光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20241102001

基于萨格纳克环级联光纤布拉格光栅的双参量传感器

陈慧超，刘成晨，陈志萌，黄昌清*

（中国计量大学 光学与电子科技学院，杭州 310018）

摘　要： 设计了一种基于错位保偏光纤-少模光纤的萨格纳克环级联光纤布拉格光栅高灵敏度双参量传感器，可实现对应变和温度的同步测量。首先将保偏光纤沿慢轴方向与单模光纤进行错位熔接，随后将其另一端与少模光纤熔接形成复合光纤结构。通过将复合光纤结构的两端连接到至3 dB光纤耦合器，形成萨格纳克环路，萨格纳克环与光纤布拉格光栅级联形成基于错位保偏光纤-少模光纤的萨格纳克环级联光纤布拉格光栅的传感探头。实验结果表明，萨格纳克环应变灵敏度可达19.14 pm/με，温度灵敏度为－1.5 nm/℃，光纤布拉格光栅应变灵敏度为1 pm/με，温度灵敏度为10.8 pm/℃。该传感器通过双参量灵敏度矩阵实现了温度与应变的同步测量，具有灵敏度高、结构紧凑的技术优势。

关键词： 萨格纳克环；光纤温度传感器；光纤应变传感器；交叉敏感

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2025)01－0057－06

High-Sensitivity Dual-Parameter Sensor for Strain and Temperature Based on Sagnac Loop Cascaded with Fiber Bragg Grating

CHEN Huichao, LIU Chengchen, CHEN Zhimeng, HUANG Changqing

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

Abstract: A high-sensitivity dual-parameter sensor for strain and temperature measurement is developed based on a Sagnac loop cascaded with a fiber Bragg grating (FBG). The sensor employs a misaligned polarization-maintaining fiber (PMF) and few-mode fiber (FMF) structure. The strain and temperature sensing characteristics were systematically analyzed through experiments. The sensor design involves splicing a section of PMF to a single-mode fiber (SMF) with deliberate misalignment along the slow axis, followed by splicing the other end of the PMF to an FMF, creating a misaligned PMF-FMF structure. The ends of this structure were connected to a 3 dB optical fiber coupler, forming a Sagnac loop, which was then cascaded with the FBG to construct the sensing probe. Experimental results demonstrate that the strain sensitivity of the Sagnac loop reaches 19.14 pm/με, with a temperature sensitivity of －1.5 nm/°C. Additionally, the FBG exhibits a strain sensitivity of 1 pm/με, and a temperature sensitivity of 10.8 pm/°C. This sensor achieves high sensitivity for both parameters, enabling simultaneous and accurate measurement of strain and temperature.

收稿日期：2024－11－02.

基金项目：浙江省基础公益研究计划项目(LGG19A040001).

*通信作者：黄昌清

Key words: Sagnac loop; fiber optic temperature sensor; fiber optic strain sensor; cross-sensitivity

0 引言

光纤传感器以其结构简单、耐腐蚀性、灵敏度高、光束质量优异以及单纵模输出稳定等特点受到广泛关注。该传感器可测量包括温度、湿度、应变、压力、溶液浓度、折射率等多种参数，在工业监测、生物医学以及国防安全等领域展现出重要应用价值[1-2]。相较于传统传感器，光纤传感器在温度检测方面具有显著优势，其体积更小、重量更轻、测量范围更宽、灵敏度更高，且能有效扩展传统传感器的应用场景[3-4]。在应变与折射率测量方面，光纤传感技术不仅具有上述优势，还具备强抗电磁干扰、宽工作带宽及快速响应等特性，已成功应用于生物分子检测、医疗健康监护及建筑结构监测等领域[5-7]。

根据传感原理差异，光纤温度/应变传感器主要分为干涉类和光纤光栅类两类。前者包括Mach-Zehnder干涉仪(MZI)[8-9]、萨格纳克干涉仪(SI)[10-11]、Michelson干涉仪(MI)[12]和Fabry-Perot干涉仪(FPI)[13-14]；后者涵盖光纤布拉格光栅(FBG)[15-16]和长周期光栅(LPG)[17-18]等。Liu等通过将FBG集成至SI中，实现0～5 187 με范围的应变测量，平均灵敏度达到17.08 pm/με[19]。Wu等利用空芯光纤(内径为50 μm、外径为125 μm)与单模光纤熔接制备微泡结构，当气泡尺寸为82 μm×146 μm时，获得3.29 pm/με应变灵敏度[20]。Li等基于模态干涉，提出了一种含芯偏置光纤传感器的剥离涂层结型结构，实现位移和温度双参量传感，温度灵敏度为31.66 pm/℃，位移灵敏度为－528.57 pm/μm[21]。然而，现有方案普遍存在双参量检测能力不足、温度灵敏度受限或系统复杂度高等问题。

