

基于光纤法布里-珀罗干涉仪的超短薄膜腔的温度传感技术研究

邢美华^{1,2,3,4}, 杨迪^{1,2,3,4}, 刘波^{1,2,3,4}, 闫诚^{1,2,3,4}, 刘钦朋^{1,2,3,4}

(1. 西安石油大学理学院, 陕西西安 710065; 2. 陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心, 陕西西安 710065; 3. 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西西安 710065; 4. CNPC 重点实验室——油藏光纤动态监测研究室, 陕西西安 710065)

摘要:针对超短薄膜腔不易制造的问题,提出了一种利用液体形成超短薄膜腔的基于法布里-珀罗干涉仪(FPI)的超薄膜光纤温度传感器。通过优化材料结构、膜厚和腔长之间的关系,建立法布里-珀罗(FP)腔长极短的结构模型,研制小型化、增敏和高精度的光纤温度传感器,并进行实验验证。结果表明,该传感器的温度灵敏度为 $342.05 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,在 $40\sim 120^\circ\text{C}$ 温度范围内的线性度为 0.997 ,具有结构紧凑、制作简单、成本低等优点和良好的温度响应特性,在复杂环境中的温度检测和制作FP超短薄膜方面具有潜在的应用价值。

关键词:光纤传感;光纤F-P腔;温度;灵敏度

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

Research on Temperature Sensing Technology of Ultra-Short Thin Film Cavity Based on Fiber-Optic Fabry-Pérot Interferometer

XING Meihua^{1,2,3,4}, YANG Di^{1,2,3,4}, LIU Bo^{1,2,3,4}, YAN Cheng^{1,2,3,4}, LIU Qinpeng^{1,2,3,4}

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection, Xi'an 710065, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an 710065, China;

4. Key Laboratory of CNPC-Research Laboratory for Optical Fiber Dynamic Detection of Oil Reservoirs, Xi'an 710065, China)

Abstract: To address the challenges in manufacturing ultrashort thin-film cavities, an ultrathin-film optical fiber temperature sensor based on a Fabry-Pérot interferometer (FPI) constructed using liquid adhesive is proposed. A miniature, high-sensitivity, and high-accuracy fiber-optic temperature sensor was developed and experimentally validated by optimizing the relationship between the material structure, film thickness, and cavity length. A structural model with an ultrashort Fabry-Pérot (FP) cavity length was successfully established. The experimental results reveal that the sensor has a temperature sensitivity of $342.05 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ and a linearity of 0.997 within the temperature range of $40\sim 120^\circ\text{C}$. The sensor features a compact design, simple fabrication process, low production cost, and excellent temperature-response performance. It holds promise for applications in temperature detection within complex environments and manufacture of ultrashort FP thin films.

Key words: fiber optic sensing; optic fiber F-P cavity; temperature; sensitivity

0 引言

温度是维护基础设施和管理设备健康的关键因素^[1-5],在生物医学、设备工程和天然气运输等多个领域发挥着关键作用。在近年来蓬勃发展的锂电池行业,温度检测技术的重要性日益突显^[6-10]。温度检测的准确性对于科学研究和生产实践至关

重要,对温度的准确测量是众多工业生产过程中的基础性技术之一。

近年来,光纤温度传感器器件因具有抗电磁干扰、体积小、灵敏度高、耐腐蚀、性能稳定和可复用等优点而备受关注。已有报道的光纤温度传感器有光纤布喇格光栅(FBG)^[11]和长周期光纤光栅

收稿日期:2024-07-20

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2024JC-YBMS-530);西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目(YCS23213193)

