

基于薄芯-三芯细锥-薄芯光纤结构的应变传感器

徐施施¹, 冯文林^{1,2*}

¹重庆理工大学理学院物理与能源系, 重庆 400054;

²绿色能源材料技术与系统重庆市重点实验室, 重庆 400054

摘要 提出一种新的弱耦合三芯锥形光纤结构的应变传感器,该结构两端由薄芯光纤、中间由熔融拉锥三芯光纤构成,形成薄芯-三芯细锥-薄芯的三明治结构。实验研究了三芯长度和锥腰直径长度对传感器的应变与温度特性影响。结果表明:在0~1600 $\mu\epsilon$ 应变范围内,传感器的干涉光谱随应变增大发生蓝移,当三芯光纤长度为7.4 cm,锥腰直径长度为41.20 μm 时,其最大应变灵敏度为-3.47 $\text{pm}/\mu\epsilon$,线性拟合度为0.9876;同时对温度传感特性进行探究,在25~60 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,传感器温度灵敏度为34.52 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$,线性拟合度0.9979。交叉敏感度为9.95 $\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ 。该应变传感器具有成本低廉、结构简单、测量范围较大的优点,在工业生产、建筑监测等领域有潜在的应用价值。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 三芯光纤; 细锥; 应变测量

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1806002

Strain Sensor Based on Thin Core-Tapered Three Cores-Thin Core Fiber Structure

Xu Shishi¹, Feng Wenlin^{1,2*}

¹Department of Physics and Energy, College of Science, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

²Chongqing Key Laboratory of Green Energy Materials Technology and Systems, Chongqing 400054, China

Abstract A novel strain sensor based on a weakly coupled fiber structure with three tapered cores is proposed. This structure comprises two thin-core fibers and a tapered three-core fiber, in which the tapered three-core fiber is sandwiched between two thin-core fibers. The strain and temperature characteristics of the sensor were studied using various lengths of the tapered three-core fiber. The results show that the interference spectrum of the sensor is blue-shifted with increasing strain in the range of 0–1600 $\mu\epsilon$. With a three-core fiber length of 7.4 cm and a cone diameter of 41.20 μm , the maximum strain sensitivity is $-3.47 \text{ pm}/\mu\epsilon$, and the linearity is 0.9876. At the same time, we also investigated the temperature sensing characteristics. In the temperature range of 25–60 $^{\circ}\text{C}$, the temperature sensitivity of the sensor is 34.52 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$, and the linearity is 0.9979. The cross-sensitivity is 9.95 $\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$. The proposed sensor has the advantages of low cost, simple structure, and wide measurement range, and has potential applications in fields such as industrial production and construction monitoring.

Key words fiber optics; fiber sensing; three-core fiber; taper; strain measurement

OCIS codes 060.2370; 060.2310; 060.2300

1 引 言

光纤应变传感器相比于传统电学传感器具有抗电磁干扰能力强、耐腐蚀性好、体积小、质量小等优点^[1],在结构健康检测^[2]、航空航天工业^[3]、土木工程等领域应用广泛^[4]。目前光纤应变传感器种类众

多,有法布里-珀罗光纤应变传感器^[5]、长周期光纤光栅应变传感器^[6]、短周期光纤光栅应变传感器^[7]、光子晶体光纤应变传感器^[8]、塑料光纤应变传感器^[9]和多芯光纤应变传感器。如黄炳森等^[10]提出了一种内置于光纤 Sagnac 干涉环中的高灵敏度光纤法布里-珀罗干涉应变传感器,测量范围为0~

收稿日期: 2020-04-22; 修回日期: 2020-05-19; 录用日期: 2020-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(51574054)、重庆市教委重大科技项目(KJZD-M201901102)、重庆市科技创新领军人才项目(CSTCCXLJRC201905)、重庆市巴南区科技项目(2019TJ08, 2018TJ12)

