

临近空间飞行高温真空光纤绝压传感器设计

张雨彤^{1,2,3}, 江毅^{1,2}, 杨水旺⁴, 张大有⁵

(1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081; 2. 信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081;
3. 包头师范学院物理科学与技术学院, 内蒙古 包头 014030; 4. 北京振兴计量测试研究所, 北京 100074;
5. 北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076)

摘要:研制了一种用于临近空间飞行器在高温环境下的蓝宝石非本征法布里-珀罗干涉仪 (extrinsic Fabry-Perot interferometer, EFPI) 型光纤绝对压力传感器。蓝宝石晶片压力传感头由3片厚度不同的蓝宝石晶片键合构成, 形成复合法布里-珀罗 (Fabry-Perot, FP) 腔, 可以同时测量温度和绝对压力, 通过实时监测温度, 对压力测量进行温度补偿, 去除温度对压力测量的影响。实验结果表明: 900 °C 内的每个温度点下, 密封 FP 腔的光学腔长随压力线性变化; 室温下, 压力灵敏度为 11.6 nm/kPa, 压力灵敏度随温度的上升略微升高, 压力测量的分辨率达到 86 Pa。

关键词: 光纤压力传感器; 非本征法布里-珀罗干涉仪; 蓝宝石晶片; 绝对压力测量

中图分类号: TP212

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)03-0118-06

Design of high-temperature vacuum fiber optic absolute pressure sensor for near-space vehicles

ZHANG Yutong^{1,2,3}, JIANG Yi^{1,2}, YANG Shuiwang⁴, ZHANG Dayou⁵

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Photonic Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China;

3. School of Physical Science and Technology, Baotou Teachers' College, Baotou 014030, China;

4. Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100074, China;

5. Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: A sapphire-based extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) fiber optic absolute pressure sensor for near-space vehicles in high-temperature environment is developed and experimentally demonstrated. The sapphire wafer sensor head is composed of three sapphire wafers with different thicknesses bonded to form composite Fabry-Perot (FP) cavities, which can realize the simultaneous measurement of temperature and absolute pressure. By monitoring the temperature in real time, the

收稿日期: 2024-01-15 修回日期: 2024-03-07

基金项目: 国家自然科学基金 (U20B2057)

作者简介: 张雨彤 (1989—), 男, 博士, 研究领域为光纤传感技术。

通信作者: 江毅 (1967—), 男, 博士, 教授, 研究领域为光纤传感技术。

引用格式: 张雨彤, 江毅, 杨水旺, 等. 临近空间飞行高温真空光纤绝压传感器设计[J]. 火箭推进, 2024, 50(3): 118-123.

ZHANG Y T, JIANG Y, YANG S W, et al. Design of high-temperature vacuum fiber optic absolute pressure sensor for near-space vehicles[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(3): 118-123.

pressure measurement is compensated to eliminate the influence of temperature on the pressure measurement. Experiment results show that the optical cavity length of the sealed FP cavity varies linearly within the applied pressure at each temperature point below 900 °C. At room temperature, the pressure sensitivity is 11.6 nm/kPa and increases slightly with the increase of temperature. The resolution of the pressure measurement is 86 Pa.

Keywords: optical fiber pressure sensors; extrinsic Fabry-Perot interferometer; sapphire wafer; absolute pressure measurement

0 引言

随着航天技术的发展,迫切需要在真空和高温环境中进行绝对压力监测。例如,当飞行器处于临近空间飞行时,飞行器表面压力的监测对评估飞行器的工作状态有重要的参考价值,此外,监测发动机尾部的燃气压力能够评估发动机的燃烧效率和健康状态^[1-2]。然而,当飞行器高速飞行时,由于摩擦产生高温、强电磁干扰,这样复杂的环境使得相关压力的测试面临很大的挑战。

光纤传感器具有耐高温、耐腐蚀、本征安全、抗电磁干扰等优点,能够在恶劣环境中实现各种物理参数的测量^[3-11]。针对压力测量,主要有迈克尔逊干涉仪^[12]、马赫-曾德尔干涉仪^[13]、EFPI^[14]等几种方案。其中,EFPI 的结构天然适合压力测量,并且具有可靠性高、响应速度快、易于制造等优点^[15-17],因此,为实现高温环境下的压力测量,采用光纤 EFPI 压力传感器是针对性很强的一种技术途径。Gao 等^[18]将两段单模光纤、空心光纤、无芯光纤依次熔接形成双 FP 腔结构,研制出一种温压复合传感器,压力测量范围为 0 ~ 10 MPa,温度测量范围为 20 ~ 800 °C。但是,由于石英熔点较低,当温度超过 800 °C 时,石英膜片变软,会导致传感器性能变差甚至损坏。

