

基于长周期光纤光栅嵌入型 Sagnac 环光谱的折射率测量

康娟^{1,2}, 董新永¹, 赵春柳¹, 张在宣¹, 金尚忠²

1. 中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018

2. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

摘要 将长周期光纤光栅(LPG)和光纤 Sagnac 环相结合, 实现了折射率和温度的同时测量。首先利用二氧化碳激光器在保偏光纤上制作了长周期光纤光栅(PM-LPG), 然后把该 PM-LPG 和普通单模光纤耦合器组成 Sagnac 环, 作为传感单元。实验选择其某一透射峰作为测试对象, 其波长随温度变化, 强度随折射率变化, 因此可实现两个参量的同时测量。实验获得的温度灵敏度为 $-0.654 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 折射率灵敏度为 $49.9 \text{ dB} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。整个实验系统成本低、简单实用, 具有较好的应用前景。

关键词 光纤 Sagnac 环; 保偏光纤; 长周期光纤光栅; 折射率传感器

中图分类号: TN253 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)04-0902-04

引言

基于光纤 Sagnac 环的传感器具有灵敏度高、测量准确、抗电磁干扰、制作方便等优点, 被广泛应用于角速度传感、电流传感、温度传感、定位技术和分布式光纤传感等测试场合^[1-3]。在光纤温度测试领域, 实验表明 Sagnac 具有比长周期光栅和光纤光栅高得多的温度灵敏度^[4, 5], 可应用于高精度温度测试。但 Sagnac 环无法实现诸如温度和折射率的双参数测量^[6]。而长周期光栅(LPG)作为一种透射型光纤光栅, 其谐振波长对外界环境的变化非常敏感, 对环境折射率、应力、弯曲等都具有较高的灵敏度^[7, 8]。把 LPG 作为折射率传感器的工作屡见报道, 但 LPG 同时对温度敏感使得测试结果不可靠^[9, 10], 需要额外的温度补偿技术。报道^[6]中有把 LPG 和高双折射率光纤连接形成光纤 Sagnac 环用于应力和温度双参数测量, 但整个传感器的传感部分体积较大, 不易控制且测试精度不高^[11, 12]。本系统利用光纤 Sagnac 环的高灵敏度温度测量结合 LPG 的折射率敏感特性, 获得折射率和温度的双参数同时测量, 具备体积小, 测试精度高的特点。

本文在不改变 Sagnac 环结构的基础上, 在组成 Sagnac 环的保偏光纤上利用 CO₂ 激光器制作了长周期光纤光栅(PM-LPG), 由该 PM-LPG 和普通单模光纤耦合器组成 Sagnac 环进行折射率和温度的双参数传感。该传感系统结合了

LPG 和光纤 Sagnac 环两者的特点, 具有对折射率和温度的高敏感特性, 同时利用二者对折射率和温度的不同响应实现了双参数同时测量。初步的实验结果证实了此设计的可行性, 整个实验系统成本低、简单实用, 制作方便。

1 长周期光纤光栅嵌入型 Sagnac 环结构原理

1.1 光纤 Sagnac 环结构

本文提出的长周期光纤光栅嵌入型的 Sagnac 环是一种典型的双光束光纤干涉仪, 其基本结构如图 1 所示。

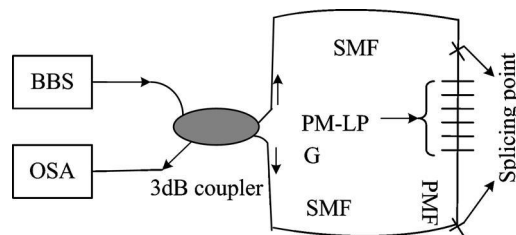


Fig 1 Schematic of the proposed Sagnac loop sensor

在图 1 中, 宽光源 BBS 发出的光经 3dB 耦合器后被分成两束光, 两束光经过 PM-LPG 后, 在 3 dB 耦合器的耦合区合束并产生干涉, 通过光谱仪(OSA)来监测其透射光谱的变化。该结构与传统的 Sagnac 环原理相同, 但其周期性透射谱被 LPG 的透射曲线调制。

收稿日期: 2010-11-25, 修订日期: 2011-02-26

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2010CB327804), 浙江省科技厅公益技术应用研究项目(2010C33056)和浙江省自然科学基金项目(Y4100571)资助

