

DOI:10.16136/j.joel.2023.12.0515

类椭圆结构光纤横向压力传感器及其温度自补偿研究

刘睿洋, 康娟*, 解丽媛, 汤毅, 李裔

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:为解决光纤横向压力传感器灵敏度不高及温度交叉敏感的问题,提出了一种具有温度自补偿的类椭圆结构光纤横向压力传感器。传感器通过将标准单模光纤(single mode fiber, SMF)弯曲成类椭圆结构,并用聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)封装形成,温度自补偿则通过将另一个近似孪生的类椭圆结构与测量端并联实现。类椭圆弯曲下 SMF 的纤芯模和包层模发生干涉,其干涉光谱随外界横向压力的变化发生漂移。实验结果表明,在 0.25—0.5 N 的横向压力范围内,传感器的特征波长随横向压力的变化呈线性关系,在 33.5—44 °C 的温度范围内,温度自补偿后的灵敏度可达 6.6 nm/N,温度交叉灵敏度仅为 0.0015 N/°C,温度补偿误差不超过 0.089 nm。提出的横向压力传感器灵敏度高、成本低、结构简单,有一定的应用参考价值。

关键词: 光纤传感器; 横向压力; 类椭圆结构; 温度自补偿

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)12-1256-07

Elliptical optical fiber transverse load sensor and its temperature self-compensation research

LIU Ruiyang, KANG Juan*, XIE Liyuan, TANG Yi, LI Yi

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: To solve the problem of low sensitivity and temperature cross-sensitivity of optical fiber transverse load sensor, an elliptical structure optical fiber transverse load sensor with temperature self-compensation is proposed. The sensor is formed by bending a standard single mode fiber (SMF) into an elliptical structure and encapsulated in polydimethylsiloxane (PDMS). The temperature self-compensation is realized by paralleling another nearly twin elliptical structure of the measuring element. The core mode and cladding mode interfere in the elliptical bending SMF, and the interference spectrum shifts with the change of applied transverse load. The experimental results show that the characteristic wavelengths of the sensor have a linear relationship to the transverse load in the range of 0.25—0.5 N. In the temperature range of 33.5—44 °C, the sensitivity after temperature self-compensation can reach 6.6 nm/N, the temperature cross sensitivity is only 0.0015 N/°C, and the temperature self-compensation error is less than 0.089 nm. The proposed transverse load sensor has high sensitivity, low cost and simple structure. It has certain application reference value.

Key words: optical fiber sensor; transverse load; elliptical structure; temperature self-compensation

0 引 言

光纤传感器相较于传统的电子传感器,因为其不受电磁干扰、体积小、灵敏度高、耐高温高压

等诸多优点,在横向压力传感领域受到了广泛的关注和应用。近年来,相继报道了多种结构的光纤横向压力传感器,主要包括光纤布拉格光栅(fiber Bragg gratings, FBG)^[1-3]、法布里-珀罗干涉仪

* E-mail: kanggroup_cjlu@qq.com

收稿日期:2022-07-12 修订日期:2022-10-21

基金项目:中国计量大学科研标志性发展专项(2021YW75)资助项目

(Fabry-Perot interferometer, FPI)^[4-6]、马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)^[7,8]、迈克尔逊干涉仪(Michelson interferometer, MI)^[9]等。上述的光纤传感器通常是通过监测输出光的强度变化亦或特征波长的漂移来实现横向压力的测量。

在横向压力的测量过程中,由于光纤传感器自身对温度的交叉敏感问题,最终会影响测量结果的准确度。因此,研究人员提出了多种温度补偿方案,如WANG等^[10]提出了一种基于光子晶体光纤的F-P/M-Z混合干涉仪,获得了1.53 nm/N的横向压力灵敏度和-13.7 pm/°C的温度灵敏度。LI等^[11]将一段多芯光纤与两段多模光纤拼接制成光纤MZI,通过监测两个特征波长的变化实现横向压力和温度的双参数测量,两者的灵敏度分别为-165 pm/N和45 pm/°C。GOEL等^[12]报道了一种基于单芯反谐振空芯光纤的紧凑型温度不敏感的机械力传感器,传感器的峰值功率对横向压力呈线性响应,峰值功率变化为52%/N,且温度灵敏度仅有3.3 pm/°C。ZHANG等^[13]通过使用电弧放电熔接一段空心毛细管制成气泡微腔,制得了一种灵敏度高达311.3 nm/N的光纤横向压力传感器,且温度灵敏度仅有1.91 pm/°C。WANG等^[14]报道了一种由MI和FPI并联组成的光纤双参数传感器,获得了85.1 pm/°C的温度灵敏度和-3.15 nm/N的横向压力灵敏度。TORRES-GOMEZ等^[15]提出了两个长周期光纤光栅级联的多路复用长周期光纤光栅,用于同时测量横向压力和温度。上述的温度补偿方案均在降低系统的温度交叉影响方面取得了一定的成效。