蓝宝石(Al_2O_3)熔点为 2 045 °C,在 0.5 ~ 3.5 μm 的波长范围内,透过率达 80%,是一种良好的高温传感材料,如利用飞秒激光制备的蓝宝石光纤光栅传感器成功实现了 1 800 °C 的高温温度传感^[19]。针对压力测量,一种方案是基于开腔的无膜片式蓝宝石光纤 EFPI 气体压力传感器^[20],利用气体折射率随压力线性变化的原理实现气体压力的测量,但是传感器的压力灵敏度受温度影响大,导致压力测量精度降低,并且只能测量气体压力。另一种方案是基于蓝宝石的直接键合工艺,制作密闭

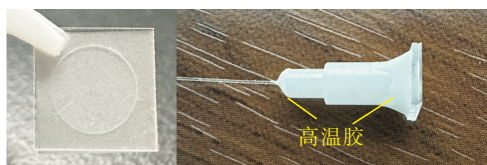
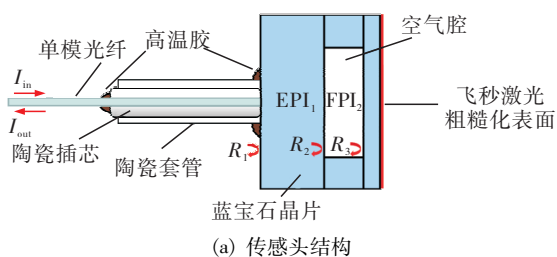
的 FP 腔,利用蓝宝石膜片随压力线性形变的原理实现压力的测量。文献[21-22]首次研制出蓝宝石密闭 FP 腔,通过反应离子刻蚀的方法在一片蓝宝石晶片中心刻蚀凹槽,与另一片表面平整的蓝宝石晶片直接键合制作成 EFPI 压力传感器,在常温下做了 0.04 ~ 1.38 MPa 压力测试后,用蓝宝石光纤拾取传感器信号,使传感器的工作温度达到 1 000 °C。国内也开展了相关研究。文献[23]利用蓝宝石的电感耦合等离子体刻蚀工艺和直接键合工艺,研制出基于蓝宝石的光纤压力传感器。文献[24]提出了蓝宝石的湿法刻蚀工艺,降低了蓝宝石刻蚀表面的粗糙度,键合得到密闭 FP 腔后,在 1 200 °C 的高温环境下对传感器进行了 0 ~ 5 MPa 的压力测试。目前,研究人员已研制出用于较高压力环境下的蓝宝石压力传感器,但针对高温、真空环境下的蓝宝石绝对压力传感器鲜有报道。文献[25-27]开展了蓝宝石光纤传感器的研制及多模蓝宝石光纤的信号解调技术相关研究工作。针对压力测量,文献[28]提出了一种蓝宝石光纤气体压力传感器,采用无膜片结构,由蓝宝石光纤传输干涉信号,在 1 400 °C 高温下,传感器的光学腔长随压力线性变化。文献[29]利用飞秒激光加工工艺和蓝宝石的直接键合工艺,研制出基于蓝宝石的膜片式光纤压力传感器,传感器的压力量程达到 0 ~ 50 MPa,最高工作温度达到 1 000 °C。为了在真空和高温环境下测量绝对压力,需要传感器整体耐高温,并且能够温度自补偿,从而去除温度对压力测量的影响,在不同温度下准确测量绝对压力。

本文提出了一种基于蓝宝石的光纤绝对压力传感器。通过键合 3 片蓝宝石晶片,制作出蓝宝石压力探头,3 层蓝宝石晶片构成复合 FP 腔结构。第一片蓝宝石晶片厚度大,其光学腔长仅与温度有关,通过监测其光学腔长实现温度的测量。压力改变时,由于感压膜片的形变,中间密封空气腔的光