作者简介:邢美华(2000-),女,山东省日照市人,硕士生。

(LPFG)^[12],但这些传感器的性能在实际应用中受到了许多限制。例如,最常见的FBG温度传感器的温度灵敏度仅为10 pm/°C,应用成本较高;LPFG传感器对应用环境要求较高,维护困难,成本较高。近年来,带有干涉仪的光纤传感器得到了广泛应用。这些干涉仪主要包括塞格纳克(Sagnac)、迈克尔逊(Michelson)、马赫-曾德尔(MZ)和法布里-珀罗(FP)干涉仪,可满足温度检测的基本要求。其中,基于法布里-珀罗干涉仪(FPI)的光纤温度传感器因其结构简单、交叉灵敏度小和小型化等特点而受到广泛关注。刘毅等^[13]采用飞秒激光诱导水击穿的方法在单模光纤(SMF)末端的纤芯上钻出微通道,然后对微通道进行电弧放电退火,使微通道内壁光滑形成FPI。Rong等^[14]在光纤端面涂覆了一层聚乙烯醇薄膜,由于薄膜边界之间存在分隔,因此可以获得双光束干涉的一个干涉谱。Li等^[15]提出了一种具有高温灵敏度超紧凑液态聚合物填充FPI,利用双光子聚合法在光纤端面制备了液态聚合物填充微结构。Chen等^[16]提出了一种小体积高灵敏的光纤温度传感器,传感器由单模光纤和一段空心光纤(HCF)熔接而成;在空心光纤中通过毛细管效应填充聚二甲基硅氧烷(PDMS),形成一个空气微气泡腔,制备空气微泡FPI。

本文以温度模型理论为基础,针对自由光谱测量范围大的超短腔体的制作难点,提出了薄膜腔体的设计思路,将温度变化转换为薄膜的腔长变化,

利用FPI波长的位移反映温度的升降。实验结果表明,所设计的传感器具有较好的稳定性和温度响应特性,有望为制作超短薄膜腔的温度传感器提供重要参考。

1 传感器设计及其工作原理

根据上述光纤温度传感器的分类,为制作一种高灵敏度、结构紧凑的传感器,实现FPI的超短薄膜腔结构,提出了通过固化液体胶制作薄膜腔的设想。其核心问题包括制备薄膜腔,探究其温度响应特性,优化其温度响应特性。由于采用传统的熔融方法难以实现超短型腔,且微腔采用金属作为薄膜材料,制造方法难度较大,因此研究了3种可用于光纤的液体粘合剂(其特性符合制作FPI薄膜腔的要求)并进行实验,以实现薄膜腔的制作以及高灵敏度、大测量温度范围性能。最后,根据实验结果选出灵敏度和测量范围较优的传感器。

图1为所设计的温度传感器结构及原理。由图1(a)可见,SMF末端包含粘合剂薄膜。分别选用UV粘合剂、PDMS粘合剂和353ND粘合剂作为涂层材料,使其具有较好的成膜性和粘接性能。3种粘合剂均为温度敏感材料,其热膨胀系数高于SMF。SMF包层直径约为 $\varnothing 125\ \mu\text{m}$,纤芯直径约为 $\varnothing(8\sim 10)\ \mu\text{m}$ 。通过控制SMF端面粘合剂的厚度,制备出不同长度薄膜腔的光纤FPI。FPI由SMF端面 M_1 和粘合剂端面 M_2 组成, M_1 为FPI的第一个反射面, M_2 为FPI提供第二个反射面。

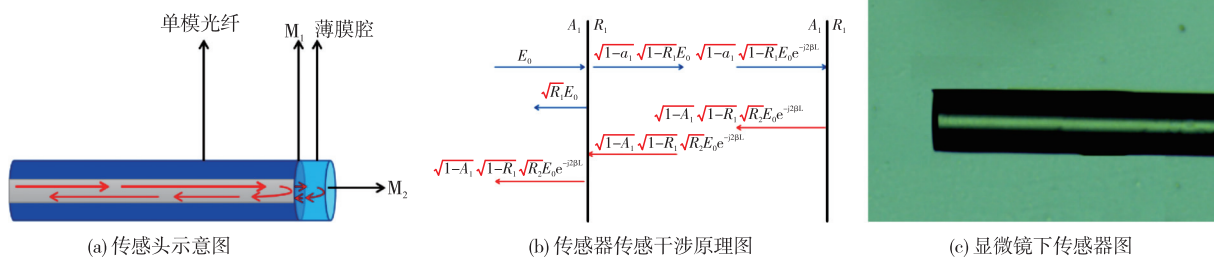


图1 传感器原理图

光纤FPI的工作过程:光线穿过SMF时,部分在SMF端面 M_1 上发生反射,部分穿过 M_1 射入薄膜腔,在薄膜腔表面 M_2 上发生反射; M_1 和 M_2 的反射光束形成光路差(OPD),光束的叠加产生干涉。由于光纤端面和粘合剂的反射率较弱,可忽略多重反射的影响,故分析时只考虑 M_2 处的反射。根据菲涅尔反射定理,两反射面的反射率 R_1 和 R_2 为^[17]

$$R_1 = \left(\frac{n_1 - n}{n_1 + n} \right)^2 \quad (1)$$

$$R_2 = \left(\frac{n - n_{\text{air}}}{n + n_{\text{air}}} \right)^2 \quad (2)$$

