

F-P 级联 MZ 温度、应变同时测量的光纤传感器

上官春梅^{1,2,3}, 何巍^{1,2,3}, 张雯^{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: 鉴于温度和应变双参量同时测量存在交叉敏感问题, 设计并制作了一种光纤法布里-珀罗(F-P)级联马赫-曾德尔(MZ)的双参数测量传感器。通过观测传感器反射谱和透射谱的波长漂移量实现温度和应变同时监测: 在 30℃~150℃ 温度范围内, 传感器灵敏度和线性度分别为 54pm/℃ 和 0.9982; 室温下在 0~450μ ϵ 应变范围内, 传感器应变灵敏度和线性度分别为 2.73pm/μ ϵ 和 0.9999, 表明该传感器可同时监测温度和应变。

关键词: 光纤传感; 双参量测量; 法布里-珀罗; 马赫-曾德尔; 温度; 应变

中图分类号: TN253 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2018)01-0016-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.01.005

Temperature and strain simultaneous measuring optical fiber sensor based on F-P cascade MZ

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

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;
2. Key Laboratory of Modern Measurement Control Technology, Ministry of Education, Beijing 100192, China; 3. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Due to the cross-sensitivity problem of simultaneous measurement of temperature and strain, the paper designs a kind of two-parameter measuring optical fiber sensor based on Fabry-Perot (F-P) cascade Mach-Zehnder (MZ). Through observing the wavelength shift of the reflection spectrum and transmission spectrum of the sensor, realizes the real-time monitoring of temperature and strain: with the temperature change from 30℃~150℃, the temperature sensitivity and linearity of the sensor are 54pm/℃ and 0.9982 respectively, and at room temperature, with the strain change from 0~450μ ϵ , the strain sensitivity and the linearity of the sensor are 2.73pm/μ ϵ and 0.9999 respectively, the result shows the sensor can simultaneously monitor temperature and strain.

Key words: optical fiber sensor; two-parameter measure; F-P; MZ; temperature; strain

0 引言

干涉型光纤传感器因其稳定性好、灵敏度高和测

收稿日期: 2017-09-01。

基金项目: 教育部长江学者与创新团队发展计划(IRT-16R07, 光电信息与仪器)资助; 北京市科技计划项目(Z151100003615010)资助; 北京市教委 2015 年度创新能力提升计划项目(TJSHG201510772016)资助; 北京信息科技大学“勤信人才”培育计划(QXTCP C201702)资助。

作者简介: 上官春梅(1990-), 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器和光纤激光器。

* 通信作者: 祝连庆(E-mail: zhulianqing@sina.com)。

量范围广等优点^[1]受到科学界关注, 并广泛应用于温度^[2,3]、应变^[4,5]、折射率^[6]、压力^[7]和震动^[8]等多种物理量的测量。其中, 温度和应变的测量在生物医学检测、大型飞行器件的健康监测和石油勘探等领域有着广泛的应用。

目前, 针对传感器的研究多是单一变量的传感测量, 而实际环境并不是简单的单一变量, 交叉敏感问题无处不在。近年来, 对于双参数测量传感器的研究也受到了研究者的青睐。2014 年, Qiqi Yao 等人将光

纤布喇格光栅(FBG)与偏芯结构结合,制作了温度折射率同时测量的传感器^[9]。2015年,卞继城、郎婷婷等人提出在单模光纤上分别熔接两个球形结构,并在单模光纤中间熔接一段细芯光纤构成马赫-曾德尔(MZ)干涉传感器,通过不同干涉波长的灵敏度不同实现温度和应变双参数同时测量^[10]。2016年,曹晔、赵月等人设计了MZ结构级联FBG构成的光纤磁场传感器,由于FBG对磁场强度不敏感,利用敏感矩阵可实现温度和磁场强度的同时测量^[11]。2017年,胡义慧、郭小珊等人利用波长为800nm的飞秒激光脉冲在普通单模光纤上加工一个微腔,把光纤拉成一个锥形光纤,与普通单模光纤熔接在一起,构成一个MZ干涉仪,实现温度和应力同时测量^[12]。本文采用40%浓度的氢氟酸腐蚀Corning公司的SMF-28单模光纤端面,制作出光纤法布里-珀罗(F-P)结构,将其与过熔接制作的MZ串联,制得温度和应变双参数同时监测传感器,并对其温度和应变传感特性进行测试分析。

