光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20251208001

基于双芯螺旋结构的高灵敏光纤干涉应变传感器

王苓茜，魏　勇*

（重庆三峡科技大学 电子与信息工程学院，重庆 404100）

摘　要： 文章提出一种基于双芯螺旋结构的高灵敏光纤干涉应变传感器。该传感器采用多模光纤-双芯光纤-多模光纤的拼接结构，并将外侧纤芯加工为螺旋结构。当双芯螺旋结构受到应变时，螺旋纤芯的传感区域长度变化量小于中间纤芯，该长度差异导致干涉谷波长发生蓝移；同时，弹光效应使模式间有效折射率差发生变化，同样引起干涉谷波长蓝移。两种因素协同作用，实现了应变增敏。实验结果表明，该传感器的应变灵敏度为－45.88 pm/με，温度-应变交叉灵敏度仅为0.85 με/℃。该传感器具有灵敏度高、温度串扰低的优点，为光纤MZI应变传感器的增敏研究提供了新方法。

关键词： 光纤MZI传感器；应变传感；双芯光纤；螺旋结构；高灵敏

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2026)03－0436－05

High-Sensitivity Fiber Interferometric Strain Sensor Based on Twin-Core Helical Structure

WANG Lingxi, WEI Yong

(**College of Electronic&Information Engineering, Chongqing Sanxia University Of Science And Technology, Chongqing 404100, CHN**)

Abstract: A high-sensitivity optical fiber interferometric strain sensor based on a dual-core helical structure is proposed. The sensor employs a multimode-twin-core-multimode fiber structure, with the outer core processed into a helical structure. During the strain detection process, the change in the sensing region length induced by the helical core is less than that induced by the central core. This results in a blueshift of the interference valleys due to the change in the sensing region length. Simultaneously, the elasto-optical effect causes a change in the modal effective refractive index, which also leads to a blueshift in the interference valleys. Ultimately, the joint effect of these two factors leads to the enhancement of strain sensitivity. Experimental results demonstrate that the strain sensitivity of the sensor is －45.88 pm/με, while its temperature-strain cross-sensitivity is as low as 0.85 με/°C. This sensor exhibits the advantages of high strain sensitivity and low temperature crosstalk, providing a novel method for enhancing the sensitivity of fiber-optic MZI strain sensors.

Key words: fiber-optic MZI sensor; strain sensing; twin core fiber; helical structure; high sensitivity

0　引言

应变检测在航天航空、石油管道、机械工程等领域的应用广泛，如飞机机翼的金属疲劳监测、油气管道的应力腐蚀评估、大型建筑的长期形变分析等，需要高精度的应变监测来预防潜在的安全事故。光纤应变传感器因具有体积小、响应快、抗电磁干扰等优点，在应变测量中发挥着重要作用[1-3]。

收稿日期：2025－12－08.

*通信作者：魏　勇

在众多性能指标中，应变灵敏度是衡量光纤应变传感器性能的重要参数。相比于其他光纤传感器，光纤马赫-曾德尔干涉（MZI）应变传感器制作简单且结构紧凑，但其应变灵敏度较低，需进一步提升[4-5]。

根据已有研究可知，光纤干涉应变传感器应变过程中干涉谷波长的移动量越大，应变灵敏度越高。干涉谷波长的移动量与模式间有效折射率差的变化量和传感区域长度的变化量有关。在应变过程中，通常模式间有效折射率差的变化量引起干涉谷波长蓝移，传感区域长度的变化量引起干涉谷波长红移，但模式间有效折射率差的变化引起的蓝移量大于传感区域长度引起的红移量[6]，传感区域长度引起的红移量会抵消一部分模式间有效折射率差的蓝移量，导致应变灵敏度变低。因此，目前主要的增敏方法是增大模式间有效折射率差的变化量，使干涉波谷的蓝移量更大，实现应变增敏[7-8]。例如，Wang 等通过空芯光纤与单模光纤拼接，空芯光纤和单模光纤的芯径不匹配，激发高阶包层模式，应变灵敏度为 −4.19 pm/με[9]；Liu 等在单模光纤上制作一对离轴扭转变形的结构，使得纤芯中的光耦合到包层并激发高阶包层模式，其应变灵敏度提升至 −28.5 pm/με[10]；Jiang 等提出扭转单模光纤，以激发高阶包层模式，应变灵敏度达 −36.19 pm/με[11]。上述增敏方法都是增大由弹光效应引起的模式间有效折射率差的改变量来提升灵敏度，但传感区域长度的变化引起干涉谷波长红移，仍会抵消一部分模式间有效折射率差变化引起的干涉谷波长蓝移，导致应变灵敏度受限。

