

# 基于偏芯熔接光纤的应力与折射率传感器

王 旗, 邹 辉, 韦 玮

南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210046

**摘要** 基于偏芯熔接技术构建了一种新型马赫-曾德尔干涉(MZI)原理的应力与折射率光纤传感器。该传感器是由一段单模光纤的两端实施偏芯熔接而成。利用光纤包层模、纤芯模对应力和折射率的敏感特性,实现对外界折射率和应力的测量。研究表明,施加轴向应力范围为 $0\sim 500\ \mu\epsilon$ 时,传感器的近红外透射光谱的波长出现蓝移,在 $1585\ \text{nm}$ 附近干涉谷处的应力灵敏度约为 $-7.00\ \text{pm}/\mu\epsilon$ ;外界折射率在 $1.331\sim 1.398$  RIU(RIU为单位折射率)范围时,传感器的近红外透射光谱的波长出现蓝移,在 $1570\ \text{nm}$ 附近干涉谷处的折射率灵敏度约为 $-55.223\ \text{nm}/\text{RIU}$ ;且均具有良好的线性拟合效果。该传感器也可应用于温度等其他参数测量,具有非常广泛的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 偏芯熔接; 干涉; 蓝移

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.1006005

## Strain and Refractive Index Sensor Based on Core-Offset Splicing Fibers

Wang Qi, Zou Hui, Wei Wei

College of Optoelectronic Engineering, Nanjing Post and Communications University, Nanjing, Jiangsu 210046, China

**Abstract** A novel fiber sensor for measuring strain and refractive index based on fiber Mach-Zehnder interference (MZI) principle and core-offset splicing technology was designed. The sensor was composed of a single mode fiber at both ends with core-offset fibers. Measurement of external refractive index and strain was realized based on sensitive characteristic of optical fiber cladding mode and core mode to strain and refractive index. The tested results indicate that wavelength of near infrared transmission spectrum shifts to shorter wavelength with a sensitivity about  $-7.00\ \text{pm}/\mu\epsilon$  at the dips  $1585\ \text{nm}$  under an axial strain  $0\sim 500\ \mu\epsilon$ ; the wavelength shifts to shorter wavelength side with a sensitivity about  $-55.223\ \text{nm}/\text{RIU}$  at the dips  $1570\ \text{nm}$  under  $1.331\sim 1.398$  RIU refractive index, where RIU is refractive index unit. The fitting has a good linearity. This fiber sensor can also be applied to other sensing fields and have good prospects.

**Key words** fiber optics; fiber sensors; core-offset splicing; interference; blue shift

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 120.3180

## 1 引 言

光纤传感器目前已被广泛地应用于人们生活的各个方面,在国防、工业、医疗、建筑安全、科学研究等领域发挥着极其重要的作用<sup>[1-2]</sup>。近年来,关于不同结构的光纤传感器的研究已有较多报道,如基于光纤光栅<sup>[3-4]</sup>、光子晶体光纤(PCF)<sup>[5-6]</sup>、迈克耳孙干涉仪<sup>[7]</sup>以及各种微型结构<sup>[8-9]</sup>的传感器,均被应用于外界应力和折射率的测量。2012年,Xu等<sup>[10]</sup>提出的PCF应变传感器,对应变的灵敏度为 $3.02\ \text{pm}/\mu\epsilon$ ;2015年,康泽新等<sup>[11]</sup>提出了一种基于耦合型双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力双参数解耦测量的全光纤型传感系统,对应力的灵敏度为 $1.25\ \text{pm}/\mu\epsilon$ ;2016年,余少伟等<sup>[12]</sup>提出了一种基于环形腔光纤激光器的应力传感

**收稿日期:** 2017-05-08; **收到修改稿日期:** 2017-06-01

**基金项目:** 国家自然科学基金(61405096)、南京邮电大学优秀人才支持计划项目(NY214158)

**作者简介:** 王 旗(1995—),男,硕士研究生,主要从事特种光纤方面的研究。E-mail: 15205185300@163.com

**导师简介:** 韦 玮(1960—),女,博士,教授,主要从事光电功能材料与器件,以及特种光纤材料与应用等方面的研究。

E-mail: weiwei@njupt.edu.cn(通信联系人)

