

文章编号: 1001-5078(2026)02-0315-06

· 光纤传感及光通讯技术 ·

基于光纤级联复合结构的真空微负压传感器

黄志成¹, 艾迪拜·艾尼瓦尔¹, 刘银^{1,2}, 苑婷¹, 菲茹扎·吐尔逊哈孜¹, 刘昕冉¹,
李希胜^{1,2}, 尤佳^{1,3}, 凡红⁴, 蓝天云^{5,6}

(1. 北京科技大学 动化学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学, 北京市工业波谱成像工程技术研究中心, 北京 100083;
3. 北京科技大学, 工业过程知识自动化教育部重点实验室, 北京 100083; 4. 深圳市城市公共安全研究院有限公司, 广东 深圳 518046;
5. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518031; 6. 核电安全监控技术与装备国家重点实验室, 广东 深圳 518031)

摘要: 真空度的微小变化会对航空航天、半导体制造、医疗器械等领域产生严重影响。光纤真空微负压传感器因其因此, 研究一种高精度、高灵敏度、抗环境干扰的真空微负压传感器具有重要的实际意义。但是, 光纤传感器的成本仍然成为阻碍其进一步应用的主要原因。针对诸多领域对低成本、尺寸小巧、高可靠性、制备工艺简单的真空微负压传感探头的巨大需求, 本文展示了一种基于光纤法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Perot Interferometer, FPI) 真空微负压传感探针。基于单模光纤 (Single mode fiber, SMF) - 空芯光纤 (Hollow core fiber, HCF) - 无芯光纤 (No core fiber, NCF) 级联结构的 FPI 光纤微负压传感探针采用定长切割工艺和光纤研磨工艺进行制备, 其低光纤成本、工艺简单和高制备效率等特性为其应用于多种领域奠定基础。本文制备的真空微负压光纤传感器样品的灵敏度达到 5.07 pm/kPa。本文提出的低成本、工艺简化解决方案为光纤微负压传感器商业化指明了方向。

关键词: 光纤传感器; 真空微负压测量技术; 低成本制备; 光纤 FP 腔

中图分类号: TP273; TN29 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.024

Fiber-optic vacuum pressure sensor based on cascaded composite structure

HUANG Zhi-cheng¹, ADIBA Anwar¹, LIU Yin^{1,3}, YUAN Ting¹, FEROUZA Tuersunhaz¹,
LIU Xin-ran¹, LI Xi-sheng^{1,2}, YOU Jia^{1,3}, FAN Hong⁴, LAN Tian-yun^{5,6}

(1. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Beijing Engineering Research Center of Industrial Spectrum Imaging, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Knowledge Automation for Industrial Processes of Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
4. Shenzhen Urban Public Safety and Technology Institute, Shenzhen 518046, China;
5. China General Nuclear Power Design Co., Ltd. (Shenzhen), Shenzhen 518031, China;
6. State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, Shenzhen 518031, China)

Abstract: A slight change in vacuum level can have serious impacts on fields such as aerospace, semiconductor manufacturing, and medical devices. Therefore, the study of a high-precision, high-sensitivity, and environmentally resistant

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2024YFC3015200); 国家自然科学基金青年基金项目 (No. 62105020); 深圳市科技计划项目 (No. KJZD20231023093057005); 中央高校基本科研业务费项目 (No. 00007753) 资助。

作者简介: 黄志成 (2001 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术。E-mail: 346487942@qq.com

通讯作者: 刘银 (1986 -), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为光纤传感系统和基于纤端超颖表面的纤上实验室技术器件。E-mail: liuyin@ustb.edu.cn

收稿日期: 2025-05-28

vacuum pressure sensor based on the fiber-optic tip is of great practical significance. However, the cost of fiber-optic sensors remains a major obstacle to their further application. In response to the substantial demand for low-cost, small-sized, high-reliability, and simple-to-manufacture vacuum pressure sensing probes in many fields, a Fabry-Perot Interferometer (FPI) vacuum pressure sensing probe is presented in this paper. The FPI fiber-optic vacuum pressure sensing probe based on a cascaded structure of single mode fiber (SMF), hollow core fiber (HCF), and no-core fiber (NCF) is prepared using fixed-length cutting and fiber grinding processes. Its characteristics, including low cost, simplicity of production, and high manufacturing efficiency lay the foundation for its application in multiple fields. The sensitivity of the vacuum micro-negative pressure fiber-optic sensor sample prepared in this paper reaches 5.07 pm/kPa. The low-cost and simplified manufacturing solution proposed in this paper points the way towards the commercialization of fiber optic micro-negative pressure sensors.