本文提出一种基于保偏光纤(PMF)-少模光纤(FMF)复合结构与光纤布拉格光栅级联的新型萨格纳克干涉传感系统。首先将一段PMF沿慢轴方向与单模光纤(SMF)进行错位熔接，另一端与FMF熔接构成PMF-FMF复合波导；然后将该结构接入3 dB光纤耦合器形成Sagnac干涉环，最终与FBG级联构成双参量传感探头。实验结果表明，萨格纳克干涉环的应变灵敏度达19.14 pm/με，温度灵敏度－1.5 pm/℃；FBG对应变的灵敏度为1 pm/με，温度灵敏度10.8 pm/℃。该系统能够实现温度与应变的同步测量，兼具高灵敏度、强抗干扰性与结构简单等优势，为光纤传感技术在光学精密测量领域的应用提供参考。

1 传感器结构与原理分析

实验使用的SMF纤芯直径和包层直径分别为9.0和125 μm；PMF为标准熊猫型保偏光纤(PM15-17034)，纤芯直径和包层直径分别为10 μm和125 μm；FMF为四模阶跃型光纤，纤芯直径和包层直径分别为18.5 μm和125 μm。PMF沿慢轴方向与SMF错位距离为4.5 μm，FMF的长度选用10 cm，PMF的长度选用50 cm，FBG的中心波长为1 549.15 nm；将制备好的基于错位PMF-FMF的Sagnac环级联FBG的传感探头两个端口分别连接到宽带光源(BBS)和光谱分析仪(OSA，AQ6370D)，所提光纤传感器结构如图1所示。

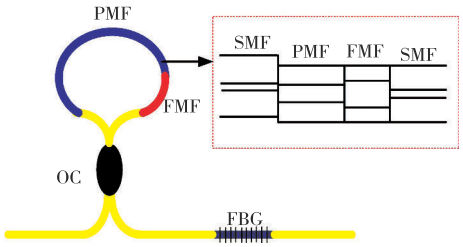


图1 基于错位PMF-FMF的Sagnac环级联FBG结构图

BBS输出的光经过3 dB耦合器分成两束光，一束光顺时针传输，另一束光逆时针传输。当一束光顺时针传输时，由于分束端的SMF和PMF之间采用的是错位熔接的方式，入射光的一部分被耦合进入PMF的包层中成为高阶包层模式，剩余的入射光仍然在纤芯内继续沿轴向传输经过FMF。同时由于纤芯不匹配，剩余入射光再次激发出高阶模成为高阶包层模式，之后纤芯模与所有包层模耦合到SMF纤芯中。当另一束光逆时针传输时，先经过FMF，由于FMF和PMF纤芯不匹配，激发出高阶模，之后高阶模与基模经过错位结构耦合到SMF纤芯中，两束传播方向相反的光在3 dB耦合器中耦合从而形成干涉，干涉光经过FBG最后到达OSA。