* E-mail: wenlinfeng@126.com

1000 $\mu\epsilon$, 灵敏度达 65.1 $\text{pm}/\mu\epsilon$, 虽然应变灵敏度高, 但 Sagnac 干涉环用到的保偏光纤价格昂贵。段德稳等^[11]提出空芯光子晶体光纤的法布里-珀罗干涉应变传感器, 测量范围为 0~1200 $\mu\epsilon$, 该传感器虽然对温度不敏感, 但干涉条纹对比度低, 为提高干涉条纹对比度还需在光纤上镀 Ti_2O_3 膜, 制作工艺复杂。Dong 等^[12]提出了一种光子晶体光纤应变传感器, 测量范围为 0~5000 $\mu\epsilon$, 应变灵敏度为 -2.21 $\text{pm}/\mu\epsilon$, 测量范围大, 灵敏度低, 但光纤制作成本高。Villatoro 等^[13]提出五芯光纤应变传感器, 其灵敏度为 1.7 $\text{pm}/\mu\epsilon$, 测量范围为 0~1600 $\mu\epsilon$, 应变灵敏度低。Hu 等^[14]提出拉锥双芯光纤应变传感器, 应变灵敏度为 -7.6 $\text{pm}/\mu\epsilon$, 测量范围为 0~731.7 $\mu\epsilon$, 其测量范围小导致其应用受限。Li 等^[15]提出四芯光纤的应变传感器, 其应变灵敏度为 -1.78 $\text{pm}/\mu\epsilon$, 温度灵敏度为 209 $\text{pm}/^\circ\text{C}$, 交叉敏感度为 117.4 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$, 应变灵敏度低, 温度对传感器的影响较大。Zhang 等^[16]提出双芯光纤应变传感器, 其应变范围为 0~841.5 $\mu\epsilon$, 应变灵敏度为 -3.31 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 和 -6.11 $\text{pm}/\mu\epsilon$, 应变灵敏度高, 但测量范围小。谭展等^[17]用空芯光纤和光纤布拉格光栅对温度与应变进行同时测量, 应变灵敏度为 -0.70 $\text{pm}/\mu\epsilon$, 其值较低。Dong 等^[18]提出光子晶体光纤应变传感器, 测量范围大, 但应变灵敏度为 -1.89 $\text{pm}/\mu\epsilon$, 灵敏度低。以上传感器应变灵敏度一般较低, 制作成本高, 或者应变测量范围较小, 或者温度交叉敏感度高, 不符合实际应用, 而塑料光纤不适用于高温环境, 故其实际应用受限。由多芯光纤制作的马赫-曾德尔应变传感器由于制作简单、价格便宜、适用性强等优点被广泛研究。

为克服传统马赫-曾德尔传感器的灵敏度低, 以

及测量范围较小的弊端, 本文提出了一种用三芯光纤制作的新型对称结构(薄芯-三芯细锥-薄芯的三明治结构, TTCF-TTCFs)的光纤应变传感器, 实验结果表明减小三芯光纤锥腰直径长度可以降低温度交叉灵敏度, 应变灵敏度最高可达 -3.47 $\text{pm}/\mu\epsilon$, 温度灵敏度最高为 34.52 $\text{pm}/^\circ\text{C}$, 交叉敏感度为 9.95 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 。实验中应变测量范围为 0~1600 $\mu\epsilon$, 温度测量范围为 25~60 $^\circ\text{C}$, 同时该传感器制作简单, 测量范围大, 应变灵敏度高。

2 传感器的制作和工作原理

2.1 传感器的结构与制作

该传感器的实验制备材料: 标准单模光纤(SMF)、薄芯光纤(TCF)、三芯光纤[其显微图如图 1(a)所示, 纤芯呈正三角排列, 芯径为 9 μm , 三个芯间距为 41.50 μm , 外径均为 125 μm]; 光源为康冠宽带光源(ASE); 光谱测量使用的是横河 AQ6370D 型光谱分析仪; 光纤熔接机为古河 S178C 等。