Keywords: fiber-optic sensor; vacuum pressure measurement technology; lowcost; Fabry-Perot cavity

1 引言

监测复杂而昂贵设备的健康状态成为系统安全运行的基本要求,真空微负压监测在航空航天、新材料制造、半导体芯片加工、食品制造和医疗等领域和工业环境中至关重要。缺乏可靠的早期真空微负压预警系统将会损害设备和系统的结构完整性和生存能力,将会导致灾难性的后果^[1-6]。市场上销售的 Pirani 真空计、热电偶真空计、McLeod 真空计和 Bourdon 真空计极易受到电磁干扰、温度、气体等工作环境的影响。此外,上述真空传感器在构建准分布式传感网络和应对恶劣环境方面也是力有不逮。因此,开发应用于真空压力监测的创新型非接触式传感技术对于许多需要保持微负压的应用来说变得至关重要。

在过去的 30 年里,光纤传感器以其紧凑的尺寸、长距离分布式/准分布式多路复用能力、抗电磁干扰、耐腐蚀、抗辐射、可以应用于严苛环境等优点引起了广泛关注^[7-12]。光纤传感器被广泛应用于物理、化学、生物传感器。在真空微负压传感方面,基于多种配置和不同工作原理的光纤真空压力传感器被开发出来,如基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)真空计^[13-15]、基于 FPI 原理的真空计^[16-17]、基于多模干涉仪原理的真空计^[18]等。尽管上述光纤传感器具有良好的灵敏度和分辨率,但是在成本和制备工作繁复性方面仍有一些局限性。首先,上述光纤传感器的制备需要昂贵的激光器和复杂的位移平台,这成为阻碍光纤真空压强传感器实用化的一道关隘;其次,可靠性作为光纤传感器实用化所具有的核心特征,脆弱的光纤结构和膜式结构难以满足光纤真空压强传感器商用化对鲁棒性的要求。因此,迫切地需要一种具有低成本、制作工

艺简单、结构鲁棒特点的解决方案来构建光纤真空微负压传感器。

为了解决光纤传感器在真空微负压应用中存在的诸多不足,技术上必须解决的三个问题是:(1)寻找合适几何结构的光纤,来构建小型化光纤器件实现传感器真空微负压的测量;(2)需要采用合适的构筑方法搭建传感系统来提高光纤传感器的便携性;(3)为解决多传感参量交叉敏感问题,需要采用合适的解调方案来实现多种传感参量的同时测量。

为了解决上述挑战,本文提出了一种基于 SMF-HCF-NCF 级联结构 FPI 光纤真空微负压传感器解决方案。百微米级的有效感知长度让小巧的光纤探针结构具有低成本和紧凑的特点,制备光纤传感探针所采用的定长切割工艺和纤端研磨工艺具有极其简洁的制备工艺流程。楔状研磨结构为保证光纤传感探针尖端的鲁棒性提供支撑。值得注意的是,相比于双端工作的长周期光纤光栅或是干涉型(马赫-增德尔型、塞格纳克型)光纤传感器,本文提出光纤 FPI 探针属于单端工作方式,具有更小的安装空间需求。综上所述,本文提出的光纤真空微负压传感探针解决方案对光纤传感器实用化具有很大的潜力。

2 传感原理与样品制备

为了在环境真空压力变化时获得足够的传感灵敏度和结构强度,本文设计的光纤 FPI 传感探针是一种基于 SMF-HCF-NCF 级联结构的干涉型光纤传感器。HCF 的主要作用是构建空气谐振腔,NCF 的主要作用是提供反射/透射面以及 SMF-HCF 和 HCF-NCF 的界面构成了谐振腔,通过采用光纤尖端研磨技术连通空气谐振腔和外界环境。环境真空

压强的变化导致空气折射率发生变化,进而导致 FPI 谐振腔的光程长度发生变化,影响谐振峰中心波长漂移。根据谐振峰中心波长和真空压强的映射关系,通过监测谐振峰中心波长的变化就可以得到环境真空压强的变化。本文提出的光纤真空微负压传感探针的示意图如图 1 所示。

