

基于乙醇灌注边孔光纤的 Sagnac 干涉型温度传感器

綦菲 辛奕 董新永 孟庆强 赵春柳 金尚忠

(中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要 提出并研究了一种基于乙醇灌注边孔光纤(SHF)的 Sagnac 干涉型温度传感器。边孔光纤是一种高双折射光纤,其包层中纤芯两侧具有两个空气孔。将乙醇填充进边孔光纤的空气孔中,利用乙醇的折射率随温度的变化,改变边孔光纤的双折射系数,使 Sagnac 干涉仪的输出谱发生波长漂移,从而实现了温度传感。实验获得该传感器在 20 °C~80 °C 的温度变化范围内灵敏度为 86.8 pm/°C,为普通光纤布拉格光栅(FBG)传感器的 8 倍。

关键词 光纤光学;光纤传感器;光纤 Sagnac 干涉仪;边孔光纤;温度测量

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.010601

Sagnac Interferometer Based Temperature Sensor With Alcohol-Filled Side-Hole Fiber

Qi Fei Xin Yi Dong Xinyong Meng Qingqiang Zhao Chunliu Jin Shangzhong

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract A temperature sensor by using an alcohol-filled side-hole fiber (SHF) based Sagnac interferometer is proposed and experimentally demonstrated. SHF is a highly birefringent fiber, which has two air holes running aside the core in the cladding of the fiber. Temperature changes the refractive index of the alcohol liquid filled in the air holes of the SHF, leading to the variation in birefringence of the SHF and hence interference pattern shift of the Sagnac interferometer. A sensitivity of 86.8 pm/°C is achieved when temperature changes between 20 °C and 80 °C. It is about eight times of that of a normal fiber Bragg grating (FBG) sensor.

Key words fiber optics; optical fiber sensor; fiber Sagnac interferometer; side-hole fiber; temperature measurement

OCIS codes 060.2300; 060.2330; 060.2370; 060.4510

1 引言

光纤 Sagnac 干涉仪(FSI)具有抗电磁干扰、设计简单、灵敏度高以及成本低等优势,因此被广泛地研究并应用于光纤陀螺及其他光纤传感领域^[1~6]。通常,在 FSI 传感器中插入一段双折射光纤(或保偏光纤)作为敏感元件,被测量变化改变光纤的双折射系数,引起分别在两个偏振态中传输的两束光之间的光程差的变化,最后导致干涉光谱的波长移动,通过测量该光谱移动,就可以实现传感测量。

边孔光纤(SHF)是一种高双折射光纤,其纤芯的两侧对称地存在两个空气孔,适合用于光纤传感,特别是气压传感。研究发现,当压力从内部或外部作用于光纤时,边孔的存在使光纤受到非对称的受力,从而改变双折射系数,实现对压力的测量^[7,8]。研究还发现,基于边孔光纤的 FSI 可以被用于温度与压力、应变、扭曲等参量的同时测量^[9~11]。近年来,研究者采用了不同的方法,如在边孔光纤的空气孔中灌入不同的金属材料^[12,13]、在边孔光纤的纤芯中掺杂不同浓度的镱离子^[14]等来提高其温度灵敏度。Y. X. Jin 等^[15]曾在边孔光纤上刻写长周期光纤光栅进行温度测量,但其制作相对比较困难,而且测量结果易受光纤弯曲等因素的

收稿日期: 2012-08-01; **收到修改稿日期**: 2012-10-04; **网络出版日期**: 2012-11-21

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327804)和浙江省钱江人才计划(QJD1002002)资助课题。

作者简介: 綦菲(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感和光纤光栅等方面的研究。E-mail: qifei1@163.com

导师简介: 董新永(1975—),男,博士,研究员,主要从事光纤传感、光纤光栅和光纤通信等方面的研究。

E-mail: xydong@cjl.u.edu.cn(通信联系人)

影响。最近, W. Qian 等^[4]报道了一种基于乙醇灌注光子晶体光纤(PCF)的温度传感器,得到了较高的温度灵敏度。但是 PCF 制备难度大、价格高,限制了其应用。

本文提出并研究了一种基于乙醇灌注边孔光纤的 Sagnac 干涉型温度传感器,在 20 °C ~ 80 °C 的范围内,测得其温度灵敏度高达 86.8 pm/°C,约为普通光纤布拉格光栅(FBG)传感器的 8 倍。而且光纤的制备相对容易、成本较低^[14]。