将 SMF 和薄芯光纤涂覆层, 然后用切割刀分别将两种光纤端面切平并得到长为 2 mm 左右的薄芯光纤, 将切得的薄芯光纤与单模光纤熔接, 重复以上步骤, 得到另一相同结构; 再将三芯光纤剥去涂覆层, 用熔接机将三芯光纤熔接于上述得到的两个长为 2 mm 左右的薄芯光纤之间。通过设置熔接机的程序, 让放电熔接点偏移以提高机械强度, 改变熔接程序的退回距离, 在三芯光纤中间拉制不同锥腰直径长度的锥形并进行实验优化。图 1(b)为调整熔接机适当退回距离后的三芯拉锥光纤显微图, 其锥腰直径长度 d 为 42.60 μm , 由显微图可见放电中心偏移。重复以上步骤形成了对称的三芯光纤结构。

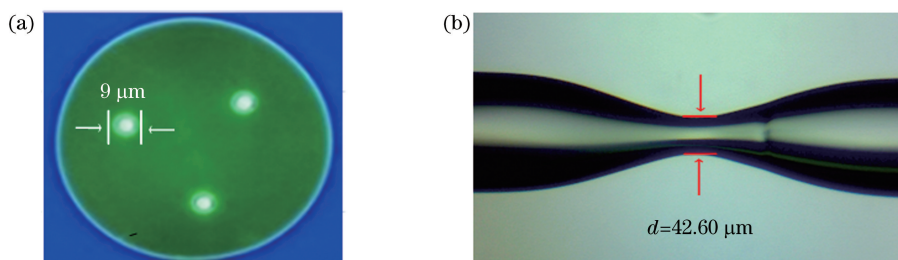


图 1 三芯光纤显微图。(a) 横向截面图; (b) 纵向拉锥结构图

Fig. 1 Microscope images of three-core optical fiber. (a) Cross-sectional view; (b) longitudinal tapered-fiber structure profile

2.2 工作原理

传感器的基本原理如图 2 所示, 在三芯光纤中光程差是由芯模和包层模的有效折射率差引起的。一般情况下, 由这些模组合引起的每一个光程差既可以产生弱干涉, 也可以产生强干涉(取决于所涉及

的模的强度)。相对于高阶包层模, 三芯光纤纤芯模占主导地位, 因此三芯光纤可作为马赫-曾德尔干涉模型^[19-21]。不同纤芯之间光的干涉可以表示为^[22]

$$I = \sum_{n=1}^3 I_n + 2 \sum_{n=1}^2 \sum_{m=2, m \neq n}^3 \sqrt{I_n I_m} \cos \phi_{n,m}, \quad (1)$$

式中： I_n 、 I_m 代表不同纤芯模式的能量强度； $\phi_{n,m}$ 代表任意两个模式间的相位差，表达式为

$$\phi_{n,m} = \frac{2\pi\Delta n^{n,m}L}{\lambda}, \quad (2)$$

其中 L 为三芯光纤的长度， λ 为工作波长， $\Delta n^{n,m}$ 为不同模式间的有效折射率差。自由光谱区可表示为^[18]

$$R_{\text{FSR}} = |\lambda_m - \lambda_{m-1}| = \frac{4\Delta n^{n,m}L}{(2m+1)(2m-1)} = \frac{\lambda_m^2(2m+1)}{\Delta n^{n,m}L(2m-1)} \approx \frac{\lambda_m^2}{\Delta n^{n,m}L}. \quad (3)$$

由(3)式可知三芯光纤长度 L 越长，光谱图越密^[19]。干涉相消条件为^[23]

$$\lambda = \frac{2\Delta n^{n,m}L}{2k+1}, \quad k=0, 1, 2, 3\cdots. \quad (4)$$

对于应变测量，由于弹光效应，当有微小应变时，光纤结构中光纤有效折射率和长度均会变化，因此光纤有效折射率和长度是应变的函数，波长的相对位移可以表示为^[12,24]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left[1 + \frac{1}{\Delta n} \frac{\partial(\Delta n)}{\partial \epsilon} \right] \epsilon, \quad (5)$$