1 光纤传感器的制作与原理

F-P级联MZ温度、应变同时测量的光纤传感器结构如图1所示。我们将Corning公司生产的SMF-28光纤置于

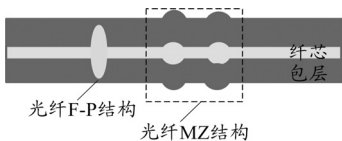


图1 光纤F-P级联MZ结构示意图

40%浓度的氢氟酸中腐蚀20min后与一端切平SMF-28光纤相互熔接形成F-P腔结构。利用熔接机将长为6cm的SMF-28光纤两端分别与另外两根单模光纤进行腰椎放大熔接,形成MZ结构。该结构传感原理是当光进入腰的放大部位时可以激发产生包层模,使纤芯模与包层模产生干涉。包层模的产生与腰椎结构有关,而光纤重叠量是对腰椎结构产生影响的重要参数。通过试验验证,本文选择光纤重叠量为150μm,并将F-P腔尾纤与MZ串联形成双参数测量的传感器。

入射到光纤的部分光在F-P腔两个端面来回反射产生干涉,部分光透过光纤F-P并经过尾纤传输到第一个过熔接点时,由于过熔接使得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,因此会同时在纤芯模和包层模上进行传输。当传输光在第二个过熔接点时纤芯模和包层模发生耦合,形成MZ干涉,两个过熔接点之间的光纤形成传感臂。

因为本文制得的光纤F-P结构反射率较低,所以其透射谱干涉现象不明显。因此,观察到的透射条纹是MZ结构干涉引起的,而反射谱为光纤F-P结构干

涉引起的。我们分别通过反射条纹和透射条纹的波长漂移来计算环境温度和应变的变化。

当环境温度和应变发生变化时,光纤F-P腔的腔长和MZ传感臂长会发生改变,反射光谱和透射光谱的波长也会随之发生漂移。假定光纤F-P传感结构的反射光谱及MZ传感结构的透射光谱的波长与温度和应变的变化关系为线性且独立无关,则只要确定灵敏度系数矩阵就能分别通过光纤F-P结构和MZ结构的波长变化值求解方程,得到相应的温度与应变值。

外界温度和应变变化时,传感器的反射谱波长变化为 $\Delta\lambda_1$,透射谱波长变化为 $\Delta\lambda_2$,与温度变化 ΔT 和应变变化 $\Delta\varepsilon$ 成近似的线性关系,写作:

$$\Delta\lambda_1 = K_{11}\Delta T + K_{12}\Delta\varepsilon \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_2 = K_{21}\Delta T + K_{22}\Delta\varepsilon \quad (2)$$

其中, K_{11} 和 K_{12} 分别为光纤F-P的温度和应变灵敏度系数, K_{21} 和 K_{22} 分别为MZ的温度和应变灵敏度系数。

联立式(1)和式(2),可以得到温度和应变的变化量与光谱波长的变化矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} \quad (3)$$

对式(3)求其逆矩阵,可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

我们分别通过光谱仪监测系统反射和透射光谱的波长变化值 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$,代入式(4)就可以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。

2 传感系统的搭建

传感系统光路如图2所示。系统由宽带光源(ASE)、1×2光纤环形器、光纤F-P腔、MZ结构和光谱仪(OSA)组成。光通过光源进入环形器,射入传感器结构通过通道1接入光谱仪观察系统反射谱,通道2接入光谱仪观察系统透射谱。其中,测试光源的光谱范围为1520~1610nm,光谱分析仪为日本Yokogawa公司的AQ6375光谱分析仪,工作波长范围为1200~2400nm,最小分辨精度为0.02nm。系统得到的光谱图如图3所示。接入通道1时观察系统的反射谱为光纤F-P结构的光谱特征,对比度为35dB,周期为30nm。由