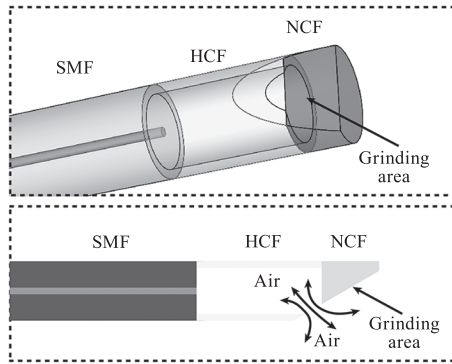


图 1 光纤真空微负压传感探针示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber-optic vacuum sensing probe

2.1 样品制备与测试

光纤真空微负压 FPI 传感探针的制备过程如图 2 所示。

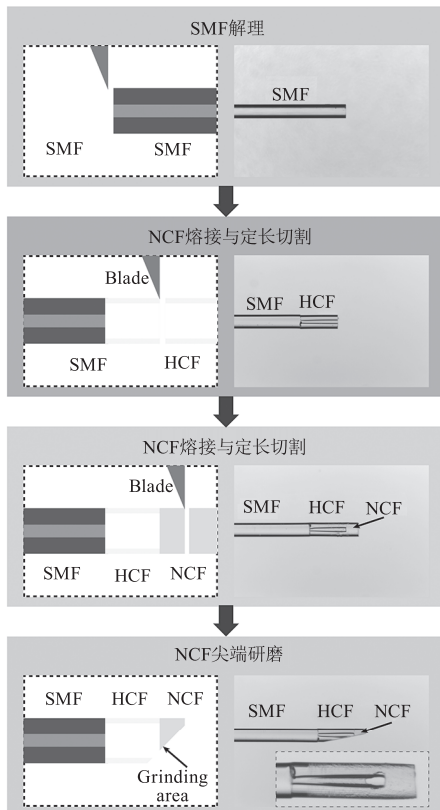
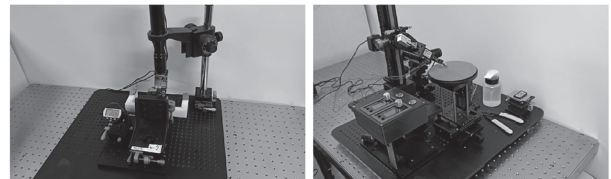


图 2 光纤真空微负压 FPI 传感探针制备示意图

Fig. 2 Schematic diagram of preparation of fiber vacuum FPI sensing probe

传感探针的制作步骤主要分为 4 个部分:(1) 首先使用光纤切割刀对 SMF 进行解理,SMF - 空气界面将会构建 FPI 谐振腔的第一个反射/透射面;(2)将 SMF 与 HCF 熔接,使用定长切割系统按照设计长度对 HCF 进行解理,本文中 HCF 的长度为 350 mm;(3) 光纤尖端的 HCF 与 NCF 熔接,空气 - NCF 界面将会构建 FPI 谐振腔的第二个反射/透射面,使用定长切割系统按照设计长度对 NCF 进行解理,本文中 NCF 的长度为 100 mm;(4) 使用光纤尖端研磨系统对 NCF 进行研磨,其主要作用是使空气 FPI 谐振腔与外界环境联通,研磨角度为 12°,此外值得注意的是,NCF 尖端的研磨将会导致 NCF 角度大于 8°,进一步减小 SMF - 空气界面与 NCF - 空气界面、空气 - NCF 界面与 NCF - 空气界面的寄生干涉。至此,光纤真空微负压传感探针制作完成。

本文中使用的光纤定长切割系统和光纤尖端研磨系统如图 3(a)和 3(b)所示。光纤定长切割系统使用万分表监测光纤托架移动的距离,通过与显微成像系统配合可以实现高精度的长度切割,其测量精度达到 0.5 mm。



(a) 光纤定长切割系统 (b) 光纤尖端研磨抛光系统

图 3 光纤 FPI 传感器制备设备示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fiber FPI sensor preparation equipment

光纤真空微负压 FPI 传感探针的测试系统如图 4 所示。

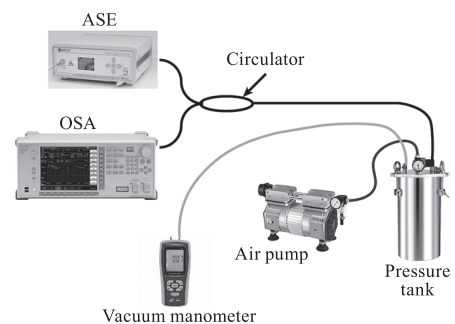


图 4 真空微负压测试系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of vacuum testing system

