统[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(10): 66-71.
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. (in Chinese)
- [80] 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(S1): 226-228.
LIANG D K, LI D SH, 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(S1): 226-228. (in Chinese)
- [81] 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, 216.
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, 216. (in Chinese)
- [82] FUSIEK G, NIEWCZAS P, BURT G M. Preliminary evaluation of a high-pressure hightemperature downhole optical sensor[C]. *Proceedings of the SENSORS, 2011 IEEE*, IEEE, 2011: 409-412.
- [83] YANG T T, HE X, RAN Z L, *et al.*. Highly integrated all-fiber FP/FBG sensor for accurate measurement of strain under high temperature[J]. *Materials*, 2018, 11(10): 1867.

- [84] ZHOU CH R, TONG X L, MAO Y, *et al.*. Study on a high-temperature optical fiber F-P acceleration sensing system based on MEMS[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 120: 95-100.
- [85] MA W Y, JIANG Y, ZHANG H, *et al.*. Miniature on-fiber extrinsic Fabry-Perot interferometric vibration sensors based on micro-cantilever beam[J]. *Nanotechnology Reviews*, 2019, 8(1): 293-298.
- [86] HUANG Y G, TANG F, MA D W, *et al.*. Design, fabrication, characterization, and application of an ultra-high temperature 6H-SiC sapphire fiber optic vibration sensor[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(5): 6802512.
- [87] FENG R, CHU Y, LIU ZH J, *et al.*. Study on high temperature resistant packaging of ultra high temperature Fabry-Perot optical fibre vibration sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(23): 27045-27050.
- [88] 梁海来. 全光纤 FPI 型低频振动传感器的设计与实验[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- LIANG H L. *Design and experiment of all-fiber low-frequency vibration sensor based on FPI*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.

作者简介:



李爱武(1971—),女,吉林长春人,博士,副教授,硕士生导师,2005年于吉林大学获得博士学位,现为吉林大学电子科学与工程学院副教授,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: liaw@jlu.edu.cn



单天奇(1997—),男,吉林长春人,硕士研究生,2019年于吉林大学获得学士学位,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 1750011737@qq.com



于永森(1974—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,2005年于吉林大学获得博士学位,现为吉林大学电子科学与工程学院教授,主要从事光纤传感,激光微纳加工研究。E-mail: yuys@jlu.edu.cn