本文在前期片状聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)封装的研究基础上,设计了一种类椭圆结构的光纤横向压力传感器并进行了块状封装。同时制作了另一个类椭圆光纤结构,并采用并联的方式来进行系统的温度自补偿。实验结果表明,传感器具有较高的横向压力灵敏度,且自补偿后的温度灵敏度与没有温度补偿时相比显著降低,有效抑制了温度带来的交叉敏感问题,很好地提高了测量系统的准确度。

1 传感器原理

实验设计的类椭圆结构光纤传感器如图1(a)所示,其原理可以通过图1(b)中的回音壁模式(whispering gallery mode, WGM)与纤芯模的干涉来解释。在图1(b)中,半圆型虚线代表散焦(caustic)面,当被束缚在纤芯附近的光传输至弯曲部分的时候,处于散焦面外侧的光将脱离纤芯的束缚而传输至包层-空气界面。因外部折射率小于包层折射率,当入射角大于临界角时会发生全反射,之后再次传输至“包层-

外部介质”边界而被全反射,依次往复,从而在光纤包层的外壁内侧形成一种稳定存在的光传输形式,称之为WGM。当WGM传输至弯曲部分的末端时,将再次耦合入纤芯中并与纤芯模发生干涉。两者干涉后得到的总输出光强可表示为^[16]:

$$I_{\text{out}} = I_c + I_{\text{WGM}} + 2\sqrt{I_c + I_{\text{WGM}}} \cos\varphi, \quad (1)$$

式中, I_c 和 I_{WGM} 分别为纤芯模和 WGM 的光强, φ 为纤芯模和 WGM 的相位差,可表示为^[17]:

$$\varphi = N\left(\frac{2\pi}{\lambda}n_{\text{cl}}2L + \varphi_r - Z\beta\right) = m\pi, \quad (2)$$

式中, N 表示 WGM 在“包层-外部介质”边界总的反射次数, n_{cl} 为包层的折射率, β 是纤芯模的传播常数, m 为正整数, φ_r 代表在包层-空气界面因全反射而产生的相移, Z 和 L 的意义如图1(b)中所示。由于干涉原理可知,当相位差 φ 等于 π 的整数倍时会出现干涉现象,在输出光谱中以波峰或波谷的形式存在,对应的特征波长 λ_c 可从式(2)推导得出^[18]:

$$\lambda_c = \frac{4\pi n_{\text{cl}}L}{Z\beta - \varphi_r + \frac{m\pi}{N}}. \quad (3)$$

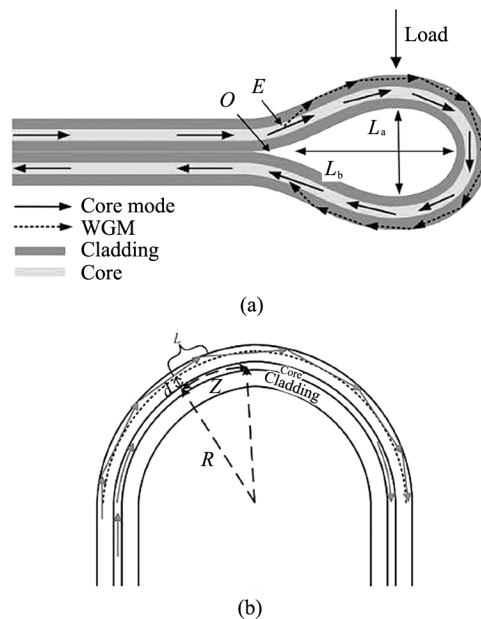


图1 弯曲光纤中形成WGM的光路:

(a) 类椭圆弯曲光纤; (b) U型弯曲光纤^[19]

Fig. 1 Optical path to form WGM in bent fiber:

(a) Elliptical bent fiber; (b) U-shaped bent fiber^[19]