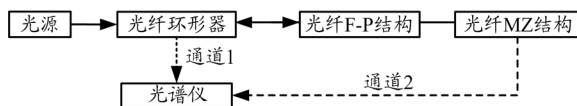


图2 传感系统光路图

于所制造的光纤 F-P 腔反射率较低,接入通道 2 时观察到的系统透射谱为光纤 MZ 结构的特征光谱,对比度和周期分别为 14dB 和 14nm。

3 实验及结果分析

3.1 温度特性研究实验

本文对所设计的传感器的温度传感特性进行实验研究。我们将已制备的传感器接入温度测试系统,将光纤 F-P 腔结构和 MZ 结构同时固定在加热台上,为避免其它变量交叉影响,整个实验在超净间中进行。

实验中将温度从 30℃调至 150℃,每次上升 20℃,待温度稳定后记录光谱仪中光谱数据,分别将通道 1 和通道 2 接入光谱仪检测传感器的波长偏移量,得到该光纤传感器反射和透射温度特征响应图如图 4 所示。传感器的反射波长基本不随温度的变化而漂移,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 0.054nm/℃,线性度 R^2 可达 0.9982。

3.2 应变特性研究实验

我们将传感器粘贴在等强度梁上,为提高实验可靠性,先分别将光纤 F-P 结构和 MZ 结构对称地粘贴在等强度梁的中心线两侧,再给它们一定的预紧力,并用低温胶将其固定,在室温下固化 24h 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。实验所用等强度梁量程为 0~500 $\mu\epsilon$,微分头每转一圈,等强度梁在水平方向上的形变为 10 $\mu\epsilon$ 。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,分别接入通道 1 和通道 2,检测反射光谱和透射光谱的波长变化情况,并解调谐振波长变化和应变量的关系,得到的反射谱和透射谱应变响应特性分别如图 5 和图 6 所示。

实验结果表明,反射光谱随着应变的增加发生红移,在相对应变量为 0~450 $\mu\epsilon$ 的范围内加载和卸载

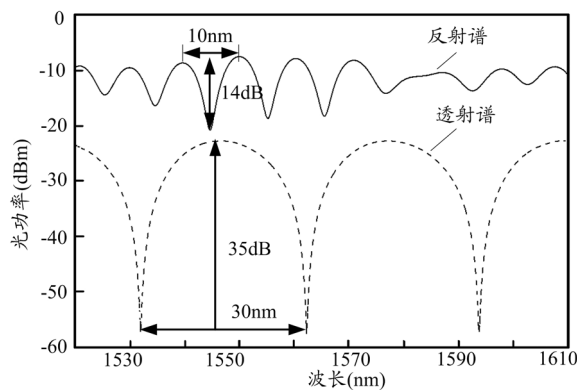
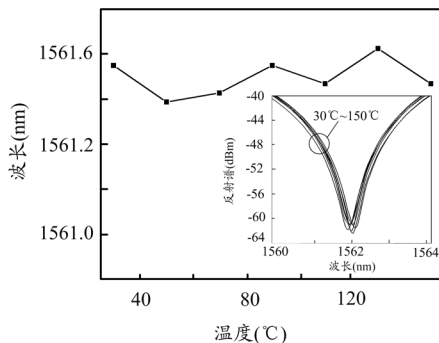
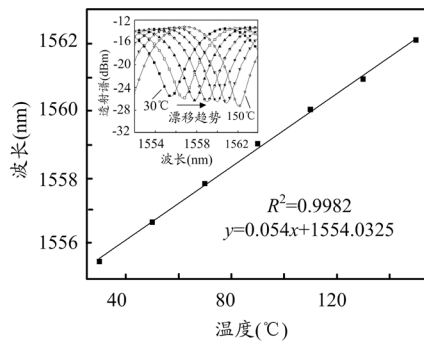


