文章编号:1004-2474(2018)04-0608-04

基于七芯光纤的 M-Z 双参数同时测量传感器

上官春梅^{1,2,3},张 雯^{1,2,3},何 巍^{1,2,3},骆 飞^{1,2,3},祝连庆^{1,2,3}

(1.北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心,北京100016;2.现代测控技术教育部重点实验室,北京100192;3.北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室,北京100192)

摘 要:利用熔接机分别对单模光纤-七芯光纤-单模光纤进行纤芯错位熔接,制作了一种光纤 Mach-Zehnder (M-Z)干涉型传感器。将一段长1 cm 的七芯光纤两端分别与 SMF-28 单模光纤错位熔接制得 M-Z 型干涉传感器。 传感器最大条纹对比度为 20 dB。分别设计不同温度、不同应变对传感器的温度特性及应变特性进行分析研究。 实验发现随着温度的增加,传感器的谐振波长发生红移,40~90 ℃温度范围内灵敏度和线性拟合度分别为 39.3 pm/℃和 0.998 3;室温下随着应变由 0 增加到 1 384 με,传感器的谐振波功率下降,应变灵敏度和线性度分别 为 0.008 8 dBm/με 和 0.990 3。实验结果表明,分别解调光谱的波长和光强都可实现温度和应变双参数同时测量。 关键词:七芯光纤;错位熔接;Mach-Zehnder(M-Z);温度测量;应变测量;双参数

中图分类号:TN253 文献标识码:A DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.04.030

M-Z Dual Parameter Simultaneous Measurement Sensor Based on Seven-Core Optical Fiber

SHANGGUAN Chunmei^{1,2,3}, ZHANG Wen^{1,2,3}, HE Wei^{1,2,3}, LUO Fei^{1,2,3}, ZHU Lianqing^{1,2,3}

 Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China; 2. Key Lab. of Modern Measurement Control Technology, Ministry of Education, Beijing 100192, China;
 Beijing Key Lab. of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: An optical fiber Mach-Zehnder (M-Z) interferometric sensor is fabricated by using a fusion splicer to perform core-offset splicing of the single mode fiber-seven-core fiber-single mode fiber respectively. An M-Z interferometric sensor is fabricated by core-offset splicing both ends of a length of 1 cm seven-core fiber and SMF-28 single-mode fiber. The maximum fringe contrast of the sensor is 20 dB. The different temperatures and strains have been designed respectively to analyze and study the temperature characteristics and strain characteristics of the sensor. The experimental results show that the resonant wavelength of the sensor is red shifted with the increase of temperature, the sensitivity and linear fitting are 39.3 pm/°C and 0.998 3 in the temperature range of $40 \sim 90$ °C. The strain wave power is reduced when the strain increases from 0 to 1 384 $\mu\epsilon$ at room temperature, and the strain sensitivity and linearity are 0.008 8 dBm/ $\mu\epsilon$ and 0.990 3, respectively. The experimental results show that the dual parameter of temperature and strain can be measured simultaneously by demodulating the wavelength and intensity of the spectrum respectively.

Key words:seven core optical fiber;core-offset splicing;Mach-Zehnder(M-Z);temperature measurement;strain measurement;dual parameter

0 引言

光纤传感器由于测量精度高,响应速度快,体积 小,受电磁干扰小等优点受到科学界广泛关注,并被 应用于各个领域^[1]。其中,干涉型光纤传感器作为 光纤传感器的重要组成部分,其测量灵敏度高,具有 很快的响应速度,被广泛应用于温度、应变、折射率、 位移、振动、曲率和湿度等参数的测量^[2-8]。其中,温 度和应变是对于材料本身非常重要的两个参数,迄

收稿日期:2017-10-22

基金项目:教育部长江学者与创新团队发展计划基金资助项目(IRT-16R07);北京市科技计划基金资助项目(Z151100003615010);北京市 教委 2015 年度创新能力提升计划基金资助项目(TJSHG201510772016);北京信息科技大学"勤信人才"培育计划基金资助项 目(QXTCP C201702)