理想情况下，忽略光纤和耦合器的耦合熔堆区的偏振效应以及熔接接口的损耗。基于错位PMF-FMF的Sagnac环的传输频谱可写作为一个周期波

长相关函数，其传输函数为：

$$T_{\mathrm{PMF-FMF}}=\frac{1-\cos\varphi}{2} \tag{1}$$

式中，φ是基于PMF-FMF的Sagnac环的相位差。

当基于错位PMF-FMF的Sagnac环在空气中时，两束传播方向相反的光在3 dB耦合器中耦合发生干涉时的累积相位差可表示为：

$$\varphi=\frac{2\pi(BL_1+n_{\mathrm{eff}}L_2)}{\lambda} \tag{2}$$

式中，B是PMF快轴和慢轴之间的双折射率差，n_{eff}是基模和高阶模的有效折射率之差，L_1是PMF的长度，L_2是FMF的长度，λ是入射光的波长。

当相位差满足$\varphi=(2k+1)\pi$($k=0,1,2,\cdots$)条件时，k阶波峰对应的谐振倾角波长可表示为：

$$\lambda_k=\frac{2(BL_1+n_{\mathrm{eff}}L_2)}{2k+1} \tag{3}$$

式中，k是干涉的阶数。基于错位PMF-FMF的Sagnac环自由光谱范围可表示为：

$$FSR_{\mathrm{PMF-FMF}}=\lambda_k-\lambda_{k+1}=\frac{\lambda_k\lambda_{k+1}}{BL_1+n_{\mathrm{eff}}L_2}\approx\frac{\lambda_k^2}{BL_1+n_{\mathrm{eff}}L_2} \tag{4}$$

式中，λ_{k+1}是$k+1$阶波峰对应的波长，光纤相位差的变化$\Delta\varphi$可以描述为：

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}(\Delta BL_1+\Delta n_{\mathrm{eff}}L_2+B\Delta L_1+n_{\mathrm{eff}}\Delta L_2) \tag{5}$$

式中，ΔB为应变和温度引起的PMF双折射的变化量，Δn_{eff}为应变和温度引起的基模和高阶模的有效折射率之差的变化量，ΔL_1为应变和温度引起的PMF长度的变化量，ΔL_2应变和温度引起的FMF长度的变化量。由于相位差的变化，干涉倾角的波长位移可表示为：

$$\Delta\lambda_{\mathrm{Sagnac}}=\frac{FSR_{\mathrm{PMF-FMF}}\Delta\varphi}{2\pi} \tag{6}$$

当应力或温度施加于传感探头时，光纤的折射率差和光纤结构长度会发生相应的变化，从而引起谐振倾角偏移。因此，该传感器的应变和温度灵敏度可以通过监测谐振倾角的位移来确定。

当入射光进入FBG时，入射光的波长等于FBG的中心波长的光会被FBG反射，并且在透射光谱中会留下一个向下的峰。FBG透射光谱的中心波长为：

$$\lambda_{\mathrm{FBG}}=2n_{\mathrm{FBG}}\Lambda \tag{7}$$

式中，λ_{FBG}是布拉格波长，n_{FBG}是光栅的有效折射率，而Λ是光栅之间的间隔长度即光栅周期。当有应变作用于FBG时或FBG周围温度变化时，光栅周期因为应变变化通过弹光效应改变了光栅的有效折射率而发生变化。光栅的周期和有效折射率因为温度变化通过热膨胀效应和热光效应而分别发生变化。FBG透射光谱的中心波长随温度和应变的变化可近似为：

$$\Delta\lambda_{\mathrm{FBG}}=\lambda_{\mathrm{FBG}}(1-p_{\mathrm{e}})\Delta\varepsilon+\lambda_{\mathrm{FBG}}(\alpha+\xi)\Delta T \tag{8}$$

式中，p_{e}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。

为了同时测量应变和温度，最少测量两个谐振倾角的波长位移，因此选择级联一个FBG构成基于错位PMF-FMF的Sagnac环级联FBG的传感探头。倾角波长随温度变化和应变的位移$\Delta\lambda_{\mathrm{FBG}}$和$\Delta\lambda_{\mathrm{Sagnac}}$可以表示为：

$$\begin{bmatrix}\Delta\lambda_{\mathrm{FBG}}\\ \Delta\lambda_{\mathrm{Sagnac}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}S_{T\text{-}\mathrm{FBG}} & S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{FBG}}\\ S_{T\text{-}\mathrm{Sagnac}} & S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{Sagnac}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta T\\ \Delta\varepsilon\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中，$S_{T\text{-}\mathrm{FBG}}$和$S_{T\text{-}\mathrm{Sagnac}}$为FBG和基于错位PMF-FMF的Sagnac环的温度灵敏度，$S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{FBG}}$和$S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{Sagnac}}$为应变灵敏度。矩阵经过变换后，应变和温度的变化可以用以下矩阵来测量：

$$\begin{bmatrix}\Delta T\\ \Delta\varepsilon\end{bmatrix}=\left(\frac{1}{S_{T\text{-}\mathrm{FBG}}S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{Sagnac}}-S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{FBG}}S_{T\text{-}\mathrm{Sagnac}}}\right)\cdot\begin{bmatrix}S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{Sagnac}} & -S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{FBG}}\\ -S_{T\text{-}\mathrm{Sagnac}} & S_{T\text{-}\mathrm{FBG}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\lambda_{\mathrm{FBG}}\\ \Delta\lambda_{\mathrm{Sagnac}}\end{bmatrix} \tag{10}$$