式中 n_1 、 n 和 n_{air} 分别是粘合剂、SMF和空气的折射率。干涉强度^[18]可表示为

$$I = (R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos F) I_0 \quad (3)$$

$$F = \cos\left(\frac{4\pi n_{\text{air}} L}{\lambda} + \varphi_0\right) \quad (4)$$

式中: I_0 为入射光强度; L 为薄膜腔腔长; λ 为真空中透射光的波长; φ_0 为初始干涉相位。当相位为 $(2m+1)\pi$ 时, 干涉强度极小, 其相位关系^[19]为

$$\frac{4\pi n_{\text{air}} L}{\lambda} + \varphi_0 = (2m+1)\pi \quad m=0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

假设空气的折射率 n_{air} 为 1, φ_0 为 0。在干涉频谱中, 两个相邻波谷处的 λ_1 和 λ_2 的中心波长存在 2π 的相位差:

$$\left(\frac{4\pi L}{\lambda_1}\right) - \left(\frac{4\pi L}{\lambda_2}\right) = 2\pi \quad (6)$$

由式(6)可得薄膜的实际长度^[20]:

$$L = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (7)$$

自由光谱范围(FSR)是描述 F-P 腔的多光束干涉光谱的重要特性参数之一, 可表示为两相邻波峰或波谷之间的波长距离, 由式(7)可得其表达式为

$$FSR = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2L} \quad (8)$$

同时, 传感器灵敏度可表示为

$$S_{\text{FP}} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \lambda(\beta + \alpha) \quad (9)$$

式中 β 和 α 分别为粘合剂的热膨胀系数和热光系数。温度的变化导致腔体的长度及薄膜的折射率发生变化, 即热膨胀效应和热光效应。由于 3 种粘合剂的折射率与光纤的折射率十分接近, 可推测热光系数对传感器灵敏度的影响较小, 故传感器随温度的形变源于 3 种粘合剂的热膨胀系数。薄膜可近似为一个圆柱形, 其体积不变, 温度变化导致其径向和轴向的腔长变化。根据光谱图波谷的位移变化可确定热膨胀系数导致的腔长变化是径向的还是轴向的, 其中, 由 PDMS 和 353ND 粘合剂形成的 FPI, 随着温度的升高, 其腔长沿轴向变长; 而由 UV 粘合剂形成的光纤 FPI, 随着温度的升高, 其腔长沿径向变长。虽然两种 FPI 的腔长沿不同方向变化, 但都会导致干涉光谱的波长漂移, 从而输出温度参数信息。

2 传感器的制作

传感器的制作过程如图 2 所示。首先, 使用光纤切割机将 SMF(SMF128)端面切平, 去除包层, 并用酒精将该 SMF 样品擦拭干净。然后, 将实验中

所使用的 UV 胶、PDMS 和 353ND 胶 3 种粘合剂少量滴在载玻片上并排出气泡备用。随后, 将 SMF 样品的切面垂直提拉, 切面与载玻片保持一定距离以免损坏切面, 观察并分析解调仪的数据, 得到性能良好的传感器。最后, 将传感器上的胶腔进行固化。UV 胶固化时, 紫外灯照射 5~10 min; PDMS 固化时, 在 85 °C 的温箱中加热 2 h; 353ND 胶固化时, 在 120 °C 的温箱中加热 20 min。3 个传感器样品固化后, 用胶带将传感器完全固定在玻璃载玻片上, 并于室温下放置 24 h, 直至其结构稳定。