器,其在波长 1557 nm 附近传感的灵敏度为  $-3 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ;2014 年,童峥嵘等<sup>[13]</sup>提出的多模光纤传感器折射率灵敏度可以达到  $32.2 \times 10^3 \text{ pm}/\text{RIU}$ (RIU 为单位折射率);2016 年,李辉栋等<sup>[14]</sup>提出使用化学腐蚀法,制成光纤气泡级联结构的马赫-曾德尔干涉(MZI)液体折射率传感器,中心波长的灵敏度为  $-216.21 \text{ dB}/\text{RIU}$ ;刘颖刚等<sup>[15]</sup>提出一种微纳结构光纤 Bragg 光栅传感器,对折射率灵敏度达到  $14.41 \times 10^3 \text{ pm}/\text{RIU}$ 。但是上述各种类型的光纤传感器均存在制作复杂、结构繁琐、成本高昂、灵敏度较低等问题。

本文基于 MZI 原理,利用偏芯熔接方法构造一种新型应力与折射率光纤传感器,由光纤包层模、纤芯模进行干涉产生对应力和折射率的敏感特性,实现对应力和折射率的测量。传感器在不同的应力下,其干涉光谱的波长向短波方向漂移,应力灵敏度约为  $-7.00 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ;当光纤传感器浸入不同浓度的甘油水溶液中时,其干涉光谱的波长向短波方向漂移,折射率灵敏度为  $-55.223 \times 10^3 \text{ pm}/\text{RIU}$ ,这种新型光纤传感器具有结构简单、制作简易、灵敏度高、成本低等优点。

## 2 光纤传感器结构和基本原理

新型应力与折射率光纤传感器结构如图 1 所示。该光纤传感器由 3 段来自于 CORNING 公司的单模光纤 SMF-28e(SMF)构成,纤芯和包层半径分别为  $4.1 \mu\text{m}$  和  $62.5 \mu\text{m}$ ,通过偏芯熔接,可以实现模间干涉。光信号输入到左边 SMF 的纤芯时激发出纤芯模,再经过熔接点  $A_1$  时,一部分纤芯模通过 SMF<sub>1</sub> 的纤芯传输到 SMF,另一部分纤芯模耦合进包层从而激发出包层模。当这些模式传输到熔接点  $A_2$  时,纤芯模之间发生耦合以及纤芯模和包层模发生耦合,使能量重新分布并且形成干涉谷。在传感 SMF<sub>1</sub> 包层中,众多的模式被激发,但总是有一个包层模处于主导地位。处于主导地位的包层模和纤芯模发生干涉,产生干涉光谱;处于次要地位的包层模与纤芯基模的干涉仅对干涉光谱起到调制作用。

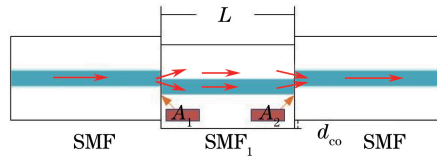


图 1 光纤传感器结构及光信号传输示意图(偏移量:  $d_{co}=6 \mu\text{m}$ 、SMF<sub>1</sub> 长度:  $L=4 \text{ cm}$ )

Fig. 1 Structure of optical fiber sensor and optical signal transmission(offset:  $d_{co}=6 \mu\text{m}$ , SMF<sub>1</sub> length:  $L=4 \text{ cm}$ )