式中： $\epsilon (= \Delta L/L)$ 为施加在传感光纤上轴向应

变^[25]， $\frac{1}{\Delta n} \frac{\partial(\Delta n)}{\partial \epsilon}$ 为弹光系数。根据(5)式，可知当应变增大时，波长蓝移。

对于温度测量，由于热光效应和热膨胀，有效折射率变化和光纤长度都是温度的函数。由温度引起的相应波长位移为^[12,21,24]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left[\frac{1}{\Delta n} \frac{\partial(\Delta n)}{\partial T} + \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} \right] \Delta T, \quad (6)$$

其中 $\frac{1}{\Delta n} \frac{\partial(\Delta n)}{\partial T}$ 为热光系数， $\frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T}$ 为热膨胀系数。由(6)式可知，温度变大会造成光纤波长的红移。

3 应变传感测试

应变传感性能测试的实验装置如图 2 所示。应变测试装置采用两个三维位移台，通过改变位移台的移动距离控制施加在光纤上的应变。两个位移台初始距离利用标准的 50 cm 刻度尺测量，单模光纤带有塑料保护层，被夹具固定在位移台上，所以位移台在一定量程范围的移动过程中，涂覆层被剥离的风险低，而光纤长度的变化量可以通过位移台上的千分尺得出，从而保证其精度，因此本文中的拉伸装置产生的应变可以作为理论上的近似真实应变。

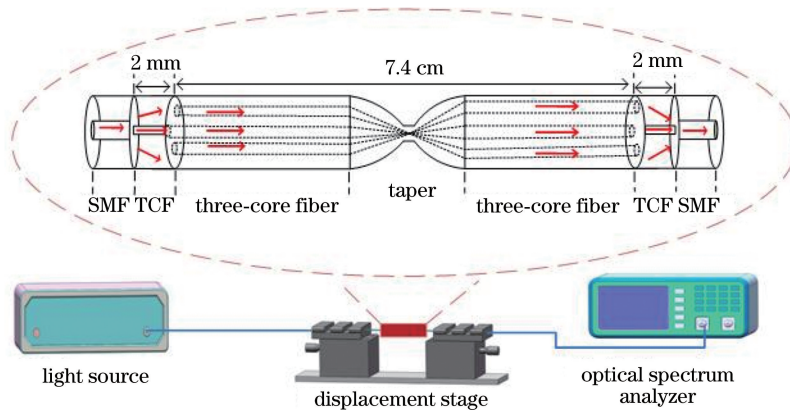


图 2 应变测量装置图(插图传感器基本原理图)

Fig. 2 Schematic diagram of strain measuring device (the inset is the basic principle of the sensor)

不同长度三芯干涉光谱如图 3(a) 所示。锥腰直径长度 d 为 $42.60 \mu\text{m}$ ，不同长度三芯光纤的应变灵敏度拟合曲线如图 3(b) 所示，应变范围为 $0 \sim 1600 \mu\epsilon$ ，超过此范围传感器机械强度明显降低。通过图 3 可知，当三芯光纤长度为 7.4 cm 时，干涉谱图较好，应变灵敏度高。固定三芯光纤长度为 7.4 cm ，进一步减少锥腰直径长度 d ，比较拉锥对应变灵敏度的影响。为更清晰地分析传感器干涉模式，通过快速傅里叶变换，得到如图 3(c) 所示锥腰直径长度 d 为 $41.20 \mu\text{m}$ 的空间频谱图。可以看

出：在空间频谱中出现了一个主干涉峰，频率为 0.0098 nm^{-1} ，这是由纤芯模式的干涉形成的；其他超模也可能被激发，故会导致一些较小的空间频率峰值。故可知图 3(c) 所示的空间频谱图有多种模式参与干涉^[18]。