当设计的类椭圆结构受到横向压力作用时,曲线上曲率为零的E点向靠近O点的方向移动,相应的弯曲长度 L_b 变大,由式(3)可知,其输出光谱中的特征波长 λ_c 向长波方向移动,在保证其他外界因素(如温度、折射率等)不变的情况下,可以通过监测特征波长的漂移情况来获取传感器受到横向压力的信

息,进而实现对横向压力的测量。

2 传感器制备

传感器的制备过程如图2所示。首先是图2(a)所示的裸传感器的制作,先将一段单模光纤(single mode fiber, SMF)的两端尾纤从同侧插入长度为5 mm、内径为0.5 mm的玻璃微管中,形成类椭圆光纤结构;再将微管沿着SMF缓慢移动,调整位置使类椭圆结构的弯曲直径 L_a 控制在8 mm,类椭圆光纤结构自身的张力和光纤与微管之间的摩擦力会让其保持稳定;最后在微管中滴入适量的紫外固化胶对微管进行固定。其次是传感器的封装,先将裸传感器置于直径为25 mm、高为8 mm的圆柱形玻璃模具中,注入PDMS胶体并加热1 h进行固化,再将封装的传感器脱模并切下部分PDMS胶体便于传感器稳定放置,过程如图2(b)所示。图2(c)为传感器的实物图。

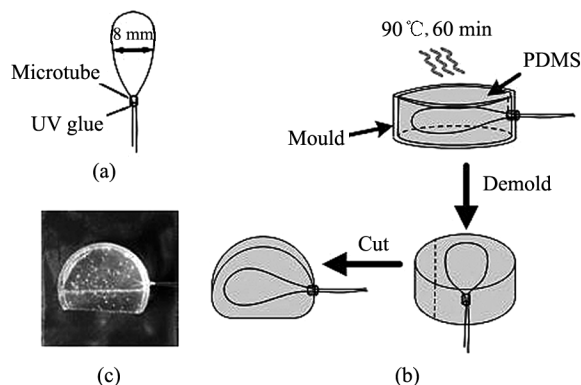


图2 传感器的制备:(a) 类椭圆光纤结构;
(b) 传感器封装过程;(c) 传感器实物图

Fig. 2 Fabrication of the sensor:

(a) The elliptical fiber structure;

(b) Encapsulation process of the sensor;

(c) Physical image of the sensor

3 结果与分析

3.1 横向压力测量

横向压力测量的实验装置如图3所示。中心波长为1550 nm的宽带光源(浩源光电, HY-SLED)发出的光经过3 dB耦合器Couple1后分为两路,一路光进入传感器S1中,另一路光进入传感器S2中(L_a 为8.1 mm),之后两束光通过另一个3 dB耦合器Couple2后产生干涉,干涉光谱由光谱分析仪(YOKOGAWA, AQ6370)实时显示。

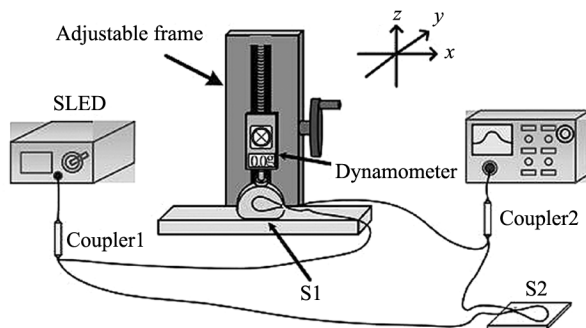


图3 横向压力测量实验装置图

Fig. 3 Diagram of transverse load measurement experimental device

将S1放置在推拉力计平台上(量程为0—10 N),通过可调节支架来改变推拉力计对传感器施加的负载,进而控制S1所受的横向压力大小。实验中施加在传感器上的横向压力由0.25 N逐渐提高到0.5 N,测量步长为0.025 N。输出光谱如图4所示,可以看出,传感器输出光谱的特征波长随横向压力的增大向长波方向移动(红移),与式(3)的理论分析一致。

