引用本文:蒋灵芝,滕传新. 基于双FPI游标效应的高灵敏光纤温度与压力传感器[J]. 光通信技术,2026,50(5):23-27.

基于双FPI游标效应的高灵敏光纤温度与压力传感器

蒋灵芝[1],滕传新[2*]

(1.桂林聚联科技有限公司,广西 桂林 541004;2.桂林电子科技大学 光电工程学院,广西 桂林 541004))

摘要:针对传统单腔法布里-珀罗干涉(FPI)光纤传感器灵敏度有限的问题,提出一种基于双FPI游标效应的高灵敏光纤温度与压力传感器。该传感器由紫外(UV)胶填充的空心光纤构成测温腔FPI_1,由石英毛细管内空气腔构成测压腔FPI_2。通过使2个腔光程近似匹配产生光学游标效应,从而增大传感器灵敏度。实验结果表明:该传感器在30.2~97.4 ℃内温度灵敏度为2.435 nm/℃,在0~20 MPa范围内压力灵敏度为-5.924 nm/MPa,且表现出较好的重复性。该传感器结构紧凑、制备工艺简单、成本低,在高压、强电磁等工业环境下具有广阔的应用前景。

关键词:光纤传感器;法布里-珀罗干涉仪;光学游标效应;温度和压力测量

中图分类号:TN256　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1002-5561(2026)05-0023-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.05.004

Highly sensitive optical fiber temperature and pressure sensor based on dual-FPI vernier effect

JIANG Lingzhi[1], TENG Chuanxin[2*]

(1. GuiLin-Link Technology CO., LTD., Guilin Guangxi 541004, China;

2. School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: This paper addresses the limited sensitivity of traditional single-cavity Fabry-Perot interferometer(FPI) fiber sensors and proposes a highly sensitive optical fiber temperature and pressure sensor based on the cascaded dual-FPI vernier effect. The sensor consists of a hollow optical fiber filled with ultraviolet(UV) glue, which forms the temperature measurement cavity FPI_1, and an air cavity in a silicon capillary, which constitutes the pressure measurement cavity FPI_2. By precisely matching the optical path of the two cavities, an optical vernier effect is generated, achieving effective amplification of the sensing sensitivity. Experimental results show that the sensor has a temperature sensitivity of 2.435 nm/℃ in the range of 30.2~97.4 ℃ and a pressure sensitivity of -5.924 nm/MPa in the range of 0~20 MPa. The sensor has a compact structure, a simple preparation process, low cost, and inherent immunity to electromagnetic interference. It has broad application prospects in industrial environments with high pressure and strong electromagnetic fields.

Key words: optical fiber sensor, Fabry-Perot interferometer, optical vernier effect, temperature and pressure measurement

0 引言

温度与压力是自然科学研究和工业生产中最为基础且关键的物理参数,其高精度、实时监测对工业装备安全运行与过程控制至关重要[1-3]。传统电学类温度与压力传感器在实际应用中常面临易受电磁干扰、难以在易燃易爆环境下实现无源测量等问题,长期工作稳定性和环境适应性不足[4]。相比之下,光纤传感器凭借本质抗电磁干扰、体积小、耐腐蚀和灵敏度高等突出优势,在温度与压力传感领域获得了广泛关注[5-8]。在各类光纤传感结构中,基于法布里-珀罗干涉(FPI)原理的光纤传感器[9]因结构紧凑、响应速度快、制备工艺相对简单而被广泛研究。然而,早期研究大多采用单腔FPI结构,尽管能实现温度或压力的测量,但受限于干涉机制本身,其灵敏度提升空间有限,难以满足精密测量场景对高灵敏度的要求[10]。

收稿日期:2026-05-11。

基金项目:广西自然科学基金重点项目(2023GXNSFDA026040)资助;中央引导地方科技发展专项项目(ZY23055018)资助;国家自然科学基金项目(62365003)资助。

作者简介:蒋灵芝(1984—),女,本科,广西桂林人,工程师,现就职于桂林聚联科技有限公司研发创新中心,主要研究方向为光通信技术。参与省部级科研项目5项,市级科研项目5项。

