光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024082402

基于螺纹槽的多模光纤马赫曾德尔干涉应变传感器

陈丽萍[1*]，王　文[2]

（1. 重庆三峡学院 电子与信息工程学院，重庆 404000；2. 重庆电子科技职业大学，重庆 401331）

摘　要： 提出了一种基于螺纹槽的多模光纤马赫曾德尔干涉应变传感器。在多模光纤上制作螺纹槽结构作为传感区，螺旋槽光纤横截面积小于单模光纤，使得传感区受到的实际应变大于施加应变。当对光纤施加定量的应变时将会获得更大的波长漂移量，从而提高传感器的应变灵敏度。实验结果显示，在 0～900 με 应变范围内，传感器的应变灵敏度分别高达－6.44 和－16.89 pm/με，线性度分别为 0.979 和 0.981。该传感器具有结构简单、灵敏度和机械强度高的优点，为光纤干涉应变传感的增敏研究提供了新方案。

关键词： 多模光纤；应变传感器；灵敏度；螺纹槽；光纤传感

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2024)06－0893－05

Multimode-fiber Optic Mach-Zehnder Interference Strain Sensor with Threaded Grooves

CHEN Liping[1]，WANG Wen[2]

（1. Faculty of Electronic and Information Engineering，Chongqing Three Gorges University，Chongqing 404000，CHN；
2. Chongqing Polytechnic University of Electronic Technology，Chongqing 401331，CHN）

Abstract： A multimode-fiber Mach-Zehnder interference strain sensor with threaded grooves is proposed. The threaded groove structure is made on the multi-mode fiber as the sensing area，and the cross-sectional area of the spiral groove fiber is smaller than that of the single-mode fiber，so that the actual strain on the sensing area is greater than the applied strain. When a quantitative strain is applied to the fiber，the wavelength drift is greater，which increases the strain sensitivity of the sensor. The experimental results show that in the strain range of 0～900 με，the strain sensitivities of the single- and multi-mode fiber sensors are －6.44 to －16.89 pm/με，respectively，with linearities of 0.979 and 0.981，respectively. The sensor has the advantages of simple structure，high sensitivity，and high mechanical strength，providing a new solution for enhancing the sensitivity of optical fiber interference strain sensors.

Key words： multimode fiber；strain sensors；sensitivity；threaded grooves；fiber optic sensing

0　引言

光纤应变传感器因其具有体积小、抗电磁干扰能力强、响应速度快等优势，被广泛用于建筑物的结构健康监测、航空航天、人工智能等领域[1-2]。在光纤应变传感器中，光纤马赫曾德尔干涉（Mach Zehnder Interferometer，MZI）传感器因其制作简单、稳定性高而备受关注[3-4]。然而，传统光纤 MZI 传感器的应变灵敏度往往不超过 2 pm/με[5-6]，这限制了其在测量需求上的应用，亟需开展高灵敏的应变传感研究。

近年来，为提高光纤 MZI 应变灵敏度，通常采用减小传感光纤的直径，使应变更集中于传感区域从而增大外界应变对传感器的调制，或者通过激发

收稿日期：2024－08－24.

* 通信作者：陈丽萍

更高阶包层模式，使传感器受应变调制时的包层模式的有效折射率变化减小，从而增大与纤芯模式的有效折射率差的改变量实现增敏。

在第一类方法中，如 Dong 等通过将空芯光纤直径拉锥至 75 μm，获得了应变灵敏度为－2.7 pm/με 的传感器[7]；Zhang 等提出了一种基于拉锥细芯光纤应变传感器，获得了应变灵敏度为 5.51 pm/με 的传感器[8]；Andé 等通过将多模光纤直径拉锥至 15 μm，获得了灵敏度为－23.7 pm/με 的传感器[9]，虽然有效提升了灵敏度，但其锥腰区直径过小，传感器结构脆弱难以有实际应用价值。在第二类方法中，Sun 等通过对多模光纤进行加热扭转激发出高阶包层模式，获得了应变灵敏度为－7 pm/με 的传感器[10]。在上述两类方案中均存在应变灵敏度提升不够明显，或应变灵敏度提升明显但传感器的机械强度和测量范围较低的问题。针对上述问题，设计了一种灵敏度、机械强度较高的基于螺纹槽的多模光纤 MZI 应变传感器，该传感器的结构为单模-螺纹槽多模-单模光纤结构。轴向应变导致多模光纤的结构参数发生变化，通过实时监测干涉谷的波长漂移量，实现应变的实时测量。