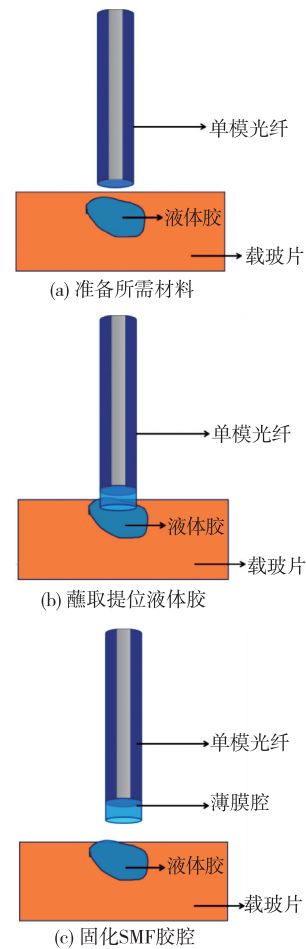


图 2 传感器的制作过程

3 实验结果与分析

为了研究温度传感器的温度响应特性, 搭建了温度传感实验设备, 如图 3 所示。温度测量实验系统由光纤解调仪、温度箱和温度传感器组成。解调器(TV125)的波长分辨率为 1 pm, 波长范围为 1 510~1 590 nm, 温度控制器(101-2AB)的分辨率为 0.1 °C。

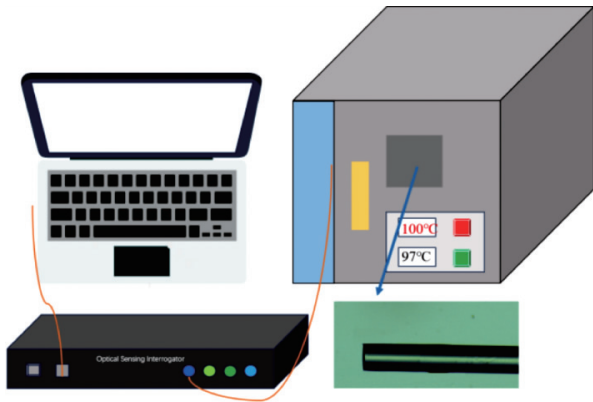
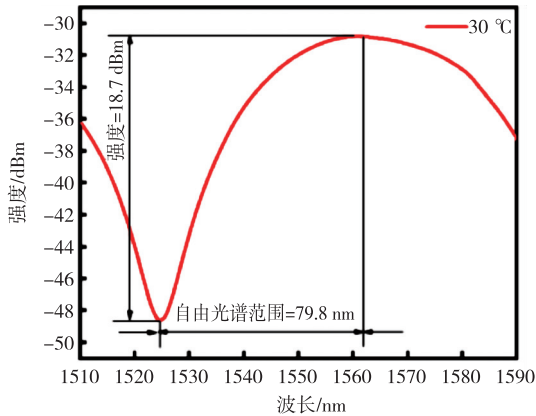
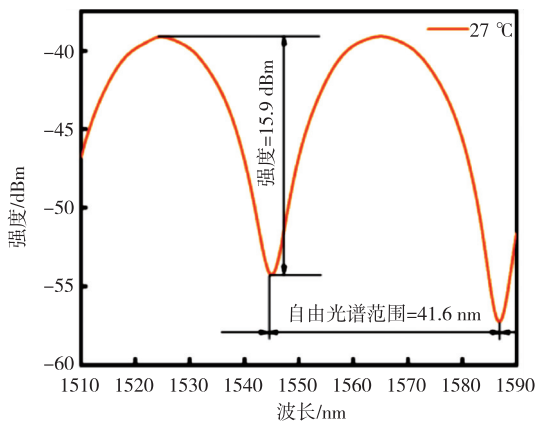


图3 温度测量实验系统

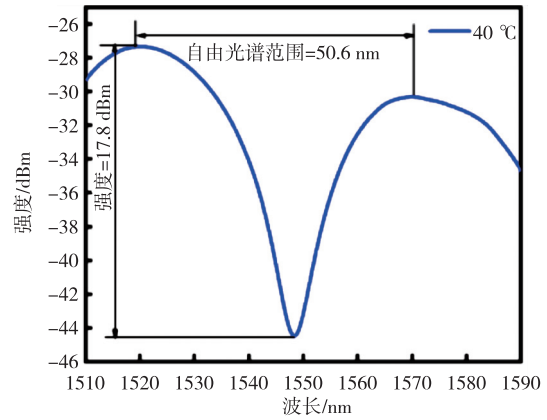
使用UV粘合剂的温度传感器在30℃时的干涉光谱如图4(a)所示,其自由光谱范围较宽,达到79.8 nm,强度高达18.7 dBm,为后续的温度测量提供了便利。图4(b)为使用PDMS粘合剂的温度传感器在27℃时的干涉频谱,其自由光谱范围达到41.6 nm,强度达到15.9 dBm。使用353ND粘合剂的温度传感器在40℃时的干涉频谱如图4(c)所示,传感器的自由光谱范围达到50.6 nm,强度达到17.8 dBm。



