

基于大偏置熔接的全光纤法布里-珀罗湿度传感器

姚 军¹ 朱 涛^{1*} 邓 明¹ 饶云江² 段德稳¹

(¹ 重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)
(² 电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 四川 610054)

摘要 利用大偏置熔接方法在两段单模光纤(SMF)中间熔接一小段单模光纤作为支撑梁制作了一种开腔式法布里-珀罗(F-P)干涉传感器。提出在干涉腔内填充一种湿度敏感型物质聚丙烯酰胺(PAM)从而形成一种高灵敏度的微型湿度计。当 PAM 通过吸收空气中的水蒸气而引起自身折射率发生改变,从而导致 F-P 干涉谱发生漂移,通过检测干涉谱的漂移量可以实现对环境相对湿度的测量。实验结果表明,这种湿度传感器在 38%~78%的相对湿度范围内,在 PAM 折射率变化范围内其干涉谱漂移了约 4 nm,漂移量与相对湿度的灵敏度约为 0.1 nm/%;而在 88%~98%的相对湿度范围内可实现高灵敏度的湿度测量,其干涉谱漂移了约 59 nm,漂移量与相对湿度的灵敏度为 5.868 nm/%。

关键词 光纤光学;光纤传感器;法布里-珀罗干涉仪;湿度;聚丙烯酰胺

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s114004

A Humidity Sensor Based on All-Fiber Fabry-Perot Interferometer Formed by Large Offset Splicing

Yao Jun¹ Zhu Tao¹ Deng Ming¹ Rao Yunjiang² Duan Dewen¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China

²Key Laboratory Broadband Optical Fiber Sensing and Communication of Education Ministry of China, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract A novel humidity sensor based on open cavity Fabry-Perot (F-P) interferometer which is formed by fusion splicing a short section of single-mode fiber (SMF) between two sections of single-mode fibers with a large offset splicing method is proposed. The proposed structure can act as a nano-composite hygrometer with high sensitivity by filling the cavity with a humidity sensitive material polyacrylamide (PAM). It is realized that the humidity can be measured by monitoring the interference spectrum shift of the sensor when the refractive index of PAM changes due to absorbing water vapor in the air substantially. The experimental results show that the interference spectrum shift is about 4 nm when the surrounding humidity varies in the range of 38%~78% and the sensitivity of interference spectrum shift versus the relative humidity is about 0.1 nm/%; the interference spectrum shift can reach up to about 59 nm when the surrounding humidity varies in the range of 88%~98% and the sensitivity of interference spectrum shift versus the relative humidity is 5.868 nm/%.

Key words fiber optics; optical fiber sensors; Fabry-Perot interferometer; humidity; polyacrylamide

OCIS codes 060.2430; 060.2370; 060.4005

1 引 言

目前,对于环境湿度的测量在许多领域显得越

来越重要,例如在仓库、博物馆、图书馆、计算机中心和一些工厂(例如微电子工业)中都需要使用湿度计

收稿日期: 2011-07-01; 收到修改稿日期: 2011-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(60807019)和教育部新世纪优秀人才支持计划基金(NCET-08-0602)资助课题。

作者简介: 姚 军(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信和传感技术等方面的研究。E-mail: yaojun@cqu.edu.cn

导师简介: 饶云江(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和光通信等方面的研究。E-mail: yjr@scut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhutao@cqu.edu.cn

来随时监测空气中湿度的变化,以保证保存的粮食、物品和资料等重要财产不受潮和霉变。传统的电子湿度计是基于电阻或者电容的变化来测量湿度的,对电磁干扰的抵抗能力较差,而且在较高湿度环境下,由于电流泄漏等原因很容易造成测量结果不准确。相比传统的湿度传感器,光纤湿度传感器具有体积小、质量轻、抗电磁干扰和可远距离监测等优点。近年来,越来越多的光纤传感器用于测量湿度,包括长周期光纤光栅^[1,2]、布拉格光纤光栅^[3,4]、等离子体表面波^[5]、纳米光纤环^[6]、光子晶体光纤^[7]、拉锥光纤^[8]和马赫-曾德尔干涉仪^[9]等。

