

DOI:10.16136/j.joel.2022.10.0781

PDMS 封装的液滴型光纤平面应变传感器

申屠卓成¹, 康娟^{1*}, 刘睿洋¹, 王琛¹, 赵春柳¹, 王懿伟²

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018; 2. 杭州美迪凯光电科技股份有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘要:提出了一种聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 封装的液滴型光纤平面应变传感器, 用于监控薄片型工件的形变情况。该传感器由一段标准单模光纤 (single mode fiber, SMF) 弯曲形成的回音壁组成, 其形状类似液滴, 并被封装在由 PDMS 制作的方形模具中。实验通过监测传感器输出光谱波长的变化情况来获取待测工件所受的外界应变的大小及方向。实验结果表明: 当传感器受到沿液滴型结构短轴方向的应变时, 输出光谱蓝移, 应变灵敏度为 $-0.108 \text{ nm}/\mu\epsilon$; 当传感器受到沿液滴型结构长轴方向的应变时, 输出光谱红移, 应变灵敏度为 $0.084 \text{ nm}/\mu\epsilon$; 实验还研究了受力方向与短轴成 45° 夹角时的情况, 为应变的方向判断提供了参考; 该传感器对温度的响应灵敏度为 $-1.557 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。所提出的光纤平面应变传感器, 不仅可以检测应变的大小, 而且可以通过应变灵敏度来识别应变的方向, 达到平面应变测量的目的, 在诸如镀膜、弯曲等领域具有很好的应用前景。

关键词:平面应变传感器; 液滴型光纤结构; 回音壁模式 (WGM); 聚二甲基硅氧烷 (PDMS)

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)10-1018-06

Optical fiber plane strain sensor with droplet-like structure encapsulated by PDMS

SHENTU Zhuocheng¹, KANG Juan^{1*}, LIU Ruiyang¹, WANG Chen¹, ZHAO Chunliu¹, WANG Yiwei²

(1. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

2. Hangzhou Medikai Optoelectronics Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: An optical fiber plane strain sensor with droplet-like structure encapsulated by polydimethylsiloxane (PDMS) was proposed to monitor the deformation of thin slice workpiece. The sensor was formed by bending a piece of standard single mode fiber (SMF) to form a whispering wall structure, shaped like a droplet, and was encapsulated in a square mold made of PDMS. The magnitude and direction of the external strain on the workpiece were obtained by monitoring the change of the output spectrum wavelength of the sensor in the experiment. Experimental results showed that when the sensor was strained along the small axis of the droplet-like structure, the output spectrum was blue-shifted with the sensitivity of $-0.108 \text{ nm}/\mu\epsilon$. While the output spectrum was red-shifted when the sensor was strained along the large axis with the sensitivity of $0.084 \text{ nm}/\mu\epsilon$. The experiment also studied the condition when the force direction was 45° with the short axis, which provided a reference for judging the strain direction, and temperature sensitivity of the sensor was $-1.557 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. Therefore, the proposed optical fiber plane strain sensor could not only detect the magnitude of strain, but also distinguish the directions of strain through strain sensitivities, so as to achieve the purpose of plane strain measurement. The sensor will have a good application prospect in such fields as coating, bending and so on.

Key words: plane strain sensor; droplet-like fiber structure; whispering gallery mode (WGM); polydimethylsiloxane (PDMS)

* E-mail: kanggroup_cjlu@qq.com

收稿日期: 2021-11-19 修订日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61775202) 和广东省信息光子技术重点实验室开放课题基金 (广东工业大学, GKPT20-04) 资助项目