(a) UV胶薄膜腔的干涉光谱



(b) PDMS胶薄膜腔的干涉光谱



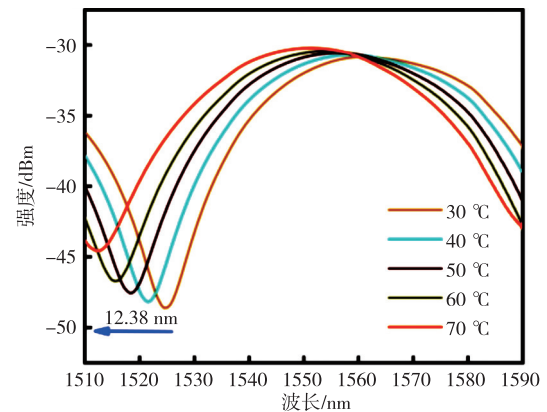
(c) 353ND胶薄膜腔的干涉光谱

图4 传感器的干涉光谱

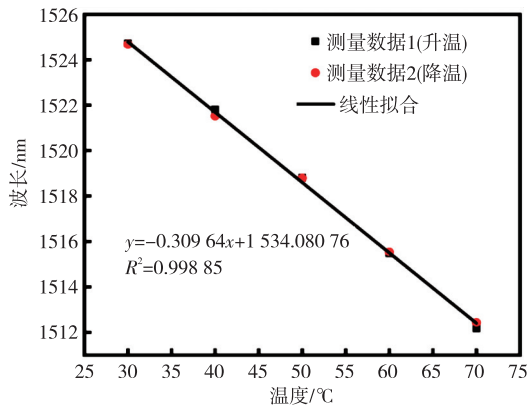
根据上述自由光谱范围得到3种不同胶水形成的FPI薄膜腔的腔长分别为15 μm、28.8 μm和23.1 μm。测量结果与公式计算结果一致,FPI的薄膜腔长度为10~30 μm,已达到本文提出的超短薄膜腔的基本要求。若要实现大温度范围测量,则需根据薄膜腔的材料特性进行温度实验。

为了获得更精确的数据,将温度传感器固定在温箱上层的中心位置。解调仪发出的光通过SMF进入薄膜腔,并在薄膜腔中产生反射光信号,然后解调器检测反射干涉光信号,并将反射光谱传输到计算机。计算机软件SM125_V1.03用于解调和记录干涉光谱。实验时,传感器被放置在温度控制器中,温度从室温变为设定温度。同时记录每间隔10℃的干涉光谱。由于3种粘合材料的温度特性不同,其耐温分别为85℃、120℃和200℃,因此为3个传感器样品设置了不同的测量温度范围。

UV薄膜腔的光纤FPI干涉光谱如图5(a)所示。当温度升高时,腔长的变化遵循一定规律,而薄膜腔的腔长主要受热膨胀系数的影响呈径向膨胀



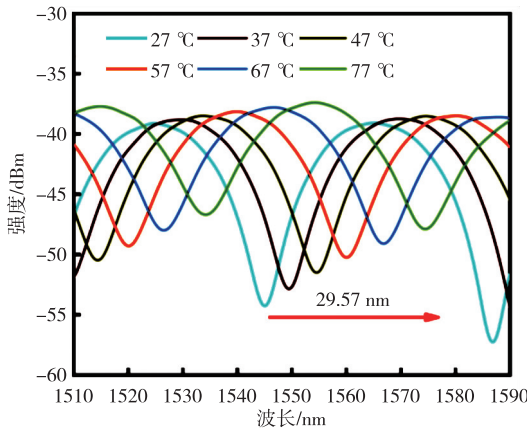
(a) UV薄膜腔的干涉光谱



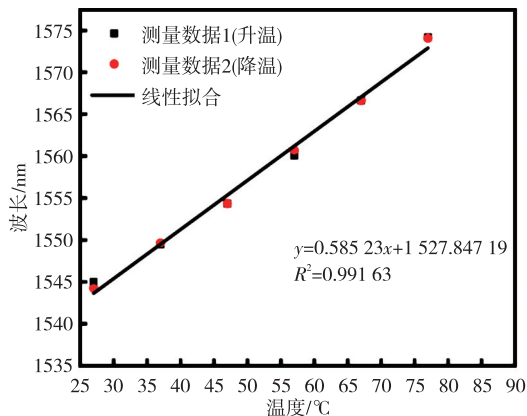
(b) UV薄膜腔的温度传感线性拟合

图 5 反射光谱(UV 薄膜腔)随温度的变化和收缩,故而温度变化时波长会发生偏移。根据 UV 胶温度特性,当温度从 30 °C 上升到 70 °C 时,波长发生蓝移。由图 5(b)可看出,传感器的温度灵敏度为 -0.309 64 nm/°C,线性度为 0.998,且升、降温实验结果符合预期。