光纤法布里-珀罗(F-P)干涉传感器具有结构简单、体积小和复用能力强等优势,其在生化传感领域的应用逐渐成为研究热点^[10~12]。本文采用在两段单模光纤(SMF)中间大偏置熔接一小段单模光纤制作了全光纤开腔法布里-珀罗(OCFP)干涉传感器,提出在腔内填充一种湿度敏感型物质聚丙烯酰胺(PAM),当PAM吸水引起其折射率发生改变,从而导致F-P干涉谱发生漂移,通过检测干涉谱的漂移量可以实现对环境相对湿度的监测。这种湿度传感器具有体积小、成本低、制作简单、灵敏度高和适用范围广等显著优点,同时这种全光纤开腔结构进一步减弱了温度漂移带来的影响,更重要的是与传统电子湿度计相比,其抗电磁干扰能力强,在恶劣环境下的应用具有较大的潜力。

2 传感器的理论分析

全光纤开腔法布里-珀罗湿度传感器的结构如图1所示,由普通的单模光纤SMF28(A段)与腔内PAM形成第一个反射面(mirror 1),PAM与C段单模光纤形成第二个反射面,经两个面反射回来的光形成F-P干涉,当F-P腔两个端面的反射率 R 较

小并且相等时,F-P干涉光光强 I_R 为^[13]

$$I_R = 2R \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi nL}{\lambda} \right) \right] I_i, \quad (1)$$

式中 I_i 为入射光强, λ 为光源波长, n 为F-P腔内介质的折射率, L 为F-P腔的物理长度。实验中采用的是宽带光源,当F-P腔内介质PAM折射率随环境相对湿度的变化而变化时,根据(1)式可知,对应某个特定的波长处的光强也会随之发生改变,表现在干涉谱上会发生漂移。因此,可以通过PAM折射率的变化引起传感器整个干涉谱的漂移,通过监测漂移量可实现对环境相对湿度的测量。

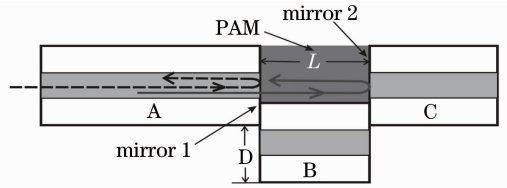


图1 湿度传感器的结构图

Fig. 1 Configuration of the humidity sensor

3 传感器的制作

全光纤开腔法布里-珀罗湿度传感器是用光纤熔接机(Fitel: S176)在单模光纤SMF28(外径为 $125 \mu\text{m}$,芯径为 $8.2 \mu\text{m}$)后偏置熔接一段同样的单模光纤。熔接过程采用手动操作,选取熔接电流为 65 mA ,预放电时间为 1200 ms ,放电时间为 2000 ms ,控制偏置距离 D 至少为 $67.5 \mu\text{m}$;然后在显微镜下切割偏置的单模光纤(图1B段),切割的同时测量其长度 L ,使 L 在 $200 \sim 300 \mu\text{m}$ 之间;接着在偏置的单模光纤尾部熔接上一小段单模光纤(图1C段),熔接时需要调节好偏置方向,使其与前面偏置方向保持一致。最后制作完成的F-P腔如图2(a)所示,其中偏置距离 D 约为 $70 \mu\text{m}$,B段单模光纤长度(F-P腔长) L 为 $255 \mu\text{m}$ 。

