

引用格式: SHEN Jiaxin, WANG Wei, ZHANG Junying, et al. Hybrid Temperature and Strain Dual-parameter Sensor Based on Fiber Bragg Grating and Multi-mode Interference of Hollow-core Fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5):0506006
申佳鑫,王伟,张军英,等. 光纤布拉格光栅与空芯光纤多模干涉混合型温度应变双参量传感器[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 0506006

光纤布拉格光栅与空芯光纤多模干涉混合型 温度应变双参量传感器

申佳鑫¹, 王伟^{1,2}, 张军英^{1,2}, 陈海滨^{1,2}, 郭子龙^{1,2}, 张雄星^{1,2}

(1 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

(2 西安工业大学 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室, 西安 710021)

摘要: 针对光纤应变传感器由于温度敏感而引入的测量问题, 提出了一种基于光纤布拉格光栅和空芯光纤多模干涉效应的混合型温度-应变双参量传感器。该传感器由两根单模光纤与一段内径小于单模光纤纤芯直径的空芯光纤熔接制成, 其中一根单模光纤的光纤端面附近预刻一组光纤布拉格光栅。空芯光纤长度为厘米量级, 光波以多模形式在空芯光纤侧壁中传播。结合光纤布拉格光栅和空芯光纤多模干涉效应对温度和应变的不同响应灵敏度, 通过求解双参数耦合矩阵同时获取温度和应变两个参量, 并有效解决了单个传感器在温度或应变测量时的温度-应变交叉敏感性问题。采用中心波长为 1 550.172 nm 的光纤布拉格光栅与一段长为 2.5 cm、内径为 5 μm 的空芯光纤制备了相应的传感器, 并进行了温度和应变测试。结果表明, 光纤布拉格光栅和空芯光纤的温度灵敏度分别达到 10.530 6 pm/ $^{\circ}\text{C}$ 和 1.802 1 pm/ $^{\circ}\text{C}$, 应变灵敏度分别达到 0.720 7 pm/ $\mu\epsilon$ 和 1.243 2 pm/ $\mu\epsilon$ 。

关键词: 光纤传感器; 空芯光纤; 光纤布拉格光栅; 温度; 应变

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215005.0506006

Hybrid Temperature and Strain Dual-parameter Sensor Based on Fiber Bragg Grating and Multi-mode Interference of Hollow-core Fiber

SHEN Jiaxin¹, WANG Wei^{1,2}, ZHANG Junying^{1,2}, CHEN Haibin^{1,2}, GUO Zilong^{1,2},
ZHANG Xiongxing^{1,2}

(1 School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(2 Shaanxi Province Key Lab of Photoelectric Measurement and Instrument Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: To solve the measurement problems of fiber-optic strain sensors caused by temperature sensitivity, a hybrid temperature-strain dual-parameter based on fiber Bragg grating and multimode interference of hollow core fiber was proposed. The sensor is composed of a hollow core fiber fused between two single mode fibers, and the inner diameter of the hollow core fiber is smaller than the core of the single mode fibers, besides, on the core of one single mode fiber, near the fiber end, a fiber Bragg

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (No. 2020JM-560), 陕西省教育厅重点科学研究计划 (No. 20JS060)

第一作者: 申佳鑫 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术。Email: shenjiaxin_xatu@163.com

导师: 王伟 (1973—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电测试技术、光纤传感技术。Email: wangwei@xatu.edu.cn

通讯作者: 张军英 (1982—), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术。Email: zhangjunying@xatu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-02; 录用日期: 2020-12-15

<http://www.photon.ac.cn>

grating is pre-written. The hollow core fiber has a length of centimeters, in which, the optical wave is propagating in a multimode form. Combining the different responsivities of the hollow core fiber and fiber Bragg grating to the temperature and the strain, the two parameters can be simultaneously demodulated by solving of the dual-parameter coupling matrix, and the problem of temperature-strain cross sensitivity of a single fiber Bragg grating or hollow core fiber sensor can be effectively solved. A hybrid fiber Bragg grating-hollow core fiber sensor was fabricated by using of a fiber Bragg grating with a center wavelength of 1 550.172 nm and a hollow fiber of 2.5 cm long and inner diameter of 5 μm . The experiment on the strain and temperature measurement shows temperature sensitivities of 10.530 6 pm/ $^{\circ}\text{C}$ and 1.802 1 pm/ $^{\circ}\text{C}$, strain sensitivities of 0.720 7 pm/ $\mu\epsilon$ and 1.243 2 pm/ $\mu\epsilon$ from the hollow core fiber and fiber Bragg grating respectively.

