

基于 Mach-Zehnder 干涉的湿度光纤传感器的研究

唐学敏 安佳丽 金永兴

中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 介绍了一种可测量相对湿度的 Mach-Zehnder(MZ)干涉的湿度光纤传感器,其传感结构是在两段标准单模之间腰椎放大熔接一段长为 15 mm 的单模光纤,并在中间的单模部分涂上一层 5%的聚乙烯醇(PVA)。PVA 的折射率随着环境湿度的变化而改变,从而使包层模有效折射率发生变化。当中间单模光纤周围环境湿度发生变化时,相应干涉峰中心波长也会发生移动,通过测量透射光谱来测量包层周围环境的湿度变化。实验测得该湿度传感器的灵敏度为 0.0983 nm/%RH(RH 表示相对湿度)。实验也证明基于 MZ 干涉的湿度光纤传感器具有良好的稳定性等一系列突出的优点。

关键词 光纤光学; 腰椎放大; 湿度传感器; 聚乙烯醇(PVA)

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.060603

Study of Humidity Sensor Based on Mach-Zehnder Interference

Tang Xuemin An Jiali Jin Yongxing

College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract A kind of relative humidity sensor based on Mach-Zehnder (MZ) interference is proposed in this paper. The sensor is composed by splicing with a waist enlarged single mode fiber (SMF) with a length of 15 mm between two SMFs, whose surface is coated with a thin layer of 5% polyvinyl alcohol (PVA). With the humidity changing, and the effective index of the cladding mode changes. When the relative humidity changes, the central wavelength of the interference peak shifts, so that the relative humidity can be obtained by measuring the sensor's transmission spectrum. The sensitivity of the proposed humidity sensor is 0.0983 nm/% RH measured by experiment. Experiments also show that the MZ-based humidity sensor has a good stability and a series of other outstanding advantages.

Key words fiber optics; waist-enlarged taper; humidity sensor; polyvinyl alcohol (PVA)

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 280.4788

1 引言

作为一种新型的湿度传感器,光纤湿度传感器具有传统传感器无可比拟的优势,它克服了传统传感器的缺陷,具有对外界环境变化敏感、体积小、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀、能实现绝对测量、稳定性好、容易复用、能埋入工程结构、制作简单、成本低廉并且可以实现远距离在线监测等特点,因此广泛应用于国防、科研、气象、仓储等领域^[1-5]。本文提出一种基于 Mach-Zehnder(MZ)干涉的湿度光纤传感器,其传感结构是在两段标准单模之间腰椎放大熔接一段单模光纤,并在中间的单模光纤(SMF)部分涂上一层 5%的聚乙烯醇(PVA)。当 MZ 干涉的湿度光纤传感器周围环境湿度发生变化时,相应输出光的谐振峰中心波长发生变化,这样就可以通过光谱仪检测传输光谱的谐振峰移动来解调出环境湿度信息。

2 湿度传感器的原理及制作

基于 MZ 干涉的湿度光纤传感器结构图如图 1 所示。通过熔接机(Fujikura FSM-60S)将一段长为 15 mm

收稿日期: 2013-10-17; 收到修改稿日期: 2013-11-18; 网络出版日期: 2014-05-15

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY13F050004)

作者简介: 唐学敏(1991—),男,本科生,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: tangxuemin4@163.com

导师简介: 金永兴(1972—),男,教授,主要从事光纤传感和光纤通信方面的研究。

E-mail: jinyongxing@cjlu.edu.cn(通信联系人)

的SMF的两端分别与两根SMF进行腰椎放大熔接。在熔接光纤的过程中,为了形成腰椎放大,将重叠量设置为150 μm 进行熔接。在电弧放电以后,由于大的重叠量和推力作用使光纤软化,推到一起的光纤直径逐渐扩大,形成腰椎放大点。

光从输入的SMF传送到第一个腰椎放大点时,由于腰椎放大部分,会激发包层模,在中间的SMF中就会同时有包层模和纤芯模传输,当传输到第二个腰椎放大点时,包层模和纤芯模耦合发生MZ干涉。

光波在中间的SMF传输后,纤芯模和包层模产生的相位差为^[6]

$$\phi = 2\Delta nL/\lambda, \quad (1)$$

式中 L 为中间SMF的长度, λ 为输入光的中心波长, Δn 为光纤纤芯与包层有效折射率的差值。干涉后的总光强为^[7]

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos \phi, \quad (2)$$

式中 I_1 和 I_2 分别为通过中间SMF纤芯和包层的光强。随着外界湿度的变化,纤芯与包层有效折射率的差值变化,导致相位差发生变化,从而使干涉谱发生变化。因此,通过测量干涉谱的变化可以得到外界湿度的变化。