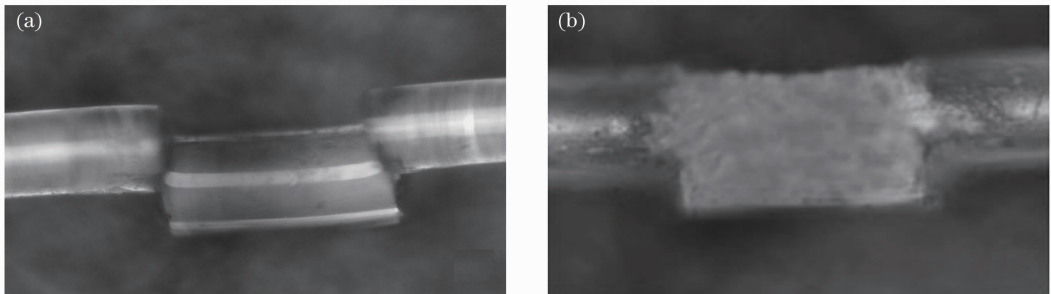


图2 湿度传感器显微图。(a)填充PAM前;(b)填充PAM后

Fig. 2 Image of humidity sensor. (a) Unfilled with PAM; (b) filled with PAM

PAM 是一种吸水性较强的化学物质(由浙江大学童利民老师提供),实验过程中取少量 PAM 与去离子水混合成质量分数为 2% 的溶液,用玻璃棒不断搅拌使溶液呈现出均匀的糊状,然后将制作好的 F-P 腔浸泡在糊状 PAM 溶液中 1 min,取出用干燥箱烘干,这样就形成了一个完整的全光纤开腔法布里-珀罗湿度传感器。制作完成以后的 F-P 湿度传感器显微图如图 2(b)所示。其干涉谱如图 3 所示,可见此种 F-P 传感器的干涉谱非常平整、光滑,同时具有较高的对比度,使后续的信号解调更加容易,测量的准确性、可靠性更高。

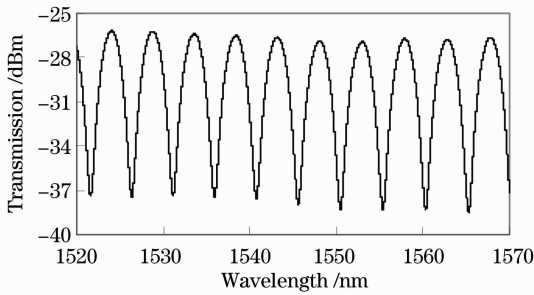


图 3 湿度传感器干涉谱

Fig. 3 Interference spectrum of the humidity sensor

4 实验及讨论

将填充好 PAM 的 F-P 湿度传感器固定在一个温度和湿度都可以进行调节的实验箱内,实验装置如图 4 所示。实验箱为重庆华茂仪器有限公司生产的高低温交变湿热箱(SDJ402),其温度调节范围为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;湿度调节范围为

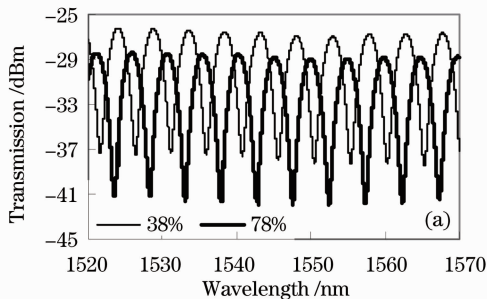


图 5 (a)不同湿度时传感器干涉谱;(b)波长漂移量与相对湿度的关系

Fig. 5 (a) Interference spectrum of the sensor with different relative humidities; (b) relation between the interference spectrum wavelength shift and relative humidity

实验过程中观察到,当湿度在 78% 到 88% 这个范围内变化时,干涉谱会发生跳变,具体表现为干涉谱条纹数增加、整体光强降低[如图 6(a)所示],通过分析认为 PAM 在这个相对湿度范围内自身折射率会发生一个较大的改变,从而导致干涉谱波长间

距变小、条纹数增多;同时 PAM 材料吸光能力增强引起了反射光的光强降低。F-P 腔干涉谱两相邻波谷(或波峰)的间距为

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

因此腔内介质(PAM)折射率为

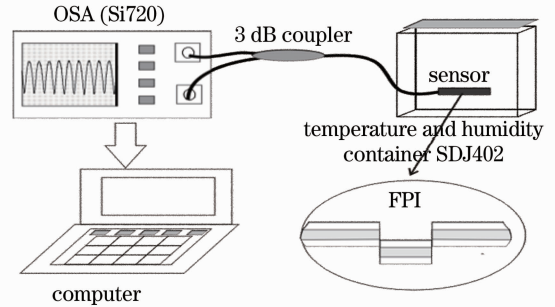
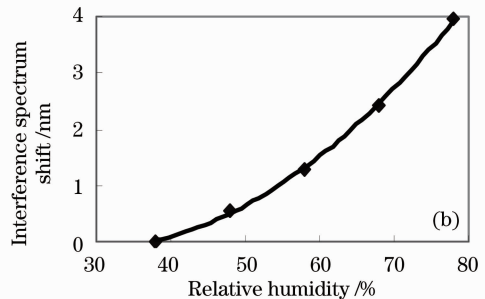