SMF<sub>1</sub> 输出端的总光强  $I$  为

$$I = I_1 + I_2 + 2I_1 I_2 \cos(2\pi L \Delta n / \lambda), \quad (1)$$

式中  $I_1$ 、 $I_2$  分别为 SMF<sub>1</sub> 中纤芯和包层的光强,  $\lambda$  为中心波长,  $\Delta n$  为纤芯与包层间的有效折射率差。当传输谱中的信号幅度达到其信号的最小值即波谷时,相应位置满足  $\pi$  的奇数倍,即

$$2m + 1 = 2L \Delta n / \lambda. \quad (2)$$

对(2)式中  $\lambda$  求导数可得

$$|\Delta \lambda| = \lambda^2 / L \Delta n. \quad (3)$$

由(3)式可知,在该干涉型滤波器的传输谱中,相邻波谷的波长间隔与中心波长、偏芯熔接光纤长度、纤芯和包层的有效折射率差有关。

当 SMF<sub>1</sub> 受到轴向应力作用时,其长度会发生微小变化。因为掺锗石英纤芯的弹光系数大于纯石英构成的包层的弹光系数,所以纤芯和包层之间的有效折射率差减小。此时,传输谱线也会受到影响。设温度恒定,则输出波长的变化量可以表示为<sup>[16]</sup>

$$\Delta \lambda / \lambda = -(1 + 2\nu + p_e) \epsilon, \quad (4)$$

式中  $\nu$  为光纤的泊松系数,  $p_e$  为有效弹光系数,  $\epsilon$  为单位长度的形变量。从(4)式可以看出,当施加轴向应力时,透射光谱曲线会向短波方向漂移。

SMF<sub>1</sub> 周围环境的折射率增加,使其包层的有效折射率增大,但由于纤芯的半径相对较小,因此纤芯基本上不会受到外界环境折射率变化的影响,纤芯有效折射率保持不变。将(2)式对折射率求导可得

$$\frac{\partial \lambda}{\partial n} = \frac{2L}{2m + 1} \cdot \frac{\partial \Delta n}{\partial n}, \quad (5)$$

式中 $(\partial\Delta n)/(\partial n) < 0$ , 所以 $(\partial\lambda)/(\partial n) < 0$ , 因此传感器干涉谱中干涉谷处的波长随着环境折射率的增加向短波方向漂移。

根据上述设计思想及理论推导, 设计制备应力与折射率的测试装置, 测试系统如图 2 所示。整个传感系统由宽谱光源(BBS, KOHERAS, super Kuersa)、传感器、测试平台以及光谱分析仪(OSA, YOKOGAWA, AQ6375)组成。

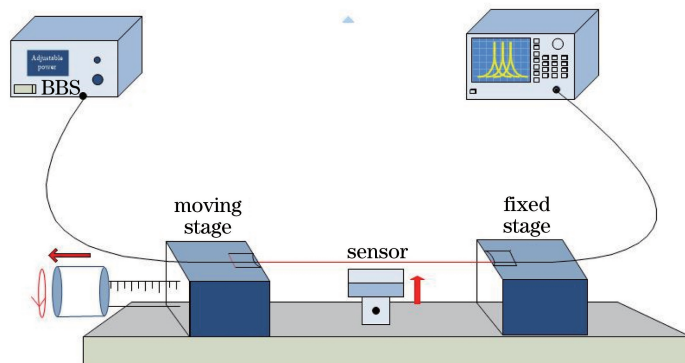


图 2 光纤应力及折射率传感测试系统示意图

Fig. 2 Experimental setup for strain and refractive index measurement

### 3 实验结果与讨论

为了研究光纤纤芯偏移量与干涉消光比之间的关系, 制备了一系列不同长度及偏移量的偏芯光纤滤波器, 实验结果如图 3(a)所示。当 SMF<sub>1</sub> 长度不变时, 在偏移量为 6 μm 时, 干涉现象最明显。选取 1545 nm 附近两个透射波谷为参考点, 测量不同长度的 SMF<sub>1</sub> 时透射光谱的自由光谱范围(FSR)值见图 3(b)。由图 3(b)可知, FSR 值与 SMF<sub>1</sub> 的长度 L 成反比, 即 FSR 值与 1/L 具有良好的线性关系, 相关系数的平方 R<sup>2</sup> 为 0.9834, 拟合性较好, 该结果与理论结果完全相符。当 SMF<sub>1</sub> 长度过短时, FSR 过宽, 不利于测试; 当 SMF<sub>1</sub> 过长时, 由于包层外表面直接和损耗较大的介质接触会导致较大的泄露损耗, 故偏芯熔接光纤的偏移量设置为 d<sub>co</sub> = 6 μm, 长度为 L = 4 cm。