基于MZ干涉的湿度光纤传感器在腰椎-单模-腰椎表层涂覆了一层聚乙烯醇(PVA),随着周围环境湿度的增大,PVA的折射率减小,且变化是线性的^[8],如图2所示。当外界空气中的湿度降低时,PVA薄膜吸水后折射率增大,从而使得干涉谱谐振峰向短波方向漂移。

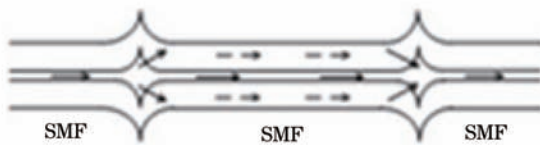


图1 湿度光纤传感器结构图

Fig.1 Structure of optical fiber humidity sensor

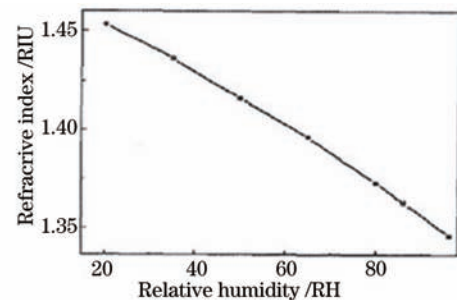


图2 PVA折射率与相对湿度的关系

Fig.2 Relationship between refractive index of PVA and relative humidity

3 实验与结果分析

实验过程中,保持室温为 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。选用的单模-单模-单模光纤结构中的单模长度为15 mm。在腰椎-单模-腰椎的包层表面均匀涂抹一层5%的PVA湿度敏感材料,在室温为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度为40%的环境中自然晾干。如图3所示,将单模-单模-单模光纤结构两端固定,使其保持绷直状态,把单模-单模-单模光纤湿度传感器与宽带光源(ASE)和光谱仪连接起来,通过光谱仪观察透射光谱的变化。

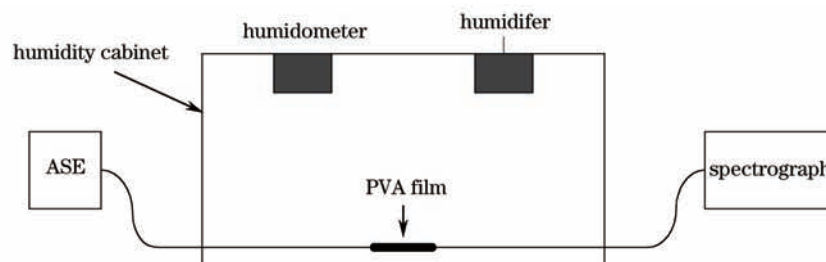


图3 湿度传感器系统示意图

Fig.3 System diagram of humidity sensor

基于MZ干涉的湿度光纤传感器随湿度变化的透射如图4所示。随着湿度的增加,干涉峰波长向长波长方向移动。波长漂移与湿度的变化呈现了线性的关系,干涉峰的湿度灵敏度为 $0.0983\text{ nm}/\%RH$,相关系数为 0.9976 ,说明该湿度传感器的线性度良好。同时针对湿度传感器的重复性,做了重复性实验,重复实验所得湿度与干涉峰波长的关系如图5所示,可以看到该湿度传感器的重复性良好。

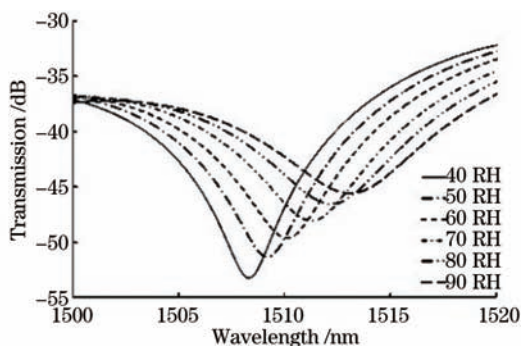


图4 不同湿度下的光谱图

Fig.4 Spectra under different humidities

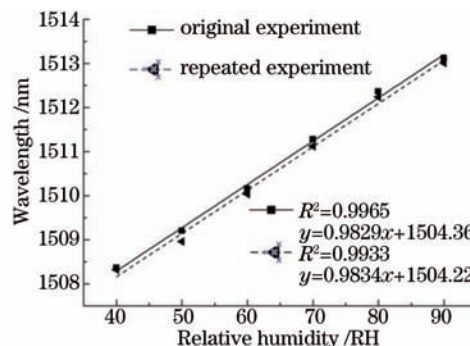


图5 传感器的干涉峰波长与湿度的关系

Fig.5 Relationship between the sensor interference wavelength and humidity

此外还研究了基于MZ干涉的湿度光纤传感器随温度的变化,变化透射图如图6所示。随着温度的增加,干涉峰波长向长波长方向移动,主要是随着温度的增加,传感器的热膨胀和热应力效应使得模式之间的光程发生变化导致的。湿度传感器的温度与谐振波长的关系如图7所示,波长漂移与温度的变化也呈现了线性的关系。而温度的灵敏度为 $0.0615 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,相关系数为 0.9965 。温度的灵敏度较大,极易影响湿度的测量,因此在实验中应该严格控制温度的变化,尽量在恒温箱中进行湿度的测量。