图3 传感器反射及透射谱图

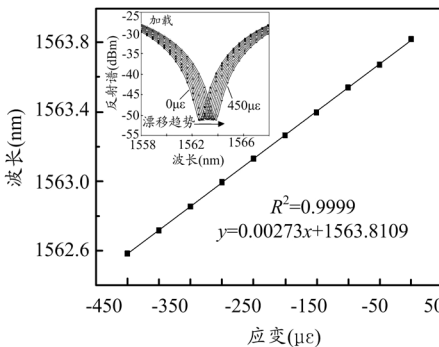


(a) 传感器反射光谱特征图

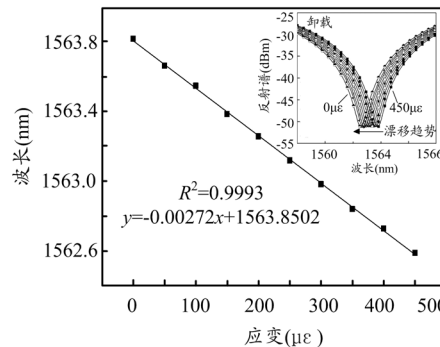


(b) 传感器透射光谱特征图

图4 不同温度下 F-P 级联 MZ 传感器的波长曲线和温度响应特性图

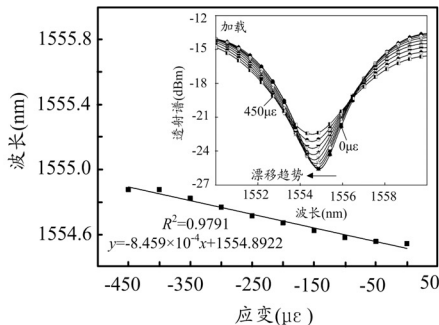


(a) 传感器加载特性反射谱图

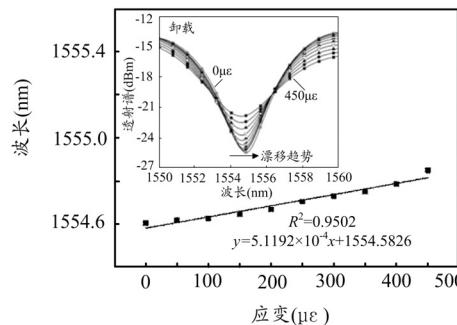


(b) 传感器卸载特性反射谱图

图5 不同应变下 F-P 级联 MZ 结构传感器反射波长曲线和应变响应特性图



(a) 传感器加载特性透射谱



(b) 传感器卸载特性透射谱

图6 不同应变下 F-P 级联 MZ 结构传感器透射波长曲线和应变响应特性图

灵敏度分别为 $2.73\text{pm}/\mu\epsilon$ 和 $2.72\text{pm}/\mu\epsilon$, 线性度为 0.9999 和 0.9993。而传感器的透射波长随应变的变化呈线性变化,灵敏度小于 1pm , 相比较于透射谱温度灵敏度,透射应变波长的漂移可以忽略不计。图 7 为传感器反射谱应变一致性验证图,对比反射谱加载和卸载曲线发现,当加载和卸载到达同一应变值时,传感器反射波长基本可以回到同一应变值,极大地提高了光纤传感器的可靠性。

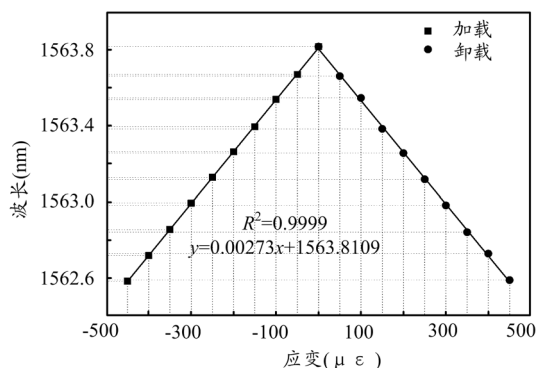


图 7 传感器反射谱应变一致性验证图

3.3 重复性实验研究及结果分析

为验证该传感器在实际使用中的可靠性,本文设计实验验证了该传感器的可重复性。我们在前文实验完成的 40 天后对该传感系统再次进行了温度和应变实验,结果如图 8 所示。可以看出,两次实验结果灵敏度相同,说明该传感器的可重复性很好。我们将重复性实验中得到的温度灵敏度系数和应变灵敏度系数代入式(4),可以得到该系统的温度和应变传感的矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2.73 \\ 54 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

