

基于光纤环镜的温度不敏感相对湿度传感器

梁厚慧 金永兴 安佳丽 王剑锋 董新永

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 提出了一种基于两段相同长度的保偏光纤环镜的温度不敏感相对湿度传感器,其中一段保偏光纤经高浓度的氢氟酸腐蚀后覆以一层湿敏材料聚乙烯醇薄膜用于获得空气的相对湿度,另一段保偏光纤则对传感器的温度进行补偿。该传感器成功实现了对周围环境相对湿度(RH)20%~80%范围内的测量,同时不受外界环境温度的影响。实验表明,该传感器所得数据呈现出良好的线性关系,获得的湿度灵敏度为 0.98 nm/%(RH),温度所带来的影响仅为 0.0072 nm/°C,达到了消除温度影响的目的。

关键词 传感器;光纤传感器;相对湿度;温度补偿;光纤环镜;聚乙烯醇

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s114001

Temperature-Independent Humidity Sensor Based on Polarization Maintaining Fiber Loop Mirror

Liang Houhui Jin Yongxing An Jiali Wang Jianfeng Dong Xinyong

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

Abstract A relative humidity sensor based on two polarization maintaining fibers loop mirror with temperature compensation is presented. The proposed sensor is created through coating a thin layer of polyvinyl alcohol onto a polarization maintaining fiber from which a portion of the cladding is etched, and the other polarization mainting fiber is used to compensate temperature. The relative humidity optical fiber sensor which shows a linear response to parameter and compensates for temperature is tested with different surrounding humidity levels from 20% to 80%. Experimental results show that the sensitivity of the relative humidity measurement is 0.98 nm/% (RH) and the effect of temperature sensitivity is only 0.0072 nm/°C. The goal to offset the effect of temperature is experimentally achieved.

Key words sensors; optical fiber sensor; relative humidity; temperature compensation; fiber loop mirror; polyvinyl alcohol

OCIS codes 060.2370; 280.4788; 310.4925; 160.5470

1 引 言

在现代信息社会中,传感器是获取自然界和生产领域中准确信息的主要途径与手段。传统传感器以其原理简单、测量准确度高、成本低等优点得到广泛应用,但在某些特殊场合下(如强电磁场或易燃易爆),传统传感器难以进行有效检测,因此无法满足现代科学技术发展的需要。与传统的传感器相比,光纤传感器具有耐腐蚀、抗电磁干扰、灵敏度高、体

积小、适于易燃易爆环境下使用以及便于多点多参量测量等优点,属于非接触、非破坏性测量。很多光纤,如光纤光栅(FBG)^[1,2]、长周期光纤光栅(LPG)^[3]、倾斜光纤光栅(TFBG)^[4]以及锥形光纤^[5]都可以作为湿度检测的敏感元件,其原理是它们的有效折射率在外界湿度变化影响下中心波长发生漂移。而在光纤环镜中,由于保偏光纤具有两个不同的极化方向,对温度、应变、折射率等参量的变

收稿日期: 2012-01-01; 收到修改稿日期: 2012-02-20

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327804)和浙江省重大科技专项(2009C11049)资助课题。

作者简介: 梁厚慧(1988—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: qianxunmohe@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等方面的研究。E-mail: jinyongxing@cjl. edu. cn (通信联系人)

化非常敏感,因此可以广泛应用于传感器中进行感应^[6,7]。

在前人的研究中,提出了基于光子晶体光纤结构的传感敏感单元、聚合物超纤维环等作为高灵敏光纤湿度传感器的结构^[8,9]。这些类型的传感器具有重现性好、响应速度快等优点,然而,所提出的湿度传感器都无法消除温度带来的交叉影响。本文提出一种新型的基于光纤环境的温度不敏感湿度传感器,实现了对周围相对湿度(RH)20%~80%范围内的测量,获得的湿度灵敏度为0.98 nm/%(RH),温度所带来的影响仅为0.0072 nm/℃,达到了消除温度影响的目的。