学腔长随之改变,通过监测其光学腔长实现压力的测量。搭建了高温绝对压力测试系统,经实验验证,该传感器可以在 25 ~ 900 ℃ 的温度范围内测量真空环境下 0 ~ 100 kPa 范围内的绝对压力。

1 传感器结构设计

传感器的原理图及照片如图 1 所示。传感器由 3 层蓝宝石晶片组成,3 片蓝宝石晶片的尺寸均为 7 mm × 7 mm,其中第一片蓝宝石晶片的厚度为 400 μm,中间带通孔的蓝宝石晶片厚度为 175 μm,第三层为蓝宝石感压膜片,厚度为 100 μm,最外侧由飞秒激光粗糙化。3 层晶片贴合后,形成中间的密封空气腔,如图 1(a)所示,传感器存在 3 个反射面,构成复合 FPI。第一片蓝宝石晶片厚度较大,在 0 ~ 100 kPa 的压力范围内几乎不发生形变,由 R_1 和 R_2 构成的 FPI_1 的光学腔长仅与温度有关,用来测量环境温度,而第三片蓝宝石晶片随着压力线性形变,由 R_2 和 R_3 构成的 FPI_2 用来测量环境压力。端面平整的单模光纤插入陶瓷插芯后,通过高温胶固定于传感器前端拾取干涉信号。



(b) 传感器照片

图 1 传感器

Fig. 1 Sensor head

2 传感器工作原理

当压力变化时,感压膜片内外表面间存在压差,产生形变,从而引起 FPI_2 光学腔长的变化,通过测量其光学腔长的变化可以解调出压力信息。根据弹性力学原理,膜片外界压力变化时,中心点的形变可以表示为

$$\omega = \frac{3r^4(1-\mu^2)}{16Eh^3}\Delta p \quad (1)$$

式中: ω 为膜片挠度; Δp 为感压膜片内外表面间的压力差; E 为膜片的杨氏模量; μ 为膜片的泊松比; r 为通孔半径。

由式(1)推导出压力灵敏度为

$$S_p = \frac{d\omega}{dp} = \frac{3(1-\mu^2)r^4}{16Eh^3} \quad (2)$$

当膜片厚度为 100 μm 时,通过增大通孔半径能够提升传感器的压力灵敏度,但同时会减少晶片间的接触面积,密封腔可能出现泄漏。综合考虑,传感器的通孔半径取 2.3 mm,结合蓝宝石的杨氏模量 380 GPa,泊松比 0.27,由式(2)计算出常温下的理论压力灵敏度为 12.8 nm/kPa。

由于热光效应和热膨胀效应,当温度变化时, FPI_1 光学腔长发生变化。如前文所述, FPI_1 的光学腔长不随压力变化,通过监测 FPI_1 的光学腔长可以解调出温度信息。得到环境温度 T 后,可以计算出环境压力 p 为

$$p = p_0 - \frac{\Delta l_2}{S_p(T)} \quad (3)$$

式中: p_0 为大气压(100 kPa); Δl_2 为 FPI_2 的光学腔长随压力的变化,由解调系统实时监测; $S_p(T)$ 为压力灵敏度。

3 实验结果

图 2(a) 为解调仪采集的传感器干涉光谱,对应的频谱如图 2(b) 所示,其中第一个峰值和第二个峰值分别对应 FPI_2 和 FPI_1 的干涉信号的主频位置,第三个峰值是 R_1 和 R_3 所形成干涉信号的主频位置。用两个带通滤波器分别提取 FPI_1 和 FPI_2 主频信号,分别作反傅里叶变换得到原始干涉信号,最后通过峰峰值法实时解调出两个 FPI 的光学腔长。基于傅里叶变换的白光干涉测量技术和峰峰值法参见文献[30-31]。

实验系统如图 3 所示,传感器置于马弗炉中,拾取干涉信号的单模光纤通过不锈钢管连接至压力罐,并从压力罐的光纤出口引出,连接至实验室自制的白光干涉解调仪^[30-31]。通过真空泵抽取密封系统中的空气,真空压力表测量绝对压力,一只铂铑热电偶置于传感器附近,测量环境温度。