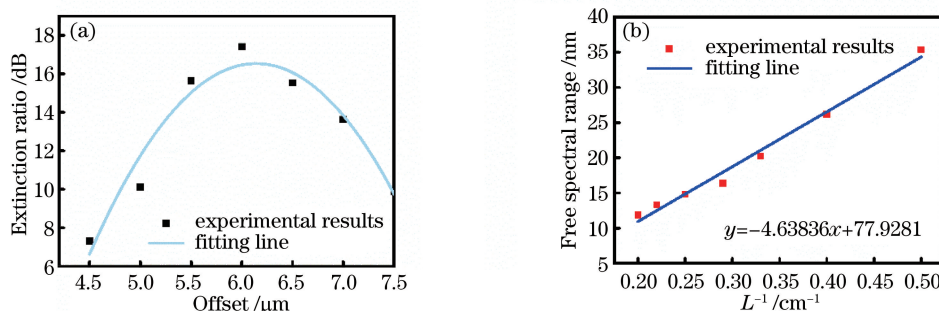


图 3 (a) SMF<sub>1</sub> 消光比与纤芯偏移量的关系; (b) FSR 与 1/L 的关系

Fig. 3 (a) Relationship between extinction ratio and SMF<sub>1</sub> core-offset; (b) relationship between free spectral range and 1/L

光纤传感器在室温空气中的近红外透射光谱如图 4 所示。由图 4 可知, 其干涉消光比较好, FSR 合适, 损耗较低。选取 1570 nm 和 1585 nm 附近的波谷, 分别观察折射率和应力的响应特性。实验中操作移动平台在恒温 20 °C 下, 以每步 100 με 的应力依次增加, 应力变化范围为 0~500 με。

随着施加在传感器上应力的增加, 传感器传输透射光谱波峰/波谷向短波长方向移动, 如图 5(a)所示, 在 0~500 με 范围内波长漂移量约为 3.5 nm, 与(3)式和(4)式理论分析结果一致。经过多次测试发现, 该传感器的应力响应特性具有良好的重复性。在施加应力变化情况下, 传感器透射光谱中波长 1585 nm 附近, 波谷随着应力的变化曲线如图 5(b)所示。传感器对应力的感应灵敏度为 -7.00 pm/με。与其他应力光纤传感器相比, 灵敏度较高。此外, 所施应力与波长漂移量之间具有良好的线性关系, 相关系数的平方 R<sup>2</sup> 为

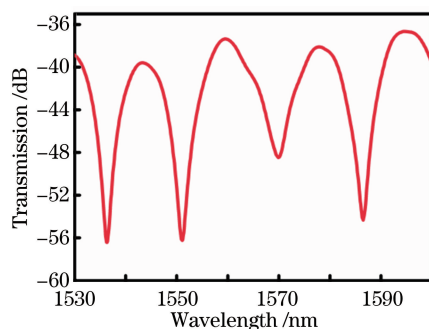


图 4 光纤传感器近红外透射光谱 ( $d_{co}=6 \mu\text{m}, L=4 \text{ cm}$ )

Fig. 4 Near infrared transmission spectrum of optical fiber sensor ( $d_{co}=6 \mu\text{m}, L=4 \text{ cm}$ )