1 传感器结构及原理分析

1.1 螺纹槽多模光纤微结构传感器设计

所设计的螺纹槽多模光纤 MZI 为单模光纤-螺纹槽多模光纤-单模光纤干涉传感器，其结构如图 1 所示。

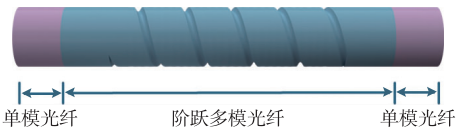


图 1 光纤干涉应变传感器结构图

传感器由两根单模光纤和一根长度为 4 cm 的多模光纤熔接而成。利用二氧化碳激光器在多模光纤中间位置刻制长度为 1.5 cm，深度为 10 μm 的凹槽，再利用氢氧焰对凹槽区域进行螺旋加工，最终形成螺纹槽结构。多模光纤的两侧分别中心正对熔接单模光纤作为输入与输出光纤，当左端单模光纤对多模光纤注光时，因芯径失配，在多模光纤纤芯中激发高阶模式，不同模式之间的有效折射率不同，被耦合至输出单模光纤纤芯中时发生干涉。

将多模光纤的长度设定为 4 cm，因为 4 cm 长的多模光纤接近自聚焦点[11]，能更有效地将单模光纤注入的基模激发出多个模式，从而提高模式耦合效率，使干涉条纹更加清晰，有助于提升测量的灵敏度。因为在氢氧焰螺旋加工过程中，火焰火头宽度为 1.2 cm，火焰从火头喷出的宽度为 1.5 cm，为了让凹槽区域充分加热后螺旋，制作凹槽长度为 1.5 cm。为保持传感器的机械强度和有较低的透射损耗，选择凹槽加工深度为 10 μm。

1.2 螺纹槽多模光纤微结构传感器的传感原理

对于螺纹槽多模光纤 MZI 的传感部分，其干涉输出光强可表示为[6]：

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\varphi \tag{1}$$

式中，I_1 和 I_2 分别表示相干涉的两束光的输出光强；φ 为两个模式的相位差，可以表示为 $\varphi = 2\pi\Delta n_{\text{eff}} L/\lambda$，其中 λ 为输入光波长，L 为传感光纤的轴向长度，Δn_{eff} 表示发生干涉的两束光的有效折射率差，可表示为 $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$，$n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 与 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 分别为纤芯模式与包层模式的有效折射率。当相位差 $\varphi = (2m+1)\pi$ 时，其中，$m = 0, 1, 2, \cdots$，干涉谷波长 λ_{dip} 可以表示为：

$$\lambda_{\text{dip}} = \frac{2(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})L}{2m+1} \tag{2}$$

由公式(2)可知，传感器干涉光束的有效折射率差和传感光纤的轴向长度发生变化，都会导致干涉谷波长移动。首先，当传感器受到轴向应变调制时，由于弹光效应，光纤纤芯与包层因材料弹光系数不同，会发生不同程度的材料折射率变化，进而使干涉光束的有效折射率差改变[12-13]。其次，当传感器受轴向拉伸时，因应变效应，传感区域的长度发生变化。所以，灵敏度可以表述为：

$$S = \frac{\partial\lambda_{\text{dip}}}{\partial\varepsilon} = \frac{2}{2m+1}\left[\left(\frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{co}}}{\partial\varepsilon} - \frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{\partial\varepsilon}\right)L + (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})\frac{\partial L}{\partial\varepsilon}\right] \tag{3}$$