若能使传感区域长度变化同样导致干涉谷波长蓝移，再与模式间有效折射率差变化引起的干涉波谷蓝移叠加，即可进一步实现传感器的应变增敏。其中传感区域长度为传播模式的实际传输物理路径长度，可以通过设计两个干涉模式的初始传感区域长度不同的传感器，应变过程中不同模式的传感区域长度变化量不同，某一模式传感区域长度拉伸量更少，另一模式的传感区域长度拉伸量更多，传感区域长度变化引起干涉谷波长蓝移；同时，因为弹光效应的存在，模式间有效折射率差的变化引起干涉谷波长蓝移，两者共同作用导致干涉谷波长显著蓝移，实现高灵敏应变传感。

综上所述，本文提出并制作了一种基于多模光纤（MMF）-双芯光纤（TCF）-MMF 结构的光纤干涉应变传感器，并通过氢氧火焰加热旋转双芯光纤，制备出双芯螺旋结构，其中中间纤芯保持平直，外侧纤芯呈螺旋状。施加应变时，螺旋纤芯的传感区域长度变化量小于中间纤芯，该长度差异导致干涉谷波长蓝移；同时，弹光效应使应变过程中模式间有效折射率差的变化同样引起干涉谷波长蓝移。两种因素共同作用，使该传感器的应变灵敏度提升至 −45.88 pm/με。本研究为光纤 MZI 应变传感器的增敏提供了新方法，有望应用于航空航天、石油管道、机械工程等领域的结构健康监测，实现更高精度的应变测量与早期损伤识别。

1　传感器结构与工作原理

1.1　传感器结构

所提出的双芯螺旋应变传感器如图 1 所示，该螺旋结构由单模光纤（SMF）-MMF-螺旋双芯光纤（HTCF）-MMF-SMF 拼接而成，其中纤芯螺距 Λ 为 450 μm，螺高 H 为 90 μm。当向单模光纤注光时，一端的多模光纤将光耦合到双芯的纤芯和包层中，此时一部分光沿着螺旋纤芯传输，另一部分沿中间纤芯传输。而包层中传输的光在传输过程中逐渐损耗，另一端的多模光纤将两个纤芯光重新耦合回单模光纤中，形成螺旋纤芯与中间纤芯干涉。

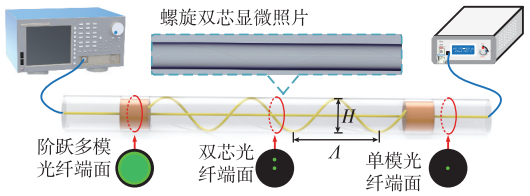


图 1　双芯螺旋结构应变传感器示意图

由于双芯光纤的纤芯材料折射率一致，激发相同的纤芯模式，此时发生干涉的两模式纤芯模式有效折射率相同，传感区域长度不同，根据双光束干涉原理，干涉谷波长的表达式为：

$$\lambda=\frac{2}{2m+1}\left(n_{\mathrm{eff}}^{1}L_1-n_{\mathrm{eff}}^{2}L_2\right)=\frac{2}{2m+1}n_{\mathrm{eff}}\left(L_1-L_2\right) \tag{1}$$

式中，λ 为干涉谷波长，n_{eff} 为模式有效折射率，L_1，L_2 分别为螺旋纤芯和中间纤芯传感区域长度。应变过程中，由于模式间有效折射率差的变化和传感区域长度的变化，进一步推导应变灵敏度 S 的公式为：

$$S=\partial\lambda/\partial\varepsilon=\frac{2}{2m+1}\left[\partial n_{\mathrm{eff}}/\partial\varepsilon\times\left(L_1-L_2\right)+n_{\mathrm{eff}}\left(\partial L_1/\partial\varepsilon-\partial L_2/\partial\varepsilon\right)\right] \tag{2}$$