1 引言

应变是评价工程设备和土木工程健康的重要参数。在过去的几十年中,针对不同的工程应用需求开发了一系列应变传感器。传统的应变测量通常通过监控应力引起的电阻或电容的电气变化来获得,但在环境比较恶劣的情况下,电子应变传感器容易受到外界诸如电磁、酸碱腐蚀等的干扰,最终影响应变测量结果,光纤应变传感器的出现为解决上述问题提供了可能。光纤应变传感器的抗电磁干扰、灵敏度高、耐腐蚀、响应速度快等优点,使其在应变测量领域受到了广泛的关注和研究。目前,常见的光纤应变传感器由多种光纤微结构构成,如光纤法布里-珀罗干涉结构(Fabry-Perot interferometer, FPI)^[1-3]、马赫-曾德干涉结构(Mach-Zehnder interferometer, MZI)^[4,5]、光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)^[6]、聚合物光纤布拉格光栅(polymer optical fiber Bragg gratings, POFBG)^[7,8]、简易锥形光纤^[9,10]、具有内部空气孔的锥形光纤^[11,12]和刻写过波导的光纤^[13,14]等。上述的光纤应变传感器通常用于轴向的应变测量,对于目前薄片工件中的平面应变测量需求则无法满足。

将单模光纤(single mode fiber, SMF)制成液滴型光纤结构为平面应变的有效测量提供了可行的方法。当液滴型光纤结构受到不同方向的应变时,光纤包层中的回音壁模式(whispering gallery mode, WGM)的光程会发生变化,导致其与核心模式耦合形成的干涉谱漂移,通过输出光谱的变化获得测量平面应变的能力。MATHEW 等^[15]和 WU 等^[16]将光纤弯曲成 U 形,分别用于湿度和应变测量。CHEN 等^[17]、DU 等^[18]和 AL-HAYALI 等^[19]在不进行任何熔接的情况下将一段 SMF 弯曲成液滴型光纤结构,该结构可实现对外界物理参数变化引起的折射率和湿度变化的测量。

本文提出了一种聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)封装的液滴型光纤平面应变传感器,利用回音壁效应实现对平面应变的大小及其方向的测量。液滴型光纤结构通过弯曲标准 SMF 并由微管打结形成。封装材料由 PDMS 和固化剂以 10:1 的比例混合固化而成。实验对该传感器进行了 0°、45°、90°3 个方向的平面应变测试,结果表明该传感器在不同方向的应变灵敏度不同,通过该特征可以识别应变方向。本文提出的应变传感器具有制作简单、成本低、灵敏度高、可获得应变方向等优势。

2 传感器的原理

液滴型光纤应变传感器的基本工作原理如图 1 所示。当光从入射光纤传播到液滴型光纤结构时,部分光将脱离纤芯的约束而穿透到包层中,当外部折射率小于包层的折射率且光纤的弯曲半径合适,则“包层-外部介质”边界处会产生全反射形成 WGM, WGM 的部分光重新耦合回纤芯,与其中的核心模式相遇而出现干涉现象。输出的干涉光强度式为^[20]:

$$I_{\text{out}} = I_c + I_{\text{WGM}} + 2\sqrt{I_c + I_{\text{WGM}}} \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi), \quad (1)$$

式中, I_c 和 I_{WGM} 分别是纤芯和 WGM 的强度, φ_0 为初始相位, $\Delta\varphi$ 为核心模式与 WGM 的相位差, 可表示为:

$$\Delta\varphi = N \left[\frac{2\pi}{\lambda} (n_{\text{cl}} 2L - n_{\text{eff},c} Z) + \varphi_r - \frac{\pi}{2} \right] = (2m+1)\pi, \quad (2)$$

式中, $N = 2\pi/2\varphi$, n_{cl} 是包层的折射率, $n_{\text{eff},c}$ 是纤芯的有效射率, $\varphi_r = -2\arctan\{[n_{\text{cl}}^2 - n_{\text{air}}^2]^{1/2}/n_{\text{cl}}\tan\theta\}$ 是包层-空气界面因全反射而产生的相移, m 为等于 0, 1, 2... 的一个正整数, L 是包层中的光路长度, Z 是纤芯的弧长。干涉光共振峰波长 λ_m 出现在:

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}} L_{\text{eff}}}{2m+1}, \quad (3)$$

式中, L_{eff} 是有效弯曲长度, $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff},c} - n_{\text{eff},\text{cl}}$, 其中 $n_{\text{eff},\text{cl}}$ 表示包层的有效折射率。