式中，$\partial L/\partial\varepsilon$ 为应变引起的传感光纤的轴向长度变化，$\partial n_{\text{eff}}^{\text{co}}/\partial\varepsilon$ 与 $\partial n_{\text{eff}}^{\text{cl}}/\partial\varepsilon$ 分别为应变引起的纤芯模式与包层模式的有效折射率变化。

当在传感器的两固定点施加应变时，假设两固定点之间的距离为 L_{S}，拉伸距离为 ΔL_{S}，其施加的应变可表示为[14]：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_{\text{S}}}{L_{\text{S}}} = \frac{\Delta L_{\text{SMF}} + \Delta L_{\text{MMF}}}{L_{\text{SMF}} + L_{\text{MMF}}} \tag{4}$$

式中，L_{SMF} 与 L_{MMF} 分别为施加应变的两固定点之间的单模光纤与多模光纤的长度，ΔL_{SMF} 与 ΔL_{MMF} 分别为单模光纤与多模光纤的长度变化量。因此，单

模光纤与多模光纤上的应变可分别定义为：$\varepsilon_{SMF}=\Delta L_{SMF}/L_{SMF}$，$\varepsilon_{MMF}=\Delta L_{MMF}/L_{MMF}$。

当光纤在受到应变调制时，作用在光纤上的力与内部受到的应变可由公式(5)表示：

$$F=\sigma S=\varepsilon ES \tag{5}$$

式中，E 为光纤的杨氏模量，σ 为光纤内部受到的应力，S 为光纤的横截面积。由弹性力学可知，光纤在受到外界应变拉伸时，固定点之间的光纤在受到外界应变拉伸不变的情况下，作用在光纤上的力处处相等，沿着横截面积不相等的截面将存在不相等的应变载荷。施加到多模光纤与单模光纤的应变与其面积有如下关系[8]：

$$\varepsilon_{SMF}ES_{SMF}=\varepsilon_{MMF}ES_{MMF} \tag{6}$$

S_{SMF} 与 S_{MMF} 分别为单模光纤与多模光纤的横截面积，因此，施加到两个区域的应变取决于横截面积的比值，即：

$$\frac{\varepsilon_{SMF}}{\varepsilon_{MMF}}=\frac{S_{MMF}}{S_{SMF}} \tag{7}$$

根据公式(4)和公式(7)可得出施加应变 ε 与多模光纤受到应变 ε_{MMF} 的关系为：

$$\varepsilon_{MMF}=\frac{L_{SMF}+L_{MMF}}{L_{MMF}+L_{SMF}\dfrac{S_{MMF}}{S_{SMF}}}\varepsilon \tag{8}$$

因此，当单模光纤与多模光纤的横截面积不相等时，传感器受应变调制引起的波长相对偏移量可表示为：

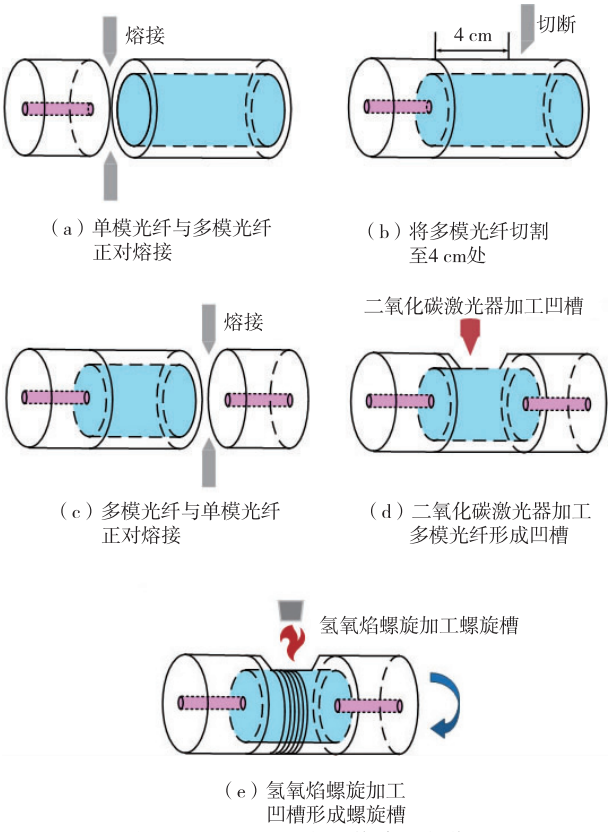
$$\Delta\lambda_{dip}=(1+P_S)\left(\frac{L_{SMF}+L_{MMF}}{L_{MMF}+L_{SMF}\dfrac{S_{MMF}}{S_{SMF}}}\right)\lambda_{dip}\frac{\Delta L_S}{L_S} \tag{9}$$