***通信作者:**滕传新(1985—),男,博士,研究员,主要研究方向为光纤传感技术。



为突破单腔FPI的灵敏度瓶颈,研究人员提出通过级联2个FP干涉腔构成双FPI传感器并利用光学游标效应进行增敏。当2个级联FP腔的光程(OPL)近似相等时,其自由光谱范围(FSR)相近但不完全相同,叠加后的反射光谱会产生周期性包络调制,即光学游标效应[11]。利用这一效应,外界物理量引起的微小波长漂移可被成倍放大,从而显著提升传感器的灵敏度,这也使基于游标效应的级联FPI成为近年来高灵敏度光纤传感领域的研究热点[12]。例如,2021年,Yang Xuemei等人[13]提出了一种基于游标效应增敏的级联双FPI的光纤压力传感器,利用2段空心石英毛细管熔接构成传感腔与参考腔,在1~101 kPa范围内实现了80.8 pm/kPa的压力灵敏度。2023年,Zhu Xiping等人[14]提出了一种基于增强游标效应的超灵敏光纤压力传感器,其中FPI_1为单模光纤(SMF)-石英毛细管-聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜结构,FPI_2为SMF-大内径毛细管-小内径毛细管串联结构。实验在0~0.15 MPa范围内获得了高达283.32 nm/MPa的压力灵敏度。虽然通过利用游标效应可以实现增敏,但现有研究普遍存在压力测量范围窄,难以兼顾高灵敏度与宽量程的问题。为此,本文提出一种基于双FPI游标效应的高灵敏光纤温度与压力传感器(下文简称光纤温度压力传感器)。

1 传感器原理与制备

1.1 传感器原理

图1为光纤温度压力传感器结构示意图。传感器包含2个FP腔:紫外(UV)胶填充腔FPI_1(长度为L_1)和封装于石英毛细管内的空气腔FPI_2(长度为L_2)。光源发出的光经入射SMF传输,到达SMF与UV胶填充空心光纤(HCF)的交界面M_1时,部分光发生反射,其余光透射进入UV胶内继续传播。透射光抵达UV胶弧面与空气的交界面M_2时再次部分反射,M_1与M_2形成的2束反射光发生干涉。透过M_2的光继续在空气腔中传输,经反射端SMF端面M_3反射后,分别与M_1、M_2处的反射光发生干涉,形成三光束干涉效应。当外界温度与压力改变时,由于UV胶的热光效应与热膨胀效应、石英毛细管的热膨胀与弹性形变会使FPI_1的光程OPL_1和FPI_2的光程OPL_2发生变化,两腔光程差改变将引发游标效应光谱包络的大幅漂移。通过监测光谱包络的漂移量,即可实现温度与压力的高灵敏度检测。

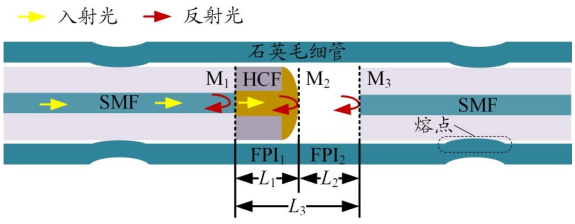


图1 光纤温度压力传感器结构示意图

为了简化分析,不考虑光在反射过程中的半波损失,级联FPI结构的干涉可以简化为3束光干涉,这3束光分别来自3个反射端面,简化后的反射光强度表达式为

$$I_r = I_1 + I_2 + I_3 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(2\varphi_1) + 2\sqrt{I_2 I_3}\cos(2\varphi_2) + 2\sqrt{I_1 I_3}\cos[2(\varphi_1+\varphi_2)] \quad (1)$$

式中:φ_1、φ_2分别为反射面M_1和M_2、反射面M_2和M_3之间的相位延迟,I_1为反射界面M_1的反射光强,I_2和I_3分别为经M_2、M_3二次反射后返回M_1的透射光强。

当2个FPI的FSR接近但不相等时,二者级联后的干涉光谱将产生游标效应,这2个FPI分别被称为传感FPI和参考FPI。根据游标效应原理,级联2个FPI产生的干涉光强I可以表示为

$$I = A\cos\left[2\pi\left(\frac{n_1 L_1 - n_2 L_2}{\lambda}\right)\right] \quad (2)$$

式中:A为干涉光强的振幅系数,n_1、n_2分别为FPI_1和FPI_2腔内介质的有效折射率,λ为波长。

利用Matlab对式(2)进行数值模拟,通过调节双FPI的光程比,可仿真得到该级联结构产生光学游标效应时的反射光谱。光程比为1.08的双FPI级联的光纤传感器模拟光谱如图2所示,可以看出,当2个FSR相近但不完全相等的FPI级联时,叠加光谱会呈现出明显的周期性包络调制。当外界温度或压力发生变化时,参考FPI的光谱基本保持不变,而传感FPI的光