2 传感器结构与原理

2.1 装置结构

图1所示为相对湿度传感器原理,由两段相同长度约为16 cm的保偏光纤PMF1和PMF2以及一个3 dB耦合器组成光纤环境,并且用氢氟酸(HF)将PMF1的包层腐蚀后,在其表面涂一聚乙烯醇(PVA)薄层作为湿度的敏感单元,图1中插入部分是涂有PVA的保偏光纤。

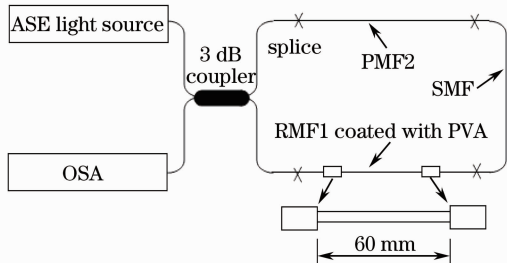


图1 温度不敏感相对湿度传感器装置图

Fig.1 Experimental setup of the temperature-independent relative humidity sensor

由于化学腐蚀会引起倏逝场变强,即随着腐蚀时间的变长,包层直径减小,加强了包层模式光能量与外界的耦合,进而增强包层模式的损耗,因而当该湿度传感器装置置于不同的湿度条件下时可以有效地增大对湿度的敏感度。在实验过程中,化学腐蚀的速度大概是2 μm/min,腐蚀的时间大约是半小时,被HF腐蚀的保偏光纤的长度大约是60 mm。因此,PMF1最后的模场直径大约是65 μm,波长范围在1520~1600 nm之间的衰减少于2 dB/km。

恒温下,相对湿度与很多现象直接相关,是一个很重要的参数。因此,研制一个能消除温度对传感器影响的相对湿度传感器,具有很重要的现实意义。近年来,已有很多湿度敏感材料,如琼脂糖凝胶、混

合纤维素和疏水性膨胀聚合物、PVA、聚酰亚胺(PI)^[10~12]等用于湿度测量。由于PVA可以很容易地吸收与解析水分,且与周围环境湿度能够快速达到平衡并保持稳定,因此选择PVA作为本实验材料。据报道,当周围环境的相对湿度由95%减小20%时,PVA的折射率会从1.35增大到1.49^[4]。也就是说,湿敏材料的折射率会随着湿度的增加而减小,从而可以引起保偏光纤双折射的改变,使得输出端的光谱产生干涉条纹的移动。

PVA颗粒可溶于水,水温越高则溶解度越大,但几乎不溶于有机溶剂。因此溶解时,可边搅拌边将颗粒缓缓加入20℃左右的冷水中充分溶胀、分散,使挥发性物质逸出,而后升温到80℃左右加速溶解,并保温2~2.5 h,直到溶液不再含有微小颗粒,即可备用。准备好湿敏材料的溶液之后,将长约60 mm的PMF1包层用HF溶液腐蚀约半小时,以提高保偏光纤对湿度的灵敏度。在实验中,所制作的PVA质量分数为5%,将腐蚀过的PMF1用乙醇清洁后在PVA溶液中浸蘸多次以形成均匀的敏感膜,然后将其固定于平面上以避免弯曲、应变等对保偏光纤的影响。最后,将整个装置放置于恒温恒湿箱中进行测量。

2.2 传感原理

如图1所示,从宽带光源(L波段和C波段, ASE)发出的光经3 dB耦合器后分成光强相等的两束光,分别沿相反方向传输一周后回到耦合器。由PMF基模引起的相对相位差,使得两束光沿光纤环相对传输后,在耦合器内发生干涉,输出的光谱可以通过分辨率为0.01 nm的光学频谱分析仪(OSA)来观测。忽略耦合器与光纤环境内部的插入损失,保偏光纤环境的透射谱是一个周期函数,可以被描述成^[13]

$$T_r = [1 - \cos \varphi]/2, \quad (1)$$

式中,相位差 $\varphi = 2\pi LB/\lambda$, λ 为输入光波长, L 为PMF的总长。而 $B = n_s - n_f$ 是保偏光纤的双折射, n_f 、 n_s 分别为PMF快轴和慢轴的有效折射率。在透射谱中,相邻两个波峰之间的距离为^[14]