测定相同应变范围内不同锥腰直径长度的应变干涉光谱以及应变引起的波长漂移量的线性拟合如图 4(a)~(d) 所示。由图可以看出随着应变的增大，传感器的输出光谱存在明显的蓝移现象，应变灵敏度分别达到 $-1.46, -2.18, -2.36, -3.47 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ，

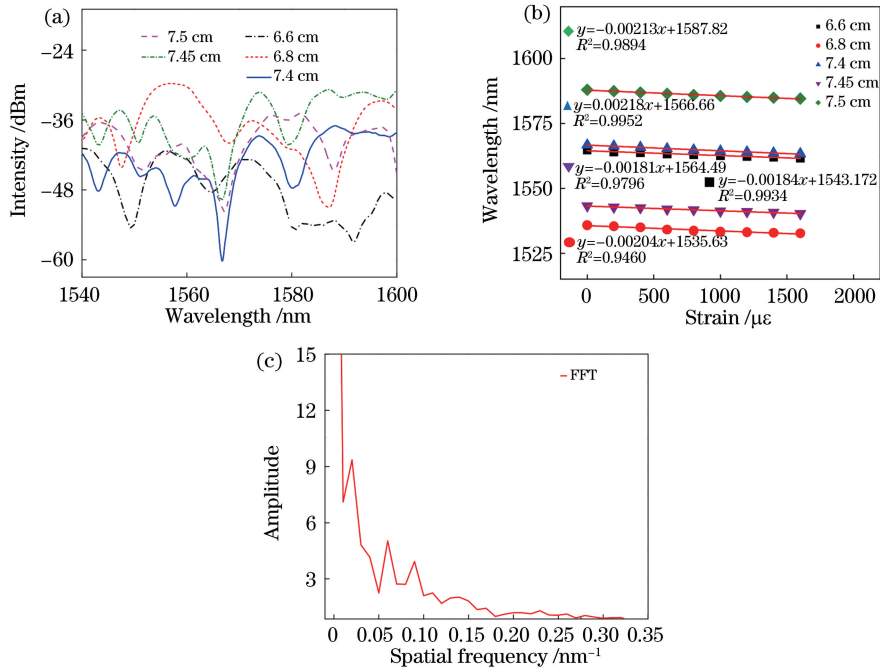


图 3 干涉光谱、应变拟合与空间频谱图。(a)不同长度三芯光纤干涉谱;(b)锥腰直径长为 42.60 μm 的不同长度三芯光纤应变拟合图;(c)锥腰直径长为 41.20 μm 时传感器的空间频谱图

Fig. 3 Interference spectrum, strain fitting and spatial spectrum. (a) Interference spectra of three-core optical fibers with different lengths; (b) strain fitting diagram of three-core optical fibers with different lengths and tapered waist diameter of 42.60 μm ; (c) spatial frequency spectrum diagram of sensor with tapered waist diameter of 41.20 μm