Key words: Fiber-optic sensor; Hollow core fiber; Fiber Bragg grating; Temperature; Strain

OCIS Codes: 060.2370; 150.4232; 280.4788

0 引言

应变测量是桥梁隧道、水利电力、轨道交通、石油平台、楼宇建筑、船舶、航空航天飞行器等多种门类工程结构健康监测的核心参数之一。光纤应变传感器由于制作简单、灵敏度高、免受电磁干扰、耐化学腐蚀及易实现分布式测量等优点,受到研究者与工程技术人员的广泛重视,并已在很多领域实现了工程应用^[1-5]。

光纤应变传感器已经发展出光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)、长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)、迈克尔逊(Michelson)、马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)、法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)光纤应变传感器等多种类型。这些传感器通常也会对温度敏感,温度变化会对应变测量结果产生干扰^[6-10]。解决该问题的一种方案是开发温度不敏感的光纤应变传感器,另一种方案是同时测量温度和应变两个参量,并利用温度测量结果补偿应变测量结果。

针对第一种方案,LANG C P等^[11]设计了一种毛细管锥温度补偿结构,毛细管与锥度长度匹配时,对温度不敏感。然而,该传感器的匹配长度精度要求高,不易制作。张珊等^[12]设计了一种对温度不敏感的应变传感少模光纤,其纤芯直径为 15.1 μm ,少模光纤在 0~600 μm 、30~300 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,对温度不敏感。但该传感器加工工艺复杂,实验在 180 $^{\circ}\text{C}$ 时存在误差。

针对第二种方案,学者们提出了多种同时测量温度和应变的方法。HAN Y G等^[13]通过控制双热敏光纤光栅对温度和应变的敏感性,实现应变和温度的同时测量。根据波长峰移的差异以及随着应变和温度变化而产生的分离,可以区分出应变和温度引起的光纤光栅中心波长的变化。但此传感器中 GeO_2 和 B_2O_3 的掺杂浓度不易控制,传感器结构复杂,制作工艺难。HUANG Zhengyu等^[14]提出两根单模光纤之间熔接一段多模光纤的传感器结构,实现温度和应变的同时测量。但此传感器多模光纤是特殊设计的光纤,且与单模光纤熔接时会出现插入损耗现象。OH S T等^[15]利用紫外线不对称曝光,在单束FBG中引入双折射,导致透射光谱中出现偏振相关损耗(Polarization-Dependent Loss, PDL)。PDL对温度和应变变化敏感,通过测量共振波长偏移量和PDL变化实现对温度和应变的同时测量。ALAHBABIM N等^[16]提出一种基于自发拉曼、布里渊反向散射和反斯托克斯信号的方法,实现温度和应变的同时测量。布里渊频移取决于温度和应变的变化,反斯托克斯拉曼信号强度的大小可以确定温度值,温度值确定后,再根据布里渊信号的频移测量结果就能准确计算出应变值。然而,布里渊频移对应变变化并不敏感,20 $\mu\epsilon$ 和 300 $\mu\epsilon$ 产生相同的频移。饶云江等^[17]提出了一种由长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)和F-P组成的混合型光纤传感器,可实现温度和应变的同时测量。谭展等^[18]提出单模光纤熔接空芯光纤(Hollow-Core Fiber, HCF)再熔接FBG的温度应变双参量传感器结构,该传感器使用内径为 25 μm 的HCF,基于反谐振原理,将光波约束在HCF的空气芯内传输,并结合FBG反射波长与HCF反谐振波长对温度和应变的不同响应灵敏度实现温度和应变的同时测量。

本文研究了一种基于FBG和小孔径HCF多模干涉效应的FBG-HCF混合型温度应变双参量光纤传感器,由于HCF内径小于单模光纤纤芯直径,单模光纤纤芯中传输的导模可以直接耦合至HCF侧壁以多模形式传输并发生多模干涉效应,利用FBG反射峰和HCF多模干涉(Multi-Mode Interference, MMI)特征峰对温度和应变的不同响应,通过实时监测FBG反射波长和HCF透射光谱多模干涉特征峰的波长漂移量,由

双参数耦合矩阵实现温度和应变的同时测量,从而有效解决温度-应变交叉敏感性问题。

1 FBG-HCF 温度-应变双参量传感器的结构与制作

所提出FBG-HCF 温度-应变双参量传感器的基本结构如图1所示,由两段单模光纤与一段HCF熔接制成,其中一根单模光纤在光纤端面附近预刻有一段FBG,其中 $2r$ 是HCF的空气芯直径, d 是HCF侧壁厚度。HCF的空气芯内径 $2r$ 要小于单模光纤纤芯直径,以保证在单模光纤中传输的光直接有效耦合至HCF侧壁的石英介质中并以多模形式传输。