式中，$P_S=(L_{MMF}/\Delta n_{eff})\partial(\Delta n_{eff})/\partial L_D$ 为光纤的弹光系数。由于 S_{SMF} 是一个常数(直径为 125 μm 的光纤，横截面积约为 12 271.85 μm^2)，因此 $\Delta\lambda_{dip}$ 可以被视为有关 S_{MMF} 的函数，且与 S_{MMF} 成反比。由公式(8)和公式(9)可知，传感器的波长变化量受多模光纤横截面积与单模光纤横截面积比值的影响，通过减小多模光纤横截面积，使得多模光纤所受到的实际应变大于施加应变，当对光纤施加定量的应变时将会获得更大的波长漂移量从而提高传感器的应变灵敏度。

2　传感器制作及实验系统搭建

2.1　螺纹槽多模光纤微结构传感器的制作

螺纹槽多模光纤微结构传感器的制作过程如图 2 所示。首先，将单模光纤(SMF)(SMF-28e，Corning)与阶跃多模光纤(MMF)(SI105/125-22/250，YOFC)进行正对熔接，随后将 MMF 切割至 4 cm 并将其与 SMF 进行熔接，从而制成多模光纤传感器。再利用二氧化碳激光加工器(MC-E-B，Yueming Laser)在多模光纤加工一个凹槽。最后，利用氢氧火焰加热光纤凹槽并控制光纤轴向扭转，制作出螺纹槽结构。二氧化碳激光器加工凹槽的具体步骤如下：把制作完成的多模光纤传感器夹持于二氧化碳激光加工器的三维位移台夹具内，通过对三维台进行调整，让多模光纤位于激光焦点的正下方位置。在二氧化碳激光器的控制计算机上绘制一个长方形加工区，并设定加工参数，其中加工长度为 1.5 cm，加工次数为 1 次，功率为总功率的 80%，速度为 2 000 mm/s。再经过二氧化碳激光器的扫描加工后，光纤包层的上方出现熔融变形情况，上方的包层被激光去除掉，进而形成一个凹槽。



(a) 单模光纤与多模光纤正对熔接　(b) 将多模光纤切割至4 cm处

(c) 多模光纤与单模光纤正对熔接　(d) 二氧化碳激光器加工多模光纤形成凹槽

(e) 氢氧焰螺旋加工凹槽形成螺旋槽

图 2　螺纹槽光纤干涉应变传感器制作流程图

氢氧火焰加热扭转凹槽区从而制作出螺纹槽结构的具体步骤如下：将二氧化碳激光器加工形成的凹槽多模光纤传感器通过一侧的旋转器放入氢氧火焰螺旋加工机中(AFBT-7000，COUPLER)，调整传感器的位置直至多模光纤的正中间部分放于火焰头正下方，然后将光纤的另外一侧固定于磁吸平台上。

光纤经过氢氧火焰加热后处于熔融状态。打开高纯氢气生成仪（AYH-500，Beijing Tianyuze Technology），点燃火焰喷头。将旋转器的速度设置为 12 000 μm/s，时间设定为 3.2 s，夹具对光纤施加螺旋扭转力，由于对多模光纤进行凹槽加工后，光纤不再是圆对称结构，所以凹槽区域受到加热扭转后，会形成螺纹槽区域，螺纹槽多模光纤 MZI 干涉应变传感器制作完成。