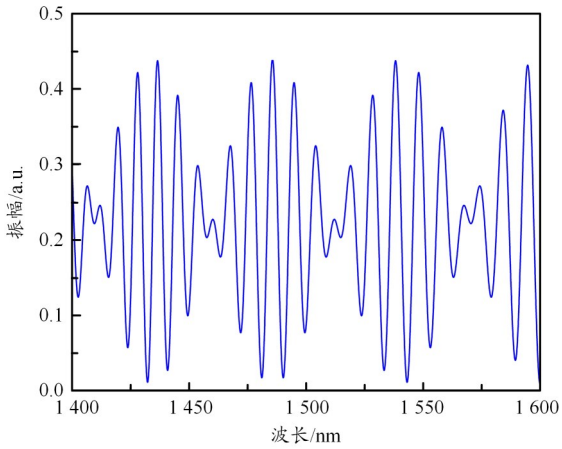


图2 光程比为1.08的双FPI级联的光纤传感器模拟光谱

学光程会随之改变,使其干涉峰发生微小偏移。在游标效应的放大机制作用下,这一微小偏移会转化为级联光谱整体包络的显著位移,从而大幅提升传感器的检测灵敏度。

游标效应的包络周期为2个FPI之间的拍频周期,则包络的FSR[15]可以表示为

$$F_E = \frac{F_1 F_2}{|F_1 - F_2|} \tag{3}$$

式中:F_E、F_1、F_2分别为包络、传感FPI_1、传感FPI_2的FSR。

当外界环境变化导致传感FPI的光谱发生微小的漂移,而参考FPI保持不变时,级联结构的反射光谱发生较大的漂移。因此,与单个FPI相比,级联FPI传感器的灵敏度提高了M倍,放大倍数M可以表示为

$$M = \frac{F_1}{|F_1 - F_2|} \tag{4}$$

所以级联FPI传感器的灵敏度为

$$S_E = M\lambda_s\left(\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}P}\frac{1}{L} + \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}\frac{1}{n}\right) \tag{5}$$

式中:L为FPI的腔长,λ_s为传感工作波长,P为外界压力,T为外界温度,n为FPI空腔内部介质的有效折射率。

1.2 传感器制备

本文所用SMF纤芯直径为8.2 μm、包层直径为125 μm;HCF纤芯直径为30 μm,包层直径为125 μm。实验配套石英毛细管内径为130 μm、外径为600 μm、长度为3 cm。光纤温度压力传感器的制备流程如下:1)对SMF与HCF开展预处理,剥离SMF涂覆层后,使用无水乙醇擦拭干净,另一方面,采用明火轻度灼烧去除HCF涂覆层,并彻底清理表面碳化残留物;2)将2种光纤端面精密切割平整,利用光纤熔接机完成SMF与HCF的熔接,再使用定长度切割平台截取长度为70 μm的HCF,制备得到SMF-HCF基础结构;3)将该结构固定于载玻片上,在HCF端面滴加适量NOA61型UV胶,静置1 h,依靠毛细作用使UV胶充分填充HCF空腔,确保腔体内无气泡与空隙,随后采用低功率UV灯照射30 s完成预固化,擦拭去除光纤表面残留胶体;4)将处理后的SMF-HCF结构与端面附有少量UV胶的SMF精准对芯、轻微接触后缓慢分离,利用表面张力在端面形成均匀弧面;5)通过高功率UV灯持续照射5 min,使UV胶完全固化,获得结构稳定的UV胶腔FPI_1;6)将制备完成的FPI_1结构缓慢插入石英毛细管并精准定位,利用光纤熔接机将光纤与石英毛细管进行塌缩熔接,全程借助光谱分析仪实时监测反射光谱,动态优化熔接参数,降低光学损耗,保证光谱特性满足实验要求;7)将另一段SMF从石英毛细管另一端缓慢插入,实时观测干涉光谱变化,待光谱出现稳定的目标干涉特征后固定光纤位置,并再次进行塌缩熔接,构建空气腔FPI_2,完成基于双FPI级联的光纤温度压力传感器的制备。