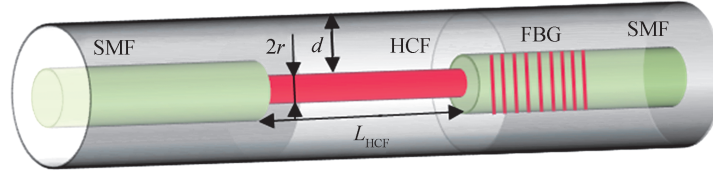


图1 FBG-HCF 温度-应变双参量传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the FBG-HCF temperature-strain dual-parameter sensor

制作该FBG-HCF 温度应变双参量传感器的步骤为:

1)将两段单模光纤(其中一段单模光纤预刻有FBG)和HCF的一端去除一段长度的涂覆层后,用光纤切割刀分别切割,使其端面均垂直于光纤轴线。

2)将切好的单模光纤和HCF熔接,再将已熔接的HCF在显微镜下用光纤切割刀按预定长度切割。为了确保HCF长度的准确性,在切割前,先将单模光纤夹持在精密位移台上,当精密位移台沿光纤轴向移动时,单模光纤会随精密位移台的移动而移动。移动精密位移台,通过显微镜观察到光纤切割刀刀口与熔接点重合时,再将精密位移台向单模光纤所在方向移动预设长度后用光纤切割刀切割。

3)将步骤2)切好的HCF与步骤1)切好的预刻有FBG的单模光纤熔接。

2 温度-应变双参量测量原理

所研究FBG-HCF 温度应变双参量传感器包含了一个HCF构成的多模干涉结构和一个FBG。宽带光源发出的光从左侧单模光纤耦合进入HCF结构,由于HCF内径小于单模光纤纤芯直径,有部分光可以直接耦合至HCF侧壁传输,不需要添加其它辅助耦合结构,如多模光纤、无芯光纤、锥型光纤等^[19-21]。相比于其它HCF多模干涉结构,小孔径HCF多模干涉结构简洁,制作工序少,制作更为容易。由于HCF侧壁较厚,且与空气折射率差较大,因此由单模光纤耦合进入HCF侧壁的光以多模形式存在,在HCF中传输的光波场可以表示为

$$E(r, z) = \sum_{m=1}^N c_m F_m(r) e^{i\beta_m z} \quad (1)$$

式中, z 是传播距离, N 是导模最高阶数, c_m 是单模光纤基模到相应模式的耦合系数, $F_m(r)$ 是 m 阶模式的模场分布, β_m 是 m 阶模式的纵向传播常数。

最终有HCF重新回到单模光纤的光波透射率可以表示为

$$T = \sum_{m=1}^N c_m^2 + \sum_{i \neq j=1}^N c_i c_j \cos(\beta_i - \beta_j) L_{\text{HCF}} \quad (2)$$

式中, L_{HCF} 是HCF的长度。由于不同模式的纵向传播常数不同,在HCF出射位置不同的模式产生不同的相移,这些模式叠加干涉后,不同波长的光波会表现出不同的透过率。透射光谱中会出现一些向下的尖峰,称之为特征峰。

如果在传感器上施加应变或者环境温度发生变化,由于HCF长度和在HCF侧壁中传输各阶次模式有效折射率的改变,相应多模干涉特征峰的波长也会发生变化,有

$$\Delta\lambda_{\text{MMI}} = K_{\text{MMI},\epsilon} \Delta\epsilon + K_{\text{MMI},T} \Delta T \quad (3)$$

式中, $K_{\text{MMI},\epsilon}$ 和 $K_{\text{MMI},T}$ 分别为HCF多模干涉峰对应共振波长的应变灵敏度和温度灵敏度, $\Delta\epsilon$ 是应变变化量,

ΔT 是温度变化量。经过HCF之后重新耦合回单模光纤的光波继续传输,经过FBG,只有波长满足布拉格条件的光波会发生强烈反射,并在透射光谱中留下一个向下的尖峰。FBG反射光谱的中心波长为

$$\lambda_{\text{FBG}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (4)$$

式中, n_{eff} 为光栅的有效折射率, Λ 为光栅栅格周期。被反射的光部分经过HCF后会返回进入光纤中。

当传感器上施加有应变作用或者环境温度发生变化,应变会引起光栅栅格周期伸缩变化,并且会通过弹光效应改变光栅中的有效折射率。温度改变则通过热膨胀效应改变光栅周期,通过热光效应改变光栅中的有效折射率。应变及温度变化引起的FBG反射光谱的中心波长偏移量为

$$\Delta\lambda_{\text{FBG}} = K_{\text{FBG},\epsilon}\Delta\epsilon + K_{\text{FBG},T}\Delta T \quad (5)$$