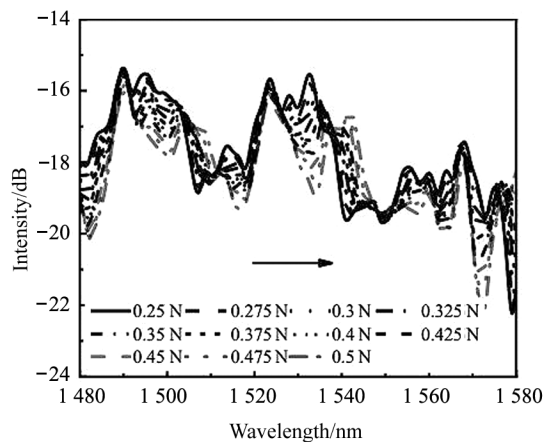


图4 不同横向压力下的传感器输出光谱

Fig. 4 Output spectrum of the sensor under different transverse loads

对横向压力为0.25 N时的输出光谱进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT),结果如图5(a)示,可以观察到有4个主要的特征频率峰。在 0.12 nm^{-1} 处对输出光谱进行低通滤波,仅保留主要的特征频率峰,得到如图5(b)所示的传感器在不同横向压力下的分离输出光谱。

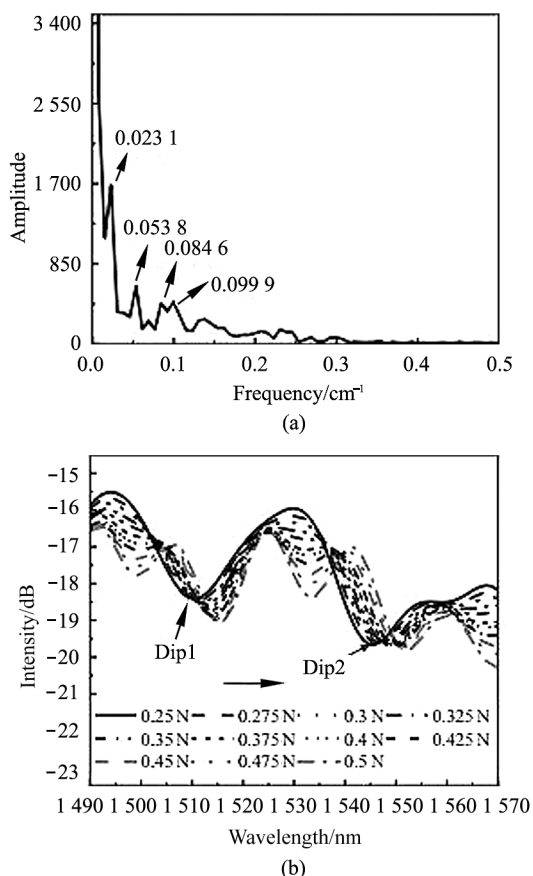


图5 输出光谱的低通滤波:(a) 输出光谱的频谱图;
(b) 不同横向压力下传感器的分离输出光谱

Fig. 5 Low-pass filtering of the output spectrum:

(a) Spectrogram of output spectrum;
(b) Separate output spectrum of the sensor under different transverse loads

选取波长大小分别为 1510.2 nm 和 1545.5 nm 的两个特征波谷 dip1 和 dip2,对它们的波长响应特性进行分析,结果如图6所示,可以看出,特征波谷

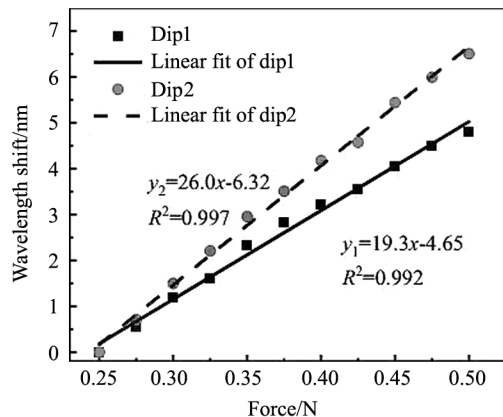


图6 dip1 和 dip2 对横向压力的波长响应

Fig. 6 Wavelength responses of dip1 and dip2 to transverse load

与横向压力呈线性关系,dip1 和 dip2 的横向压力灵敏度分别为 19.4 nm/N 和 26.0 nm/N。

3.2 温度测量

由于传感器采用 PDMS 作为封装材料,其温度的交叉影响不可忽视。实验搭建了如图7所示的温度测量系统,将 S1 放置在温控平台表面,用一个尺寸为 4 cm×4 cm×2.5 cm 的保温箱盖住 S1 来保证其所处空间的温度稳定。