图 6 为 PDMS 薄膜腔的光纤 FPI 干涉光谱。



(a) PDMS薄膜腔的干涉光谱



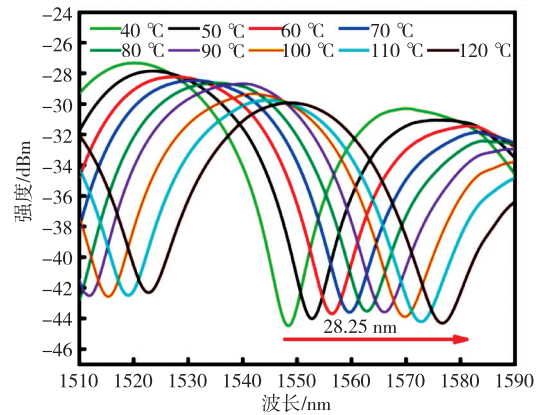
(b) PDMS薄膜腔的温度传感线性拟合

图 6 反射光谱(PDMS 薄膜腔)随温度的变化

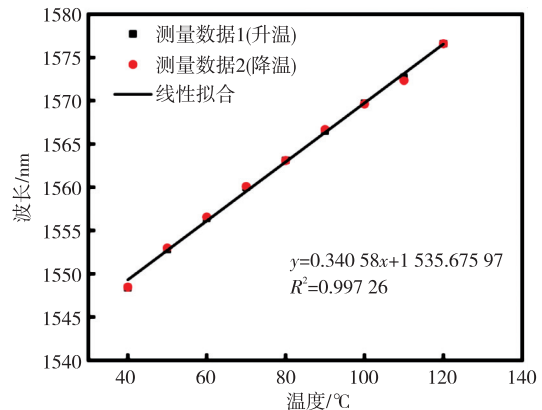
由图 6(a)可见,当温度升高时,受热膨胀系数的影响,腔长沿轴向膨胀。当温度从 27 °C 上升到

77 °C,波长发生红移。由图 6(b)可看出,传感器的温度灵敏度为 0.585 23 nm/°C,线性度为 0.991,升、降温灵敏度误差较小。

图 7 为 353ND 胶水薄膜腔的 FPI 干涉光谱。由图 7(a)可见,当温度从 40 °C 上升到 120 °C 时,波长红移 28.25 nm。由图 7(b)可看出,传感器温度灵敏度为 0.340 58 nm/°C,线性度为 0.997,升、降温数据相差较小。



(a) 353ND薄膜腔的干涉光谱



(b) 353ND薄膜腔的温度传感线性拟合

图 7 反射光谱(353ND 薄膜腔)随温度的变化

对比以上实验结果可知,UV 薄膜腔的光纤 FPI 温度测量范围小,但灵敏度高,制作成本低,可以应用于对测温范围较小的场景。PDMS 薄膜腔的 FPI 灵敏度最高,但 PDMS 是一种双组分环氧树脂粘合剂,搅拌和固化的过程更复杂,生产难度大;此外,其温度测量范围小于 353ND 形成的 FPI,自由光谱范围在 3 组传感器中也较小。353ND 薄膜腔的光纤 FPI,其干涉频谱的自由光谱范围较大,干涉频谱可连续监测,具有测量温度范围大、灵敏度高的优点。综合而言,基于 353ND 薄膜腔的光纤 FPI 传感器具有薄膜腔腔长可控、灵敏度高、制造简

单和成本低等优点,有望应用于对灵敏度和测温范围要求较高的场景。

相较于FBG、SMF及现阶段的薄膜型光纤温度传感器,使用353ND胶制成薄膜腔的光纤FPI的温度灵敏度为 $342.05 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,线性拟合度为0.997,在 $40\sim 120^\circ\text{C}$ 内具有一定优势,具有潜在的工程应用价值,具体参数对比如表1所示。