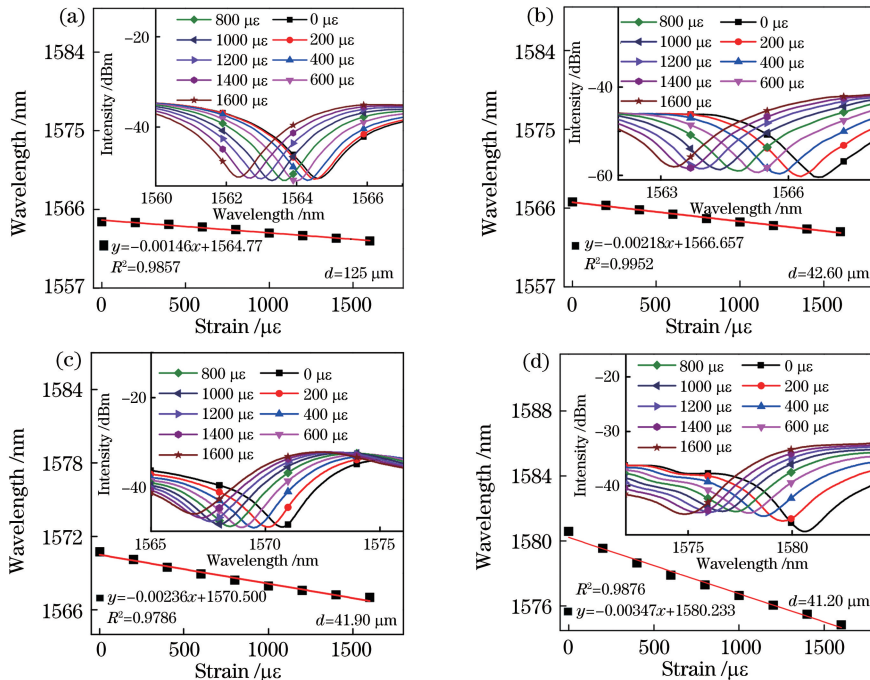


图 4 相同应变范围内不同锥腰直径长度的应变干涉光谱以及应变引起的波长漂移量的线性拟合。(a)锥腰直径长为 125 μm ; (b)锥腰直径长为 42.60 μm ; (c)锥腰直径长为 41.90 μm ; (d)锥腰直径长为 41.20 μm

Fig. 4 Strain interference spectra of optical fibers with different tapered waist diameters in the same strain range and the linear fitting of wavelength drift caused by strain. (a) 125- μm tapered waist diameter; (b) 42.60- μm tapered waist diameter; (c) 41.90- μm tapered waist diameter; (d) 41.20- μm tapered waist diameter

线性度分别为 0.9857, 0.9952, 0.9786, 0.9876。实验得出光纤锥腰直径长度越小, 应变灵敏度越高, 这是因为拉锥提高了三芯光纤纤芯之间的耦合效率, 锥腰直径长度越小, 纤芯耦合越强, 所以应变灵敏度越高。

4 温度传感测试

对传感器温度特性进行探究时, 将传感器水浴加热, 温度间隔为 5 °C, 从 25 °C 加热至 60 °C, 图 5 为温度测量装置图。图 6(a) 和 (b) 为 7.4 cm 长的三芯光纤当锥腰直径长度分别为 42.60 μm 和 41.20 μm 时光纤温度传感器的输出干涉谱图和温度变化引起的波长漂移量的线性拟合图。结果表明: 在 25~60 °C 范围内, 此光纤温度传感器的透射

光谱随温度降低发生蓝移, 锥腰直径长度为 42.60 μm 时, 光纤传感器的温度灵敏度为 28.71 pm/°C, 线性拟合度为 0.9909。锥腰直径长度为 41.20 μm 时, 光纤传感器的温度灵敏度为 34.52 pm/°C, 线性拟合度为 0.9979。实验结果表明, 锥腰直径长度越小, 温度灵敏度越高, 交叉灵敏度越低, 更适用于实际应用。