C + L 波段的放大自发辐射 (Amplifiedspontaneous-emission, ASE)光源提供带宽大约为 80 nm(1525 ~

1605 nm) 的光谱。光源光谱通过环形器入射到光纤 FPI 传感探头中, 光纤 FPI 传感探头放入压力罐中, 通过无油真空泵为真空压力罐提供真空压力, 使用真空压强计监测真空压力罐内的压强, 通过真空压力调节阀调节所需的真空压力。从 FPI 传感器返回的光通过环形器入射光谱仪 (Opticalspectru-analyzer, OSA) 中, OSA 将会获得 FPI 的反射光谱, 通过监测选定谐振峰中心波长将会得到缓环境中真空微负压的数值。

2.2 光纤 FPI 传感器测量原理

光纤 FPI 探针的反射光谱中谐振峰中心波长 λ_m 与气压 P 的关系可以表示为:^[19-20]

$$\lambda_m = \frac{2L_{\text{FPI}}}{m} \left(1 + \frac{2.8793 \times 10^{-9} \cdot P}{1 + 0.003671 \cdot t} \right) \quad (1)$$

其中, L_{FPI} 是谐振腔的长度, 即 HCF 的长度; m 是干涉级数; t 是环境温度。在温度保持恒定的情况下, 谐振腔的长度 L_{FPI} 不会因为热胀冷缩发生变化, 因为谐振腔内部与外界联通, 所以也不会因为内外压强差而发生变化。所以谐振峰中心波长与压强呈正比。

3 实验与结论

为了验证光纤真空微负压 FPI 传感器样品的有效性, 在真空 0 ~ -90 kPa 范围内对传感器样品进行测试, 以 10 kPa 为步长。不同真空压强下的光纤 FPI 传感探针样品的反射光谱特征谐振峰的演变如图 6(a) 所示。从图 6(a) 中可以看出特征谐振峰中心波长发生红移。不同真空压强情况下, 特征谐振峰中心波长和真空压强的映射关系如图 6(b) 所示。从图 6(b) 中可以看出, 中心波长随环境真空压强呈单调、线性变化, 且具有较好的线性度。光纤真空 FPI 探针的灵敏度为 5.07 pm/kPa, 具有令人满意的结果。

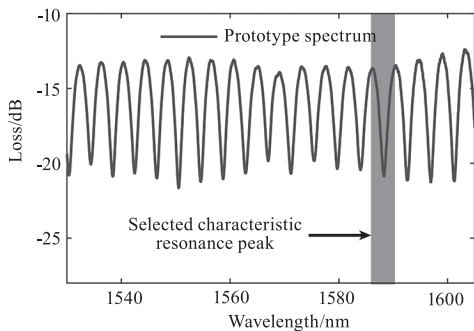
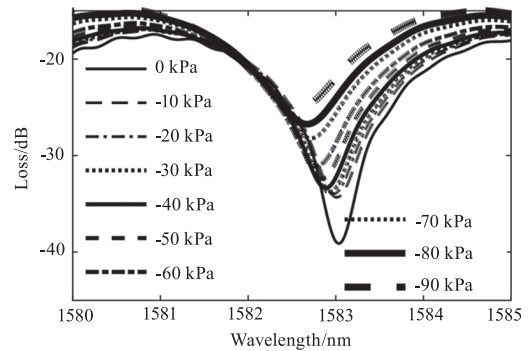
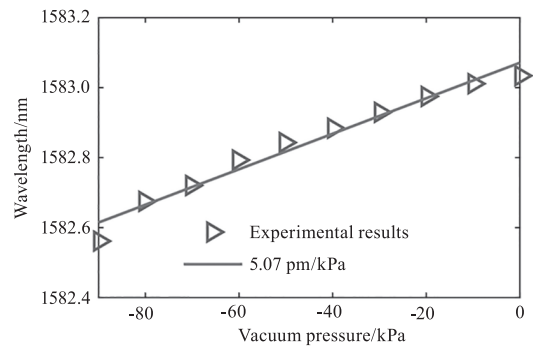