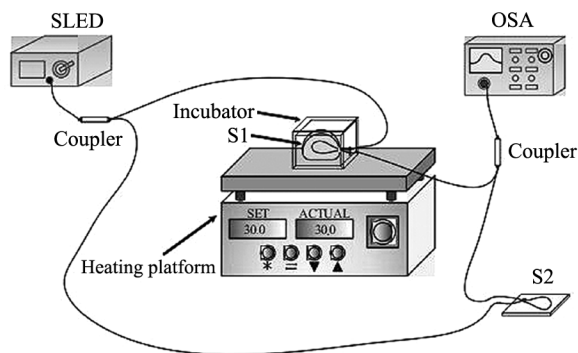


图7 温度测量实验装置图

Fig. 7 Diagram of temperature measurement experimental device

实验首先将 S2 断开,观察没有 S2 时传感器的温度响应。实验中加热平台以 1.5 °C 的步长将温度从 32 °C 升高至 50 °C,传感器在不同温度下的输出光谱如图8(a)所示。可以发现,随着温度的升高,传感器的输出光谱发生显著的蓝移。PDMS 随着温度的升高发生膨胀^[20],使类椭圆结构弯曲长度 L_b 变小,因此输出光谱蓝移,与式(3)的理论分析一致。与横向压力测试中的处理方式相同,对输出光谱进行低通滤波,仅保留主要的特征频率峰,滤波后的分离光谱如图8(b)所示。选择波长为 1552.4 nm 的特征波谷 dip3 进行温度响应分析,结果如图8(c)所示。传感器的温度灵敏度为 -1.27 nm/°C,在实际应用中会带来不可忽略的温度交叉影响,从而影响横向压力测量的准确度。

将 S2 接入,重复上述温度测量实验步骤,结果如图9所示。

选取与横向压力测试中相同波长大小的特征波谷 dip1 和 dip2,对其波长的温度响应特性进行分析,结果如图10所示,dip1 与 dip2 的温度灵敏度基本一致,分别为 -0.41 nm/°C 和 -0.40 nm/°C,与未接入 S2 时的温度灵敏度 -1.27 nm/°C 相比,传感器的温度灵敏度有明显降低,但是温度的影响仍不可忽略,有必要再次进行温度补偿。

3.3 温度自补偿

本文提出的温度自补偿方案拟通过传感器输出光谱的两个特征波长的灵敏度计算来实现。把两个

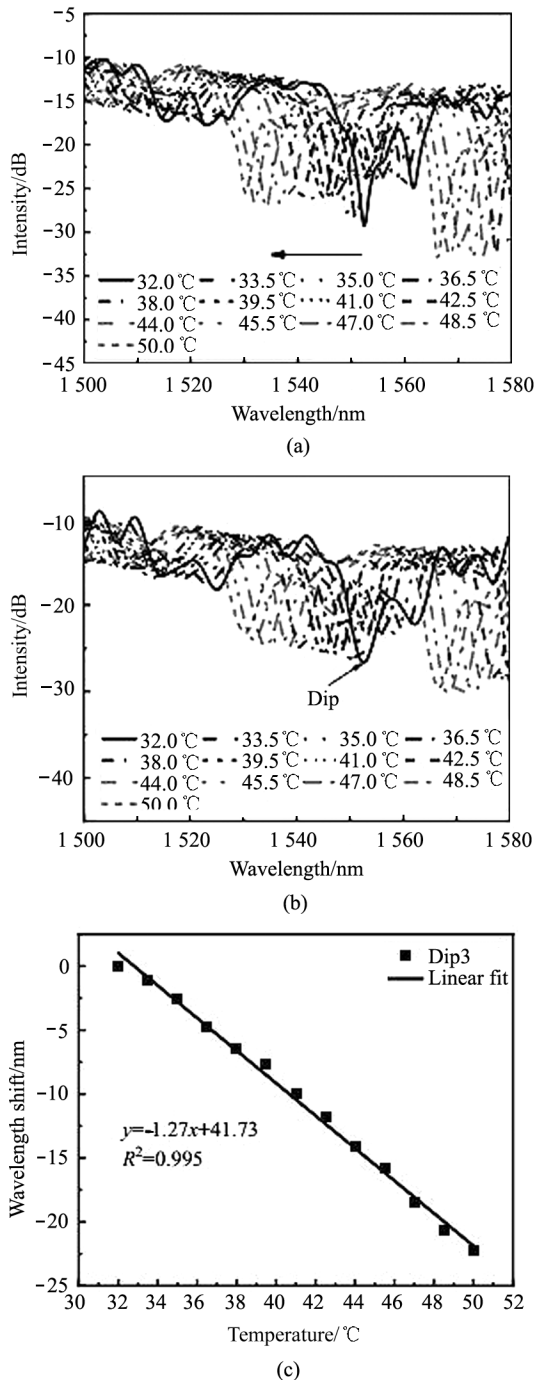


图8 断开 S2 时的温度测量结果:

(a) 不同温度下的输出光谱;
(b) 分离输出光谱; (c) dip3 对温度的波长响应
Fig. 8 Temperature measurement results with S2 disconnected; (a) Output spectrum at different temperatures; (b) Separated output spectrum; (c) Wavelength response of dip3 to temperature

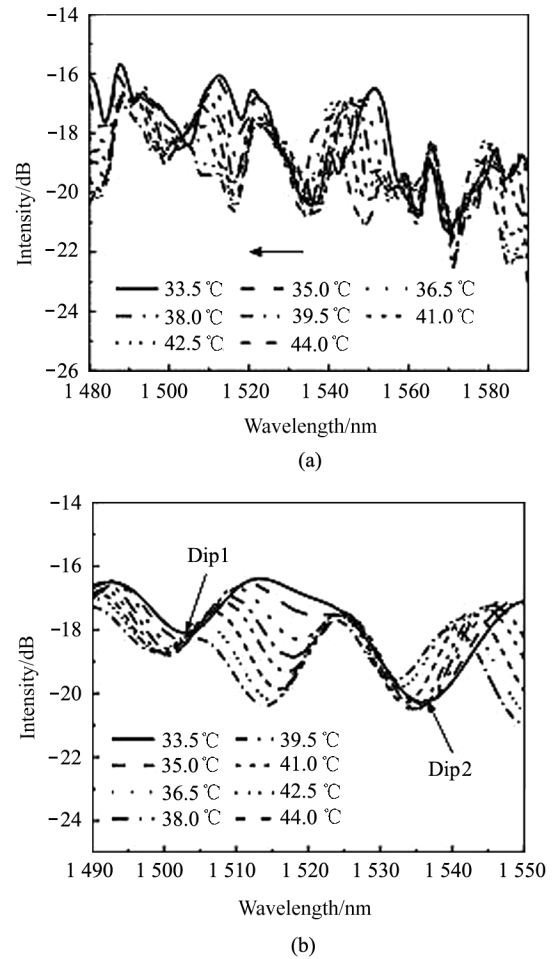


图9 接入 S2 时的温度测量结果:

(a) 不同温度下的输出光谱; (b) 分离输出光谱
Fig. 9 Temperature measurement results with S2 connected; (a) Output spectrum at different temperatures; (b) Separate output spectrum

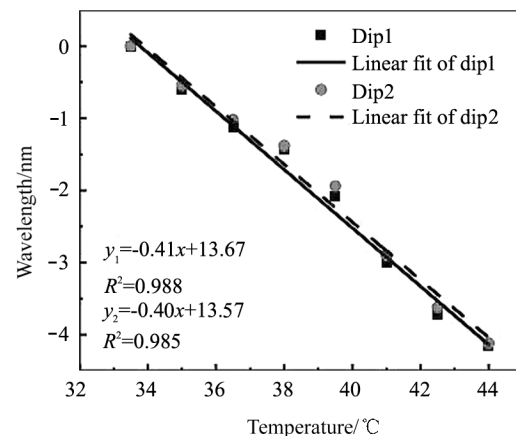


图10 dip1 和 dip2 对温度的波长响应
Fig. 10 Wavelength responses of dip1 and dip2 to temperature

典型的特征波峰 (tip) 或特征波谷 (dip) 分别命名为 λ_1 和 λ_2 , 当作用在传感器上的横向压力和环境温度分别变化 dF 和 dT 时, 输出光谱中的特征波长变化量可表示为^[21]:

$$d\lambda_i = \frac{\partial \lambda_i}{\partial F} dF + \frac{\partial \lambda_i}{\partial T} dT, i = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

式中, $\frac{\partial \lambda_i}{\partial F}$ 和 $\frac{\partial \lambda_i}{\partial T}$ 分别表示传感器的横向压力灵敏度和温度灵敏度, 整理传感器的两个灵敏度可得:

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = (K_{F1} - K_{F2})\Delta F + (K_{T1} - K_{T2})\Delta T, \quad (5)$$

式中, $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别为两个特征波长的漂移量, K_{F1} 和 K_{F2} 分别为两个特征波长的横向压力灵敏度, K_{T1} 和 K_{T2} 分别为两个特征波长的温度灵敏度。