式中，$\partial n_{\mathrm{eff}}/\partial\varepsilon$ 为应变引起的纤芯模式间有效折射率

差的变化，$\partial L_1/\partial\varepsilon$与$\partial L_2/\partial\varepsilon$分别为应变引起螺旋纤芯和中间纤芯传感区域长度的变化。由上述公式可知，对双芯螺旋结构施加应变时，弹光效应会引起纤芯模式有效折射率减小，干涉波谷蓝移。同时，由于螺旋纤芯和中间纤芯的传感区域长度不同，螺旋纤芯和中间纤芯的传感区域长度的变化量不同。对于螺旋纤芯受到轴向应变部分用于改变螺旋的几何形状，即增大每圈的螺距Λ和减小螺高H，另一部分用于纤芯弯曲路径的伸长，而中间纤芯受到的轴向应变全部转化为纤芯路径的伸长。因此，螺旋纤芯引起的传感区域长度的变化量小于中间纤芯引起的传感区域长度的变化量，此时传感区域长度的变化引起干涉波长蓝移，两种因素共同作用实现应变增敏。

双芯光纤其中一根纤芯加工为螺旋结构，进一步验证双芯螺旋结构中螺旋纤芯和中间纤芯传感区域长度变化量的大小，受到应变后螺旋纤芯传感区域长度($L_{1,\varepsilon}$)表示为[12]：

$$L_{1,\varepsilon}=N\sqrt{\left[2\pi H(1-v\varepsilon)\right]^2+\left[\Lambda(1+\varepsilon)\right]^2} \quad (3)$$

式中，当H=0时，表示双芯螺旋结构受到应变后中间纤芯传感区域的长度，即$L_{2,\varepsilon}=N\Lambda(1+\varepsilon)=L_1(1+\varepsilon)$；当$\varepsilon$=0时，表示未受应变时的螺旋纤芯传感区域长度[13]。根据公式(3)，可以求出双芯螺旋结构中螺旋纤芯和中间纤芯的传感区域长度的变化量。为了方便比较螺旋纤芯和中间纤芯传感区域长度变化量的大小，将在一个圈数内(N=1)螺旋纤芯和中间纤芯传感区域长度的变化量代入Matlab进行仿真，其中螺旋纤芯的螺距Λ为450 μm，螺高H为90 μm。Matlab仿真结果如图2所示，可以看出应变过程中双芯螺旋结构中螺旋纤芯传感区域长度的变化量小于中间纤芯传感区域长度的变化量。

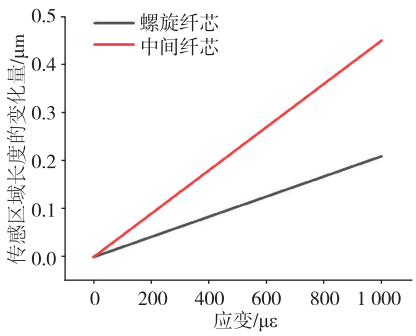


图2 双芯螺旋结构受到应变后螺旋纤芯与中间纤芯传感长度的变化量比较

1.2 传感器制作

双芯螺旋应变传感器的制作过程如图3所示。首先将单模光纤(SMF-28e，Corning)与阶跃多模光纤(SI105/125-22/250，YOFC)进行正对熔接，随后将阶跃多模光纤切割至1 mm并将其与双芯光纤(TCF-9/125，Xingyuan Aote)进行熔接，再将双芯光纤长度取2 cm，构成SMF-MMF-TCF结构，与拼接好的阶跃多模光纤和单模光纤MMF-SMF进行正对熔接，完成SMF-MMF-TCF-MMF-SMF光纤的制作。最后，将加工完成后的光纤两端分别夹持于氢氧火焰拉锥机(Full-Featured Research Type-2，Coupler)两侧的夹具中，调整光纤位置使双芯光纤区域置于氢氧焰火头的正下方。设置光纤熔融拉锥机左侧夹具自旋转转速为0 μm/s，右侧夹具转速为12 000 μm/s，设定氢气流速为180SCCM，加热时间为6 s，打开氢气发生器(AYH-500，Beijing Tianyuze Technology)，待氢气流量逐渐增加至设定值并稳定，点燃氢氧焰，左右夹具按设置转速开始旋转，最终形成双芯螺旋结构，如图3(f)。