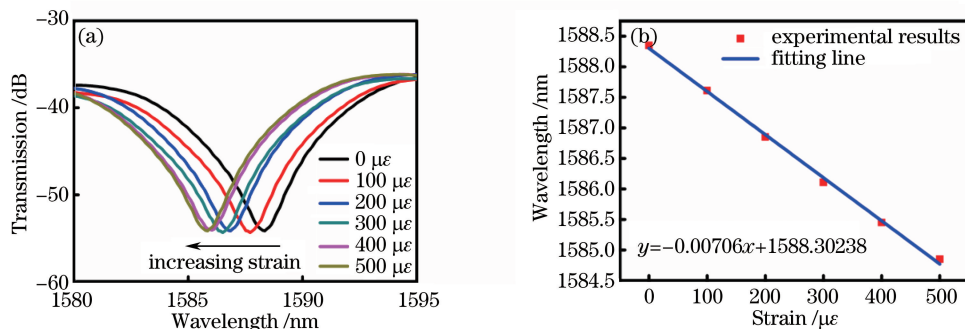


图 5 (a) 光纤传感器应力透射光谱; (b) 特征波长干涉谷与应力的关系

Fig. 5 (a) Strain transmission spectrum of optical fiber sensor; (b) relationship between interference dips of characteristic wavelength and strain

0.9977, 拟合性较好。

为了研究该传感器的折射率特性, 配制了质量分数为 0~50% 的甘油水溶液。实验发现, 室温下随着溶液的质量分数增加, 其折射率增大, 对应的折射率范围为 1.331~1.398 RIU。

传感器在恒温 20 °C 条件下浸在质量分数分别为 0、20%、30%、40% 和 50% 的甘油水溶液中时光纤传感器的透射光谱如图 6(a) 所示。由图 6(a) 可知, 随着所测溶液折射率的增大, 光纤传感器光谱曲线向短波长方向移动, 这与理论分析结果一致。在折射率 1.331~1.398 RIU 范围内, 波长漂移量为 3.7 nm, 传感器的折射率灵敏度为  $-55.223 \text{ nm/RIU}$ 。可用品质因子 (FOM,  $\delta$ ) 来衡量该折射率传感器的整体性能, 品质因子的定义为  $\delta = S/\omega_{1/2}$ , 其中  $\omega_{1/2}$  为透射谱半峰全宽,  $S$  为灵敏度。其  $\delta$  值为  $10.85 \text{ RIU}^{-1}$ , 与其他光纤传感器相比, FOM 相对较高。干涉谷的波长随外界折射率的变化如图 6(b) 所示, 其线性拟合曲线相关系数的平方  $R^2$  为 0.9962, 拟合性较好。

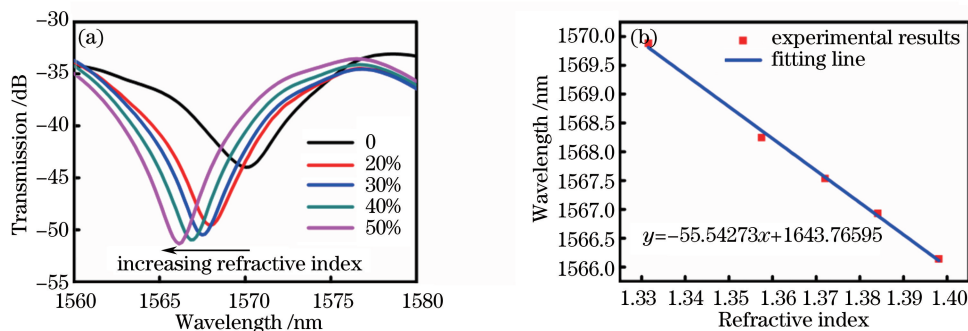


图 6 (a) 不同折射率中传感器的光谱; (b) 特征波长干涉谷与折射率的关系

Fig. 6 (a) Transmission spectra of sensor under different refractive indexes; (b) relationship between interference dips of characteristic wavelength and refractive index