温度误差(δ_T)和应变误差(δ_ε)可以用波长分辨率δ_λ(本次实验$\delta_\lambda=0.02$ nm)的函数来表示：

$$\delta_{\mathrm{T}}=\pm\frac{\left|S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{Sagnac}}\right|+\left|S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{FBG}}\right|}{\left|S_{T\text{-}\mathrm{FBG}}S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{Sagnac}}-S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{FBG}}S_{T\text{-}\mathrm{Sagnac}}\right|}\delta_\lambda \tag{11}$$

$$\delta_{\varepsilon}=\pm\frac{\left|S_{T\text{-}\mathrm{Sagnac}}\right|+\left|S_{T\text{-}\mathrm{FBG}}\right|}{\left|S_{T\text{-}\mathrm{FBG}}S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{Sagnac}}-S_{\varepsilon\text{-}\mathrm{FBG}}S_{T\text{-}\mathrm{Sagnac}}\right|}\delta_\lambda \tag{12}$$

2　实验与分析

为研究系统的独立应变或温度响应，使用BBS、分辨率带宽为0.02 nm的OSA、微位移平台和加热台构建了实验装置，如图2所示。

图3展示了在室温下没有施加任何应变的情况下基于错位PMF-FMF的Sagnac环级联FBG的光谱，dip_1为Sagnac环的一个干涉倾角，dip_2为FBG的透射倾角，dip_1和dip_2的波长分别为1 543.2和1 549.15 nm。

首先，在应变测量实验中，使用粘合剂将PMF-FMF和FBG分别固定在微位移台中间，实验装置

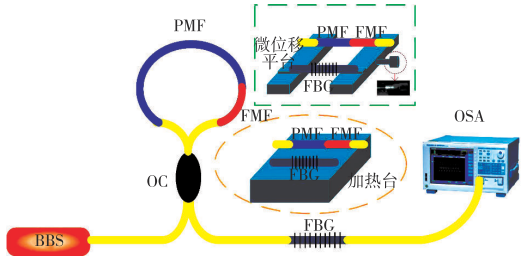


图2 基于错位PMF-FMF的Sagnac环级联FBG的测应变和测温的实验装置图

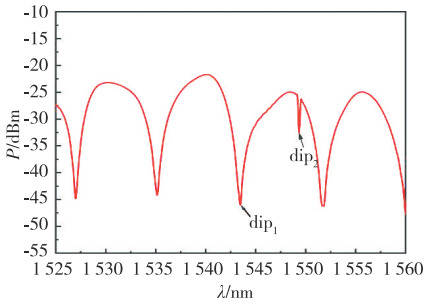


图3 基于错位PMF-FMF的Sagnac环级联FBG光谱

如图2绿色虚线方框所示，通过转动右侧应变位移台的旋钮对PMF-FMF和FBG施加轴向应变，轴向分辨率为10 μm。位移平台的位移量ΔL和应变量ε之间的关系可以表示为：

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \tag{13}$$

式中，L_0是两个应变位移台之间的初始距离。

两个应变位移台之间的初始距离L_0设定为20 cm，每次将旋钮旋转最小单位0.01 mm，即轴向拉伸长度ΔL=0.01 mm，根据公式(13)可算出对应的应变变化为50 με，应变从0 με增加到250 με，每次增加50 με，用光谱分析仪测量输出光谱。

图4和图5分别展示了在室温(25 ℃，ΔT=0)下，当外加应变范围为0～250 με时，制备的基于错位PMF-FMF的Sagnac环的干涉倾角dip_1和FBG透射倾角dip_2的应变光谱变化。从图中可以看出，随着施加应变的增加，dip_1和dip_2分别表现出不同程度的红移(红色箭头方向)。

图6、7分别展示了dip_1和dip_2干涉倾角和透射倾角波长位移，分别用黑色圆圈和红色方块表示，图中实线为测量数据点的线性拟合。从图中可看出，dip_1和dip_2呈现线性关系，且分别具有0.991和0.997的线性拟合度。通过计算测量结果得出，dip_1和dip_2的应变灵敏度分别约为19.14和1 pm/με。