式中, $K_{\text{FBG},\epsilon}$ 是FBG应变灵敏度, $K_{\text{FBG},T}$ 是FBG温度灵敏度,且有

$$K_{\text{FBG},\epsilon} = \lambda_{\text{FBG}}(1 - p_{\epsilon}) \quad (6)$$

$$K_{\text{FBG},T} = \lambda_{\text{FBG}}(\alpha + \xi) \quad (7)$$

式中, p_{ϵ} 是光纤的弹光系数, ξ 是光栅的热光系数, α 是光栅的热膨胀系数。

显然,HCF的特征峰波长和FBG的布拉格波长均在温度和应变的影响下发生漂移,联立式(3)和(5),得

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{FBG}} \\ \Delta T_{\text{MMI}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\text{FBG},\epsilon} & K_{\text{FBG},T} \\ K_{\text{MMI},\epsilon} & K_{\text{MMI},T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于FBG反射中心波长和HCF多模干涉特征峰对应变和温度的敏感系数各不相同,在已知波长漂移量的条件下,可以通过求解线性方程得到温度和应变变量,即

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\text{FBG},\epsilon} & K_{\text{FBG},T} \\ K_{\text{MMI},\epsilon} & K_{\text{MMI},T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{FBG}} \\ \Delta\lambda_{\text{MMI}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

因此,利用FBG和HCF的多模干涉效应,可以同时测量温度和应变,并有效消除温度-应变交叉敏感性的影响。

3 实验与分析

采用第1节所述制备工艺,制备了图1所示结构的FBG-HCF温度应变双参量传感器。其中,单模光纤使用美国康宁的单模裸光纤,型号G652D,纤芯为 $9\ \mu\text{m}$,除去涂覆层后光纤外径为 $125\ \mu\text{m}$ 。FBG采用紫外光刻写,室温下反射中心波长为 $1\ 550.172\ \text{nm}$,3 dB带宽 $0.168\ \text{nm}$ 。HCF选用Polymicro Technologies公司的TSP005150纯石英空芯光纤(光纤内径为 $5\ \mu\text{m}$ 、除去涂覆层后外径为 $125\ \mu\text{m}$)。根据多模干涉透射率的理论公式(2)可以看出,HCF越长,多模干涉特征峰波长对温度或者应变的响应灵敏度也就越高。但是,HCF长度过长会造成透射光谱中出现过多的多模干涉特征峰,光谱过于杂乱^[22],从而影响对FBG峰值位置的判定。综合考虑传感器灵敏度和透射光谱中的多模干涉特征峰数量,粗略确定HCF长度为 $2.5\ \text{cm}$,制备了传感器,对小孔径FBG-HCF温度应变双参量传感器的传感特性进行验证。

搭建了温度-应变双参量同时测量的实验测试系统,如图2所示,对所提出和制作的FBG-HCF混合型温度应变双参量光纤传感器的传感性能进行测试。该系统由SLD光源(中心波长为 $1\ 550\ \text{nm}$,3 dB带宽为 $98\ \text{nm}$)、光纤环行器、精密位移台、两台光谱分析仪(OSA 1和OSA 2)、加热平台、点温计和FBG-HCF混合型温度应变双参量光纤传感器构成。将传感器两端分别固定在两台精密位移台上,当精密位移台沿光纤轴向移动时,传感器的HCF和FBG被拉伸,产生应变。两台精密位移台中间放置加热平台,控制传感器温度。实验过程中,将点温计的探头与FBG-HCF混合型温度应变双参量光纤传感器紧贴放置,实时监测传感器临近位置的温度。分别在 27.2°C (室温)、 50°C 、 75°C 、 100°C 四组不同温度条件下进行温度、应变测量实验。

SLD输出的宽带光信号从光纤环行器1端口入射,2端口进入FBG-HCF混合型温度应变双参量光纤传感器,携带着HCF波长信息和FBG中心波长信息的复合式透射光,进入光谱分析仪1。在 27.2°C ,应变为零时,光谱分析仪1采到的HCF和FBG的复合式透射光如图3所示。在透射光谱中出现了具有多个透射峰特征的多模干涉信号,另外在该信号上,叠加了由于FBG在 $1\ 550.172\ \text{nm}$ 波长高反而形成的一个尖锐的峰值信号。从2端口出射的FBG反射光通过光纤环行器3端口进入光谱分析仪2。同样条件下,光谱分析仪2