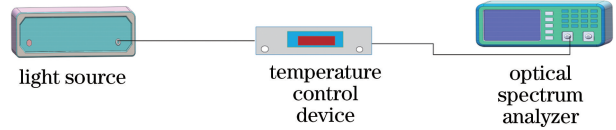


图 5 温度测量装置图

Fig. 5 Schematic diagram of temperature measuring device

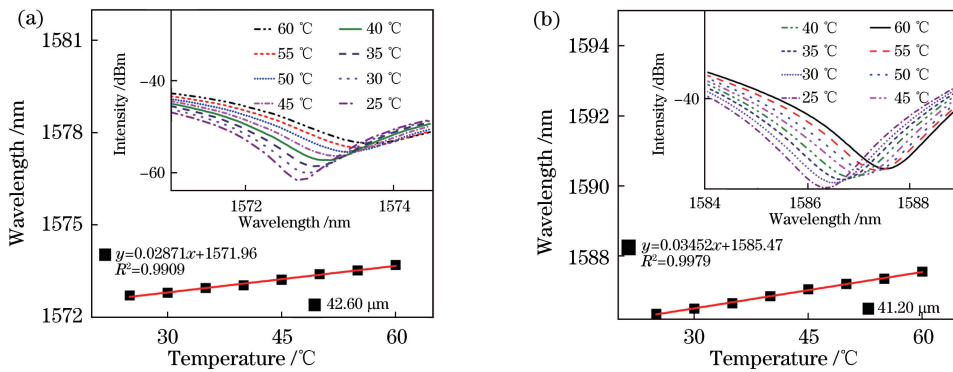


图 6 不同锥腰直径长度和不同温度时的干涉光谱图。(a) 锥腰直径长为 42.60 μm; (b) 锥腰直径长为 41.20 μm

Fig. 6 Interference spectra of different waist diameters and temperatures. (a) 42.60-μm tapered waist diameter;

(b) 41.20-μm tapered waist diameter

将本文所提光纤与其他光纤(长周期光纤、光子晶体光纤、四芯光纤、空芯光纤和布拉格光栅、少模光纤与光纤布拉格光栅)的应变传感器作对比, 见表 1, 可得本文所提传感器的应变灵敏度比四芯光纤、空芯光纤与少模光纤应变传感器高, 而温度灵敏度比长周

期光纤光栅、四芯光纤、少模光纤和光子晶体光纤低, 由此说明本文所提传感器在提高应变灵敏度的同时, 一定程度上降低了温度对传感器的影响; 同时较光纤法布里-珀罗或光子晶体光纤等传感器制作更简单、所用的薄芯光纤、三芯光纤价格不高, 制作成本低。

表 1 不同光纤应变传感器的性能比较

Table 1 Performance comparison of the different optical fiber strain sensors

Structure	Strain sensitivity / ($\text{pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$)	Temperature sensitivity / ($\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	Cross sensitivity / ($\mu\epsilon \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	Reference
Long-period fiber grating	30.00	37.00	1.230	Ref. [7]
Photonic crystal fiber	-14.89	-243.8	16.37	Ref. [8]
Four-core fiber	-1.780	209.0	117.4	Ref. [15]
Hollow fiber and fiber Bragg grating	-0.709 and 1.020	24.55 and 12.76	34.63 and 12.51	Ref. [17]
Few-mode fiber and fiber Bragg grating	-2.000 and 0.67	-34.3 and 10.7	17.15 and 15.97	Ref. [26]
TTCF-TTCFs	-3.470	34.52	9.950	This work

5 结 论

提出一种简单的全光纤马赫-曾德尔应变传感器制备方法,实验结果表明:三芯光纤的长度为 7.4 cm 及锥腰直径长度为 41.20 μm 时,在应变范围为 0~1600 μe 内,其灵敏度达到 -3.47 $\text{pm}/\mu\text{e}$;在 25~60 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,其灵敏度为 34.52 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$,线性拟合度为 0.9979,交叉敏感度为 9.95 $\mu\text{e}/^{\circ}\text{C}$ 。本研究工作表明,该传感器具有较高的应变灵敏度,在应变的监测领域有潜在应用价值,也为与光纤光栅级联消除温度对应变测量影响提供了一种新的光纤结构,适用于特定环境中应变的测量。