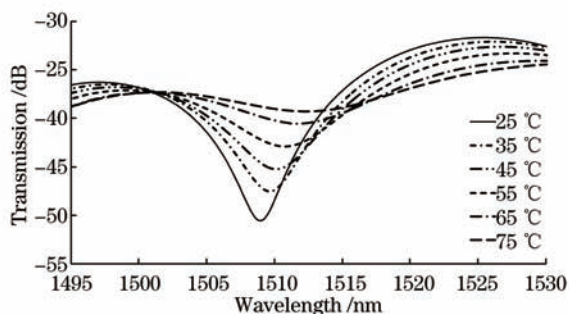


图6 不同温度下的光谱图

Fig.6 Spectra under different temperatures

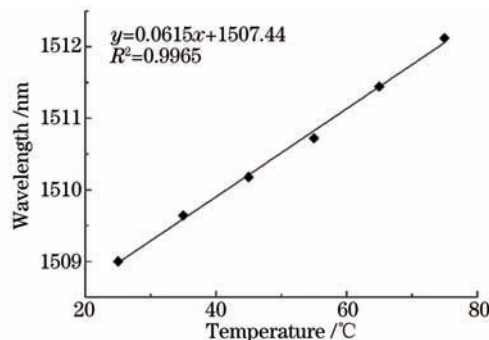


图7 传感器的干涉峰波长与温度的关系

Fig.7 Relationship between the sensor interference wavelength and temperature

4 结 论

提出的湿度传感器,其PVA薄膜材料的化学性能稳定,具有长期稳定性和响应速度快的突出优点。实验测试湿度范围为40%RH~90%RH,并采用最小二乘法进行线性拟合。结果表明,线性拟合率为 0.9976 ,灵敏度为 $0.0983 \text{ nm}/\%RH$,同时该湿度传感器具有较好的重复性。基于MZ干涉的湿度光纤传感器具有测量体积小、耐高温和耐腐蚀等特点,是一种非电类湿度传感器,尤其适合于高湿度环境下工作,这是传统的电类湿度传感器无法胜任的。

参 考 文 献

- 1 Yao Jun, Zhu Tao, Deng Ming, *et al.*. A humidity sensor based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by large offset splicing[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s114004.
姚 军, 朱 涛, 邓 明, 等. 基于大偏置熔接的全光纤法布里珀罗湿度传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s114004.
- 2 Sun Miao, Xu Ben, Li Yi. A strain sensor based on in-line Mach-Zehnder interferometer with thin-core fiber [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s114006.
孙 苗, 徐 贲, 李 裔. 基于细芯光纤内嵌马赫曾德尔干涉仪的应变传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s114006.
- 3 F Xu, C Li, D Ren, *et al.*. Temperature-insensitive Mach-Zehnder interferometric strain sensor based on concatenating two waist-enlarged fiber tapers[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(7): 070603.

- 4 Yang Zhangcheng, Xu Hanfeng, Dong Xinyong. Research development of high-temperature resistant fiber gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 050003.
杨樟成, 徐汉锋, 董新永. 高温光纤光栅的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 050003.
- 5 Chen Yixin, Zhao Chunliu, Liu Xing, *et al.*. Research and development of optical fiber sensors based on photonic crystal fiber loop mirrors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 010005.
陈益新, 赵春柳, 刘星, 等. 基于光子晶体光纤环镜的光纤传感器的研究及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 010005.
- 6 Y Geng, X Li, X Tan, *et al.*. High-sensitivity Mach-Zehnder interferometric temperature fiber sensor based on a waist-enlarged fusion bitaper[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2011, 11(11): 2891-2894.
- 7 C R Liao, Y Wang, D N Wang, *et al.*. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer embedded in FBG for simultaneous refractive index and temperature measurement[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2010, 22(22): 1686-1688.
- 8 Miao Yinping, Liu Bo, Liu Jian, *et al.*. Tilted fiber Bragg grating used for relative humidity sensor[J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2010, 21(7): 978-982.
苗银萍, 刘波, 刘健, 等. 基于倾斜光纤光栅的相对湿度传感器[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(7): 978-982.