当选择的特征波长使得 K_{F1} 和 K_{F2} 相差值较大, 而 K_{T1} 和 K_{T2} 相差较小, 特别的, 当 K_{T1} 和 K_{T2} 接近时, 可以认为 $K_{T1} - K_{T2} \approx 0$, 此时温度对横向压力测量的影响可以忽略不计, 因此, 波长漂移的差值可以认为是横向压力导致的。

将上述实验中 dip1、dip2 的温度灵敏度和横向压力灵敏度代入式(5)可得:

$$\Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1 = 6.6 \times \Delta F + 0.01 \times \Delta T. \quad (6)$$

可以看出, 温度补偿后传感器的温度灵敏度仅为 $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 与没有温度补偿时相比降低了 99.2%, 传感器的横向压力灵敏度为 $6.6 \text{ nm}/\text{N}$, 温度交叉灵敏度仅有 $0.0015 \text{ N}/^\circ\text{C}$ 。传感器的温度补

偿误差可表示为:

$$E_T = \Delta\lambda_2 - \frac{K_{T2}}{K_{T1}}\Delta\lambda_1. \quad (7)$$

根据式(7)进行传感器的温度补偿误差分析, 结果如图 11 所示, 传感器的温度补偿误差不超过 0.089 nm , 有效地控制了温度带来的交叉敏感问题。

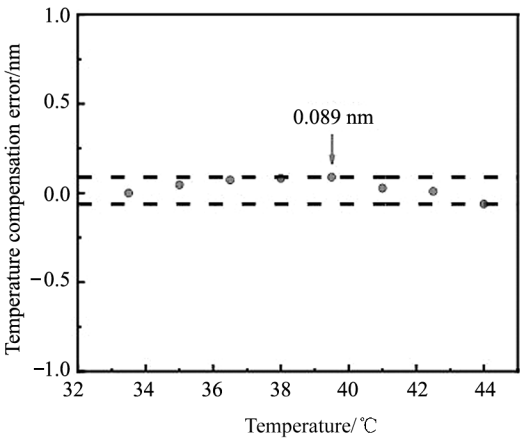


图 11 传感器的温度补偿误差

Fig. 11 Temperature compensation error of the sensor

表 1 将实验结果与现有文献进行了比较, 可以看出, 虽然温度补偿后传感器的灵敏度有所下降, 但相比其他文献, 该传感器仍具有很高的横向压力灵敏度。同时该传感器还具有较低的温度交叉灵敏度, 非常适用于横向压力的高精度测量。

表 1 具有温度补偿的光纤横向压力传感器性能比较

Tab. 1 Performance comparison of optical fiber transverse load sensors with temperature compensation				
Sensor structure	Transverse load sensitivity/(nm/N)	Transverse load range/N	Temperature intercross sensitivity/(N/°C)	Ref.
Paralleled FPI	-3.75	0.00—0.98	0.000 9	[5]
F-P/M-Z hybrid interferometer	1.53	0.00—2.45	-0.009 0	[10]
Fiber-tip micro-cavity	1.37	0.00—5.00	0.001 5	[22]
Air bubble cavity FPI	1.31	0.00—3.63	0.000 8	[23]
Elliptical fiber	6.60	0.25—0.50	0.0015	This work

4 结 论

本文提出了一种具有温度自补偿的类椭圆结构光纤传感器, 并对其横向压力和温度传感性能进行了测试。通过将 SMF 弯曲成类椭圆结构并用 PDMS 封装获得横向压力传感器, 同时并联另一个类椭圆光纤结构来实现温度自补偿。在横向压力性能测试中, 该传感器表现出了高达 $26.0 \text{ nm}/\text{N}$ 的横向压力灵敏度, 但此时温度的交叉影响不可忽略。

温度补偿后的传感器仍具有 $6.6 \text{ nm}/\text{N}$ 的高横向压力灵敏度, 此时温度灵敏度仅为 $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 相比于没有温度补偿时降低了 99.2%, 温度交叉灵敏度仅为 $0.0015 \text{ N}/^\circ\text{C}$ 。该传感器具有成本低、灵敏度高、结构简单、受温度影响低等诸多优点。

参考文献:

[1] WACHTARCZYK K, GSIOR P, KALETA J, et al. In-plane strain measurement in composite structures with fiber