作者简介: 康娟, 女, 1977 年生, 中国计量学院光电学院讲师, e-mail: kangjuan@cju.edu.cn

图 2 中实线所示为 LPG 嵌入型 Sagnac 环的透射光谱图, 虚线为 CO₂ 激光器制作的 PM-LPG 的透射谱。其中 LPG 的周期为 480 μm, 长度为 24 mm, 所用保偏光纤的拍长在 1 550 nm 处为 3.1 mm、双折射系数 $B = 5 \times 10^{-4}$ 。Sagnac 环中保偏光纤的总长度为 $L = 1.4$ m。根据理论计算干涉条纹的间隔 $\Delta\lambda = \lambda^2 / (B \cdot L) = 3.432$ nm, 与实际测量结果 $\Delta\lambda = 3.4$ nm 吻合的很好。由图 2 虚线可以看出, 由于保偏光纤的双折射特性, PM-LPG 的透射谱出现两个明显的谐振峰 Dip A1 (1 548.125 nm) 和 Dip C (1 579.625 nm), 分别对应于两个偏振态。由图 2 实线可以看出, 光纤 Sagnac 环透射谱被 LPG 透射曲线调制。

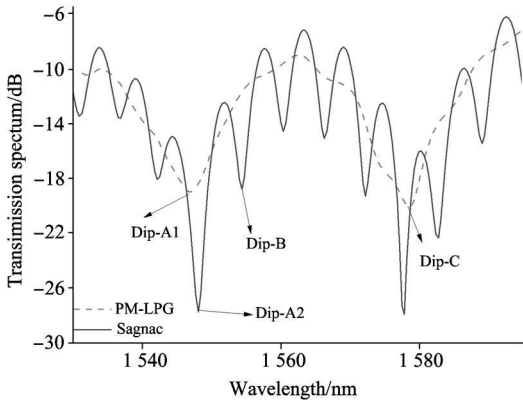


Fig 2 Transmission spectra of the PM-LPG and the Sagnac loop sensor

1.2 测量原理

当外界环境折射率和温度发生变化时, PM-LPG 透射谱将发生漂移, 导致光纤 Sagnac 环透射谱 Dip B 处的能量发生变化。如外界环境的变化导致 PM-LPG 谐振峰 Dip A1 左移, 则光纤 Sagnac 环 Dip B 处能量变大, 反之, 如果外界的变化导致 PM-LPG 谐振峰 Dip A1 右移, 则光纤 Sagnac 环 Dip B 处能量变小。由图 1 中 PM-LPG 透射谱可以看出, 在 Dip A1 两侧各有 15.75 nm 的近似线性范围, 在这段区域内, 光纤 Sagnac 环谐振峰强度的变化与由 PM-LPG 的外界折射率变化 Δn 和温度的变化 ΔT 成近似的正比关系, 用公式可以表示为

$$\Delta P = K_{11} \Delta n + K_{12} \Delta T \quad (1)$$

式中, K_{11} 为折射率灵敏度系数, 单位为 $\text{dB} \cdot \text{RIU}^{-1}$ (refractive index unit), K_{12} 为温度灵敏度系数, 单位为 $\text{dB} \cdot \text{°C}^{-1}$ 。

同时当外界环境折射率和温度发生变化时, 由折射率变化 Δn 和温度变化 ΔT 所引起的光纤 Sagnac 环的透射峰的波长变化可表示为

$$\Delta\lambda = K_{21} \Delta n + K_{22} \Delta T \quad (2)$$

式中, K_{21} 为折射率灵敏度系数, 单位为 $\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$, K_{22} 为温度灵敏度系数, 单位为 $\text{nm} \cdot \text{°C}^{-1}$, 是一个与双折射光纤的热光系数和热膨胀系数有关的常数^[7]。根据式 (1) 和式 (2) 可以得出被测折射率和温度的矩阵公式如下

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} \quad (3)$$

实验时, 通过监测光纤 Sagnac 环透射谱特定谐振峰 (如 Dip B) 处强度的变化 ΔP 和波长漂移 $\Delta\lambda$ 参数后, 利用式 (3) 可以计算出外界环境环折射率和温度的变化值。