$$S = \lambda^2/(BL), \quad (2)$$

因此通过改变环境的温度、湿度等条件引起的相位差变化为

$$\Delta\lambda = \frac{S \cdot \Delta\varphi}{2\pi}. \quad (3)$$

在本实验中,表层涂有PVA的PMF1的折射率会因受到湿度的影响而改变,从而使得相位差 φ

产生变化。因此,环境的改变如温度和湿度等因素的改变会引起传感器中心波长的漂移。

3 实验结果和讨论

在实验过程中,将整个光纤环放置于恒温恒湿箱中来测量传感器对湿度的响应。在这个传感器中,只有涂覆有聚乙烯醇的薄膜 PMF1 能同时响应温度和湿度的改变;而 PMF2 没有涂湿敏材料,因此仅对温度敏感,对相对湿度不敏感。当恒温恒湿箱的相对湿度从 20% 增加到 80% 时,输出端的共振峰波长会向长波长方向移动。透射谱谐振波长曲线如图 2 所示,其中 PMF1 的中心波长在 1567 nm 处,PMF2 的中心波长在 1579 nm 处。实验选用的保偏光纤的双折射系数 $B=6 \times 10^{-4}$, Sagnac 环中保偏光纤的总长度 $L=32$ cm,则根据(2)式计算透射谱中干涉条纹的间隔 $S=12.8871$ nm,这与实际测量结果 $S'=12.9$ nm 吻合得很好;而根据理论(3)式计算受温度、湿度因素影响后引起的相位差变化 $\Delta\lambda=3.5927$ nm,这与实际测量结果 $\Delta\lambda'=3.6$ nm 也相吻合,两者的误差都在 0.2% 以内。

由图 2 可知,有两个谐振峰出现在 1560~1585 nm 的光谱范围内,而在 1566.3 nm 处共振波长发生明显的约 3.6 nm 的光谱红移。该现象可以解释为:当周围环境的湿度恒定、温度变化时,Sagnac 环波长的透射谱会产生一个整体的移动;但如果恒温在 25 °C,逐渐增大湿度,其中在 1566.3 nm 处的谐振峰产生红移而另一个谐振峰在 1579 nm 邻近

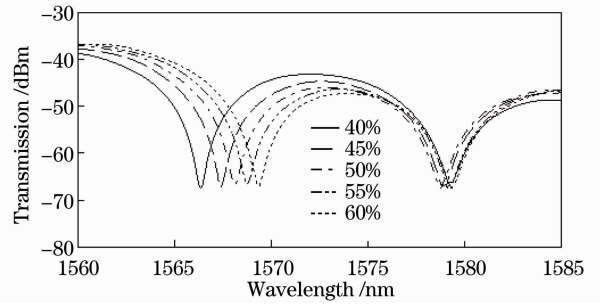


图 2 湿度变化时透射谱发生的谐振波长漂移
Fig. 2 Wavelength shift of the transmission dip versus relative humidity

保持不动。这是因为 PMF2 仅对温度敏感,而 PMF1 对温度和湿度都敏感。因此,可利用移动点和固定点之间的波长间距来表示湿度对该传感器的影响。

由理论分析可知,在恒湿条件下,改变环境的温度会对该传感器产生影响,输出的光谱会整体移动。温度升高后,保偏光纤的中心波长会发生蓝移,如图 3 所示。图 3(a)为温度变化时传感器光谱漂移的部分曲线;图 3(b)中的拟合曲线分别为该相对湿度传感器在 20 °C~40 °C 范围内,PMF1 和 PMF2 产生漂移的波长间距与温度的变化关系。由图 2 可知,当传感器受到温度影响时,两段保偏光纤同步产生漂移且温度灵敏系数相差不大,分别为 -0.2530 nm/°C、 -0.2594 nm/°C。这一现象证实了本文提出的利用两段保偏光纤来消除温度对湿度传感器的影响具有可行性与现实性。