## 4 结 论

基于 MZI 原理,设计制作了一种新型单模光纤偏芯结构光纤传感器。并选取了位于 1585 nm 和 1570 nm 两处的干涉谷进行了应力与折射率的测量。结果表明,干涉谷的特征波长变化与应力、折射率具有良好的线性关系,在  $0\sim 500\ \mu\epsilon$  范围内,随着应力的增大,其透射光曲线向短波方向漂移,应力灵敏度约为  $-7.00\ \text{pm}/\mu\epsilon$ 。在  $1.331\sim 1.398$  RIU 范围内,随着外界折射率的增大,其透射光曲线向短波方向漂移,折射率灵敏度为  $-55.223\ \text{nm}/\text{RIU}$ 。该传感器具有结构简单、制作简易、体积小和灵敏度较高等优点。在生物医学、航天航空、环境检测等领域具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Pevec S, Donlagic D. High resolution, all-fiber, micro-machined sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 16241-16253.
- [2] Wu D, Zhu T, Chiang K S, *et al.* All single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(5): 805-810.
- [3] Zhou D P, Wei L, Liu W K, *et al.* Simultaneous measurement for strain and temperature using fiber Bragg gratings and multimode fibers[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 1668-1672.
- [4] M B Reid, Özcan M. Temperature dependence of fiber optic Bragg gratings at low temperatures [J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(1): 237-240.
- [5] Shi Weihua, Wu Jing. Photonic crystal fiber sensor based on surface plasmonic and directional resonance coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0206002.  
施伟华, 吴 静. 基于表面等离子体共振和定向耦合的光子晶体光纤传感器[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0206002.
- [6] Dong B, Hao J Z, Liaw C Y, *et al.* Simultaneous strain and temperature measurement using a compact photonic crystal fiber inter-modal interferometer and a fiber Bragg grating[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(32): 6232-6235.
- [7] Tian Z B, Yam S S H, Looock H P. Refractive index sensor based on an abrupt taper Michelson interferometer in a single-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(10): 1105-1107.
- [8] 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.
- [9] Wong W C, Chan C C, Zhang Y F, *et al.* Miniature single-mode fiber refractive index interferometer sensor based on high order cladding mode and core-offset[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(5): 359-361.
- [10] Xu F, Li C, Ren D X, *et al.* Temperature-insensitive Mach-Zehnder interferometric strain sensor based on concatenating two waist-enlarged fiber tapers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(7): 070603.
- [11] Kang Zexin, Sun Jiang, Ma Lin, *et al.* Decoupling dual measurement sensor system of temperature and strain based on twin-core fiber cascaded with fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0506004.  
康泽新, 孙 将, 马 林, 等. 基于双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力解耦双测量传感系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0506004.
- [12] Yu Shaowei, Pei Li, Wen Xiaodong, *et al.* Strain sensor based on ring cavity fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0222004.  
余少伟, 裴 丽, 温晓东, 等. 基于环形腔光纤激光器的应力传感器[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 0222004.
- [13] Tong Zhengrong, Han Wei, Cao Ye. Fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode fiber core-offset[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0106004.  
童峥嵘, 韩 伟, 曹 晔. 基于多模光纤偏芯熔接实现温度和折射率同时测量的光纤传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0106004.
- [14] Li Huidong, Fu Haiwei, Shao Min, *et al.* In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on cascading fiber air bubble for high sensitivity liquid refractive index measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(7): 0706006.  
李辉栋, 傅海威, 邵 敏, 等. 基于光纤气泡级联的高灵敏度马赫曾德干涉液体折射率传感器[J]. *光子学报*, 2016, 45(7): 0706006.
- [15] Liu Yinggang, Zhang Wei, Jia Zhen'an, *et al.* Experimental investigation on micro/nanofiber Bragg grating sensor for refractive index of liquid[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2016, 27(5): 486-490.  
刘颖刚, 张 伟, 贾振安, 等. 微纳光纤布拉格光栅液体折射率传感实验研究[J]. *光电子 • 激光*, 2016, 27(5): 486-490.
- [16] Li E B. Temperature compensation of multimode-interference-based fiber devices[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(14): 2064-2066.