

# 基于细芯光纤内嵌马赫-曾德尔干涉仪的应变传感器

孙 苗 徐 贲 李 裔

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要** 研究了基于细芯光纤内嵌马赫-曾德尔干涉仪的光纤应变传感器, 通过将一根细芯光纤熔接在两根单模光纤(SMF)之间, 构成了一种光纤内干涉的马赫-曾德尔干涉仪。当单模光纤中的光耦合进细芯光纤时, 一部分光耦合进细芯光纤纤芯作为芯模传输, 另一部分光耦合进细芯光纤包层中激发出包层模沿包层传输, 当芯模和包层模再耦合进单模光纤时发生干涉。当应变作用在细芯光纤上时, 干涉条纹发生漂移。通过解调干涉条纹对应变的漂移量实现应变测量, 在  $0\sim 2000\ \mu\epsilon$  的测量范围内, 测得的应变灵敏度为  $-1.83\ \text{pm}/\mu\epsilon$ , 并且实验结果与理论分析有很好的 consistency。该传感器具有体积小、制作简单、灵敏度高等优点。

**关键词** 传感器; 光纤传感器; 应变测量; 马赫-曾德尔干涉仪; 细芯光纤

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.s114006

## A Strain Sensor Based on In-Line Mach-Zehnder Interferometer with Thin-Core Fiber

Sun Miao Xu Ben Li Yi

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract** A optical fiber strain sensor based on in-line Mach-Zehnder interferometer is proposed. The in-line Mach-Zehnder interferometer is fabricated by simply splicing a section of thin-core fiber between two single-mode fibers (SMFs). When the light couples into the thin-core fiber, part of the light couples into the core of the thin-core fiber and propagates as the core mode. While part of the light couples into the cladding of the thin-core fiber, and many cladding modes are excited. The lights at the core mode and the cladding modes in the thin-core fiber are prone to interference when recoupling into the SMF. By interrogating the wavelength shifts of the interference spectrum, the strain sensor is demonstrated. A strain sensitivity of  $-1.83\ \text{pm}/\mu\epsilon$  is achieved within the measurement range from 0 to  $2000\ \mu\epsilon$ . The experimental results agree well with theoretical analyses. This strain sensor has the advantages of small size, simple fabrication, and high sensitivity.

**Key words** sensors; fiber sensor; strain measurement; Mach-Zehnder interferometer; thin-core fiber

**OCIS codes** 060.2300; 060.2310; 060.2370

### 1 引 言

随着光纤技术的发展, 光纤传感技术得到了广泛的应用。与传统的电传感器相比, 光纤传感器具有抗电磁干扰、体积小、质量轻、灵敏度高、能在恶劣环境中使用等优点。因此, 引起了各高校、研究所的关注, 设计出满足测量各种参数需要的传感器。如温度、应变、湿度、折射率传感器等<sup>[1~4]</sup>。马赫-曾德

尔干涉仪是一种重要的光纤传感结构, 该结构的传感器具有灵敏度高、成本低等优点, 具有广泛的应用价值。基于光纤内嵌马赫-曾德尔干涉仪的传感器结构主要由单模光纤-多模光纤-单模光纤结构<sup>[5,6]</sup>、光纤错位熔接<sup>[7]</sup>、光纤锥形结构<sup>[8,9]</sup>、光子晶体光纤结构<sup>[10]</sup>和激光加热导致微弯形变<sup>[11]</sup>等。近来利用光纤的内模干涉构成的马赫-曾德尔干涉仪吸引了

收稿日期: 2012-01-01; 收到修改稿日期: 2012-02-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61007051)和浙江省自然科学基金(Y5090150)资助课题。

作者简介: 孙 苗(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤传感及器件方面的研究。E-mail: sunmiao712@163.com

导师简介: 李 裔(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光纤传感与器件方面的研究。E-mail: liyinus@gmail.com

(通信联系人)

很多的关注。吴强等<sup>[12]</sup>通过在细芯光纤表面沉积湿度敏感材料制作了湿度传感器,顾波波<sup>[13]</sup>制作了PH传感器,夏天昊等<sup>[14]</sup>利用基于细芯光纤的马赫-曾德尔干涉仪做折射率传感器。但是利用该结构做应变传感器的研究还很少。