图 5 光纤传感探针样品的反射光谱

Fig. 5 Reflection spectrum of fiber sensing probe prototype



(a) 特征谐振峰随真空压强的演变



(b) 中心波长与真空压强的映射关系

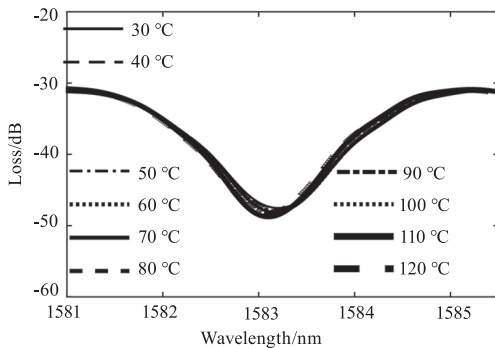
图 6 谐振峰中心波长与真空压强的关系

Fig. 6 Relationship between the center wavelength of the resonant peak and vacuum pressure

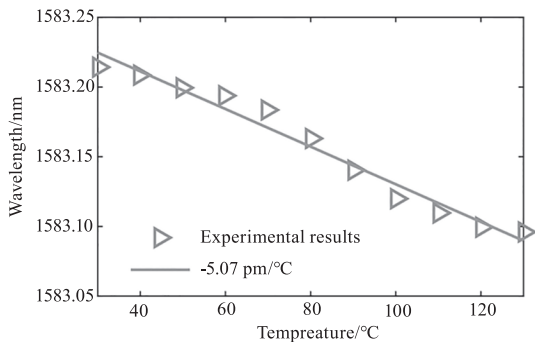
从公式(1)中可以看出, 温度对空气折射率的影响也是不可忽略的, 温度与光纤真空微负压传感器的影响需要被着重考虑。在 30 ~ 130 °C 范围内对光纤 FPI 传感探针样品进行了测试, 步长为 10 °C。特征谐振峰在不同温度下移动情况如图 7(a) 所示。从图 7(a) 中可以看出谐振峰中心波长随温度发生蓝移。中心波长随温度的变化如图 7(b) 所示。从图 7(b) 中可以看出中心波长随温度线性单调变化, 具有较好的线性度。光纤 FPI 探针样品的温度灵敏度为 -1.35 pm/°C。从上述数据可以看出, 温度与真空压强的交叉敏感度为 0.27 kPa/°C, 在要求不高的应用中可以忽略环境温度对真空压强的影响。在要求较高的应用中, 可以考虑使用多器件技术或是多谐振峰技术来解决真空压强 - 温度的交叉敏感问题^[8,21-23]。使用具有不同温度和真空压强灵敏度的传感器或谐振峰构建二元一次方程组, 通过解方程分别得到真空压强和温度的数值以解决交叉敏感问题。

在制作成本方面, 本文制作光纤 FPI 传感探针的 SMF 采购价格为 30 \$/km, HCF 的价格为 20 \$/m, NCF 的价格 3 \$/m, HCF 和 NCF 的使用长度分别

为 350 mm 和 100 mm,通过成本分析,光纤真空压强传感器的成本大约为 0.37 C,相比于电子真空计等商用真空微负压测量芯片具有极高的成本优势,另外,光纤真空压强传感器制作过程中使用的光纤熔接机、光纤定长切割系统(自制)、光纤研磨系统(自制)成本不超过 2500 \$,且具有极其简洁的制作工艺流程,本项目提出的光纤真空压强传感器在原材料成本、制备设备成本和制作工艺复杂度方面极具优势。



(a) 不同温度情况下的谐振峰光谱



(b) 谐振峰中心波长与温度的线性关系

图 7 谐振峰中心波长与温度的关系

Fig. 7 Relationship between the center wavelength of the resonance peak and temperature