2.2 实验系统的搭建

对螺纹槽多模光纤 MZI 进行应变实验测试，搭建实验装置如图 3 所示，传感器左端单模光纤连接光谱仪，右端单模光纤连接宽带光源。在进行数据测量时，先将传感器的传感区域调整至应变测量平台中心位置，再将光纤的一侧放置于应变平台顶部的光纤凹槽内并通过磁盖固定。然后拉直光纤使其水平，将另一侧的光纤固定于应变平台顶部。随后通过按动电机控制器调整三维位移台间的距离来控制对传感器施加的应变大小并记录下透射光谱。

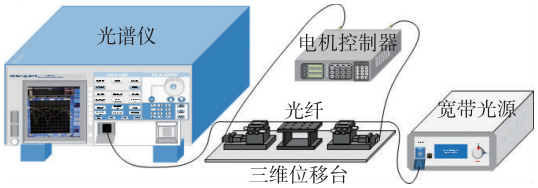


图 3 应变实验装置示意图

3 实验结果

对螺纹槽多模光纤 MZI 进行应变实验测试的数据如图 4 所示，在测量范围为 0～900 με，随着轴向应变的施加，螺纹槽多模光纤 MZI 发生干涉的波谷出现蓝移。由于传感器内有多种模式参与干涉，不同模式之间形成不同的干涉谷；并且，在受到应变调制时，由于不同模式的有效折射率改变量不同，产生的波长改变量不同，因此不同干涉谷的灵敏度则不同。

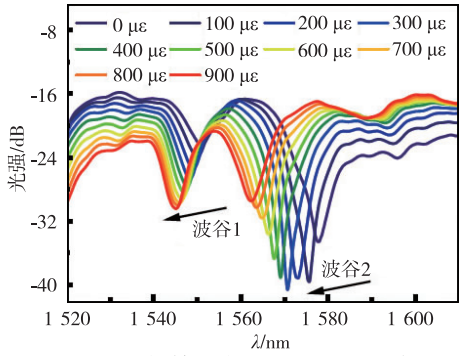


图 4 施加轴向应变时的干涉光谱

对应变传感器干涉光谱数据进行寻谷处理后，干涉谷波长与轴向应变的对应关系如图 5 所示。从图 5 可以看出，干涉谷波长随应变变化呈现线性关系，并且具有良好的线性度。经计算得出，波谷 1 的应变灵敏度为－6.44 pm/με，线性度为 0.979；波谷 2 的应变灵敏度为－16.89 pm/με，线性度为 0.981。波谷 2 的应变灵敏度高于波谷 1 的应变灵敏度，在实际的应变测量过程中，可以选择应变灵敏度更高的波谷 2 作为波长漂移的参考信号。

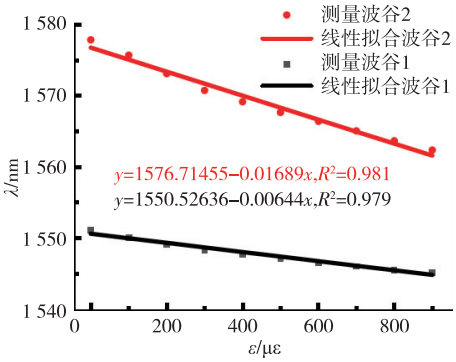


图 5 干涉谷波长与轴向应变的关系

如表 1 所示，与常见的几种光纤应变传感器进行性能比较，可以发现螺纹槽多模光纤 MZI 不仅具有较高的应变灵敏度，还具有较大的光纤直径，其传感器的物理强度较高。

表 1 增敏型光纤干涉应变传感器灵敏度比较表

参考文献	光纤结构	应变灵敏度/(pm·με^{-1})	应变检测范围/με	光纤最小直径/μm
[7]	单模-拉锥光纤-单模	2.7	0～2 100	75.527
[15]	拉锥单模光纤	6.8	0～300	60
[16]	拉锥光纤	8.62	0～3 200	51.3
[9]	单模-拉锥多模光纤-单模	23.69	0～500	15
本文	螺纹槽多模光纤	16.89	0～900	115