2 传感装置及原理

实验装置如图 1 所示。由宽带光源(SLED)、3 dB 光纤耦合器、一段长 15 cm 的灌入乙醇的边孔光纤、偏振控制器(PC)和光谱分析仪(OSA)构成。实验中采用乙醇作为灌注液体,因为它是一种常见的化学试剂,而且温度灵敏度(折射率随温度的变化)高,可通过温度有效地影响 SHF 的双折射系数。SLED 发出的光经过 3 dB 耦合器分光后,在 FSI 中形成相向传输的两束光,一束直接进入 SHF,然后进入 PC,另一束先进入 PC 再进入 SHF。PC 的作用是使光经过 PC 后偏振态改变 90°,即快轴和慢轴互换。由于两束光经过 PC 和 SHF 的顺序不同,在 SHF 中传输时一束处于快轴、另一束处于慢轴,从而产生相位延迟。两束光再次进入 3 dB 耦合器时,偏振态刚好一致,因此产生干涉。

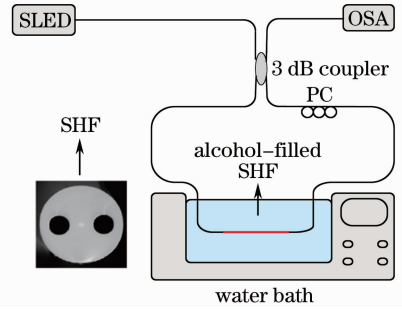


图 1 实验装置图(插图为 SHF 截面图)

Fig. 1 Experimental setup of the proposed temperature sensor. Inset: cross section of the SHF

由于干涉,FSI 的透射率 T 可表示为

$$T = \frac{1}{2}[1 - \cos(2\pi BL/\lambda)], \quad (1)$$

式中 L 为 SHF 的长度, λ 为波长, $B = n_x - n_y$ 为 SHF 的双折射系数, n_x 和 n_y 分别为 SHF 慢轴和快轴的有效折射率。其透射谱谐振峰的波长满足关系式

$$2\pi BL/\lambda_{\text{peak}} = 2k\pi, \quad (2)$$

式中 k 为整数, λ_{peak} 为谐振峰波长。由此可得

$$\lambda_{\text{peak}} = BL/k. \quad (3)$$

而且,相邻两个谐振峰之间的波长间隔可表示为 $S = \lambda^2/(BL)$ 。

温度变化时,SHF 的双折射系数和长度发生改变,导致谐振峰波长发生漂移,由(3)式知波长漂移可以表示为

$$\Delta\lambda_{\text{peak}} = (\Delta BL + B\Delta L)/k, \quad (4)$$

式中 ΔB 为 SHF 及乙醇的热光效应导致的光纤双折射系数的变化, ΔL 为 SHF 由于热膨胀效应所产生的长度变化。

因此,该传感器的温度灵敏度可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta T} = \lambda_{\text{peak}} \left(\frac{1}{B} \frac{dB}{dT} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right), \quad (5)$$

式中 $\frac{dL}{dT}$ 为热膨胀效应系数, $\frac{dB}{dT}$ 为热光效应系数。

3 结果与讨论

实验采用的 SHF 的纤芯和包层的直径分别为 10 μm 和 125 μm ,两个空气孔的孔径为 28 μm ,空气孔中心距离纤芯 28 μm ,以纤芯为中心对称地分布在光纤包层内。纤芯与包层的折射率之差为 0.0056。SHF 光纤截面的扫描电子显微镜(SEM)图像如图 1 插图所示。利用毛细现象在空气孔中填充分析纯乙醇,并在两端用熔接机(Fujikura, FSM 60)各熔接一段普通的单模光纤(SMF)。由于 SHF 和 SMF 的模场面积及数值

孔径不匹配,SHF与SMF间的熔接存在较大的插入损耗,整个FSI的插入损耗约为13 dB,相对较大,但本实验监测的是谐振峰的波长漂移,而非强度变化,因此插入损耗对测量精度的影响可以忽略。实验中所用SLED的3 dB带宽为62 nm,FSI谐振峰波长的漂移通过光谱仪(Philips,AQ6370)来直接监测,光谱仪的波长分辨率为0.02 nm。