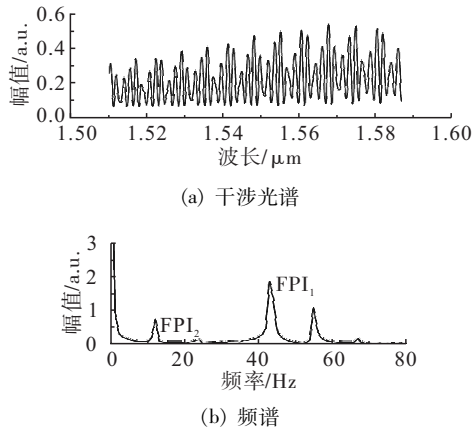


图 2 干涉光谱与频谱

Fig. 2 Interference spectrum and frequency spectrum

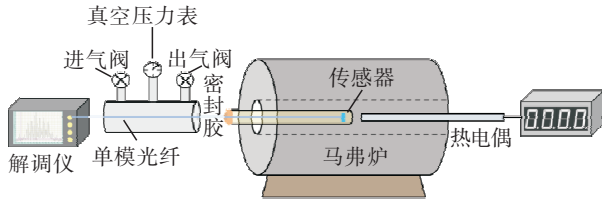


图 3 测试系统

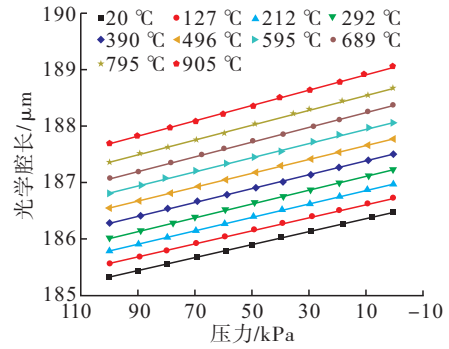
Fig. 3 The test system

控制马弗炉的温度以 100 °C 为间隔,从室温升至 900 °C,每个温度点保持 30 min 后,以 10 kPa 为间隔抽取密封系统中的空气,测试 FPI₂ 的压力响应,如图 4(a) 所示。由于蓝宝石的热膨胀效应, FPI₂ 的初始光学腔长随着温度的升高而增大,在每个温度点下,光学腔长随着压力的减小线性上升 ($R^2 > 0.999$)。在对应温度点的压力灵敏度如图 4(b) 所示,常温下的压力灵敏度为 11.6 nm/kPa,与理论值 12.8 nm/kPa 接近,与预期一致,由于杨氏模量在高温下略微降低,传感器的压力灵敏度略微上升,故对其进行分段拟合,表示为

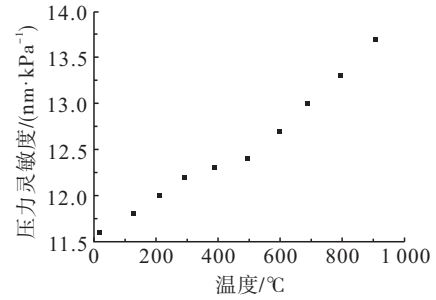
$$S_p(T) = \begin{cases} 2 \times 10^{-9} T^2 + 2 \times 10^{-6} T + 0.0116 & 20 \leq T < 300 \\ 10^{-6} T + 0.0119 & 300 \leq T < 500 \\ 7 \times 10^{-10} T^2 + 2 \times 10^{-6} T + 0.0111 & 500 \leq T \leq 900 \end{cases} \quad (4)$$

为准确测量绝对压力,在测得环境温度后,得到对应温度下的压力灵敏度,对压力的测量进行温度补偿。FPI₁ 的光学腔长仅受蓝宝石的热光效应和热膨胀效应影响,其温度响应如图 5 所示,即可得到环境温度为

$$T = \left[-0.0076 + \sqrt{0.0076^2 - 16 \times 10^{-6} \times (672.0032 - l_1)} \right] / 8 \times 10^{-6} \quad (5)$$



(a) 压力响应



(b) 压力灵敏度

图 4 压力响应及压力灵敏度

Fig. 4 Pressure response and pressure sensitivity

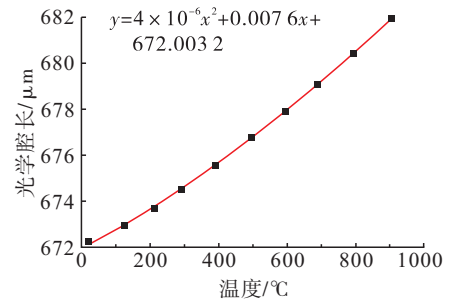


图 5 温度响应

Fig. 5 Temperature response

根据式(3)可计算出传感器所处环境的绝对压力。

根据以上标定,在 300、600、900 °C 这 3 个温度点对传感器进行测试,结果如图 6 所示。3 条拟合直线的相关系数 R_2 均大于 0.99,最大误差为 1.99 kPa,经过温度补偿后,传感器能够在不同温度下准确测量出绝对压力。