图 4 湿度实验装置

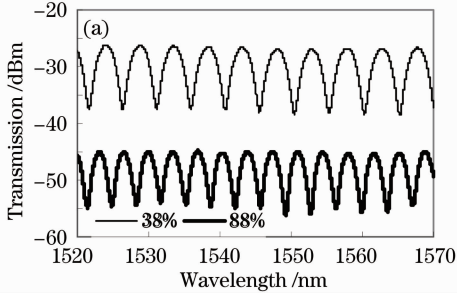
Fig. 4 Experimental setup for humidity measurement

在整个湿度实验中,湿热箱内的温度保持在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度从 38% 升至 78% 的过程中,每变化 10% 且在相对稳定后(大约 1 min)采集一组数据,实验观察到该湿度范围内的 F-P 腔干涉谱变化(相对湿度为 38% 和 78% 时的干涉谱对比)如图 5(a)所示,数据处理后得到如图 5(b)所示的 F-P 腔干涉谱波谷(图中取的是实验所用 F-P 腔最后一个波谷)对应的波长随湿度变化的漂移关系。由图 5 可知,当相对湿度从 38% 变化到 78% 时,传感器干涉谱整体蓝移约 4 nm,在 PAM 折射率变化范围内灵敏度约为 $0.1\text{ nm}/\%$ 。



$$n = \lambda^2 / (2\Delta\lambda L), \quad (3)$$

由(3)式计算出相对湿度为 78%和 88%时的 F-P 腔内 PAM 的折射率分别为 0.9614 和 1.3459,由此可以看出,PAM 在相对湿度为 78%到 88%这个范围内折射率发生了一个较大的突变从而导致了干涉谱的跳变;通过改进优化填充在 F-P 腔内的介质,可以一定程度上避免干涉谱跳变现象的发生。湿度从



88%升至 98%的过程中,每变化 1%采集一组数据,数据处理后结果如图 6(b)所示。从图中可以看出,当相对湿度从 88%变化到 98%时,传感器干涉谱整体蓝移约 59 nm,在 PAM 折射率变化范围内灵敏度为 5.868 nm/%,可见这种全光纤开腔法布里-珀罗湿度传感器在该湿度范围内具有较高的灵敏度和较好的线性度。

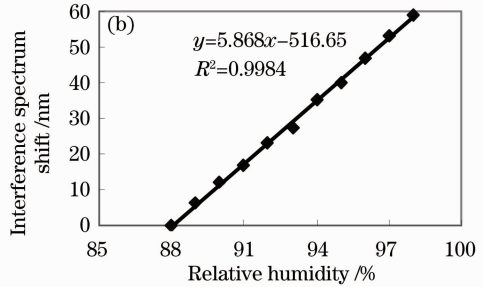


图 6 (a) 湿度为 38%和 88%时的干涉谱;(b)波长漂移量与相对湿度的关系

Fig. 6 (a) Interference spectrum with relative humidity of 38% and 88%; (b) relation between the interference spectrum wavelength shift and relative humidity

分析湿度计在相对湿度从 88%至 98%的范围内灵敏度约为 38%至 78%时的 58 倍的原因可能为:F-P 腔内湿度敏感型物质 PAM 在大于 78%的相对湿度范围内较小于 78%时的折射率变化更大,根据(1)式,较大的折射率变化将导致 F-P 湿度传感器的干涉谱漂移量更大。因此如果采用在相对湿度从 38%至 98%的范围内折射率变化较为均匀的物质填充到 F-P 腔内,将会有效改善湿度计的线性度和稳定性。

率变化量会带来更大的波长漂移量,因此可通过减小干涉腔长来提高传感器测量湿度的灵敏度,同时也可以进一步减小湿度测量响应时间。

5 结 论

通过在全光纤开腔法布里-珀罗传感器的腔内填充湿度敏感型材料 PAM 实现了一种高灵敏度的新型湿度传感器。实验结果表明在 38%~78%的相对湿度范围内,干涉谱最大漂移量约 4 nm,漂移量与相对湿度的灵敏度约为 0.1 nm/%;在 88%~98%的相对湿度范围内,其干涉谱最大漂移量约为 59 nm,漂移量与相对湿度的灵敏度为 5.868 nm/%,与理论分析一致,线性趋势明显。因此这种具有体积小、结构简单、成本低、抗电磁干扰、响应快、灵敏度高和温度影响小等优点的湿度计在光纤传感领域的湿度测量中具有较大的应用潜力。