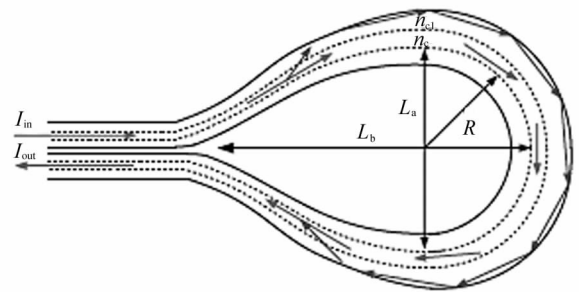


图 1 传感器光路图

Fig. 1 Optical path of the sensor

3 传感器的制作

图 2 所示为传感器的制作过程,其中图 2(a)所示为液滴型光纤结构的制备过程。首先将一段 SMF 的两端从同侧插入长度为 5 mm、内径为 0.5 mm 的玻璃微管中,形成液滴型光纤结构;其次将微管沿着 SMF 缓慢移动,并调整其位置,将液滴型光纤结构的

直径控制在 6 mm(L_a 的长度),液滴型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。

图 2(b)所示为 PDMS 封装液滴型光纤结构的过程。第 1 步,将聚二甲基硅氧烷与固化剂按 10:1 的比例混合,制备 PDMS 前体;第 2 步,在真空箱中对均匀搅拌的 PDMS 前体进行脱气;第 3 步,将液滴型光纤结构放入一个边长为 18 mm 的方形玻璃模具中,并倒入脱气后的 PDMS 前体直至填充;第 4 步,将液滴型光纤平面应变传感器固化后,再小心地从模具中取出,完成传感器制作。

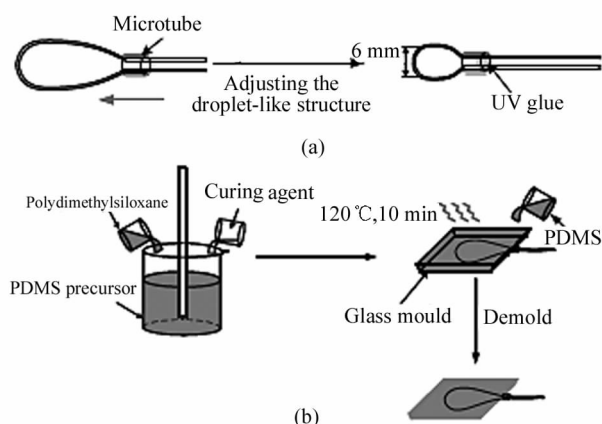


图 2 传感器制作过程:(a) 液滴型光纤结构制作过程;
(b) 封装过程

Fig. 2 Manufacturing steps of the sensor:

(a) Fabrication process of droplet-like fiber structure;

(b) Encapsulation process

4 结果与讨论

实验装置如图 3(a)所示,应变传感器由位移平台(红星杨科技,OMYE62A)上的夹具固定,通过手动调节位移平台来获得拉伸应变。传感器的一端连接到 SLED(superluminescent light emitting diode)宽带光源(浩源光电, HY-SLED),另一端连接到光谱仪(YOKOGAWA, AQ6370),通过观察光谱仪中输出光谱的变化来跟踪应变的变化情况。图 3(b)为传感器在 26 °C 室温下自由状态时的输出光谱,可以观察到明显的 WGM 引起的干涉现象。为了分析传感器对应变大小及方向的感知特征,后续的实验采用在一个平面上的 0°、45°和 90°3 个方向施加拉力,并观察液滴型光纤平面应变传感器的输出光谱情况。

如图 4 所示,在 0°方向施加应变来观察传感器

的应变响应情况。调节位移平台获得 0—33.33 $\mu\epsilon$ 范围的微应变,获得如图 4(a)所示的传感器输出光谱变化情况。可以发现,随着应变的增加,液滴型光纤平面应变传感器的输出光谱向短波方向发生显著的漂移(即蓝移)。究其原因,是由于液滴型光纤结构类似于椭圆,具有短轴 L_a 和长轴 L_b ,当拉伸方向为 0°时,传感器的长短轴之比 $\sigma(\sigma=L_a/L_b)$ 变大,带来光纤结构的有效长度 L_{eff} 变小,最终导致输出光谱的蓝移。共振峰随应变变化的漂移情况如图 4(b)所示,应变灵敏度为 $-0.108 \text{ nm}/\mu\epsilon$, $R^2=0.996$,应变和光谱的漂移表现出良好的线性关系。