在实际测量中,分别通过解调该系统反射和透射的波长变化值,便可以实时监测环境的温度和应变,

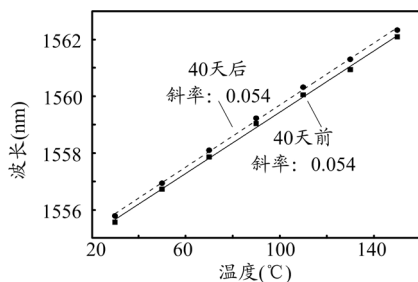
通过反射谱波长变化值可以测量应变,通过透射谱波长变化可以测量温度,分别接入透射和反射便可实现温度和应变双参量实时测量。

4 结束语

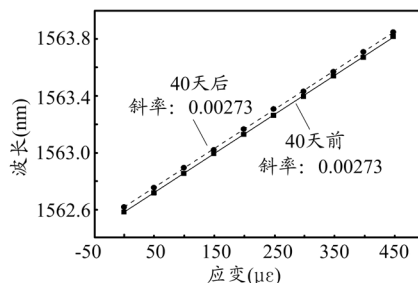
本文设计了基于氢氟酸腐蚀的光纤 F-P 级联 MZ 温度和应变双参数实时监测的传感器,并对本传感器的温度和应变传感特性进行了实验研究,建立了传感器温度及应变和光谱波长之间的数学模型,通过其传感系数矩阵便可以同时监测外界温度和应变双参量变化。本文设计的双参量传感器结构简单,制作成本低,能很好地解决应力和温度的交叉敏感问题,在航空航天、生物医学检测以及大型建筑健康监测等方面都具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] 陈松,杨秀峰,童峥嵘,等. 光纤 Fabry-Perot 干涉型传感器研究进展[J]. 光通信技术,2012,36(5):32-34.
- [2] POLYZOS D, HAVERMANN D, HAND D P, et al. In-Fiber Fabry-Perot Cavity Sensor for High-Temperature Applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2419-2425.
- [3] 张琪,周骏,陈金平,等. 基于 Bitaper-LPFG-Bitaper 结构的全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的温度传感特性[J]. 光子学报,2013,42(3):307-310.
- [4] GAO R, LU D, CHENG J, et al. In-Fiber Double-Layered Resonator for High-Sensitive Strain Sensing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(11): 857-860.
- [5] 刘冲冲,邹翔,周正仙. 高精度动态光纤应变传感研究[J]. 光子学报,2016,45(11):48-53.
- [6] 谭耀成,楼俊,许宏志,等. 光纤倏逝波吸收传感器灵敏度模拟分析[J]. 压电与声光,2013,35(6): 810-813.
- [7] LIAO C, WANG C, WANG D N, et al. Sub-micron silica diaphragm-based fiber-tip Fabry-Perot interferometer for pressure measurement [J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2827-2830.
- [8] CHEN Y, TAN D, LIU X. Based on the interferometric fiber optic vibration sensor[J]. Optical Instruments, 2015, 37(1):24-27.
- [9] YAO Qiqi, MENG Hongyun, WANG Wei, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 209(1): 73-77.
- [10] 卞继城,郎婷婷,俞文杰,等. 基于马赫-曾德尔干涉的温度和应变同时测量的光纤传感器研究[J]. 光电子·激光,2015(11):2169-2174.
- [11] 赵月,曹晔,童峥嵘,等. 可双参量同时测量的光纤磁场传感器[J]. 光子学报,2016,45(12):42-46.
- [12] 胡义慧,郭小珊,江超,等. 用于温度与应力同时测量的光纤传感器[J]. 湖北师范学院学报(自然科学版),2017,37(1):83-87.



(a) 传感器温度重复性



(b) 传感器应变重复性

图 8 传感器重复性验证图