采到的FBG反射光如图4所示,其中心波长位置与透射光谱中FBG信号一致。

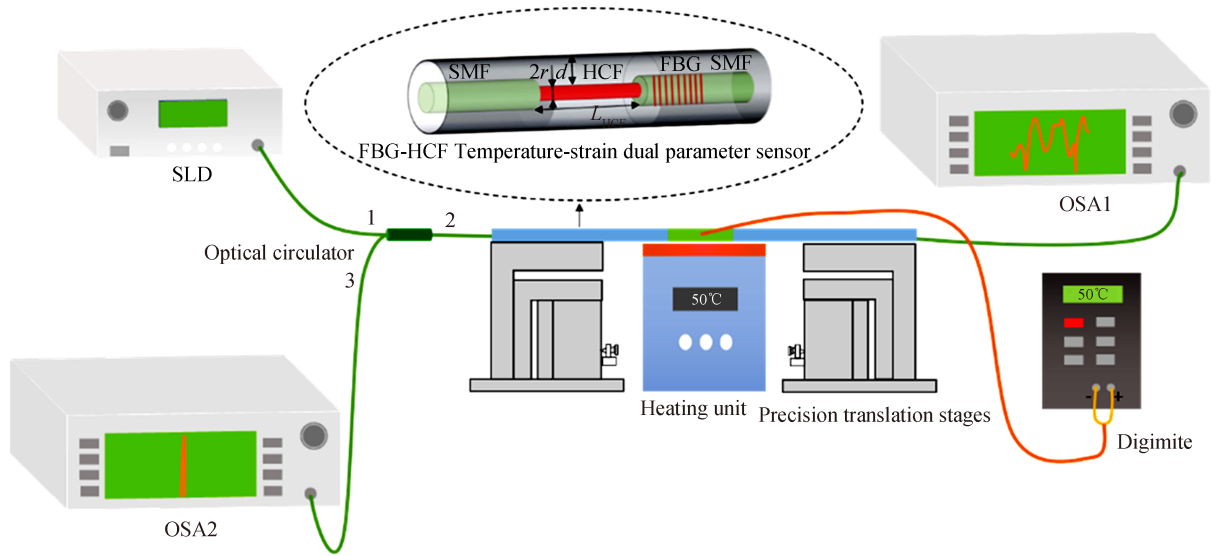


图2 FBG-HCF温度应变双参量传感器系统简图

Fig. 2 Experimental setup of the FBG-HCF temperature-strain dual-parameter sensing system

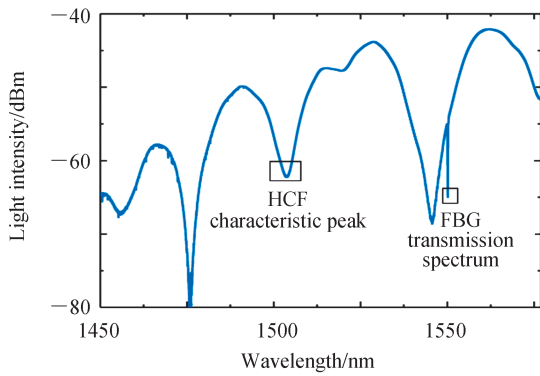


图3 FBG-HCF温度应变双参量传感器HCF透射光谱

Fig. 3 Transmission spectrum of the FBG-HCF temperature-strain dual-parameter sensor

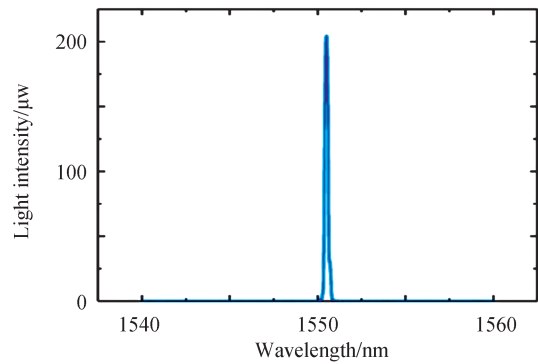


图4 FBG-HCF温度应变双参量传感器FBG反射光谱

Fig. 4 Reflection spectrum of the FBG-HCF temperature-strain dual-parameter sensor

在27.2℃,不同应变条件下,HCF透射光谱、FBG透射光谱的峰值移动如图5(a)、(b)所示,可以看到,随着应变量的增加,HCF透射光谱的多模干涉特征峰向短波长方向均匀移动(见图5中的局域放大子图),同时,FBG的布拉格透射峰位置向长波长方向均匀移动(见图5中的局域放大子图),并且移动的速率明显低于HCF,表明两者对于应变有着不同的响应灵敏度。

对HCF的透射光谱数据进行寻峰处理,得到峰值波长与应变的对应关系如图6(a)所示。可以看出,当应变增加时,HCF透射光谱的多模干涉特征峰向短波长方向均匀移动。不同温度下,应变与波长的对应关系呈线性分布,线性度高达99.85%,且相互平行。由于温度-应变交叉敏感性的影响,应变相同时,HCF的透射光谱的波谷峰值有所不同。计算得到,HCF的应变灵敏度为 $K_{\text{MMI},\epsilon} = -1.2432 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