本文提出了一种基于马赫-曾德尔干涉仪的光纤应变传感器。通过在细芯光纤两端熔接单模光纤制成马赫-曾德尔干涉仪的干涉臂。当应变作用于传感器时,测量细芯光纤中芯模与包层模干涉形成的干涉条纹发生的漂移,通过解调波长的移动就可以实现应变传感。在  $0\sim 2000\ \mu\epsilon$  的测量范围下,得到的应变灵敏度为  $-1.83\ \text{pm}/\mu\epsilon$ 。该结果与理论分析有很好的一致性。该传感器具有结构简单、损耗低、灵敏度高等优点。

## 2 光纤应变传感器原理

图1为基于细芯光纤的马赫-曾德尔干涉仪应变传感器的实验结构图。将一段长为  $L$  的细芯光纤熔接在两根单模光纤之间,制成马赫-曾德尔干涉仪。实验中所使用的细芯光纤(Nufern 405HP,波长  $515\ \text{nm}$  时模场直径为  $(3.5\pm 0.5)\ \mu\text{m}$ ,纯石英纤芯)长为  $155.0\ \text{mm}$ ,纤芯直径约为  $3\ \mu\text{m}$ 。将细芯光纤熔接在两根普通单模光纤之间,构成马赫-曾德尔干涉仪。采用宽带光源(BBS)作为光源,输出的干涉光谱通过光谱仪 OSA(Yokogawa AQ6370C)接收。将干涉仪被固定在两个间距为  $20\ \text{cm}$  的平移台上,通过保持一个平移台不动,移动另一个平移台使得光纤被拉伸,对光纤外加应变作用。

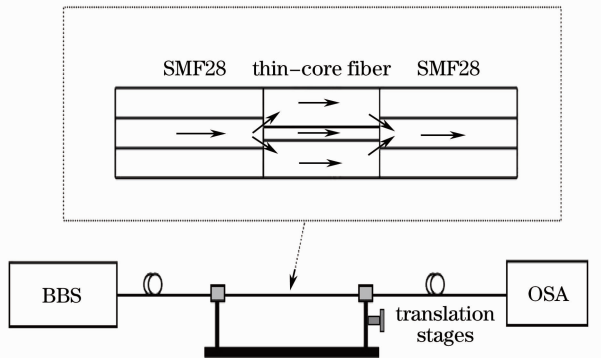


图1 光纤应变传感器的实验结构图

Fig. 1 Schematic of experimental setup for strain sensor

当单模光纤纤芯中传输的基模通过单模光纤-细芯光纤熔接点时,由于模场不匹配等原因,一部分光沿细芯光纤纤芯传输,另一部分光耦合进细芯光纤的包层,激发出包层模在光纤包层内传输。当芯模和包层模通过细芯光纤-单模光纤熔接点耦合进

单模光纤纤芯时,芯模和包层模发生干涉。

当只考虑芯模和一阶包层模干涉时,传感器的传输光强可以表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{2\pi(n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl}}^{\text{eff}})L}{\lambda}\right], \quad (1)$$

式中  $I_1$  和  $I_2$  分别表示芯模光强和包层模光强, $\lambda$  表示空气中自由空间光波长, $L$  表示细芯光纤的长度, $n_{\text{co}}^{\text{eff}}, n_{\text{cl}}^{\text{eff}}$  分别表示芯模和包层模的有效折射率。由(1)式可看出,当相位为  $2\pi$  的整数倍时,干涉光强达到最小值,即  $I = I_{\text{min}}$ 。当

$$\frac{2\pi(n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl}}^{\text{eff}})L}{\lambda_v} = (2k + 1)\pi, \quad (2)$$

式中  $k$  为整数, $\lambda_v$  表示  $k$  阶干涉波谷的中心波长。 $S = \lambda^2/(nL)$  为干涉条纹的自由光谱范围,其中  $n = n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl}}^{\text{eff}}$ 。当应变作用在细芯光纤上时,由应变引起的细芯光纤的相位差可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_v}(\Delta nL + n\Delta L), \quad (3)$$

式中  $\Delta n = \Delta n_{\text{co}}^{\text{eff}} - \Delta n_{\text{cl}}^{\text{eff}}$  表示由光弹效应引起的光纤折射率的变化。基于单模光纤中光弹效应的分析,光纤中有效折射率的变化与外加的应变有关,并且存在系数关系,即光弹系数<sup>[15]</sup>。假设  $\Delta n_{\text{co}}^{\text{eff}}$  和  $\Delta n_{\text{cl}}^{\text{eff}}$  光弹系数不同,表示方法相似,可以表示为

$$\Delta n_{\text{co}}^{\text{eff}} = P_{\text{co}} n_{\text{co}}^{\text{eff}} \epsilon, \quad (4a)$$

$$\Delta n_{\text{cl}}^{\text{eff}} = P_{\text{cl}} n_{\text{cl}}^{\text{eff}} \epsilon, \quad (4b)$$