表1 353ND胶与其他材料参数性能对比

文献	薄膜材料	薄膜腔长/ μm	温度灵敏度/ ($\text{pm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
[14]	PVA胶	19.9	173.5
[21]	ZrO_2 和 Al_2O_3	—	8.37×10^{-3}
[22]	多模光纤	59.2	181.1
本文	353ND胶	23.1	342.05

4 结束语

本文建立了超短薄膜腔的制作模型,提出了通过调整液体胶材料、腔长长度来保证温度灵敏度及测温范围的详细理论。设计并制备了传感器样品,经过合理的实验验证,在 $40\sim 120^\circ\text{C}$ 时,所制备的传感器的灵敏度为 $342.05 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,线性度为0.997,其对温度变化反应迅速,且具有体积小、成本低、灵敏度高、漂移率低等特性,可在复杂环境下进行温度检测,在光学测量温度领域具有较高的应用价值。未来研究将围绕提高液体胶材料的耐高温性及更精密的超短腔制作,以进一步提高传感器的灵敏度,实现向微型化和多参量化的发展。

参考文献:

[1] ARREGUI F J, MATÍAS I R, COOPER K L, et al. Simultaneous measurement of humidity and temperature by combining a reflective intensity-based optical fiber sensor and a fiber Bragg grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2002,2(5):482-487.

[2] PECORELLA C, CIRILLO A, SICILIANO B, et al. Robot-aided prostate cancer diagnosis with fiber optic sensing: A validation study on phantoms and ex-vivo tissues[J]. *Uro*, 2021,1(4):245-253.

[3] SALVO P, CALISI N, MELAI B, et al. Temperature and pH sensors based on graphenic materials[J]. *Bio-sensors and Bioelectronics*, 2017,91:870-877.

[4] OZBEY B, UNAL E, ERTUGRUL H, et al. Wireless displacement sensing enabled by metamaterial

probes for remote structural health monitoring[J]. *Sensors*, 2014,14(1):1691-1704.

[5] QIN J, CHAO K, KIM M S. Raman chemical imaging system for food safety and quality inspection[J]. *Transactions of the ASABE*, 2010,53(6):1873-1882.

[6] NOVAIS S, NASCIMENTO M, GRANDE L, et al. Internal and external temperature monitoring of a Li-ion battery with fiber Bragg grating sensors[J]. *Sensors*, 2016,16(9):1394.

[7] NASCIMENTO M, FERREIRA M S, PINTO J L. Real time thermal monitoring of lithium batteries with fiber sensors and thermocouples: A comparative study[J]. *Measurement*, 2017,111:260-263.

[8] QIAN S, CHEN X, JIANG S, et al. Plasmonic fiber-optic sensing system for in situ monitoring the capacitance and temperature of supercapacitors[J]. *Optics Express*, 2022,30(15):27322-27332.

[9] LIU Y, LIU Z, MEI W, et al. Operando monitoring Lithium-ion battery temperature via implanting femtosecond-laser-inscribed optical fiber sensors[J]. *Measurement*, 2022,203:111961.

[10] YANG G, LEITÃO C, LI Y, et al. Real-time temperature measurement with fiber Bragg sensors in lithium batteries for safety usage[J]. *Measurement*, 2013,46(9):3166-3172.

[11] OSUCH T, JUREK T, MARKOWSKI K, et al. Simultaneous measurement of liquid level and temperature using tilted fiber Bragg grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015,16(5):1205-1209.

[12] DAS A K, LEE H, NODA K, et al. Potential of mechanically induced cascaded long-period grating structure for reflectometric pressure, strain, and temperature sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(18):10539-10546.

[13] LIU Y, QU S, LI Y. Single microchannel high-temperature fiber sensor by femtosecond laser-induced water breakdown[J]. *Optics letters*, 2013,38(3):335-337.

[14] RONG Q, SUN H, QIAO X, et al. A miniature fiber-optic temperature sensor based on a Fabry-Pérot interferometer[J]. *Journal of Optics*, 2012,14(4):045002.

[15] LI M, LIU Y, GAO R, et al. Ultracompact fiber sensor tip based on liquid polymer-filled Fabry-Pérot cavity with high temperature sensitivity[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016,233:496-501.