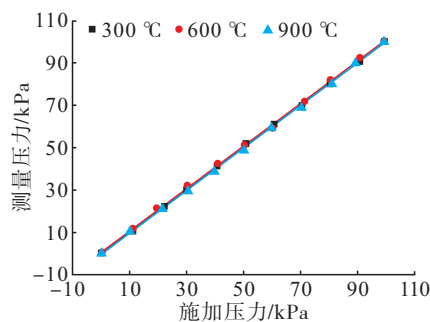


图 6 传感器压力测试

Fig. 6 Pressure test of the sensor

对传感器的压力分辨率进行测试,在大气压下,用解调仪连续采集 300 s FPI₂ 的光学腔长,如图 7 所示,测量精度约为 1 nm,结合常温下的压力灵敏度 11.6 nm/kPa,传感器的压力分辨率为 86 Pa。下一阶段将通过增加通孔孔径、降低蓝宝石感压膜片厚度等方式,进一步提高压力测量灵敏度,将测量分辨率提升到 1 Pa 量级,另外采用蓝宝石光纤拾取干涉信号,提高传感器的工作温度。

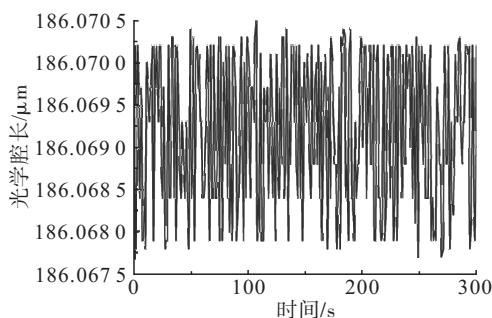


图 7 光学腔长波动

Fig. 7 Fluctuation of the optical cavity length

4 结论

本文研制了一种蓝宝石 EFPI 光纤绝对压力传感器,将蓝宝石衬底、带通孔的蓝宝石晶片和蓝宝石感压膜片键合形成密闭的 FP 腔。研究表明,在室温和 900 °C 的压力灵敏度分别为 11.6 nm/kPa 和 13.7 nm/kPa,此时,传感器的压力分辨率达到 86 Pa。利用复合 FPI 结构,传感器实现了压力测量的温度补偿,使其能够在 900 °C 的高温下准确测量出真空环境中的绝对压力。本文所提出的压力传感器耐高温、本征安全,能够为临近空间飞行器的环境试验与测试提供技术支持。

参考文献

- [1] 王珺,吕海鑫,陈景龙,等. 液体火箭发动机健康状态智能检测方法[J]. 火箭推进, 2021, 47(4): 52-58.
WANG J, LYU H X, CHEN J L, et al. Intelligent detection method of liquid rocket engine health state [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(4): 52-58.
- [2] 陈海峰,邝奇,翟文化,等. 液体火箭发动机试验脉动压力测量技术研究[J]. 火箭推进, 2016, 42(5): 104-109.
CHEN H F, KUANG Q, ZHAI W H, et al. Research on detection technology of fluctuating pressure in liquid rocket engine test [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(5): 104-109.
- [3] RAJAN G. Optical fiber sensors: Advanced techniques and applications [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.
- [4] DU Y L, SUN B C, LI J Z, et al. Optical fiber sensing and structural health monitoring technology [M]. Berlin: Springer, 2019.
- [5] MURPHY K A, KOOB C E, PLANTE A J, et al. High-temperature sensing applications of silica and sapphire optical fibers [C]// Fiber Optic Smart Structures and Skins III. [S. l.]: SPIE, 1990.
- [6] LEE C E, ATKINS R A, TAYLOR H F. Performance of a fiber-optic temperature sensor from -200 to 1050 °C [J]. Optics Letters, 1988, 13(11): 1038-1040.
- [7] 郭煜恩,谭跃刚,吕文强. 双 F-P 型高温/应变复合光纤传感器[J]. 传感技术学报, 2023, 36(2): 198-203.
GUO Y E, TAN Y G, LYU W Q. Dual F-P high temperature/strain composite optical fiber sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(2): 198-203.
- [8] 赵贤,王永杰,李慧聪,等. 基于飞秒光纤光栅的高温 FBG 传感器阵列[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(11): 350-355.
ZHAO X, WANG Y J, LI H C, et al. High-temperature fiber Bragg grating sensor array based on femtosecond fiber grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(11): 350-355.
- [9] 张柳超,江毅,王素梅,等. 基于飞秒激光加工的微纳高温光纤振动传感器[J]. 光学技术, 2017, 43(4): 334-338.
ZHANG L C, JIANG Y, WANG S M, et al. A micro fiber optic vibration sensor fabricated by femtosecond laser for high temperature applications [J]. Optical