2 实验结果及分析

实验时, 考虑到最佳线性关系, 选择 Dip B 处作为强度变化和波长变化监测的对象。在折射率测量时, 所用不同折射率的样本是通过配置不同浓度的蔗糖溶液得到的。在一定温度下, 蔗糖溶液的折射率和浓度存在唯一的对应关系。实验配置了 8 种不同浓度的蔗糖溶液作为待测样本, 分别为 0% (纯净水), 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% 和 90%, 根据阿贝原理测出对应的折射率。在 32.9 °C 室温下, 把 PM-LPG 传感头水平置于有机玻璃板上, 并施加很小的预应力将其拉直。通过改变 PM-LPG 周围蔗糖溶液浓度, 测试光纤 Sagnac 环 Dip B 处的透射峰强度变化和波长漂移情况, 以获得 K_{11} 和 K_{21} 灵敏度系数。

图 3 是 PM-LPG 分别处于水, 30%, 60% 和 70% 浓度蔗糖中的 Sagnac 环透射谱图。Dip B' 是当 PM-LPG 的外界环境从空气变为水后 Dip B 的新位置 (空气和水的温度有差异)。从图中可以看出随着浓度的增加, Sagnac 环透射谱 Dip B' 处的强度变弱, 其左侧的谐振峰变强, 右侧谐振峰变弱, 表明蔗糖浓度的增加导致 PM-LPG 谐振峰向短波方向漂移。图 4 是实验中八种样品在 Dip B' 处透射谱强度随外界折

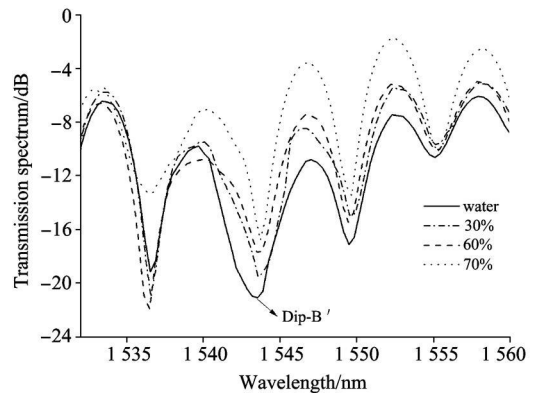


Fig 3 Measured transmission spectra with different RI

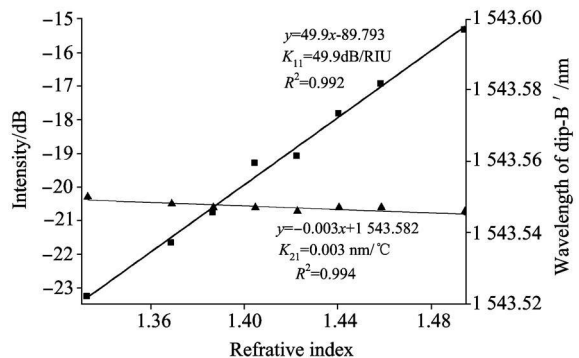


Fig 4 Intensity and wavelength changing at Dip B' with different RI

射率变化的情况。离散点为实际测量点, 直线为线性拟合曲线。经计算, $D_{ip} B$ 强度变化对折射率的灵敏度为 $K_{11} = 49.9 \text{ dB} \cdot \text{RIU}^{-1}$, 拟合曲线的线性度为 $R^2 = 0.992$ 。 $D_{ip} B$ 波长变化对温度的灵敏度系数为 $K_{21} = 0.003 \text{ nm} \cdot \text{C}^{-1}$, 可以近似认为在外界折射率发生变化时, $D_{ip} B$ 处波长基本没有发生漂移, 即 $K_{21} \approx 0$ 。实验中 LPG 长度 24 mm 远小于组成光纤 Sagnac 环的保偏光纤的长度 1.4 m 可以忽略, 因此使得光纤 Sagnac 环的透射峰 $D_{ip} B$ 处波长漂移随折射率变化的影响很小, 即 K_{21} 近似为零。实验结果和理论分析相符合。