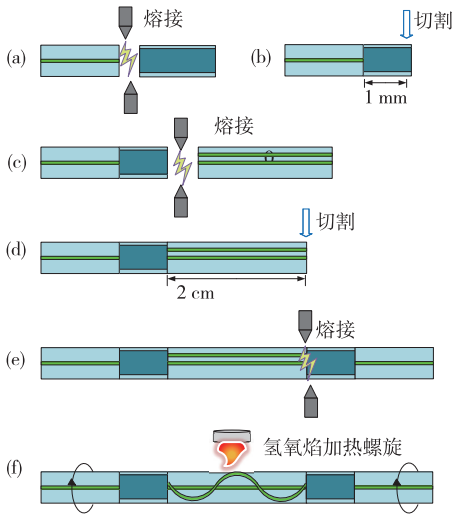


图3 双芯螺旋结构制作流程图

1.3 应变装置搭建

应变测量装置如图4所示。首先将单模光纤右端连接宽带光源(HY-ASE-CL-17-N-B-FP，HOYATEK)，接着将单模光纤左端连接光谱分析仪(AQ6370D，YOKAGAWA)，再将光纤放置于位移台上的左右夹居中，保证光纤处于绷直状态，通过应变控制器控制步进电机左右移动，从而对传感器施加应变，最后通过计算机分析采集光谱。

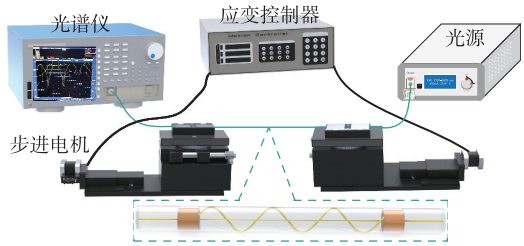
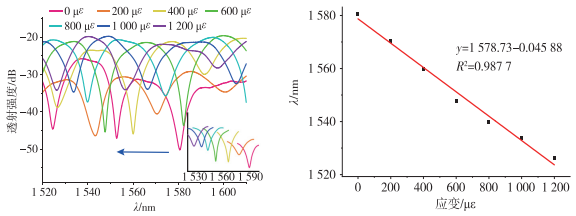


图 4　应变实验装置

2　实验结果

2.1　应变测量结果

将所制作的螺距 450 μm，螺高 90 μm 的双芯螺旋结构应变传感器进行实验测试，每施加 200 με 干涉谷波长发生移动，采集一次输出光谱并保存，应变测试结果如图 5 所示。在 0～1 200 με 范围，应变灵敏度为－45.88 pm/με，线性度为 0.987 7。

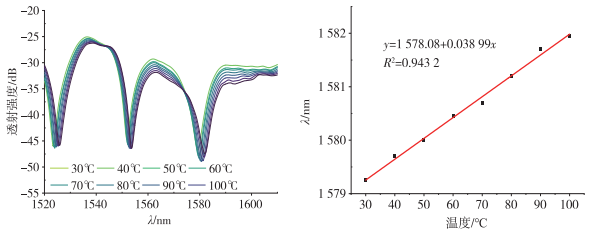


（a）干涉谷波长移动的实验光谱　（b）应变与干涉谷波长的线性拟合图

图 5　应变实验结果

2.2　温度测量结果

为研究应变过程中温度变化对传感器的影响，进行了温度实验测试。温度从 30℃升温到 100℃，每次温度增加 10℃，干涉谷波长红移，结果如图 6 所示。其温度灵敏度为 38.99 pm/℃，温度-应变交叉串扰的应变灵敏度为 0.85 με/℃。