首先测量了SHF没有灌注乙醇情况下FSI的输出谱,如图2中虚线所示。可明显看出,填充乙醇前FSI并没有出现干涉现象,这是因为SHF具有很高的初始双折射系数,两个偏振模的截止波长有很大的差异,在监测波长范围内只有一个偏振模存在,另一个为泄漏波^[16]。

当在SHF的空气孔中灌入乙醇后,由于乙醇的折射率比空气的折射率大许多,SHF的双折射系数变小,使得两个偏振模的截止波长靠近,从而在工作波长范围内可以同时存在,因此可以观测到明显的干涉现象。图2中实线为室温(20℃)情况下该传感器的输出光谱。其在1475~1495 nm的波长范围内存在两个干涉峰,第一个的峰值波长为1482.5 nm(A),对比度约为9.5 dB,第二个的峰值波长为1489.5 nm(B),对比度约为6.8 dB,两个峰值的波长间距为7 nm。由(2)式计算可得,20℃时填充乙醇后的SHF的双折射系数约为 2.1×10^{-3} 。

将传感头在自由状态下放入温度可调的水浴加热箱中,温度可同时由测量精度为0.1℃的热电偶测得。实验中,为了确保传感器的稳定性,将光纤固定在一个稳定的平面上。温度测量间隔为8℃,每次测量稳定2~3 min以保证测量的准确性。传感器在不同温度下的输出光谱如图3所示。从图中可以看出:随着温度的增加,整个干涉谱发生了明显的红移。但是消光比随温度的增加减小了,这可能与乙醇折射率随温度增加而减小(20℃时乙醇折射率为1.36048,54℃时降至1.34629,变化率达-0.0004)^[4],导致其中一个偏振模的传输损耗增加,从而降低了相干强度有关。

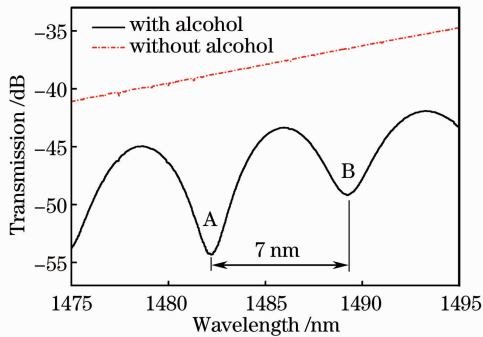


图2 灌入乙醇前后SHF-FSI的输出光谱

Fig. 2 Transmission spectra of the SHF-based FSI with and without alcohol liquid

图4给出了A峰的波长随温度变化的关系曲线。在温度从20℃增加到72℃时,A峰的波长从1482.22 nm移到1484.54 nm。从图中可见,波长变化与温度成很好的线性关系。分别测量了温度升高和降低两种情况下的数据,其线性拟合关系式可分别表示为 $y = 0.0868x + 1480.41$ 和 $y = 0.0867x + 1480.39$,线性拟合度分别为0.9982和0.9978。实验具有良好的重复性,温度灵敏度高达86.8 pm/℃,约为普通FBG传感器灵敏度的8倍。

以上实验结果表明,基于乙醇灌注边孔光纤的FSI传感器具有良好的温度响应灵敏度。根据所用光纤光谱仪的波长分辨率计算,其温度分辨率可以达到0.23℃。但是由于乙醇沸点的限制,该传感器只能测量低于80℃的温度。