温度测量时, 把图 1 所示 Sagnac 环置于恒温恒湿箱中, 同时测试光纤 Sagnac 环 $D_{ip} B$ 处波长漂移和透射峰强度随温度变化情况, 其中 PM-LPG 外界环境为空气。当温度从 33 °C 变化到 70 °C 时, $D_{ip} B$ 处波长漂移和透射峰强度随温度变化情况如图 5 和图 6 所示, 其中离散点为实际测量点, 直线为线性拟合曲线。经计算, $D_{ip} B$ 对温度的灵敏度为 $K_{22} = -0.654 \text{ nm} \cdot \text{C}^{-1}$, 负数表示波长向短波方向漂移, 拟合曲线的线性度为 $R^2 = 0.998$ 。强度对温度的灵敏度为 $K_{12} = 0.402 \text{ dB} \cdot \text{C}^{-1}$, 拟合曲线的线性度为 $R^2 = 0.995$ 。

把实验测得的灵敏度系数代入式(3)得到, PM-LPG 嵌

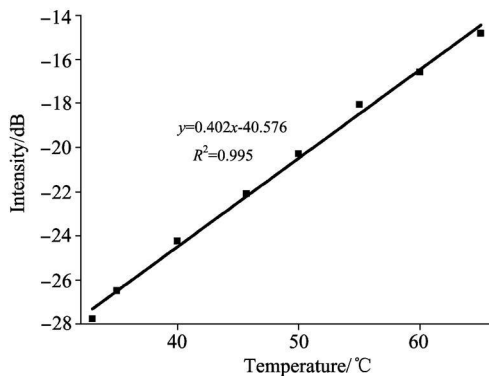


Fig 5 Intensity changing with different temperature

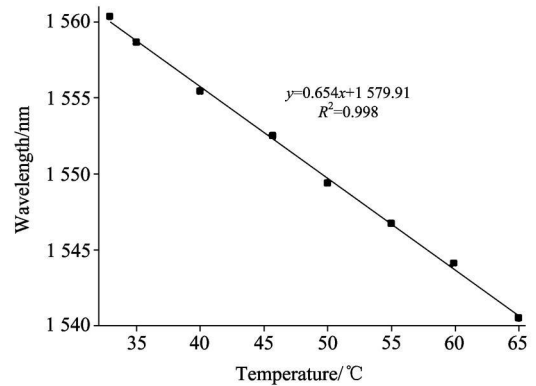


Fig 6 Wavelength shift with different temperature

入型光纤 Sagnac 环折射率和温度传感的矩阵方程如下

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 49.9 & 0 & 0 & 402 \\ 0 & -0.654 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (4)$$

测量时, 由式(4)可以获得足够精确的解。在实际应用时, 为了避免温度对被测结果的影响, 可以利用光纤 Sagnac 环对温度响应的高灵敏性特性来修正温度对传感器测试结果的影响, 大大提高了传感器的测量精度。

3 结论

提出了一种新颖的长周期光纤光栅嵌入型光纤 Sagnac 环传感器, 通过监测其透射谱的某个透射峰的强度随折射率变化情况和波长随温度变化情况, 可以实现折射率和温度的同时测量。该传感系统结合了 LPG 和光纤 Sagnac 环两者的特点, 具有对折射率和温度的高敏感性。实验测得的温度灵敏度为 $-0.654 \text{ nm} \cdot \text{C}^{-1}$, 线性度为 0.998, 折射率灵敏度为 $49.9 \text{ dB} \cdot \text{RIU}^{-1}$, 线性度为 0.992。实验结果证实了此设计的可行性, 整个实验系统结构简单、成本低, 制作方便, 具有较好的应用前景。