在30～35 ℃的温度范围内测量dip_1的光谱变化(步长为1 ℃)，在30～55 ℃的温度范围内测量dip_2的光谱变化(步长为5 ℃)，图8(a)和(b)显示了制备的基于错位PMF-FMF的Sagnac环级联FBG光纤传感器的dip_1的升温和降温引起的光谱变化，图9(a)和图9(b)显示了dip_2的升温和降温引起的光谱

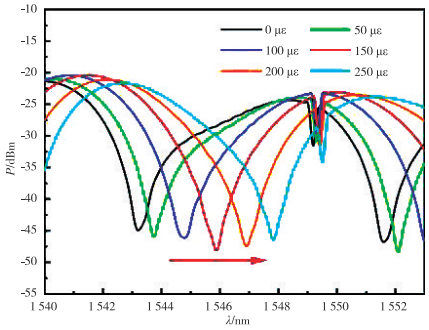


图4 dip_1应变光谱变化

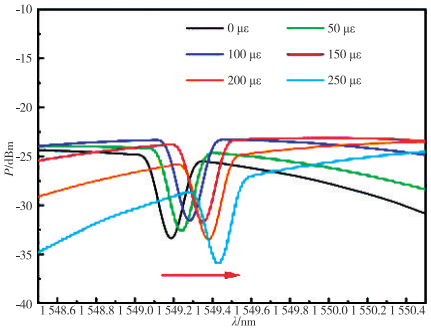


图5 dip_2应变光谱变化

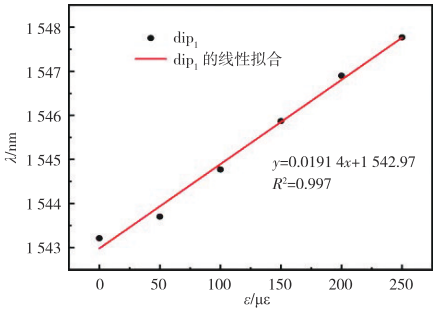


图6 dip_1应变的线性拟合

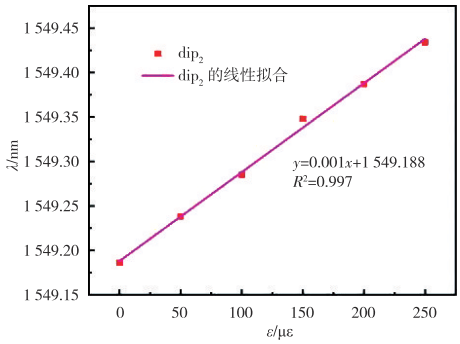
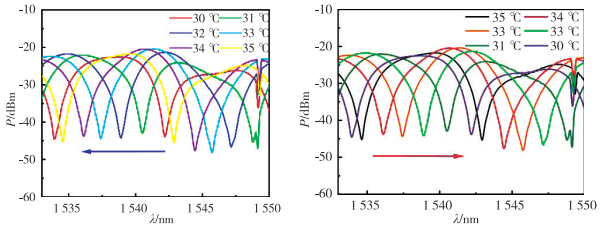


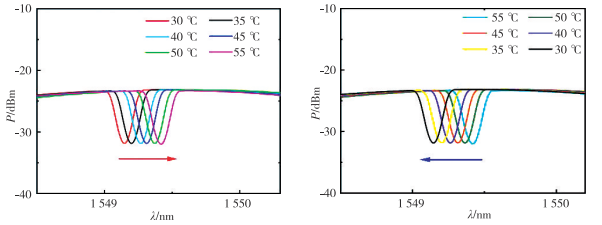
图7 dip_2应变的线性拟合

变化，分别在施加温度为 30～35 ℃和 30～55 ℃而不施加应变（$\Delta\varepsilon=0$）的情况下测量。从图中可以看出，随着环境温度的升高，dip_1和dip_2分别蓝移（蓝色箭头方向）和红移（红色箭头方向）。



（a）升温　　（b）降温

图 8　dip_1温度光谱变化



（a）升温　　（b）降温

图 9　dip_2温度光谱变化

图 10 和图 11 分别展示了升温和降温过程中dip_1和dip_2的波长位移，分别用黑色菱形、红色菱形、黑色三角形、红色三角形表示，图中的实线展示测量数据点的线性拟合。