作者简介:上官春梅(1990-),女,山东临沂人,硕士生,主要从事光纤传感器和光纤激光器方面的研究。E-mail: shangguanchunmei@126. com。通信作者:祝连庆(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感与激光器、精密测量与系统的研究。E-mail: zhulianqing@sina.com。

今为止,测量温度和应变的方法很多^[9-12]。干涉型 传感器由于其自身的优势受到科学研究者的广泛 青睐。

2017年,Y Sun等通过在两段单模光纤之间熔接一段多模光纤形成模间干涉制得温度和应变同时测量的传感器,温度和应变灵敏度分别为 17.33 pm/C和-2.19 pm/ $\mu\epsilon^{[13]}$;同年,祁乐融等利用 Fabry-perot(F-P)级联 FBG 制得传感器对人体健康参数进行研究,对骨骼受力形变以及压强进行了测试,灵敏度分别为 39.005 25 pm/mm 和 0.3 pm/ mmHg^[14];2014年,姜澜等利用飞秒激光对光纤纤芯进行微加工并用氢氟酸进行平滑处理,制作出条纹对比度为 20 dB 的光纤 F-P 传感器,并应用于液体折射率的测量,灵敏度为 1 135.7 nm/RIU^[15]。

复杂的现实环境中到处都存在多变量问题,交 叉敏感问题严重,目前越来越多的研究者开始对双 参数测量传感器进行研究,而传统的多参数测量传 感器都是多种器件的级联,一定程度上增加了器件 的体积和质量。单个器件可同时解决交叉敏感问题 的研究显得尤为重要。

本文提出采用七芯光纤与普通单模光纤错位熔 接制作 Mach-Zehnder(M-Z)干涉型光纤传感器,利 用 LZM-100 熔接机将长为1 cm 的七芯光纤两端分 别与单模光纤(SMF-28)进行错位熔接得到 M-Z 光 纤传感器,并分别对其温度传感特性及应变传感特 性进行测试分析。实验发现随着温度的增加,该传 感器透射波长向长波方向移动;随着应变增加,该传 感器透射波功率下降,分别通过解调该传感器的波 长和功率,可实现温度和应变的双参量测量。

1 光纤传感器的制作与原理

设计的传感器结构如图 1 所示,将一段 SMF-28 光纤一端与七芯光纤进行错位熔接,纤芯对准方 式如图 2 所示,截取七芯光纤使其长为 1 cm,七芯 光纤另一端与 SMF-28 光纤采用同样的错位方式熔 接,制得如图 1 所示的 M-Z 干涉型光纤传感结构, 用低温胶将传感结构封装在金属基片上得到光纤传 感器。



图 1 光纤传感器结构示意图



图 2 纤芯对准结构图

基于错位熔接的光纤传感器有两个错位熔接 点,当光入射到第一个熔接点时,由于偏芯结构会使 部分光耦合到后面一段光纤的包层进行传输,从而 激发出高阶包层模,因此会同时有纤芯模和包层模 进行传输;当传输光在第2个熔接点时纤芯模和包 层模发生耦合,形成 M-Z干涉,两个过熔接点之间 的光纤形成传感臂,通过透射光谱的移动来实现不 同物理参量的传感。

当环境温度和应变发生变化时,光纤 M-Z 传感 臂长会发生改变,透射光谱的波长和功率也会随之 发生变化。假定光纤 M-Z 的透射光谱的波长及功 率变化线性且独立无关,因此,只要确定灵敏系数矩 阵就可分别通过光纤 M-Z 波长和功率变化值求解 方程得到相应的温度与应变值。

外界温度和应变变化时,传感器的透射谱波长 变化 $\Delta\lambda$ 、功率变化 ΔI 与温度变化 ΔT 、应变变化 $\Delta \epsilon$ 成近似的线性关系,有

$$\Delta \lambda = K_{11} \Delta T + K_{12} \Delta \varepsilon \tag{1}$$

$$\Delta I = K_{21} \Delta T + K_{22} \Delta \varepsilon \tag{2}$$

式中:K₁₁,K₁₂,K₂₁,K₂₂分别为光纤 M-Z 的波长和 功率随温度和应变的变化系数。

联立式(1)、(2)可得温度和应变的变化量与光 谱波长及功率的变化矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda \\ \Delta I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix}$$
(3)