参 考 文 献

- [1] Tian J J, Li Z G, Sun Y X, et al. High-sensitivity fiber-optic strain sensor based on the vernier effect and separated Fabry-Perot interferometers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(21): 5609-5618.
- [2] Ye X W, Su Y H, Han J P. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: a comprehensive review[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 1-11.
- [3] Islam M, Ali M, Lai M H, et al. Chronology of Fabry-Perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: a review [J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 7451-7488.
- [4] Ramakrishnan M, Rajan G, Semenova Y, et al. Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials[J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 99.
- [5] Markowski K, Jędrzejewski K, Marzęcki M, et al. Linearly chirped tapered fiber-Bragg-grating-based Fabry-Perot cavity and its application in simultaneous strain and temperature measurement [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1464-1467.
- [6] Liu W L, Sun C T, Geng T, et al. A new spring-shaped long-period fiber grating with high strain sensitivity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(14): 1163-1166.
- [7] You R Z, Ren L, Song G B. A novel fiber Bragg grating (FBG) soil strain sensor[J]. *Measurement*, 2019, 139: 85-91.
- [8] Yang F, Wang Z K, Wang D N. A highly sensitive optical fiber strain sensor based on cascaded multimode fiber and photonic crystal fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 47: 102-106.
- [9] Aitkulov A, Tosi D. Optical fiber sensor based on plastic optical fiber and smartphone for measurement of the breathing rate [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(9): 3282-3287.
- [10] Huang B S, Gao S C, Huang X C, et al. High-sensitivity fiber Fabry-Pérot interferometer strain sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0606002.
黄炳森, 高社成, 黄新成, 等. 高敏光纤法布里-珀罗干涉应变传感器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0606002.
- [11] Duan D W, Zhu T, Rao Y J, et al. A miniature extrinsic Fabry-Pérot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 17-20.
段德稳, 朱涛, 饶云江, 等. 基于空芯光子晶体光纤的微小型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器 [J]. *光学学报*, 2008, 28(1): 17-20.
- [12] Dong X R, Du H F, Sun X Y, et al. A novel strain sensor with large measurement range based on all fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Sensors*, 2018, 18(5): 1549.
- [13] Villatoro J, Arrizabalaga O, Durana G, et al. Accurate strain sensing based on super-mode interference in strongly coupled multi-core optical fibres[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 4451.
- [14] Hu Y Y, Ning T G, Zhang C B, et al. Strain sensor based on two concatenated abrupt-tapers in twin-core fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 46: 1-4.
- [15] Li C, Ning T G, Zhang C, et al. All-fiber multipath Mach-Zehnder interferometer based on a four-core fiber for sensing applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 248: 148-154.
- [16] Zhang C B, Ning T G, Zheng J J, et al. An optical fiber strain sensor by using of taper based TCF structure [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 120: 105687.
- [17] Tan Z, Liao C R, Liu S, et al. Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1206007.
谭展, 廖常锐, 刘申, 等. 基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器 [J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1206007.
- [18] Dong X R, Luo Z, Du H F, et al. Highly sensitive strain sensor based on a novel Mach-Zehnder mode interferometer with TCF-PCF-TCF structure [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 116: 26-31.
- [19] Li H, Li H B, Meng F Y, et al. All-fiber MZI sensor based on seven-core fiber and fiber ball symmetrical structure [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 112: 1-6.
- [20] Duan L, Zhang P, Tang M, et al. Heterogeneous all-

- solid multicore fiber based multipath Michelson interferometer for high temperature sensing [J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20210-20218.
- [21] Yin B, Li Y, Liu Z B, et al. Investigation on a compact in-line multimode-single-mode-multimode fiber structure [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 80: 16-21.
- [22] Zhao Y, Cai L, Li X G. Temperature-insensitive optical fiber curvature sensor based on SMF-MMF-TCSMF-MMF-SMF structure [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(1): 141-147.
- [23] Liu Y, Wang D N, Chen W P. Crescent shaped Fabry-Perot fiber cavity for ultra-sensitive strain measurement [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38390.
- [24] Zhang N, Xu W, You S H, et al. Simultaneous measurement of refractive index, strain and temperature using a tapered structure based on SMF [J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 70-74.
- [25] Kumar A, Goel N K, Varshney R K. Studies on a few-mode fiber-optic strain sensor based on LP₀₁-LP₀₂ mode interference [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(3): 358-362.
- [26] Gao X K, Ning T G, Zhang C B, et al. A dual-parameter fiber sensor based on few-mode fiber and fiber Bragg grating for strain and temperature sensing [J]. *Optics Communications*, 2020, 454: 124441.