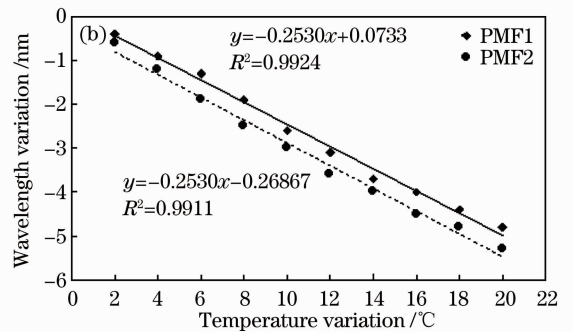
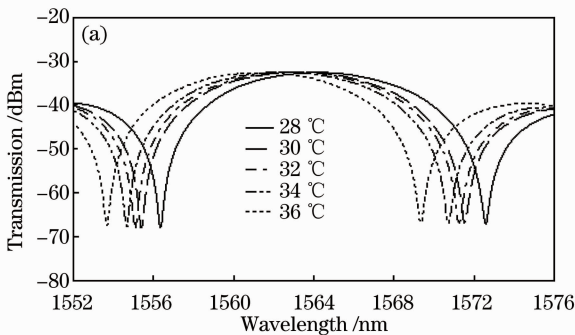


图 3 温度与波长之间的关系曲线。(a)不同温度下的光谱漂移;(b)温度与保偏光纤波长间距之间的关系

Fig. 3 Correlation between wavelength and temperature. (a) Spectrum drift in different temperatures;

(b) relationship of PMF1 dip and PMF2 dip between the wavelength variation and the temperature

在恒温条件下,实验观测传感器输出光谱得到的波长变化与湿度之间的关系。如图 4 所示,将数据线性拟合后得出的湿度波长敏感性为 0.11 nm/% (RH)。谐振波长随着相对湿度从 20% 到 80% 的变

化而单调增加, x 轴与 y 轴的线性关系为

$$y = 0.1115x + 1564.1, \quad (4)$$

其拟合度为 0.993。与此同时,从图 2 中可以看出,当周围环境湿度发生变化时,该相对湿度传感器在

1579 nm 附近的谐振波长仅仅移动了 0.1 nm,受温度影响的系数只有 0.0072 nm/°C,可补偿温度对该湿度传感器造成的误差。其温度敏感性对于工作在正常环境下的湿度传感器而言是可以忽略的。这也表明本文提出的基于两段保偏光纤环镜相对湿度传感器可以对温度进行补偿,并取得了较好的应用效果。

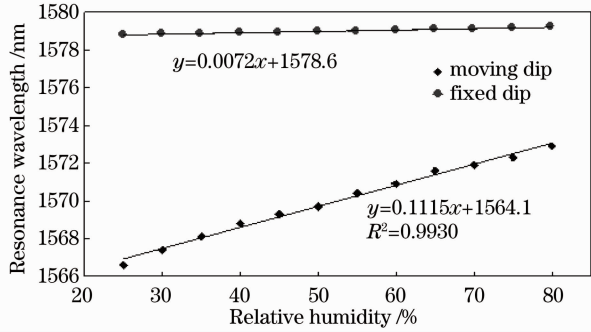


图 4 相对湿度与波长之间的变化关系曲线

Fig. 4 Relationship of moving dip and fixed dip between the wavelength variation and the humidity

为了测量该光纤湿度传感器的可逆性,将湿度从 80%降低到 20%,观察其输出的信号频谱。图 5 给出了 PMF1 的中心谐振波长随着湿度增加和减少的往复变化过程所产生的频谱转移。由图 5 可知,当 RH 从 80%逐渐降至 20%的过程中,谐振波长向短波长方向漂移,且基本沿着 RH 上升的曲线下降,这说明了该光纤湿度传感器具有良好的重现性、可逆性。

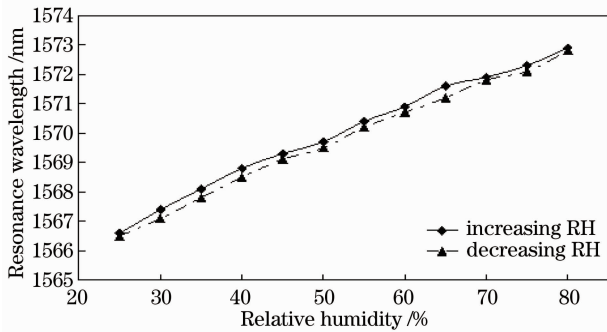


图 5 湿度传感器的重复性

Fig. 5 Repeatability of designed humidity sensor

在实验过程中,该温度不敏感湿度传感器工作时的正负响应时间都很短。在室温 25 °C 下,相对湿度达到 80%时,传感器所需的响应时间少于 6 s;另一方面,若相对湿度下降到 20%时的负响应时间略比正响应时间快,约为 4 s。与其他光纤湿度传感器^[15,16]相比,该传感器不仅具有快速的响应时间,而且灵敏度高,同时还消除了温度带来的影响,在实