相对地测量了在 90°方向的传感器应变响应。图 5(a)所示为输出光谱随应变变化的漂移情况。可以发现,随着应变的增加,传感器的长短轴之比 σ 减小,因而带来光纤结构的有效长度 L_{eff} 变大,输出光谱的共振峰向长波方向有显著的漂移(即红移)。对波长与应变进行线性拟合,得到平面应变与波长漂移的关系如图 5(b)所示,应变灵敏度为 $0.084 \text{ nm}/\mu\epsilon$, $R^2=0.993$ 。

为了更全面地研究传感器对不同方向应变的响

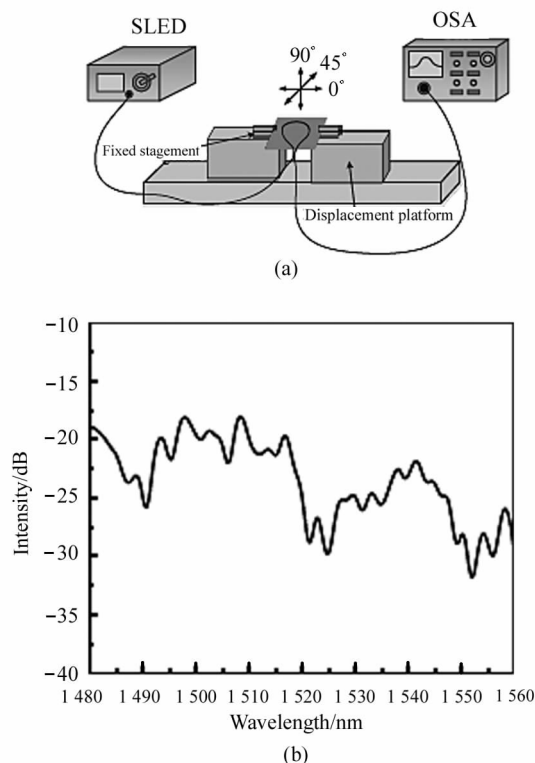


图 3 实验装置及输出光谱:(a) 平面应变实验装置;

(b) 原始输出光谱

Fig. 3 Experimental setup and output spectrum:

(a) Experimental setup of plane strain tests;

(b) Original output spectrum

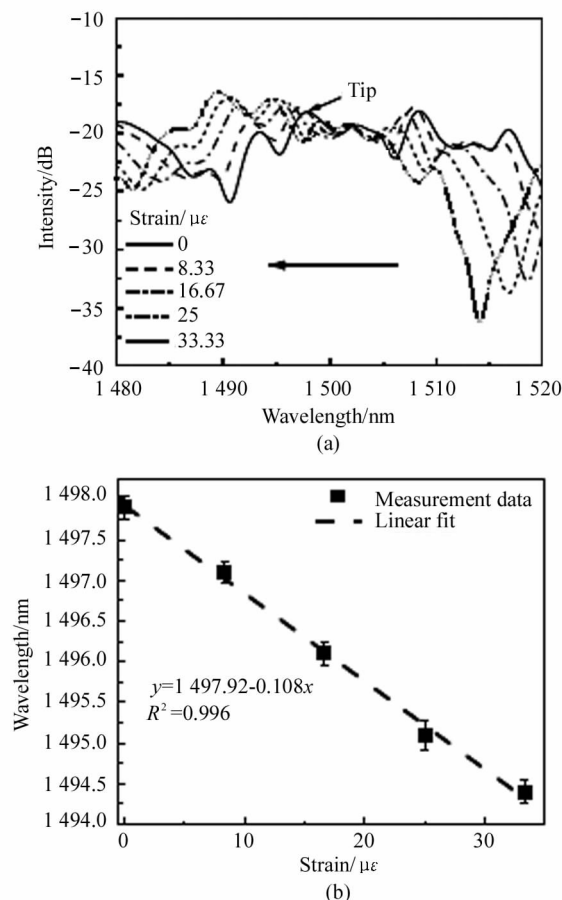


图4 0°方向:(a) 应变响应光谱;