(下转第1014页)

一种有效且可行的方案。

参考文献:

- [1] HEIDEMANN J, STOJANOVIC M, ZORZI M. Underwater sensor networks: Applications, advances and challenges[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, 370(1958):158-75.
- [2] XIE F, ZUO Q, CHEN Q, et al. Designs of the biomimetic robotic fishes performing body and/or caudal fin (BCF) swimming locomotion: A review[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2021, 102:13.
- [3] 王南. 蛙人水下通信技术现状与发展趋势[J]. *声学 & 电子工程*, 2022(4):62-65.
WANG Nan. Current status and development trend of frogman underwater communication technology [J]. *Acoustic and Electronic Engineering*, 2022(4):62-65.
- [4] 王萌. 基于 FPGA 的水声通信发射机的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
WANG Meng. Research on hydroacoustic communication transmitter based on FPGA[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.
- [5] ABBAS W B, AHMED N, USAMA C, et al. Design and evaluation of a low-cost, DIY-inspired, underwater platform to promote experimental research in UWSN[J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 34:239-251.
- [6] ZIA M Y I, OTERO P, PONCELA J. Design of a low-cost modem for short-range underwater acoustic communications[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 101:375-390.
- [7] KLEUNEN W A P, MOSELEY N, HAVINGA P, et al. Proteus II: Design and evaluation of an integrated power-efficient underwater sensor node[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, 11(10):1-10.
- [8] 金翔, 李锐, 范季强, 等. 非隔离 Boost 升压变换拓扑综述及其舰船应用展望[J]. *船电技术*, 2023, 43(7):6-11.
JIN Xiang, LI Rui, FAN Jiqiang, et al. A review of non-isolated Boost boost converter topologies and their prospects for shipboard applications[J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2023, 43(7):6-11.
- [9] HUANG Q, WANG H, HAO S, et al. Design and fabrication of a high-frequency single-directional planar underwater ultrasound transducer[J]. *Sensors*, 2019, 19(19):4336.
- [10] 宋文娟, 殷奎喜, 郝辉, 等. $\pi/4$ -QPSK 调制方式及其与 GSMK 调制方式的比较[J]. *电子工程师*, 2002, 28(7):3.
SONG Wenjuan, YIN Kuixi, HAO Hui, et al. $\pi/4$ -QPSK modulation and its comparison with GSMK modulation[J]. *Electronic Engineer*, 2002, 28(7):3.
- [11] 吴双, 王晓聪, 胡振宇, 等. 深海远距离水声通信机的设计[J]. *电声技术*, 2023, 47(1):20-22.
WU Shuang, WANG Xiaocong, HU Zhenyu, et al. Design of deep-sea long-range hydroacoustic communication[J]. *Audio Engineering*, 2023, 47(1):20-22.
- [12] ANTONIO S, BLANC S, YUSTE P, et al. An ultra-low power and flexible acoustic modem design to develop energy-efficient underwater sensor networks[J]. *Sensors*, 2012, 12(6):6837-6856.
- [13] (上接第 1006 页)
- [16] CHEN M, ZHAO Y, XIA F, et al. High sensitivity temperature sensor based on fiber air-microbubble Fabry-Pérot interferometer with PDMS-filled hollow-core fiber[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 275:60-66.
- [17] DENG M, TANG C 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.
- [18] RAN Z L, RAO Y J, LIU W J, et al. Laser-micromachined Fabry-Pérot optical fiber tip sensor for high-resolution temperature-independent measurement of refractive index[J]. *Optics Express*, 2008, 16(3):2252-2263.
- [19] WEI T, HAN Y, LI Y, et al. Temperature-insensitive miniaturized fiber inline Fabry-Pérot interferometer for highly sensitive refractive index measurement[J]. *Optics Express*, 2008, 16(8):5764-5769.
- [20] LIANG J, LI X, LI J, et al. High-temperature-sensitive and spectrum-contrast-enhanced sensor using a bullet-shaped fiber cavity filled with PDMS[J]. *Optics Express*, 2022, 30(8):12316-12325.
- [21] 高晓丹, 彭建坤, 吕大娟. 法布里-珀罗薄膜干涉的光纤温度传感[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1):242-246.
- [22] 李卓玥, 董晨龙, 向美琼, 等. 基于珉珀的全光纤式温度传感器研究[J]. *自动化仪表*, 2023, 44(S01):329-332.