- Bragg grating written in side-hole elliptical core optical fiber[J]. *Materials*, 2022, 15(1): 77.
- [2] ABUSHAGUR A A G, ARSAD N, ELGAUD M M, et al. Evaluation of a novel spectral pair of a chirp FBG embedded in a cantilever beam for simultaneous temperature and transverse forces measurement[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 107701-107709.
- [3] PENG H, XU X L, WU S Y. A novel fiber Bragg grating sensor for weak pressure measurement based on the Stokes parameter[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2020, 31(10): 1018-1024.
彭晖, 徐小来, 邬书跃. 基于斯托克斯参量的光纤光栅微压力传感方法研究[J]. *光电子·激光*, 2020, 31(10): 1018-1024.
- [4] WU Y F, ZHANG Y D, WU J, et al. Simultaneous measurement of transverse load and temperature using hybrid structured fiber-optic Fabry-Perot interferometer[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 10736.
- [5] WU Y F, LIU B, WU J, et al. A transverse load sensor with ultra-sensitivity employing Vernier-effect improved parallel-structured fiber-optic Fabry-Perot interferometer[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 120297-120303.
- [6] WU Y F, ZHANG Y D, WU J, et al. Temperature-insensitive fiber optic Fabry-Perot interferometer based on special air cavity for transverse load and strain measurements[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9443-9448.
- [7] ZHU F X, ZHANG Y D, QU Y C, et al. Fiber-optic hybrid structure sensor for simultaneous measurement of transverse load and temperature[J]. *Optik*, 2019, 208: 164078.
- [8] ZHAO L L, LIU B, SUN T T, et al. Photonic crystal all-fiber interferometer for temperature and transverse load sensing based on phase demodulation[J]. *Optik*, 2016, 216: 164754.
- [9] WU Y F, LIU B, NAN T, et al. Fiber optic hybrid structure based on an air bubble and thin taper for measurement of refractive index, temperature, and transverse load[J]. *Optik*, 2021, 241: 166962.
- [10] WANG J, LIU B, WU Y F, et al. Temperature insensitive fiber Fabry-Perot/Mach-Zehnder hybrid interferometer based on photonic crystal fiber for transverse load and refractive index measurement[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 56: 102163.
- [11] LI Y C, SONG Z, WEI J P, et al. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of transverse loading and temperature based on multi-core fiber[J]. *Optics and Laser Technology*, 2021, 143: 107354.
- [12] GOEL C, ZANG J, MATYAS P, et al. Temperature-insensitive mechanical sensor using multi-modal behavior of antiresonant hollow-core fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39: 3998-4005.
- [13] ZHANG X L, ZHOU X L, WANG S, et al. High-sensitivity fiber-optic Fabry-Perot transverse load sensor based on bubble microcavity[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2022, 335: 113375.
- [14] WANG T T, MAO Y Y, LIU B, et al. Compact fiber optic sensor for temperature and transverse load measurement based on the parallel vernier effect[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(5): 6853408.
- [15] TORRES-GOMEZ I, MARTINEZ-RIOS A, ANZUETO-SANCHEZ G, et al. Transverse load and temperature sensing using multiplexed long-period fiber gratings[J]. *Photonics*, 2021, 8(1): 1.
- [16] AL-JANABI D I, SALMAN A M, AL-JANABI A. High sensitivity balloon-like thermometric sensor based on bent single mode fiber[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(11): 115106.
- [17] NAM S H, YIN S Z, REICHARD K M, et al. Fiber optic high temperature sensing based on whispering gallery mode resonance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5911: 59110W. 1-59110W. 10.
- [18] MERZA H Q, AL-HAYALI S K, AL-JANABI A H. All-fiber Mach-Zehnder interferometric comb filter based on macrobend single-mode optical fiber for selecting lasing performance in 1-micron region[J]. *Optics Communications*, 2021, 493: 127017.
- [19] HARRIS A J, CASTLE P F. Bend loss measurements on high numerical aperture single-mode fibers as a function of wavelength and bend radius[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(1): 34-40.
- [20] YANG R, YU Y S, ZHU C C, et al. PDMS-coated S-tapered fiber for highly sensitive measurements of transverse load and temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(6): 3429-3435.
- [21] CHI H, TAO X M, YANG D X, et al. Simultaneous measurement of axial strain, temperature, and transverse load by a superstructure fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(24): 1949-1951.
- [22] MA J, JU J, JIN L, et al. Fiber-tip micro-cavity for temperature and transverse load sensing[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12418-12426.
- [23] WU Y F, ZHANG Y D, WU J, et al. Temperature-insensitive fiber optic Fabry-Perot interferometer based on special air cavity for transverse load and strain measurements[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9443-9448.

作者简介:

康 娟 (1977—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事光纤传感方面的研究。