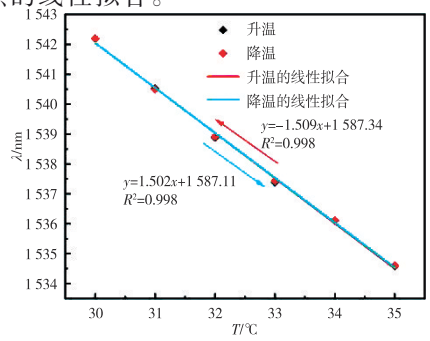


图 10　dip_1升降温的线性拟合

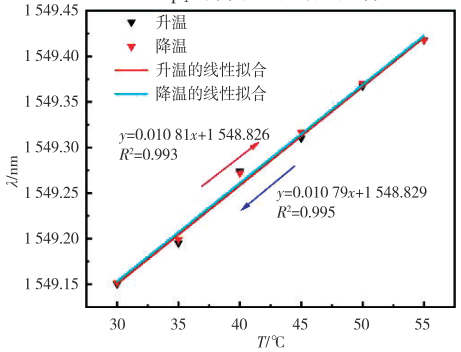


图 11　dip_2升降温的线性拟合

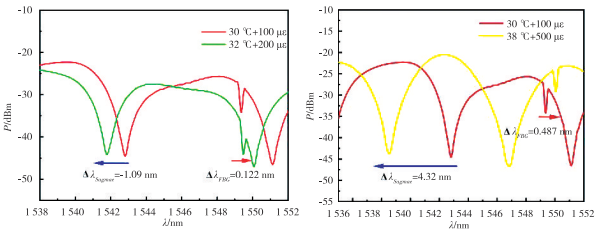
从图中可以看出，dip_1和dip_2呈良好的线性关系，且升温和降温分别具有 0.998，0.998，0.993，0.995 的线性拟合度。通过计算测量结果得出，dip_1和dip_2的温度灵敏度分别约为－1.5 nm/℃和 10.8 pm/℃。

根据 4 个灵敏度系数S_{T-FBG}，$S_{T-Sagnac}$，$S_{\varepsilon-FBG}$，$S_{\varepsilon-Sagnac}$的测量结果，可将公式（10）改写为：

$$\begin{bmatrix}\Delta T\\ \Delta\varepsilon\end{bmatrix}=\frac{1}{1\,706.712}\begin{bmatrix}19.14 & -1\\ 1\,500 & 10.8\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\lambda_{FBG}\\ \Delta\lambda_{Sagnac}\end{bmatrix}\quad(14)$$

通过测量dip_1和dip_2的波长位移（$\Delta\lambda_{Sagnac}$和$\Delta\lambda_{FBG}$），可以使用公式（14）直接求出外加应变和温度。由公式（11）和（12）可知，判别误差为：$\delta_T=\pm0.011\,8$ ℃，$\delta_\varepsilon=\pm0.885$ με。

为验证公式（14）的准确性，同时测量应变和温度，对传感器施加的初始应变设置为 100 με，设置加热台的初始温度为 30 ℃，然后将应变分别增加到 200 和 500 με，相应加热台的温度分别增加到 32 和 38 ℃。第一种情况下，应变变化和温度变化分别 100 με 和 2 ℃；第二种情况下，应变变化和温度变化分别 400 με 和 8 ℃，两种情况下光谱的波长偏移分别如图 12（a）和（b）所示。根据图 12 的结果，第一种情况下，dip_1和dip_2波长变化分别为－1.09 和 0.122 nm，第二种情况下，dip_1和dip_2的波长变化分别为－4.32 和 0.487 nm。将两种情况的波长变化分别代入公式（14），计算得到第一种情况下的应变变化和温度变化分别为 100.326 με 和 2.007 ℃，第二种情况下的应变变化和温度变化分别为 400.679 με 和 7.993 ℃。所得结果近似与实际值相等，故该传感器可以实现应变和温度的同时测量。



（a）应变和温度分别增加 100 με 和 2 ℃　　（b）应变和温度分别增加 400 με 和 8 ℃

图 12　同时测量应变和温度时光谱的波长偏移

3　结论

本文提出了一种高灵敏度的全光纤应变和温度传感器。在该传感探头中，Sagnac 环的应变灵敏度可达 19.14 pm/με，温度灵敏度可达－1.5 nm/℃；FBG

应变灵敏度为1 pm/με,温度灵敏度为10.8 pm/℃。该光纤传感器具有灵敏度高、抗干扰能力强、结构简单等优点,与其他光纤传感器相比具有较高的应变和温度灵敏度。在0.02 nm的波长分辨率下,应变和温度的分辨率分别为0.885 με和0.0118 ℃。该光纤传感器结构简单且灵敏度高,是应变和温度测量的可选方案。

参考文献:

[1] Liu M, Wu Y, Song H, et al. Multiparameter measuring system using fiber optic sensors for hydraulic temperature, pressure and flow monitoring[J]. Measurement, 2022, 190: 110705.