（a）干涉谷波长移动的实验光谱　（b）温度与干涉谷波长的线性拟合图

图 6　温度实验结果

2.3　石油管道应变测试结果

石油管道应变检测模拟装置如图 7 所示。首先将基于双芯螺旋结构的光纤干涉应变传感器的左右两端分别连接到光谱分析仪和宽谱光源上，再将该传感器的传感区域绷直并粘贴到管道表面。当管道产生微小裂纹时，双芯螺旋应变传感器受到应变，干涉波谷蓝移。应变测试时，先将左右管道紧密相连，受到应变后，管道中间产生微小裂纹，从而得到不同应变状态下该传感器的干涉谷波长移动情况，如图 8 所示。

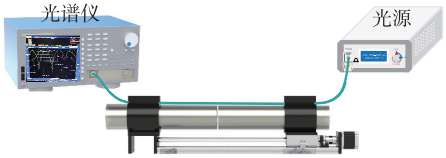


图 7　石油管道应变检测模拟装置

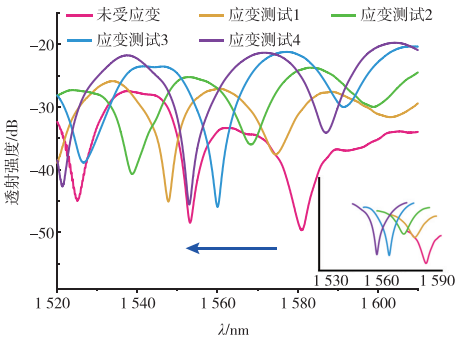


图 8　管道应变测量结果

在应变测量结果中，构建应变与干涉谷波长的线性拟合关系，通过不同应变状态下干涉谷波长，可以推算出此时所受应变大小，如表 1 所示。

表 1　管道应变测试数据

应变测试	λ/nm	应变大小/με
1	1 574.45	93.29
2	1 568.35	226.24
3	1 560.00	408.24
4	1 552.95	561.9

3　结果与讨论

本文提出一种传感区域长度变化和模式有效折射率变化均引起干涉波谷蓝移，增大应变过程干涉谷波长蓝移量，从而实现应变增敏的新方法。在应变过程中，螺旋纤芯受到轴向应变部分用于改变螺旋的几何形状，即增大螺距和减小螺高，另一部分用于纤芯弯曲路径的伸长，而中间纤芯受到的轴向应变全部转化为纤芯路径的伸长。因此，双芯螺旋结构中螺旋纤芯引起的传感区域长度的变化量小于中间纤芯引起的传感区域长度的变化量，此时传感区域长度的变化引起干涉谷波长蓝移。同时，因为弹光效应的影响，模式间有效折射率差的变化

引起干涉谷波长蓝移，两者共同作用导致干涉谷波长显著蓝移，实现应变增敏。

如表2所示，将双芯螺旋结构应变传感器与其他光纤MZI应变传感器进行比较，可以得出双芯螺旋结构应变传感器具有高应变灵敏度及低温度串扰的优势。

表2 光纤MZI应变传感器性能比较

传感器结构	应变灵敏度/(pm/με)	温度-应变交叉灵敏度/(με/℃)	参考文献
空芯光纤拉锥	−2.7	0.59	[14]
单模-空芯光纤-单模	−4.26	2.29	[9]
多模光纤螺纹槽	−16.89		[15]
单模光纤离轴扭转	−28.5	2.73	[10]
单模光纤扭转	−36.19	1.74	[11]
双芯光纤螺旋	−45.88	0.85	本文

4 结论

本文提出一种基于双芯螺旋结构的光纤干涉应变传感器，应变过程中螺旋纤芯的传感区域拉伸量更少，中间纤芯的传感区域长度拉伸量更多，传感区域长度的变化引起干涉谷波长蓝移，同时模式有效折射率也会引起干涉谷波长蓝移，在两种因素共同作用下，实现高灵敏应变传感。经过实验测试，该传感器的应变灵敏度为−45.88 pm/με，温度-应变交叉灵敏度为0.85 με/℃。所提方案具有应变灵敏高、温度串扰低、检测范围大的优势，后续可嵌入飞机机翼、油气管道、建筑结构等场景中，实现实时、高精度应变监测，有望广泛应用于航空航天、石油管道、机械工程等领域的结构健康监测。