(b) 波长与应变的线性拟合图

Fig. 4 Direction of 0°: (a) Spectrum of strain response;

(b) Linear fitting of wavelength and strain

应,在不改变其他任何条件的情况下进行了45°方向应变响应的实验。波长随应变的变化情况如图6所示,可以看出,随着应变的增加,输出光谱的共振峰漂移情况与90°方向时类似,但相比于90°方向,45°方向的应变灵敏度为0.061 nm/με,降低了27.4%。从几何关系可知,光纤结构在受到45°方向的拉力时,其 σ 的值虽然也在增大,但 σ 的变化速率比90°方向时的变化速率慢,因而对应变的敏感性下降,最终表现为传感器应变灵敏度的降低。

为了详细分析传感器应变灵敏度与长短轴之比 σ 之间的对应关系,把传感器3个方向上的应变响应情况列于表1中。可以看出,应变方向在[0°,45°)范围内, σ 值均增大,输出光谱蓝移,应变灵敏度越大,应变方向越接近0°;应变方向在[45°,90°]范围内, σ 值均减小,输出光谱红移,应变灵敏度越大,越接近90°。因此,可以通过传感器的应变灵敏度大小来判别平面应变方向。

考虑到温度对传感器的交叉影响,对传感器的温度特性进行了分析。将处于自由状态下的传感器放入恒温箱(精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)中,温度由35℃逐渐提高到50℃,每步提高2℃并保持10 min,实验结果如图7所示。可以看出,传感器输出光谱共振峰

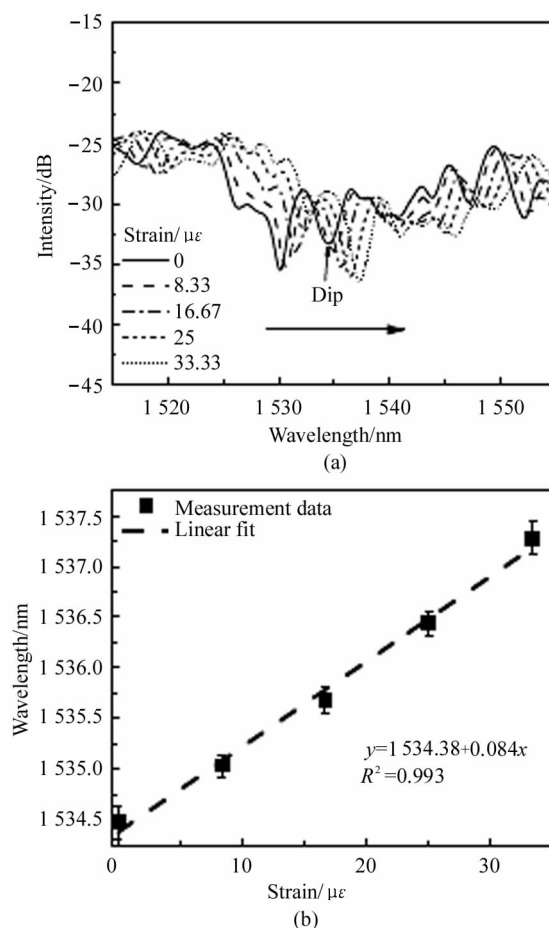
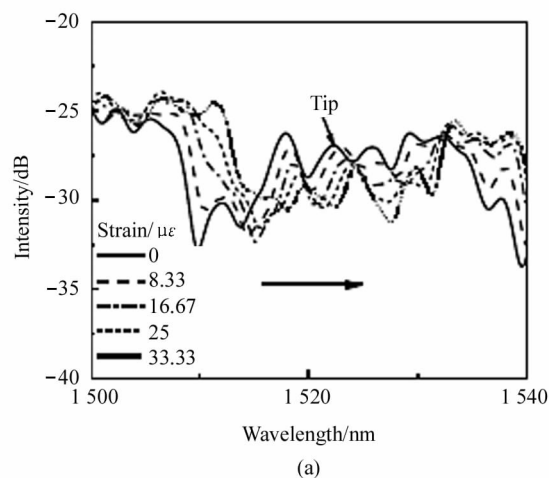