图 7 所示的是 F-P 传感器干涉谱随温度变化的漂移情况,从图中可知,在 30 °C~100 °C 温度范围内,传感器干涉谱漂移量约为 0.05 nm,温度灵敏度为 0.0006 nm/°C。因此,这种传感器具有较低的温度敏感性,不需要进行附加的温度补偿。另外,根据(1)式可知,F-P 腔的物理长度 L 越小,相同的折射

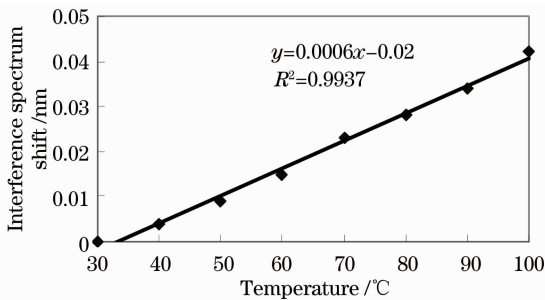


图 7 干涉谱波长漂移量与温度的关系

Fig. 7 Relation between the interference spectrum wavelength shift and temperature

参 考 文 献

- 1 Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A humidity sensor based on ultra-long-period fiber gratings with asymmetric refractive index modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2042~2045
- 2 宋 韵,朱 涛,饶云江等. 基于非对称折变型超长周期光纤光栅的湿度传感器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2042~2045
- 3 Ignacio Del Villar, Carlos R. Zamarreño, Miguel Hernaez *et al.*. Resonances in coated long period fiber gratings and cladding removed multimode optical fibers: a comparative study[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(19): 20183~20189
- 4 Zhang Xiangdong, Li Yulin, Peng Wenda *et al.*. Design and realization of temperature and relative humidity sensor based on

- FBG[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1166~1169
张向东, 李育林, 彭文达等. 光纤光栅型温湿度传感器的设计与实现[J]. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1166~1169
- 4 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*, 2007, **127**: 518~524
- 5 Zhimei Qi, Itaru Honma, Haoshen Zhou. Humidity sensor based on localized surface plasmon resonance of multilayer thin films of gold nanoparticles linked with myoglobin[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12): 1854~1856
- 6 Yu Wu, Tianhu Zhang, Yunjiang Rao *et al.*. Miniature interferometric humidity sensors based on silica/polymer microfiber knot resonators [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, **155**(1): 258~263
- 7 J. Mathew, Y. Semenova, G. Rajan *et al.*. Humidity sensor based on photonic crystal fibre interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 2010, **46**(19): 1341~1343
- 8 Lei Zhang, Fuxing Gu, Jingyi Lou *et al.*. Fast detection of humidity with a subwavelength-diameter fiber taper coated with gelatin film[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 13349~13353
- 9 Qiang Wu, Yuliya Semenova, Jinesh Mathew *et al.*. Humidity sensor based on a single-mode hetero-core fiber structure [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(10): 1752~1754
- 10 Deng Ming, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Refractive-index sensor based on photonic crystal fiber Fabry-Pérot interferometer with self temperature compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1790~1795
邓明, 饶云江, 朱涛等. 基于光子晶体光纤法布里-珀罗干涉仪的温度自补偿折射率计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1790~1795
- 11 Jiang Desheng, Wei Renxuan. Solution concentration measurement system based on fiber Fabry-Pérot interference wavelength [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1127~1131
姜得生, 魏仁选. 基于光纤 F-P 干涉波长的溶液浓度测量系统研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1127~1131
- 12 Zhu Tao, Xu Min, Rao Yunjiang *et al.*. Miniature humidity sensor based on all-fiber Fabry-Pérot interferometer formed by hollow core fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1592~1596
朱涛, 徐敏, 饶云江等. 基于空芯光纤的集成式全光纤法-珀干涉式湿度传感器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1592~1596
- 13 Bi Weihong. Mathematical model for fiber-optical nonsymmetrical Fabry-Perot interferometric cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(7): 873~878
毕卫红. 本征不对称光纤法布里-珀罗干涉仪的理论模型[J]. *光学学报*, 2000, **20**(7): 873~878

栏目编辑：殷建芳