4 结论

综上所述,本文展示了一种基于紧凑型光纤 FPI 真空微负压测量探头的解决方案,可以实现低成本、高生产效率的传感器样品制备。基于定长切割工艺和光纤尖端研磨工艺的光纤 FPI 真空微负压传感探针的真空压强灵敏度和温度灵敏度分别为 5.07 pm/kPa 和 $-1.35 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。实验结果表明,本文提出的真空微负压传感器克服了传统真空压强传感器和其他类型光纤传感器在成本、制备工艺复杂度方面的局限性。由于这种真空微负压传感器制备方案的优越性,有理由相信其在物理、化学和生物量传感方面也具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Ayustaningwarno F, Fogliano V, Verkerk R, et al. Surface color distribution analysis by computer vision compared to sensory testing: vacuum fried fruits as a case study [J]. Food Research International, 2021, 143: 110230.
- [2] Kumar R R, Gupta R K, Sarkar A, et al. Vacuum diffusion bonding of α -titanium alloy to stainless steel for aerospace applications: interfacial microstructure and mechanical characteristics [J]. Materials Characterization, 2022, 183: 111607.
- [3] Kaienburg P, Jungbluth A, Habib I, et al. Assessing the photovoltaic quality of vacuum-thermal evaporated organic semiconductor blends [J]. Advanced Materials, 2022, 34 (22): e2107584.
- [4] Na W S, Baek J. A review of the piezoelectric electromechanical impedance based structural health monitoring technique for engineering structures [J]. Sensors, 2018, 18 (5): 1307.
- [5] Li D T, Wang Y J, Zhang H Z, et al. Applications of vacuum measurement technology in China's space programs [J]. Space Science & Technology, 2021, 2021: 7592858.
- [6] Rodríguez-González P, Robles Valero P E, Fernández-Abia A I, et al. Application of vacuum techniques in shell moulds produced by additive manufacturing [J]. Metals, 2020, 10(8): 1090.
- [7] Liu Y, Chen Y F, Zhou S P, et al. Fiber-optic meta-tip with multi-sensitivity resonance dips for humidity sensing [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 352: 130957.
- [8] Liu Y, Xia Q, Zhou A, et al. Multi-parameter sensing based on surface plasma resonance with tungsten disulfide sheets coated [J]. Optics Express, 2020, 28(5): 6084 - 6094.
- [9] Liu Y, Zhou A, Yuan L B. Sensitivity-enhanced humidity sensor based on helix structure-assisted Mach-Zehnder interference [J]. Optics Express, 2019, 27(24): 35609 - 35620.
- [10] Liu Y, Li X W, Chen Y F, et al. Imaging-based optical barcoding for relative humidity sensing based on meta-tip [J]. Nanophotonics, 2022, 11(1): 111 - 118.
- [11] Liu Y, Deng H C, Yuan L B. A novel polyvinyl alcohol and hypromellose gap-coated humidity sensor based on a Mach-Zehnder interferometer with off-axis spiral deformation [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 284: 323 - 329.
- [12] Liu Y, Zhou A, Yuan L B. Gelatin-coated michelson inter-

- ferometric humidity sensor based on a multicore fiber with helical structure [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(10):2452–2457.
- [13] McMillen B, Jewart C, Buric M, et al. Fiber Bragg grating vacuum sensors [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(23):234101.
- [14] Mironov A E, Yu N J, Park S, et al. All optical fiber thermal vacuum gauge [J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2020, 2(1):014006.
- [15] Ullah R, Khan R Y M, Faisal M. Efficient diaphragm-based fiber Bragg grating vacuum sensor [J]. *Vacuum*, 2023, 207:111566.
- [16] Ghildiyal S, Ranjan P, Mishra S, et al. Fabry-perot interferometer-based absolute pressure sensor with stainless steel diaphragm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(15):6093–6101.
- [17] Ceysens F, Driesen M, Puers R. An optical absolute pressure sensor for high-temperature applications, fabricated directly on a fiber [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(11):115017.
- [18] Ascorbe J, Fuentes O, Arregui F J, et al. Optical fiber vacuum sensor based on etched SMS structure and PDMS coating [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(8):9698–9705.
- [19] Liu Y, Lin H F, Dai Y T, et al. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer for gas pressure sensing [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(19):8012–8016.
- [20] Deng M, Tang C P, Zhu T, et al. Refractive index measurement using photonic crystal fiber-based Fabry-Perot interferometer [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(9):1593–1598.
- [21] Liu Y, Zhou A, Yuan L B. Multifunctional fiber-optic sensor, based on helix structure and fiber Bragg gratings, for shape sensing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 143:107327.
- [22] Liu Y, Deng H C, Yuan L B. Directional torsion and strain discrimination based on Mach-Zehnder interferometer with off-axis twisted deformations [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 120:105754.
- [23] Liu Y, Zhou A, Xia Q, et al. Quasi-distributed directional bending sensor based on fiber Bragg gratings array in triangle-four core fiber [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(22):10728–10735.