FBG应变和反射光谱的中心波长的对应关系如图6(b)所示,可以看出,当应变增加时,FBG的反射光谱的中心波长向长波长方向均匀移动。不同温度下,应变与波长的对应关系呈线性分布,线性度高达99.99%,且相互平行。由于温度-应变交叉敏感性的影响,应变相同但温度不同时,FBG的反射光谱的中心波长有所偏移。计算得到,FBG的应变灵敏度为 $K_{\text{FBG},\epsilon} = 0.7207 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

在零应变下,HCF透射光谱温度与波长的对应关系如图7(a)所示,可以看到,温度和波长的对应关系呈线性分布,线性度为99.16%。温度上升时,HCF透射光谱的多模干涉特征峰向短波长方向移动,计算得到HCF温度灵敏度为 $K_{\text{MMI},T} = -1.8021 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

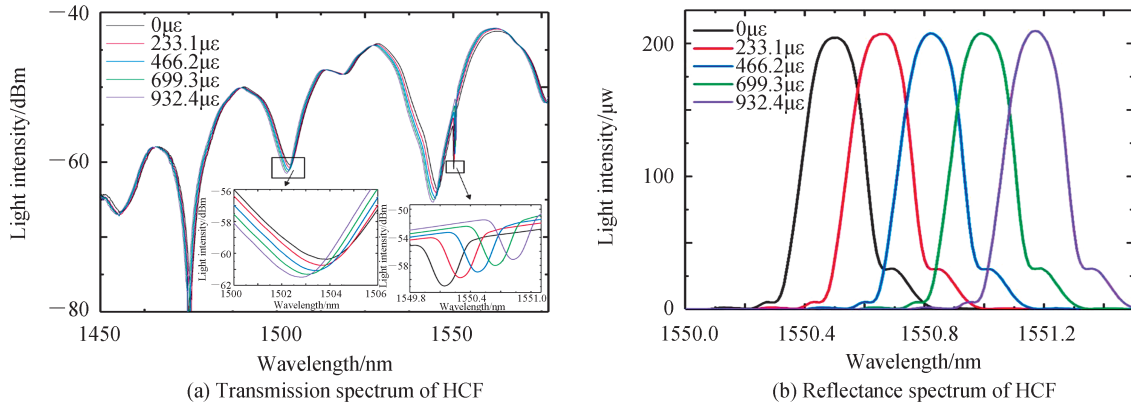


图 5 不同应变条件下FBG-HCF 温度-应变传感器光谱

Fig. 5 Spectrum of the FBG-HCF temperatruue-strain dual-parameter sensor under different strains

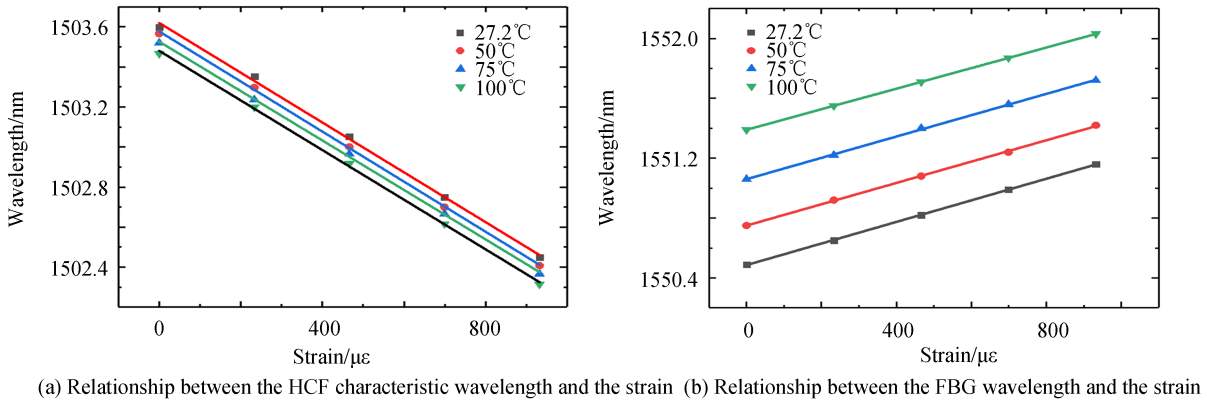


图 6 不同温度下波长与应变对应的关系

Fig. 6 Relationship between the wavelength and the strain under different temperatures

在零应变下,FBG 反射光谱的中心波长温度与波长的对应关系如图 7(b)所示,可以看到,温度和波长的对应关系呈线性分布,线性度为 99.75%。温度上升时,FBG 的反射光谱的中心波长向长波长方向移动,计算得到 FBG 温度灵敏度为 $K_{\text{FBG},T}=10.5306 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