[2] Zhao J, Zhao Y, Cai L. Hybrid fiber-optic sensor for seawater temperature and salinity simultaneous measurements [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(3): 880-886.

[3] Pizzaia J P L, Castellani C E S, Leal-Junior A G. Highly sensitive temperature sensing based on a birefringent fiber Sagnac loop [J]. Optical Fiber Technology, 2022, 72: 102949.

[4] Habisreuther T, Elsmann T, Graf A, et al. High-temperature strain sensing using sapphire fibers with inscribed first-order Bragg gratings[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 1-8.

[5] Wang M, Liu F, Zhou X, et al. Optical fiber sensing technologies based on femtosecond laser micromachining and sensitive films[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 070703.

[6] Rao Y J. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 139-157.

[7] Zhang Q, Wang Y, Zhang M, et al. Distributed temperature measurement with millimeter-level high spatial resolution based on chaotic laser [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(10): 104208.

[8] Zhao C, Xu L, Liu L. Ultrahigh sensitivity Mach-Zehnder interferometer sensor based on a weak one-dimensional field confinement silica waveguide [J]. Sensors, 2021, 21(19): 6600.

[9] Machikhin A S, Polschikova O V, Ramazanova A G, et al. Spectral holographic imaging of transparent objects in Mach-Zehnder interferometer using acousto-optic filter[J]. Physics of Wave Phenomena, 2016, 24: 129-134.

[10] Moan E, Luo Z, Sackett C A. A large-area Sagnac interferometer using atoms in a time-orbiting potential [J]. Proc. SPIE, 2019, 10934: 223-231.

[11] Shao L Y, Luo Y, Zhang Z, et al. Temperature sensor with enhanced sensitivity by cascaded fiber optic Sagnac loops[J]. Proc. SPIE, 2014, 9157: 309-312.

[12] Glebov V, Lashmanov O. Modelling of interference pattern produced by Michelson interferometer [J]. Proc. SPIE, 2016, 9889: 280-285.

[13] Zhang Z, Leng Y, Lu X, et al. Germanium Fabry-Perot interferometer heated with a ND: YAG laser[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2017, 59(5): 1009-1012.

[14] Padron I, Fiory A T, Ravindra N M. Novel MEMS Fabry-Perot interferometric pressure sensors[C]// 6th International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials, 2010, 638: 1009-1014.

[15] Wu X, Xue H, Meng H, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain by combining a fiber Bragg grating and the pigtail fiber covered with epoxy resin [J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(6): 064904.

[16] Chen J, Liu Q, He Z. High-resolution simultaneous measurement of strain and temperature using π-phase-shifted FBG in polarization maintaining fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(22): 4838-4844.

[17] Chen C, Li X, Ding H. A novel wavelength demodulation technique for interferometric fiber optic sensor [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(9): 2948-2953.

[18] Wu Y, Ye H, Han J, et al. Supercontinuum generation degradation of 1 040 nm laser pumped photonic crystal fibers [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(11): 3588-3594.

[19] Liu C, Chen H, Chen Q, et al. Sagnac interferometer-based optical fiber strain sensor with exceeding free spectral measurement range and high sensitivity [J]. Optics & Laser Technology, 2023, 159: 108935.

[20] Wu Y, Zhang Y, Wu J, et al. Temperature-insensitive fiber optic Fabry-Perot interferometer based on special air cavity for transverse load and strain measurements[J]. Optics Express, 2017, 25(8): 9443-9448.

[21] Li C, Yang W, Yu X, et al. A knotted shape core cladding optical fiber interferometer for simultaneous measurement of displacement and temperature [J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2020, 39: 100778.

作者简介:

陈慧超(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤温度传感技术;

黄昌清(1980—),男,博士,教授,主要研究方向为光纤激光器和传感器、光子晶体光纤。