References

- [1] Vali V, Shorthill R W. Appl. Opt., 1976, 15: 1099.
- [2] Starodumov A N, Zenteno, et al. Appl. Phys. Lett., 1997, 70: 19.
- [3] ZHOU Ying-wu, GAO Kan, et al(周赢武, 高侃, 等). Chinese J. Lasers(中国激光), 2004, 31(9): 1103.
- [4] LI Zhizhong, YANG Huayong, CHENG Yirsheng, et al(李智忠, 杨华勇, 程玉胜, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, 29(1): 157.
- [5] LI Kuo, ZHOU Zheeran, LIU Aichun, et al(李阔, 周振安, 刘爱春, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, 29(1): 249.
- [6] Frazão O, Marques L M, et al. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(22): 2407.
- [7] Dong Xinyong, Tam H Y. Applied Physics Letters, 2007, 91: 151113.
- [8] Zhou Dapeng, Wei Li, Liu Wingki, et al. Optics Communications, 2008, 281(18): 4640.
- [9] HUANG Guilin, ZHAO Qida, LIU Songfen, et al(黄桂岭, 赵启大, 刘松芬, 等). Journal of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2007, 18(5): 519.
- [10] LIU Bo, TONG Zhengrong, CHEN Shaohua, et al(刘波, 董峥嵘, 陈少华, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2004, 24(2): 199.
- [11] Chambers A R, Mowlem M C, Dokos L. Composites Science and Technology, 2007, 67(6): 1235.
- [12] Lee Jung Ryoul, Tsuea Hiroshi, Toyama Nobuyuki. NDT & E International, 2007, 40(1): 85.

Measurement of Refractive Index with a PMF LPG Based Sagnac Loop Sensor

KANG Juan^{1,2}, DONG Xir yong¹, ZHAO Churr liu¹, ZHANG Zai xuan¹, JIN Shang zhong²

1. Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

2. School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract By inscribing a long period fiber grating (LPG) on a polarization maintaining fiber (PMF), a fiber Sagnac loop sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature has been proposed and demonstrated. The LPG was fabricated on the PMF by using a CO₂ laser, and then inserted into a fiber loop formed by using a normal single mode fiber coupler. One of the transmission minimum of the Sagnac loop sensor was measured, whose wavelength varied with temperature and the intensity changed with refractive index. Temperature sensitivity of $-0.654 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ and refractive sensitivity of $49.9 \text{ dB} \cdot \text{RIU}^{-1}$ have been achieved. The sensor system shows advantages of small size and low cost, and owns a good application prospect.

Keywords Fiber Sagnac loop; Polarization maintaining fiber; Long period fiber grating; Refractive index sensor

(Received Nov. 25, 2010; accepted Feb. 26, 2011)

《光谱学与光谱分析》2011 年征订启事

欢迎投稿 欢迎订阅

《光谱学与光谱分析》1981 年创刊，国内统一刊号：CN 11-2200/O4，国际标准刊号：ISSN 1000-0593，CODEN 码：GYGFED，国内外公开发行，大 16 开本，288 页，月刊；是中国科协主管，中国光学学会主办，钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的学术性刊物。北京大学出版社出版，每期售价 40.00 元，全年 480 元；国内邮发代码 82-68，国外发行代码 M905。刊登主要内容：激光光谱测量、红外、拉曼、紫外、可见光谱、发射光谱、吸收光谱、X 射线荧光光谱、激光显微光谱、光谱化学分析、国内外光谱化学分析领域内的最新研究成果、开创性研究论文、学科发展前沿和最新进展、综合评述、研究简报、问题讨论、书刊评述。

《光谱学与光谱分析》适用于冶金、地质、机械、环境保护、国防、天文、医药、农林、化学化工、商检等各领域的科学研究单位、高等院校、制造厂家、从事光谱学与光谱分析的研究人员、高校有关专业的师生、管理干部。

《光谱学与光谱分析》为我国首批自然科学核心期刊，中国科协优秀科技期刊，中国科协择优支持基础性、高科技学术期刊，中国科技论文统计源刊，“中国科学引文数据库”，“中国物理文摘”，“中国学术期刊文摘”，同时被国内外的 CSD，SCI，AA，CA，Ei，PJK，MEDLINE 等文献机构收录。根据国家科技部信息研究所发布信息，中国科技期刊物理类影响因子及引文量《光谱学与光谱分析》都居前几位。欢迎国内外厂商在《光谱学与光谱分析》发布广告（广告经营许可证：京海工商广字第 8094 号）。

《光谱学与光谱分析》的主编为黄本立院士。

欢迎新老客户到全国各地邮局订阅，若有漏订者可直接与光谱学与光谱分析期刊社联系。

联系地址：北京市海淀区学院南路 76 号，光谱学与光谱分析期刊社 邮政编码：100081

联系电话：010-62181070，62182998

电子信箱：chnghxygpf@vip.sina.com；修改稿专用邮箱：gp2008@vip.sina.com

网 址：http://www.gpxygf.com