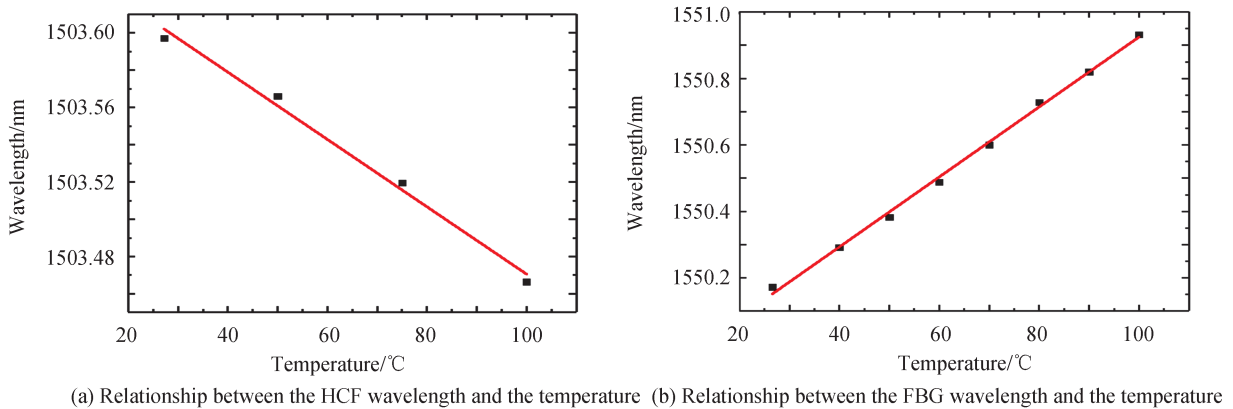


图 7 无应变时温度-波长对应曲线关系

Fig. 7 Correspondence relationship between temperature-wavelength without strain.

光纤温度应变传感器在实际测量过程中容易受到温度-应变交叉敏感性的影响,存在一定的测量误差。本文研究的 FBG-HCF 混合型温度应变双参量光纤传感器中的 FBG 和 HCF 对温度和应变同时敏感,通过实验测得 HCF 的应变、温度灵敏度分别为 $K_{\text{MMI},\epsilon}=-1.2432 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $K_{\text{MMI},T}=-1.8021 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,FBG 的温度、应变灵敏度分别为 $K_{\text{FBG},\epsilon}=0.7207 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $K_{\text{FBG},T}=10.5306 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。将 FBG 和 HCF 的温度和应变灵敏度

$K_{\text{MMI},\epsilon} = -1.2432 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $K_{\text{MMI},T} = -1.8021 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、 $K_{\text{FBG},\epsilon} = 0.7207 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $K_{\text{FBG},T} = 10.5306 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 代入式(9)中得

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7207 & 10.5306 \\ -1.2432 & -1.8021 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{FBG}} \\ \Delta\lambda_{\text{MMI}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过同时追踪分析HCF多模干涉信号与FBG的透射或反射光谱信号,可以实现温度 ΔT 和应变 $\Delta\epsilon$ 的同时测量,同时,消除温度-应变交叉敏感性的影响。

可以看到,FBG-HCF温度应变双参量传感器的透射光谱会出现多个空芯光纤多模干涉特征峰,不同于涉峰在温度或者应变变化时,响应灵敏度有所不同。可以通过实验进行测量表征,选择响应灵敏度最高的多模干涉特征峰的峰值波长作为传感量。另外,实际的空芯光纤多模干涉特征峰与FBG布拉格波长可能发生混叠,对双参量测量产生不利影响。在实际设计传感器时,可以首先通过实验观测HCF透射光谱中各多模干涉特征峰位置,然后再根据透射光谱粗略确定FBG布拉格波长,确保FBG布拉格波长位置不与HCF多模干涉特征峰位置发生混叠。

4 结论

本文结合FBG和HCF中的多模干涉效应,研究并实现了一种易于制作的、灵敏度高的FBG-HCF混合型温度-应变双参量传感器,并进行了实验测试。传感器由两根单模光纤与一段内径小于单模光纤纤芯直径的空芯光纤熔接制成,其中一根单模光纤的光纤端面附近预刻一组FBG。通过求解温度和应变的双参数耦合矩阵方程,实现了温度-应变的同时测量,并有效克服了温度-应变交叉敏感性的影响。实验结果表明该传感器FBG反射峰和HCF多模干涉特征峰的温度灵敏度分别达到 $10.5306 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $1.8021 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,应变灵敏度分别达到 $0.7207 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $1.2432 \text{ pm}/\mu\epsilon$,并且具有99%以上的线性度。