验过程中对温度进行了补偿。

4 结 论

提出并验证了一种基于两段保偏光纤环镜温度补偿的相对湿度传感器。验证表明,该传感器随着湿度的增加,其谐振峰波长呈现出线性的红移。在相对湿度范围为 20%~80%内,该光纤传感器湿度测量的灵敏度大约为 0.98 nm/%,温度所带来的影响仅为 0.0072 nm/°C,达到了实验过程中对温度进行补偿、消除温度对传感器影响的目的。

参 考 文 献

- 1 T. L. Yeo, T. Sun, K. T. V. Grattan *et al.*. Characterization of a polymer-coated fiber Bragg grating sensor for relative humidity sensing[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, **110**(1): 148~155
- 2 P. Kronenbery, P. K. Rastogi, P. Giaccari *et al.*. Relative humidity sensor with optical fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(16): 1385~1387
- 3 T. Venugopalan, T. Sun, K. T. V. Grattan. Long period grating-based humidity sensor for potential structural health monitoring [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, **148**(1): 57~62
- 4 Y. P. Miao, B. Liu, H. Zhang *et al.*. Relative humidity sensor based on tilted fiber Bragg grating with polyvinyl alcohol coating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(7): 441~443
- 5 J. M. Corres, F. J. Arregui, I. R. Matias. Design of humidity sensors based on tapered optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(11): 4329~4336
- 6 O. Frazao, B. V. Marques, P. Jorge *et al.*. High birefringence D-type fiber loop mirror used as refractometer[J]. *Sensor and Actuators B: Chemical*, 2008, **135**(1): 108~111
- 7 C. L. Zhao, J. R. Zhao, W. Jin *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement using a highly birefringence fiber loop mirror and a long-period grating written in a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(20): 4077~4080
- 8 X. Y. Dong, T. Li, Y. Liu *et al.*. Polyvinyl alcohol-coated hybrid fiber grating for relative humidity sensing[J]. *J. Biomed. Opt.*, 2011, **16**(7): 077001
- 9 Wang Pan, Gu Fuxing, Zhang Lei *et al.*. Polymer microfiber rings for high-sensitivity optical humidity sensing [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(3): G7~G10
- 10 R. Jindal, S. Tao, J. P. Singh *et al.*. High dynamic range fiber optic relative humidity sensor [J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**: 1093~1096
- 11 C. Barain, I. R. Matias, F. J. Arregui *et al.*. Optical fiber humidity sensor based on a tapered fiber coated with agarose gel [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2000, **69** (1-2): 127~131
- 12 X. F. Huang, D. R. Sheng, K. F. Cen *et al.*. Low-cost relative humidity sensor based on thermoplastic polyimide-coated fiber Bragg grating[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, **127**(2): 518~524
- 13 Y. X. Jin, C. C. Chan, Y. F. Zhang *et al.*. Temperature sensor based on a pressure-induced birefringent single-mode fiber loop mirror [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, **21**(6): 065204
- 14 X. Y. Dong, H. Y. Tam, P. Shum. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber

- based Sagnac interferometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(15): 151113
- 15 T. L. Yeo, T. Suna, K. T. V. Grattan *et al.*. Characterisation of a polymer-coated fibre Bragg grating sensor for relative humidity sensing[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, **110**(1): 148~155
- 16 X. F. Huang, D. R. Sheng, K. F. Cena *et al.*. Low-cost relative humidity sensor based on thermoplastic polyimide-coated fiber Bragg grating [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, **127**(2): 518~524

栏目编辑:殷建芳