对式(3)求其逆矩阵,可得

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda \\ \Delta I \end{bmatrix}$$
(4)

分别通过光谱仪监测传感器的系统透射光谱 的波长及功率变化值 Δλ,ΔI,代入式(4)就可确定 外界环境温度和应变的改变情况,实现温度和应 变的双参量测量。

该传感系统光路如图 3 所示,由宽带光源 (ASE)、1×2 光纤环形器、光纤 M-Z 和光谱仪 (OSA)组成。



其中测试光源的光谱为1520~1610 nm,光谱

分析仪为日本 Yokogawa 公司的 AQ6375 光谱分析 仪,工作波长为1 200~2 400 nm,最小分辨精度为 0.02 nm。得到的光谱图如图 4 所示,最大对比度 可达到 20 dB。



2 传感特性测试与分析

2.1 温度特性实验

为了防止湿度等外界因素对传感区域的影响, 整个测量操作在超净间完成,实验过程中除温度外, 保持其他环境不变,将光纤通过1×2环形器与宽带 光源和光谱仪连接,将传感器放在加热台上,将温度 从 30 ℃上升到 90 ℃,每次上升 10 ℃,待温度稳定 后记录光谱仪中光谱数据,其实验结果如图 5 所示。



由图 5 可知,传感器的功率基本不随温度的变 化而变化,而透射波长随着温度的升高向长波方向 发生红移,灵敏度为 39.3 pm/℃,线性度可达 0.998 3。

2.2 应变特性实验

将所制作的传感器粘贴在等强度梁上,将传感器分别粘贴于等强度梁后,在恒温、恒湿的超净间中 对等强度梁进行加载、卸载标定实验。实验所用等 强度梁,微分头每转一圈,等强度梁在水平方向上的 形变为138.4 με。为避免固化过程中光纤回缩导致 初始应变测量值不准,实验采用相对应变值,拧动微 分头对光纤传感器施加应变,实验每次拧动微分头 两圈,使传感器产生 276.8 με 应变,待稳定后记录 光谱仪中光谱数据,其实验结果如图 6 所示。



图 6 应变传感特性测量系统图

由图 6 可知,传感器的波长基本不随应变的变 化而变化,而功率随着温度的升高向下漂移,灵敏度 为 0.008 8 dBm/με,线性度可达 0.990 3。

分别将上述温度和应变相关的灵敏度系数代入 式(4),得到该系统的温度和应变传感的矩阵方程为

$\begin{bmatrix} \Delta T \end{bmatrix}_{-}$	^{39.3}	0]	-1 ΓΔλ]	(5)
$\lfloor_{\Delta \varepsilon} \rfloor^{-}$	Lo	0.008 8	$\lfloor_{\Delta I} \rfloor$	(5)

3 结束语

在实际测量中,分别通过解调该系统透射谱波 长及功率变化值,便可实时监测环境的温度和应变。 通过波长变化值可以测量温度,通过功率变化可以 测量应变,分别解调波长和应变可实现温度和应变 双参量的实时测量。该传感器测量灵敏度高,稳定 性好,可重复性强,在生物医学检测、大型飞行器监 测等领域都有较好的应用前景。

参考文献:

LU Lidan, YAN Guang, LIU Feng, et al. Jusit load test on pre-stretching substrate FBG sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(4):619-623.

[2] 闫旭,傅海威.光纤 Michelson 干涉仪型折射率和温度 同时测量传感器[J]. 压电与声光,2016,38(6): 970-973.

YAN Xu, FU Haiwei. Fiber sensor for simultaneous measurements of refractive index and temperature based on a Michelson interferometer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2016,38(6):970-973.