参考文献

- [1] CHIANG C C, LI C H. A packaged, low-cost, robust optical fiber strain sensor based on small cladding fiber sandwiched within periodic polymer grating[J]. Optics Express, 2014, 22(11):13916-13926.
- [2] SUN H, HU M, RONG Q, et al. High sensitivity optical fiber temperature sensor based on the temperature cross-sensitivity feature of RI-sensitive device[J]. Optics Communications, 2014, 323:28-31.
- [3] HONG S, JUNG W, NAZARI T, et al. Thermo-optic characteristic of DNA thin solid film and its application as a biocompatible optical fiber temperature sensor[J]. Optics Letters, 2017, 42(10):1943-1945.
- [4] JIANG Jian, RAO Yunjiang, NIU Yongchang, et al. Application of LPFG/EFPI integrated optical fiber sensor to realize simultaneous measurement of temperature and strain[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(9):1063-1066.
江建,饶云江,牛永昌,等.应用LPFG/EFPI集成式光纤传感器实现温度及应变的同时测量[J].光子学报,2003,32(9):1063-1066.
- [5] HAN Xiaopeng, LIU Chunyu, ZHAO Chunlong, et al. A DOT structure based on Mach-Zehnder interference principle for simultaneous strain and temperature sensing[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(8): 0806004.
韩晓鹏,柳春郁,赵纯龙,等.基于马赫曾德尔干涉原理的优化双锥结构应变温度同步传感[J].光子学报,2020,49(8):0806004.
- [6] YAN L, GUI Z, WANG G, et al. A micro bubble structure based Fabry - Perot optical fiber strain sensor with high sensitivity and low-cost characteristics[J]. Sensors, 2017, 17(3):555-562.
- [7] LI X, ZHEN S, QIAN K, et al. A heat-resistance and high-sensitivity acoustic pressure sensor based on aluminum-polyimide diaphragm[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279(5):75-78.
- [8] DAVIS M A, KERSEY A D. Simultaneous measurement of temperature and strain using fibre Bragg gratings and Brillouin scattering[J]. IEE Proceedings - Optoelectronics, 2002, 144(3):151-155.
- [9] MAUGHAN S M, KEE H H, NEWSON T P. Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter[J]. Measurement Science & Technology, 2001, 12(7): 834-842.
- [10] YU Xiujuan, YU Youlong, ZHANG Min, et al. Study on the strain and temperature densing characteristics of FBG packaged by the copper slice[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(9):1325-1328.
于秀娟,余有龙,张敏,等.铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J].光子学报,2006,35(9):1325-1328.
- [11] CHANGPENG L, YI L, KUNJIAN C, et al. Temperature-insensitive optical fiber strain sensor with ultra-low detection limit based on capillary-taper temperature compensation structure[J]. Optics Express, 2018, 26(1):477-487.

- [12] ZHANG Shan, HUANG Zhanhua, LI Guifang, et al. Temperature-insensitive strain sensing based on few mode fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2):0210002.
张珊,黄战华,李桂芳,等.温度不敏感的少模光纤应变传感[J].中国激光,2017,44(2):0210002.
- [13] HAN Y G, LEE S, KIM C S, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain using dual long-period fiber gratings with controlled temperature and strain sensitivities[J]. Optics Express, 2003, 11(5):476-481.
- [14] HUANG Z, ZHU Y, CHEN X, et al. Intrinsic Fabry-Pe'rot fiber sensor for temperature and strain measurements[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(11):2403-2405.
- [15] OH S, HAN W, PAEK U, et al. Discrimination of temperature and strain with a single FBG based on the birefringence effect[J]. Optics Express, 2004, 12(4):724-729.
- [16] ALAHBABI M N, CHO Y T, NEWSON T P. Simultaneous temperature and strain measurement with combined spontaneous Raman and Brillouin scattering[J]. Optics Letters, 2005, 30(11):1276-1278.
- [17] RAO Y J, RAN Z L, LIAO X, et al. Hybrid LPPG/MEFPI sensor for simultaneous measurement of high-temperature and strain[J]. Optics Express, 2007, 15(22):14936-14941.
- [18] TAN Zhan, LIAO Changrui, LIU Shen, et al. Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12):1206007.
谭展,廖常锐,刘申,等.基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器[J].光学学报,2018,38(12):1206007.
- [19] ZHANG Y, ZHANG W, CHEN L, et al. High sensitivity optical fiber liquid level sensor based on a compact MMF-HCF-FBG structure [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(5): 055104.
- [20] WU Y, YANG Y, JIN W, et al. Compact Mach-Zehnder interferometer-based no-core fiber hollow-core fiber no-core fiber structure[J]. Optical Engineering, 2017, 56(3):030501.
- [21] COELHO L, KOBELKE J, SCHUSTER K, et al. Optical refractometer based on multimode interference in a pure silica tube[J]. Optical Engineering, 2011, 50(10):100504.
- [22] LI Lijun, MA Qian, CAO Maoyong, et al. Simulation and analysis of sensing modes of in-fiber interferometer[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(22):130-136.
李丽君,马茜,曹茂永,等.全光纤干涉式结构中传感模式仿真分析[J].物理学报,2017,66(22):130-136.