参考文献：

[1] 李天梁，温宇航，张 奥，等. 一种基于“8”型弹簧结构的高温大应变光纤传感器[J]. 航空制造技术，2025，68(17)：34-41.
Li Tianliang，Wen Yuhang，Zhang Ao，et al. A high-temperature large-strain optical fiber sensor based on “8” shaped spring structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2025，68(17)：34-41.

[2] Ni C，Zhao M，Wang X，et al. Research on the application of interferometric optical fiber sensors in high-pressure gas pipelines[J]. Optical Fiber Technology，2024，87：103862.

[3] Joe H E，Yun H，Jo S H，et al. A review on optical fiber sensors for environmental monitoring [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology，2018，5(1)：173-191.

[4] Wang K，Mizuno Y，Lee H，et al. Experimental demonstration of offset-induced sensitivity enhancement in SMS-based temperature and strain sensing [J]. Applied Physics Express，2023，16(5)：052003.

[5] Li Y，Jiang Y，Tang N，et al. Fiber optic temperature and strain sensor using dual Mach - Zehnder interferometers [J]. Applied Optics，2023，62(8)：1977-1983.

[6] Wang X，Liu C，Wei Y，et al. Low-strain crosstalk curvature MZI based on the cascaded of step-index fiber and graded index fiber[J]. IEEE Sensors Journal，2023，23(17)：19318-19323.

[7] Zhang G，Ge Q，Wang H，et al. Stress applying TPMF based sensor for simultaneous temperature and strain measurement [J]. Optik，2022，254：168636.

[8] Gao Y，Jin S，Zuo C，et al. Dual Mach-Zehnder interferometer based on DCF and FCF for temperature and strain measurement [J]. Photonic Sensors，2024，15(1)：250120.

[9] 王 磊，张钰民，姚霁峰，等. 单模-空芯-单模光纤微结构应变传感特性研究[J]. 半导体光电，2024(4)：515-522.
Wang Lei，Zhang Yumin，Yao Jifeng，et al. Research on the strain sensing characteristics of single mode-hollow core-single mode optical fiber microstructure [J]. Semiconductor Optoelectronics，2024(4)：515-522.

[10] Liu Y，Deng H，Yuan L. Directional torsion and strain discrimination based on Mach-Zehnder interferometer with off-axis twisted deformations [J]. Optics & Laser Technology，2019，120：105754.

[11] Jiang X，Lu P，Sun Y，et al. Simultaneous measurement of axial strain and temperature based on twisted fiber structure [J]. Chinese Optics Letters，2018，16(4)：040602.

[12] Zhang H，Wu Z，Shum P P，et al. Highly sensitive strain sensor based on helical structure combined with Mach-Zehnder interferometer in multicore fiber [J]. Scientific Reports，2017，7：46633.

[13] Chremmos I D. Analytical computation of the electromagnetic field produced by an optical fiber helix [J]. Progress in Electromagnetics Research B，2009，16：189-207.

[14] Dong L，Gang T，Bian C，et al. A high sensitivity optical fiber strain sensor based on hollow core tapering [J]. Optical Fiber Technology，2020，56：102179.

[15] 陈丽萍，王 文. 基于螺纹槽的多模光纤马赫曾德尔干涉应变传感器[J]. 半导体光电，2024，45(6)：893-897.
Chen Liping，Wang Wen. Multimode-fiber optic Mach-Zehnder interference strain sensor with threaded grooves [J]. Semiconductor Optoelectronics，2024，45(6)：893-897.

作者简介：

王苓茜(2001—)，女，重庆市万州区人，硕士研究生，主要从事光纤传感方面的研究；

魏 勇(1987—)，男，博士，教授，硕士生导师，主要从事光纤表面等离子体共振传感技术、光纤干涉传感技术等方面的研究。