- [3] MARTINS H F, BIERLICH J, WONDRACZED K, et al. High-sensitivity dispersive Mach-Zehnder interferometer based on a dissimilar-doping dual-core fiber for sensing applications[J]. Optics Letters, 2014, 39(9): 2763-2766.
- [4] 刘申.光纤气泡微腔传感及回音壁模式调控技术[D]. 深圳:深圳大学,2017.
- [5] CAO Ye, ZHAO Chen, TONG Zhengrong, et al. All-fiber interferometric sensors for simultaneous measurement of dual parameters [J]. Acta Photonica Sinica, 2015,44(10):1006002.
- [6] FU Haiwei, YAN Xu, SHAO Min, et al. Fourier analysis applied on MZI transmission spectrum for refractive index measurement [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(6):658-660.
- [7] MINDRAOA, BEMINIR, ZENI L. Distributed temperature sensingin poly meroptical fiber by BOFDA[J].
 IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26 (4): 387-390.

(上接第 607 页)

[5] 郑慈航,唐刚,刘景全,等.利用 PZT 块材制备微型压
 电悬臂梁采能器的研究[J].压电与声光,2011,33(3):
 418-421.

ZHENG Cihang, TANG Gang, LIU Jingquan. Study on MEMS-based piezoelectric cantilever generator fabricated by bulk PZT[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(3);418-421.

- [6] PARK J, BANG K, PARK C. Fabrication of piezoelectric PZT thick film by Sol-Gel process [J]. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2015, 29(1):94-99.
- [7] 鲁健,褚家如.高取向 PZT 铁电薄膜的溶胶-凝胶法制备[J].中国科学技术大学学报,2002,134(6): 748-753.

LU Jian, ZHU Jiaru. Preparation of strongly (100)-oriented $Pb(Zr_{0.53}, Ti_{0.47})O_3(PZT)$ film by Sol-Gel meth-

- [8] 姜霁珊. 基于双 M-Z 干涉仪的光纤周界防护系统 [D].北京:北京理工大学,2015.
- [9] JIANG Junfeng, WANG Shuang, LIU Kun, et al. Development of optical fiber temperature sensor for aviation industry [C]//S. l. : International Conference on Optical Communications and Networks. IEEE, 2017;1-3.
- [10] ZHAO Yong, CAI Lu, LI Xuegang. Temperature-insensitive optical fiber curvature sensor based on SMF-MMF-TCSMF-MMF-SMF structure[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2016, 66 (1):141-147.
- [11] ZENG H,GENG T,YANG W, et al. Combining two types of gratings for simultaneous strain and temperature measurement[J]. IEE Photonics Technology Letters,2016,28(4):477-480.
- [12] CHEN Xi, ANSARI F. Speckle-field-intensity optical fiber strain sensor [C]//S. l. : Intelligent Civil Engineering Materials and Structures ASCE, 2015.
- [13] SUN Yuan,LIU Deming,LU Ping, 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.
- [14] 祁乐融. 基于光纤布拉格光栅和法-珀传感器的人体 健康参数测量方法研究[D].太原:中北大学,2017.
- [15] YUAN Lei, HUANG Jie, LAN Xinwei, et al. All-in-fiber optofluidic sensor fabricated by femtosecond laser assisted chemical etching[J]. Optics Letters, 2014, 39 (8):2358.

od[J]. Journal of University of Science and Technology of China,2002,134(6):748-753.

[8] 毛剑波,易茂祥. PZT 压电陶瓷极化工艺研究[J]. 压电 与声光,2006,28(6):736-740.

MAO Jianbo, YI Maoxiang. Research on the polarization technology of PZT piezoelectric ceramic[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2006,28(6):736-740.

- [9] KIM S G, PRIYA S, ISAKU K. Peizoelectric MEMS for energy harvesting[J]. Materials Research Society, 2012,37(12): 1039-1050.
- [10] 张森,孟庆丰,王宏金.悬臂梁式压电振动能量收集器的疲劳分析[J].压电与声光,2014,36(5):757-760.
 ZHANG Miao, MENG Qingfeng, WANG Hongjin.
 Fatigue analysis for cantilever piezoelectric vibration energy harvester[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014,36(5):757-760.