- Technique, 2017, 43(4): 334-338.
- [10] 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.
- [11] GUO H Y, CHEN J, TIAN Z M, et al. A high temperature solid pressure sensor based on fiber Bragg grating [J]. Symmetry, 2021, 13(11): 2098.
- [12] YUAN S F, ANSARI F, LIU X H, et al. Optic fiber-based dynamic pressure sensor for WIM system [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 120(1): 53-58.
- [13] 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.
- [14] LIU G G, HAN M. Fiber-optic gas pressure sensing with a laser-heated silicon-based Fabry-Perot interferometer [J]. Optics Letters, 2015, 40(11): 2461-2464.
- [15] YOSHINO T, KUROSAWA K, ITOH K, et al. Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(10): 1624-1633.
- [16] 李爱武, 单天奇, 国旗, 等. 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.
- LI A W, SHAN T Q, GUO Q, et al. Research progress of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors [J]. Chinese Optics, 2022, 15(4): 609-624.
- [17] 王宁, 朱永, 张洁. 高温高压环境下光纤法布里-珀罗传感技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(11): 61-73.
- WANG N, ZHU Y, ZHANG J. Research status of fiber fabry-perot sensing technology under high temperature and high pressure environment [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(11): 61-73.
- [18] GAO H C, 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.
- [19] 何俊, 徐锡镇, 贺佳, 等. 蓝宝石光纤光栅高温传感器研究进展与发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 11-33.
- HE J, XU X Z, HE J, et al. Research progress and development tendency of sapphire fiber Bragg grating-based high-temperature sensors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(10): 11-33.
- [20] FENG X X, JIANG Y, GAO H C, et al. Diaphragm-free gas pressure sensor based on all-sapphire fiber Fabry-Perot interferometers [J]. Applied Optics, 2022, 61(22): 6584-6589.
- [21] YI J, LALLY E, WANG A B, et al. Demonstration of an all-sapphire Fabry-Perot cavity for pressure sensing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(1): 9-11.
- [22] YI J. Sapphire Fabry-Perot pressure sensor at high temperature [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(2): 1596-1602.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] CUI Y, JIANG Y, ZHANG Y T, et al. Sapphire optical fiber high-temperature vibration sensor [J]. Optics Express, 2022, 30(2): 1056-1065.
- [26] FENG X X, JIANG Y, XIE S R, et al. Higher-order mode suppression technique for multimode sapphire fiber external Fabry-Perot interferometers [J]. Optics Express, 2022, 30(4): 4759.
- [27] FENG X X, JIANG Y, XIE S R, et al. Signal pick-up technique for sapphire fiber external fabry-perot interferometer using tapered multimode fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(12): 3992-3996.
- [28] ZHANG Y T, JIANG Y. An all-sapphire fiber diaphragm-free extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor for the measurement of gas pressure at ultrahigh temperature [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(6): 5818-5823.
- [29] ZHANG Y T, JIANG Y, DENG H, et al. All-sapphire-based optical fiber pressure sensor with an ultra-wide pressure range based on femtosecond laser micromachining and direct bonding [J]. Optics Express, 2023, 31(25): 41967-41978.
- [30] JIANG Y. High-resolution interrogation technique for fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors by the peak-to-peak method [J]. Applied Optics, 2008, 47(7): 925-932.
- [31] JIANG Y. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2): 75-77.