式中  $P_{\text{co}}$  和  $P_{\text{cl}}$  分别为纤芯和包层的有效光弹系数。把(4)式代入(3)式,又由波长漂移与相位差关系  $\Delta\lambda = S\Delta\varphi/(2\pi)$ ,可得波长漂移量与应变的关系为

$$\Delta\lambda = \lambda(1 + P_e)\epsilon, \quad (5)$$

式中  $P_e = \frac{P_{\text{co}} n_{\text{co}}^{\text{eff}} - P_{\text{cl}} n_{\text{cl}}^{\text{eff}}}{n}$  表示应变引起的细芯光纤折射率的变化系数。从(5)式可以看出波长漂移量与应变成比例,因此当外加应变时,光谱的漂移量呈线性变化趋势。

## 3 应变实验结果

图2为马赫-曾德尔干涉应变传感器不同应变时对应的透射光谱。实验过程中装置的环境温度控制在  $(28\pm 0.1)\ ^\circ\text{C}$ 。测量时光谱仪的分辨率设置为  $0.05\ \text{nm}$ 。实验发现,随着外加应变的增加,传感器的传输光谱向短波长方向漂移。通过增大平移台的间距,外加的应变可以从  $0$  增大到  $2000\ \mu\epsilon$ 。选取干涉光谱中从  $1480\ \text{nm}$  到  $1600\ \text{nm}$  范围内的  $5$  个波峰和  $4$  个波谷,分别命名  $\text{peak}1, 2, \dots, 5$  和  $\text{dip}1, \dots,$

4,分别记录这5个波峰和4个波谷在0~2000  $\mu\epsilon$  传输谱的波长漂移情况。图3为应变从0增大到2000  $\mu\epsilon$  时,5个波峰和4个波谷波长漂移对应外加应变的关系。表1为波长的漂移量以及该传感器的应变灵敏度。由图3和表1可知,波长的漂移量与

外加的应变呈线性关系,与理论分析中(5)式一致。最大的应变灵敏度为-1.84 pm/ $\mu\epsilon$ (dip4),最小的灵敏度为-1.27 pm/ $\mu\epsilon$ (peak3和dip1)。考虑dip4,波长的漂移量为-3.92 nm,计算出(5)式中对应的系数为-2.256。

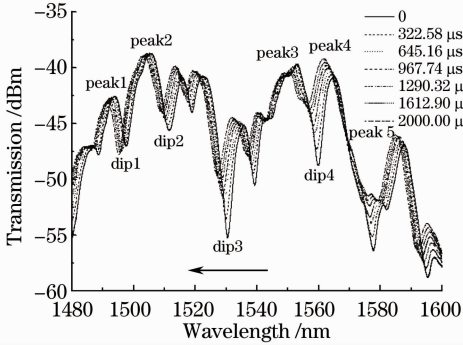


图2 不同应变作用下传感器的透射光谱  
Fig. 2 Transmission spectrum of the strain sensor versus different strains

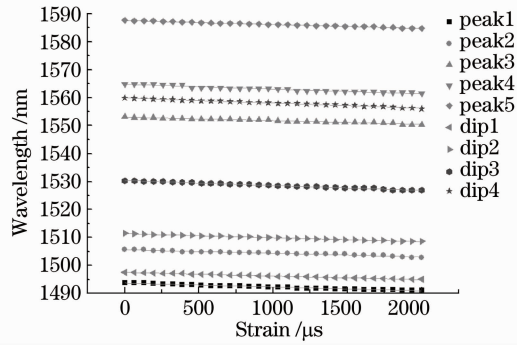


图3 0~2000  $\mu\epsilon$  的应变范围内传感器对应的波长漂移  
Fig. 3 Wavelength shifts of the strain sensor within the measurement range from 0 to 2000  $\mu\epsilon$