4 结论

本文提出了一种螺纹槽多模光纤 MZI，通过理论分析和实验验证，该传感器具有良好的应变传感性能。通过对多模光纤进行螺纹槽加工，让应变集中于多模光纤区域，使传感器的应变灵敏度大幅度提升，最高可达－16.89 pm/με。此外，该传感器制作简单、成本低、机械强度较高，在桥梁隧道、结构健康监测等领域具有较大的应用潜力。

参考文献：

[1] Li Y, Liu Z, Liu Y, et al. Simultaneous measurement of axial strain and lateral stress based on cascaded interference structure[J]. Optics Express, 2022, 30(7): 10942-10952.

[2] Xi J，Li J，Sun H，et al. In-situ monitoring of internal temperature and strain of solid-state battery based on optical fiber sensors[J]. Sensors and Actuators A：Physical，2022，347：113888.

[3] 董雷岗. 基于马赫-曾德尔干涉结构的光纤应变传感器研究[D]. 西安：西北大学，2020：1-53.
Dong Leigang. Research on fiber optic strain sensor based on Mach-Zehnder interference structure[D]. Xi'an：Northwest University，2020：1-53.

[4] 王　磊，张钰民，姚雾峰，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，2024，45(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，2024，45(4)：515-522.

[5] Ma L，Qi Y，Kang Z，et al. All-fiber strain and curvature sensor based on No-core fiber[J]. IEEE Sensors Journal，2014，14(5)：1514-1517.

[6] Zhang X，Liu C，Liu J，et al. Single modal interference-based fiber-optic sensor for simultaneous measurement of curvature and strain with dual-differential temperature compensation[J]. IEEE Sensors Journal，2018，18(20)：8375-8380.

[7] 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.

[8] Zhang H，Zhang M，Kang J，et al. High sensitivity fiber-optic strain sensor based on modified microfiber-assisted open-cavity Mach-Zehnder interferometer[J]. Journal of Lightwave Technology，2021，39(13)：4556-4563.

[9] Andre R M，Biazoli C R，Silva S O，et al. Strain-temperature discrimination using multimode interference in tapered fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters，2013，25(2)：155-158.

[10] Sun Y，Liu D，Lu P，et al. Dual-parameters optical fiber sensor with enhanced resolution using twisted MMF based on SMS structure[J]. IEEE Sensors Journal，2017，17(10)：3045-3051.

[11] 高麒麟. 单模—多模—单模光纤结构的研究与应用[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2009：1-62.
Gao Qilin. Research and application on single-multi-single mode fiber structure[D]. Harbin：Harbin Engineering University，2009：1-62.

[12] 苑立波. 温度和应变对光纤折射率的影响[J]. 光学学报，1997，17(12)：1713-1717.
Yuan Libo. Effect of temperature and strain on fiber optic refractive index[J]. Acta Optica Sinica，1997，17(12)：1713-1717.

[13] Gao S，Baker C，Chen L，et al. High-sensitivity temperature and strain measurement in dual-core hybrid tapers[J]. IEEE Photonics Technology Letters，2018，30(12)：1155-1158.

[14] 李依伦，李　敏. 材料力学中应力与应变的名称与正负定义[J]. 力学与实践，2017，39(5)：484-488.
Li Yilun，Li Min. The names and plus-minus definitions of stress and strain in mechanics of material[J]. Mechanics in Engineering，2017，39(5)：484-488.

[15] Abbas L G，Ai Z，Mumtaz F，et al. Temperature and strain sensing with hybrid interferometer [J]. IEEE Sensors Journal，2021，21(23)：26785-26792.

[16] Zhao Y，Chen M Q，Peng Y. Tapered hollow-core fiber air-microbubble Fabry-Perot interferometer for high sensitivity strain measurement [J]. Advanced Materials Interfaces，2018，5(21)：1800886.

作者简介：

陈丽萍(1999—)，女，四川省南充市人，硕士研究生，主要研究方向为光纤传感；

王　文(1969—)，男，四川省西充县人，教授，主要研究方向为高校信息系统开发。