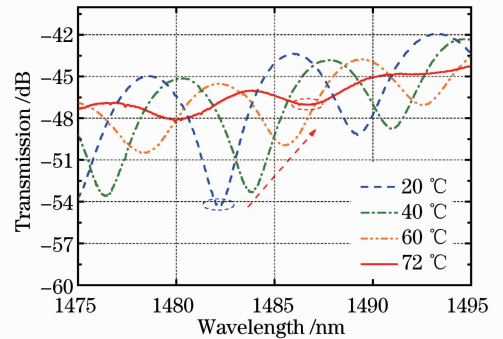


图3 不同温度下传感器的输出光谱

Fig. 3 Transmission spectra under various temperatures

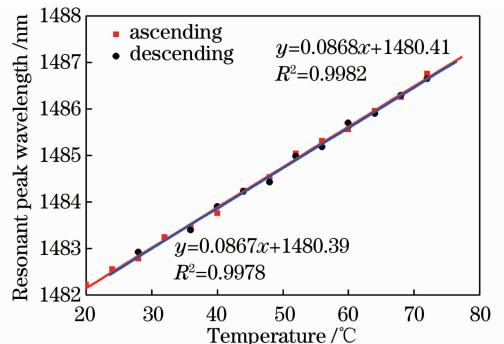


图4 A峰的波长随温度的变化

Fig. 4 Wavelength of peak A versus temperature

4 结 论

提出并研究了一种基于乙醇灌注边孔光纤的 Sagnac 干涉型温度传感器。通过在边孔光纤的空气孔中灌入折射率对温度敏感的液体乙醇,使得传感器的干涉谱随温度变化。实验测得其测量灵敏度达到 $86.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,是普通 FBG 传感器的 8 倍,分辨率为 $0.23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。同时该传感器制备简单,对光源和解调设备等均没有特殊的要求,成本较低,具有一定的应用前景。但是由于乙醇沸点的限制,温度测量范围被限制在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下。

参 考 文 献

- 1 Kang Juan, Dong Xinyong, Zhao Chunliu *et al.*. Measurement of refractive index with a PM-LPG based Sagnac loop sensor [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(4): 206~209
康 娟,董新永,赵春柳等. 基于长周期光纤光栅嵌入型 Sagnac 环光谱的折射率测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(4): 206~209
- 2 Zu Peng, Xiang Wanghua, Bai Yangbo *et al.*. A novel fiber Sagnac magnetic field sensor based on magnetic fluid[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806005
祖 鹏,向望华,白杨博等. 一种新型的基于磁性液体的光纤 Sagnac 磁场传感器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806005
- 3 X. Dong, H. Y. Tam. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(1): 015113
- 4 W. Qian, C.-L. Zhao, S. He *et al.*. High-sensitivity temperature sensor based on an alcohol-filled photonic crystal fiber loop mirror[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(9): 1548~1550
- 5 B. Dong, Q. Zhao, J. Lü *et al.*. Liquid-level sensor with a high-birefringence-fiber loop mirror[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(30): 7767~7771
- 6 Y. Liu, B. Liu, X. Feng *et al.*. High-birefringence fiber loop mirrors and their applications as sensors[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(12): 2382~2390
- 7 H. M. Xie, Ph. Dabkiewicz, R. Ulrich *et al.*. Side-hole fiber for fiber-optic pressure sensing[J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(5): 333~335
- 8 J. R. Clowes, S. Syngellakis, M. N. Zervas. Pressure sensitivity of side-hole optical fiber sensor[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6): 857~859
- 9 E. Chmielewska, W. Urbanczyk, W. J. Bock. Measurement of pressure and temperature sensitivities of a Bragg grating imprinted in a highly birefringent side-hole fiber[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(31): 6284~6291
- 10 X. Dong, Y. Jin, W. Zhou *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature with side-hole fiber based Bragg grating[C]. 7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing, 2009
- 11 O. Frazão, S. O. Silva, J. M. Baptista *et al.*. Simultaneous measurement of multiparameters using a Sagnac interferometer with polarization maintaining side-hole fiber[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(27): 4841~4848
- 12 S. H. Lee, B. H. Kim, W. T. Han. Effect of filler metals on the temperature sensitivity of side-hole fiber[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(12): 9712~9717
- 13 B. H. Kim, S. H. Lee, A. Lin *et al.*. Large temperature sensitivity of Sagnac loop interferometer based on the birefringent holey fiber filled with metal indium[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(3): 1789~1794
- 14 D. S. Moon, B. H. Kim, A. Lin *et al.*. The temperature sensitivity of Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining side-hole fiber[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 7962~7967
- 15 Y. X. Jin, C. C. Chan, Y. F. Zhang *et al.*. Mechanically induced long-period fiber grating in side-hole single-mode fiber for temperature and refractive sensing[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(7): 1303~1306
- 16 D. A. Nolan, G. E. Berekey, M.-J. Li *et al.*. Single-polarization fiber with a high extinction ratio[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(16): 1855~1857