2 实验测试与结果分析

2.1 测试系统

基于双FPI级联的光纤高灵敏温度与压力传感器的测试系统装置如图3所示,该系统主要由超连续谱光源、传感探头、分束器、光谱分析仪、液压泵、水浴锅以及温度计等组成。其中,使用的光源为YSL Photonics公司的SC-5型超连续谱光源,其输出光谱范围覆盖470~2 400 nm,能够提供宽带、高功率的光源,为传感测试提供稳定的光学输入。所使用的光谱分析仪是中电科思仪公司的,型号为6362D,扫描波长范围为600~1 700 nm。光源发出的光通过分束器进入传感探头,经过传感探头的反射信号再返回分束器,分束器将反射光分离出来并将其传输至光谱分析仪。

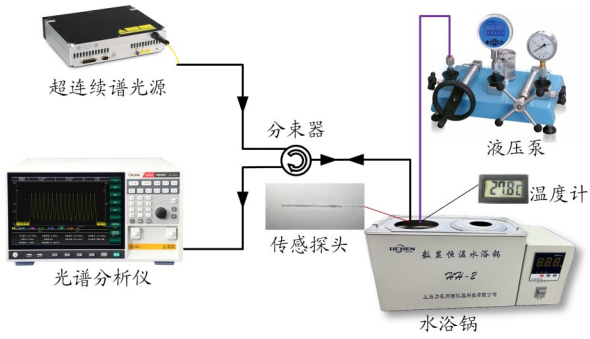
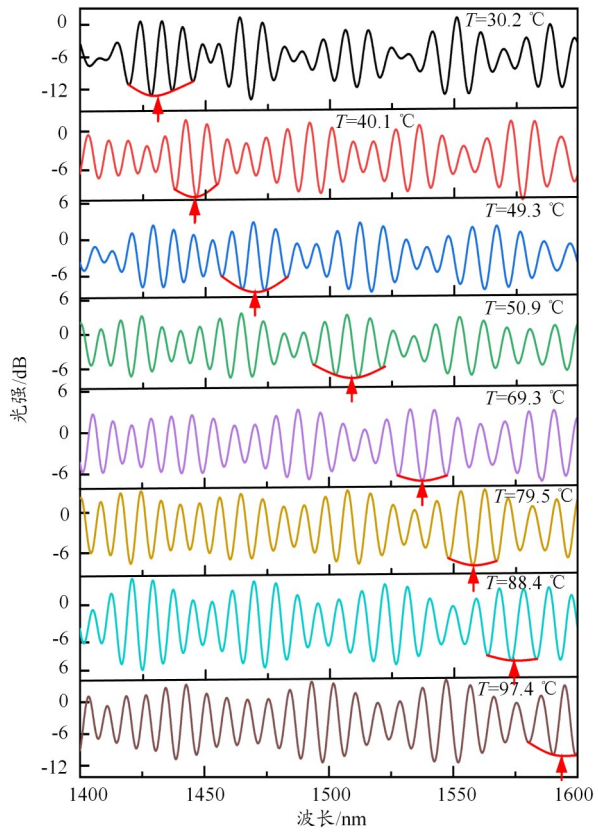


图3 测试系统装置图

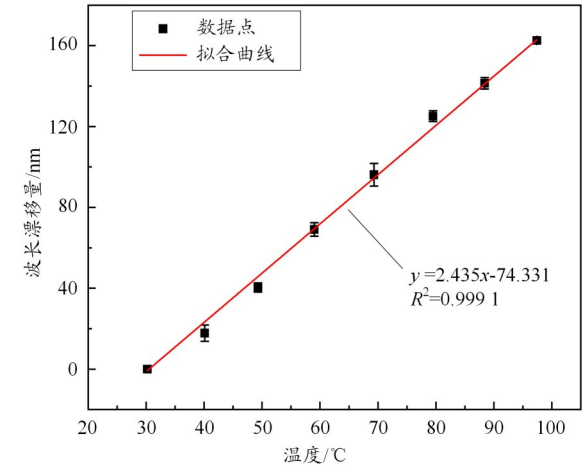
2.2 传感器温度与压力响应测试

为验证该传感器的温度与压力的响应特性,本文制备了光程比(OPL_1:OPL_2)为1.28的双FPI级联的光纤传感器并进行温度与压力响应测试,结果分别如图4和图5所示。

在温度响应测试中,温度变化范围为30.2~97.4 ℃,得到传感器反射光谱随温度的变化趋势如图4(a)所示。可以看出,在不同温度下,传感器反射光谱均呈现出稳定的周期性包络结构,且随温度升高,光谱包络整体(图中红色箭头指向位置)向长波长方向发生移动。这一现象源于测温用FPI_1中所采用的