表1 光纤传感器波长漂移量和灵敏度

Table 1 Wavelength shifts and sensitivity of strain sensor

	Wavelength shift /nm	Equation	R-square	Sensitivity / (pm/ $\mu\epsilon$ )	Standard error / $10^{-5}$
Peak1	1491.17-1493.79=-2.62	$y=-0.00140x+1493.750$	0.97853	-1.40	3.71
Peak2	1502.82-1505.66=-2.84	$y=-0.00128x+1505.660$	0.96035	-1.28	4.65
Peak3	1550.35-1553.20=-2.85	$y=-0.00127x+1553.051$	0.96723	-1.27	4.21
Peak4	1561.55-1564.86=-3.31	$y=-0.00172x+1564.815$	0.95010	-1.72	7.05
Peak5	1584.74-1587.62=-2.88	$y=-0.00142x+1587.557$	0.99095	-1.42	2.43
Dip1	1495.10-1497.58=-2.48	$y=-0.00127x+1497.562$	0.99519	-1.27	1.58
Dip2	1508.70-1511.54=-2.84	$y=-0.00143x+1511.390$	0.99119	-1.43	2.41
Dip3	1526.97-1530.34=-3.37	$y=-0.00177x+1530.412$	0.99105	-1.77	3.03
Dip4	1555.95-1559.87=-3.92	$y=-0.00183x+1559.903$	0.99056	-1.83	3.21

## 4 结 论

提出一种基于全光纤马赫-曾德尔干涉仪的应变传感器。通过在细芯光纤两端分别熔接两根单模光纤,构成马赫-曾德尔干涉仪。实现了应变测量,具有较好的应变灵敏度。并且进行了理论分析和实验验证。在0~2000  $\mu\epsilon$  的测量范围内,测得的应变灵敏度为-1.83 pm/ $\mu\epsilon$ 。该传感器具有结构简单、损耗低、灵敏度高优点。

致谢 研究工作得到了光电技术研究所老师和同学的支持和帮助,特别是董新永老师给予的实验理论指导,在此表示衷心的感谢。

## 参 考 文 献

1 Wenwen Qian, Chunliu Zhao, Shaoling He *et al.*. High-sensitivity temperature sensor based on an alcohol-filled photonic

crystal fiber loop mirror [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(9): 1548~1550  
 2 Shengchun Liu, Zuowei Yin, Liang Zhang *et al.*. Multilongitudinal mode fiber laser for strain measurement [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(6): 835~837  
 3 Bobo Gu, Mingjie Yin, A. Ping Zhang *et al.*. Optical fiber relative humidity sensor based on FBG incorporated thin-core fiber modal interferometer [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(5): 4140~4146  
 4 Yu Zhang, Bo Lin, Swee Chuan Tjin *et al.*. Refractive index sensing based on higher-order mode reflection of a microfiber Bragg grating [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26345~26350  
 5 Yu Liu, Li Wei. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(13): 2516~2519  
 6 Yuan Gong, Tian Zhao, Yunjiang Rao *et al.*. All-fiber curvature sensor based on multimode interference [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(11): 679~681  
 7 Zhaobing Tian, Scott S.-H. Yam, Hans Peter Loock. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(16): 1387~1389  
 8 J. Yang, L. Jiang, S. Wang *et al.*. High sensitivity of taper-based Mach-Zehnder interferometer embedded in a thinned optical

- fiber for refractive index sensing[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(28): 5503~5507
- 9 Zhaobing Tian, Scott S.-H. Yam, Jack Barnes *et al.*. Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(8): 626~628
- 10 Yan Zhou, Wenjun Zhou, Chi Chiu Chan *et al.*. Simultaneous measurement of curvature and temperature based on PCF-based interferometer and fiber Bragg grating[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(24): 5669~5672
- 11 Tao Wei, Xinwei Lan, Hai Xiao. Fiber inline core-cladding-mode Mach-Zehnder interferometer fabricated by two-point CO<sub>2</sub> laser irradiations[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(10): 669~671
- 12 Qiang Wu, Yuliya Semenova, Jinesh Mathew *et al.*. Humidity sensor based on a single-mode hetero-core fiber structure[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(10): 1572~1574
- 13 Bobo Gu, Mingjie Yin, A. Ping Zhang *et al.*. Low-cost high-performance fiber-optic PH sensor based on thin-core fiber modal interferometer[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(25): 22296~22302
- 14 Tianhao Xia, A. Ping Zhang, Bobo Gu *et al.*. Fiber-optic refractive-index sensors based on transmissive and reflective thin-core fiber modal interferometers [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(10): 2136~2139
- 15 Xingyong Dong, H. Y. Tam, P. Shum. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(15): 151113

栏目编辑:殷建芳