图5 90°方向:(a) 应变响应光谱;

(b) 波长与应变的线性拟合图

Fig. 5 Direction of 90°: (a) Spectrum of strain response;

(b) Linear fitting of wavelength and strain



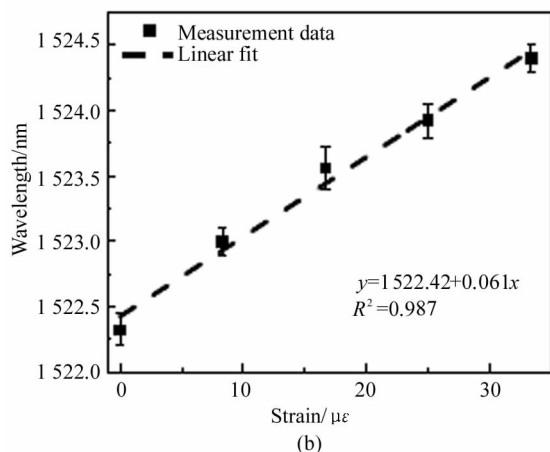


图6 45°方向:(a) 应变响应光谱;
(b) 波长与应变的线性拟合图

Fig. 6 Direction of 45°: (a) Spectrum of strain response;
(b) Linear fitting of wavelength and strain

表1 传感器响应情况

Tab. 1 Response of the sensor

Stretch angle/(°)	Strain sensitivity/ (nm/με)	σ
0	-0.108	Increase
45	0.061	Decrease slowly
90	0.084	Decrease

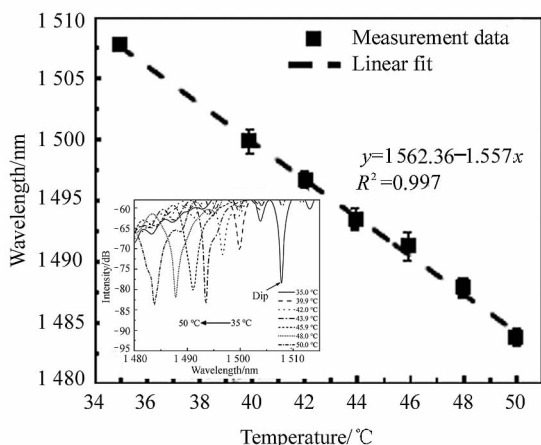


图7 波长随温度变化而漂移。插图显示了液滴型
光纤平面应变传感器在不同温度下的输出光谱

Fig. 7 Wavelength shift with the temperature variation.

Inset shows the output spectra of droplet-like
fiber plane strain sensor at different temperatures

随温度的上升而向短波方向移动,温度灵敏度为 $-1.557 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, $R^2=0.997$ 。在升温过程中,传感器的弯曲半径 R 随PDMS胶体的膨胀而变大,由参考

文献[21]可知,当弯曲半径增大时,波长出现蓝移现象。因此应变测量过程中温度的交叉影响不可忽视,应尽量保持环境温度的稳定性。

5 结论

本文提出了一种PDMS封装的液滴型光纤平面应变传感器。实验结果表明,当应变范围为 $0-33.33 \mu\epsilon$ 时,传感器在 0° 、 45° 和 90° 方向上的应变灵敏度分别为 $-0.108 \text{ nm}/\mu\epsilon$ 、 $0.061 \text{ nm}/\mu\epsilon$ 和 $0.084 \text{ nm}/\mu\epsilon$,通过应变灵敏度的不同可以有效获取平面上的应变大小和方向。由于液滴型光纤结构的温度灵敏度为 $-1.557 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,因此该传感器亦可以应用于温度的测量。本文提出的液滴型光纤平面应变传感器具有成本低、结构简单灵活、易于制作等优点,为诸如镀膜翘曲、电路板印刷形变等工程领域对平面应变测量的需求提供了参考。