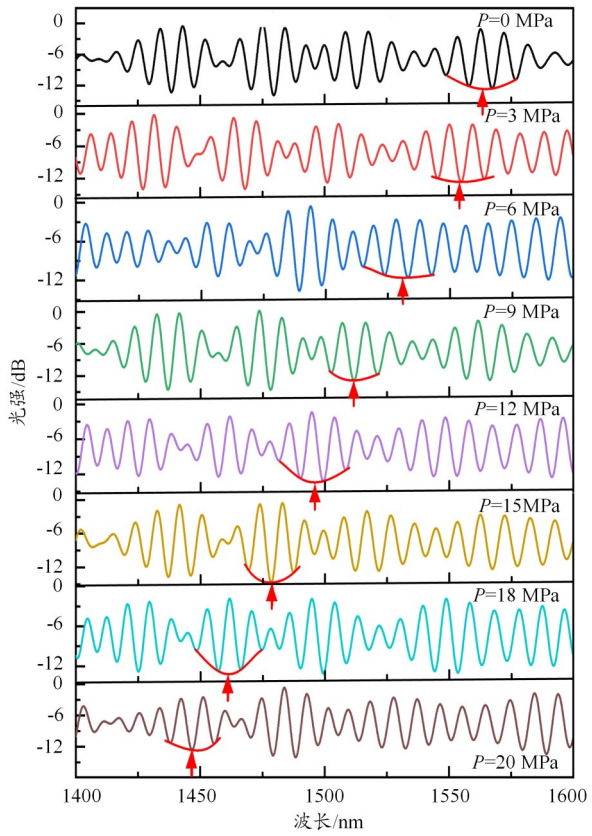


(a) 反射光谱

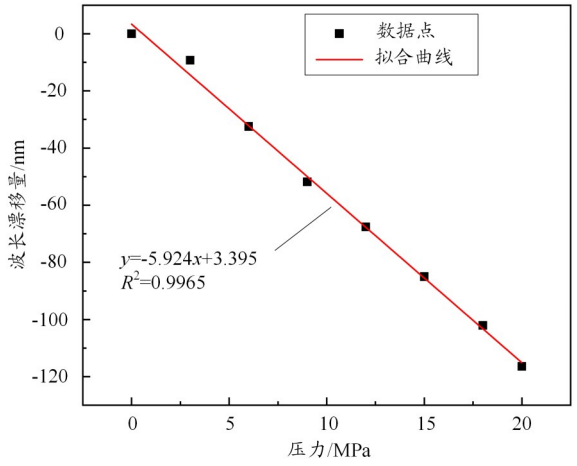


(b) 包络峰值波长漂移量与温度的关系

图4 传感器在不同温度下的反射光谱,以及包络峰值波长漂移量与温度的关系



(a) 反射光谱



(b) 包络峰值波长漂移量与温度的关系

图5 传感器在不同压力下的反射光谱,以及包络峰值波长漂移量与压力的关系

UV胶具有较大的热光系数与热膨胀系数,温度升高会改变UV胶的折射率与腔体长度,导致其光程OPL_1发生显著变化。在游标效应的放大作用下,这一微小光程变化被转化为明显的包络峰值波长漂移,从而实现对温度的高灵敏度响应。图4(b)为包络峰值波长漂移量与温度之间的关系,结果显示传感器的温度灵敏度为2.435 nm/℃,线性拟合度R^2为0.999 1,在整个测量范围内呈现优异的线性关系,无明显非线性失真。此外,多次升降温循环测试结果表明,各温度点的包络峰值波长未发生明显变化,体现出该传感器重复性较好。

在压力响应测试中,压力变化范围为0~20 MPa,

并保持温度恒定以排除干扰,实验结果如图5(a)所示。可以看出,随着外部压力不断增大,传感器反射光谱包络整体(图中红色箭头指向位置)向短波长方向发生移动,光谱轮廓保持完整,游标效应包络清晰可见,未出现跳变、消失或形变现象,表明传感器在高压环境下结构稳固,腔体密封可靠,无塌陷或泄漏。产生波长漂移的原因是:外部压力作用于石英毛细管,使其发生微小的径向与轴向形变,导致测压的FPI_2的空气腔被压缩,光程OPL_2减小;而FPI_1几乎不受外界压力影响。在游标效应的放大作用下,微小的腔长变化被转化为显著的包络蓝移。图5(b)展示了包络峰值漂移量与压力之间的拟合关系,得到传感器压力灵敏度为-5.924 nm/MPa,线性拟合度R^2=0.996 5,并且在压力为0~20 MPa量程内拟合曲线保持线性。经多次升降压循环测试后,每个压力点的包络峰值波长均与初次加压时的测量值基本吻合,可以看出该传感器表现出较好的重复性。

3 结束语

本文设计并制备了一种基于双FPI游标效应的高灵敏度光纤温度与压力传感器,该传感器由2个FPI腔构成:UV胶填充腔FPI_1对温度敏感,石英毛细管内的空气腔FPI_2对压力敏感。实验结果表明,该传感器在30.2~97.4 ℃范围内温度灵敏度为2.435 nm/℃,在0~20 MPa范围内压力灵敏度为-5.924 nm/MPa,且均呈现良好的线性响应与重复性。光纤温度压力传感器无需复杂的温度-压力解耦机制,仅依靠光学游标效应即可实现灵敏度显著放大,具有制备工艺简便、重复性与可靠性优良等优势,有效弥补了传统单腔FPI灵敏度偏低、压力测量范围较窄的不足。

参考文献:

[1] Qi Bo, Pickrell G R, Zhang Po, et al. Fiber optic pressure and temperature sensors for oil down hole application[C]//Fiber Optic Sensor Technology and Applications 2001. Newton: SPIE, 2002: 182-190.

[2] Schenato L, Aneesh R, Palmieri L, et al. Fiber optic sensor for hydrostatic pressure and temperature measurement in riverbanks monitoring[J]. Optics &laser technology, 2016, 82: 57-62.

[3] Liu Bonan, Luo Junxian, Liu Shen, et al. A probe-shaped sensor with FBG and fiber-tip bubble for pressure and temperature sensing[J]. Photonic Sensors, 2021, 11(4): 411-417.

[4] Zhao Yong, Wu Qilu, Zhang Yanan. Simultaneous measurement of salinity, temperature and pressure in seawater using optical fiber SPR sensor [J]. Measurement, 2019, 148: 106792.

[5] Wu Shengnan, Yan Guofeng, Wang Chengliang, et al. FBG incorporated side-open Fabry-Perot cavity for simultaneous gas pressure and temperature measurements[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(16): 3761-3767.

[6] Liu Qinpeng, Yang Di, Xing Meihua, et al. Simultaneous measurement of temperature and pressure sensing technology based on double cavity matching in batteries[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 87: 103954.

[7] Wang Yu, Yan Yaxi, Yuan Weihao, et al. Highly sensitive gas pressure sensor based on the hollow core Bragg fiber and harmonic Vernier effect [J]. Optics Letters, 2023, 48(8): 1990-1993.

[8] Hu Xixi, Su Dan, Qiao Xueguang. Highly sensitive optical fiber pressure sensor based on the FPI and Vernier effect via femtosecond laser plane-by-plane writing technology[J]. Applied Optics, 2024, 63(10): 2658-2666.

[9] Guo Xu, Wu Rui, Zhou Jingcheng, et al. Fiber lateral pressure sensor based on Vernier-effect improved Fabry-Perot interferometer[J]. Sensors, 2022, 22(20): 7850.

[10] Pan Rui, Yang Wenlong, Li Linjun, et al. High-sensitive fiber-optic pressure sensor based on Fabry-Perot interferometer filled with ultraviolet glue film and Vernier effect[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 67: 102710.

[11] 方莎莎,吴许强,张刚,等.基于游标效应的高灵敏光纤温度和应变传感器[J].中国激光,2021,48(1):123-132.

[12] 罗春晖,陈晓旭,吴舜.基于游标效应的并联法布里-珀罗干涉仪传感特性的分析[J].光学学报,2023,43(5):31-38.

[13] Yang Xuemei, Wu Shun, Cheng Haihao, et al. Simplified highly-sensitive gas pressure sensor based on harmonic Vernier effect[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 140: 107007.

[14] Zhu Xiping, Jiang Chao, Chen Hailin, et al. Ultrasensitive gas pressure sensor based on two parallel Fabry-Perot interferometers and enhanced Vernier effect[J]. Optics And Laser Technology, 2023, 158: 108755.

[15] Kong Lingxin, Zhang Yanxin, Zhang Weigang, et al. Cylinder-type fiber-optic Vernier probe based on cascaded Fabry-Perot interferometers with a controlled FSR ratio[J]. Applied Optics, 2018, 57(18): 5043-5047.