参考文献:

- [1] LV Z, WANG S, JIANG J, et al. Long-sensing-length strain sensor based on optical fiber Fabry-Perot interferometer with HCF-SMF structure [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 6803408.
- [2] LI Y, DONG B, CHEN E, et al. Heart-rate monitoring with an ethyl alpha-cyanoacrylate based fiber Fabry-Perot sensor [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(4): 5600206.
- [3] LIU Y, YU C. Highly stretchable hybrid silica/polymer optical fiber sensors for large-strain and high-temperature application [J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20107-20116.
- [4] ZHAO L, ZHANG Y, CHEN Y, et al. A fiber strain sensor with high resolution and large measurement scale [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(6): 2991-2996.
- [5] ROLDAN-VARONA P, PALLARRES-ALDEITURRIAGA D, RODRIGUEZ-C L, et al. All-in-fiber multiscan Mach-Zehnder interferometer assisted by core FBG for simultaneous multi-parameter sensing [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106459.
- [6] TANG Z, LOU S, WANG X, et al. Using mode coupling mechanism in symmetrical triple-core photonic crystal fiber for high performance strain sensing [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(4): 4500707.
- [7] PEREIRA L, MIN R, PAIXAO T, et al. Compact dual-strain sensitivity polymer optical fiber grating for multi-parameter sensing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39

- (7);2230-2240.
- [8] ZUBEL M G, FASANO A, WOYESSA G T, et al. Bragg gratings inscribed in solid-core microstructured single-mode polymer optical fiber drawn from a 3D-printed polycarbonate preform[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(21):12744-12757.
 - [9] ZHANG C, NING T, ZHENG J, et al. An optical fiber strain sensor by using of taper based TCF structure [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 120:105687.
 - [10] ZHANG C, NING T, LI J, et al. Refractive index and strain sensor based on twin-core fiber with a novel T-shaped taper[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 102:12-16.
 - [11] CHEN Y, LUO J, LIU S, et al. A Fabry-Perot interferometer with asymmetrical tapered-fiber for improving strain sensitivity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(5):1509-1514.
 - [12] ZHAO Y, CHEN M, PENG Y. Tapered hollow-core fiber air-microbubble Fabry-Perot interferometer for high sensitivity strain measurement[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2018, 5(21):1800886.
 - [13] DENG J, WANG D N. Ultra-sensitive strain sensor based on femtosecond laser inscribed in-fiber reflection mirrors and vernier effect[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(19):4935-4939.
 - [14] CHEN Q, WANG D N, FENG G, et al. Optical fiber surface waveguide with Fabry-Perot cavity for sensing[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(22):6186-6189.
 - [15] MATHEW J, SEMENOVA Y, FARRELL G. A fiber bend based humidity sensor with a wide linear range and fast measurement speed[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 174:47-51.
 - [16] WU C W, CHEN C T, CHIANG C C. A novel U-shaped, packaged, and microchanneled optical fiber strain sensor based on macro-bending induced whispering gallery mode[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 288:86-91.
 - [17] CHEN Y, HAN Q, LIU T, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a cascaded FBG/droplet-like fiber structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(11):6432-6436.
 - [18] DU Y, HAN Q, HU H, et al. High-sensitivity refractive index and temperature sensor based on cascading FBGs and droplet-like fiber interferometer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 299:111631.
 - [19] AL-HAYALI S K, SALMAN A M, AL-JANABI A H. Effect of hygroscopic polymer-coatings on the performance of relative humidity sensor based on macro-bend single-mode fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 62:102460.
 - [20] LIU T, CHEN Y, HAN Q, et al. Sensor based on macrobent fiber Bragg grating structure for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(4):791-795.
 - [21] RENNER H. Bending losses of coated single-mode fibers: a simple approach[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, 10(5):544-551.
- 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。