

文章编号: 0253-2239(2010)06-1592-05

基于空芯光纤的集成式全光纤法-珀干涉式湿度传感器

朱涛^{1,2} 徐敏¹ 饶云江^{1,2} 柯涛¹ 刘良辰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 电子科技大学通信与信息工程学院宽带光纤传输及通信网络技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054

摘要 利用空芯光纤制作的法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)干涉传感器具有较低的温度敏感性,由于传感器干涉光光程差与空芯光纤制作的F-P干涉腔腔内介质折射率有直接依赖关系,提出在空芯F-P干涉传感器的腔内填充一种具有较强吸水性的新型纳米复合水凝胶从而构成一种温度低敏感的微型湿度计。当水凝胶通过吸收空气中的水蒸汽而使自身的折射率发生变化时,就会导致F-P腔干涉光的光程差发生变化,通过检测这一光程差的变化就可实现对环境相对湿度的测量。实验结果表明,填充自制的水凝胶,在38%~98%的相对湿度变化范围内,传感器的光程差从608.7180 μm 变化到了604.0488 μm ,在水凝胶折射率变化范围内,其光程差与相对湿度的灵敏度为77.82 nm/(1%)。

关键词 导波与光纤光学;光纤传感器;法布里-珀罗干涉仪;湿度;水凝胶

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1592

Miniature Humidity Sensor Based on All-Fiber Fabry-Pérot Interferometer Formed by Hollow Core Fiber

Zhu Tao^{1,2} Xu Min¹ Rao Yunjiang^{1,2} Ke Tao¹ Liu Liangchen¹

¹ Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems Ministry of Education.

Chongqing University, Chongqing 400044, China

² Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technologies Ministry of Education,

University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract A highly sensitive humidity sensor based on Fabry-Pérot (F-P) interferometer which is formed by hollow core fiber with low sensitivity to temperature is realized. Because the optical path difference of interferential cavity depends on the cavity length and the refractive index of the media which is filled in the F-P cavity. The F-P sensor is filled with a novel nano-composite hydrogel with a strong water capacity. It is realized that the humidity can be measured by measuring optical path difference of the sensor when the refractive index of hydrogel changes due to absorbing water vapor in the air substantially. The experimental results show that the optical path difference changes from 608.7180 μm to 604.0488 μm when the surrounding humidity varies in the range of 38% ~ 98% and the sensitivity of optical path difference versus the relative humidity is 77.82 nm/(1%).

Key words guided wave and fiber optics; optical fiber sensors; Fabry-Pérot interferometer; humidity; hydrogel

1 引言

光纤法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)干涉传感器具有结构简单、体积小、复用能力强以及重复性好

等优势^[1,2],可以用来检测温度、应变和溶液浓度等参量^[3~6],在光纤传感领域具有极大的应用潜力。其中,利用光纤F-P干涉传感器来实现生化传感已

收稿日期: 2009-06-18; 收到修改稿日期: 2009-08-28

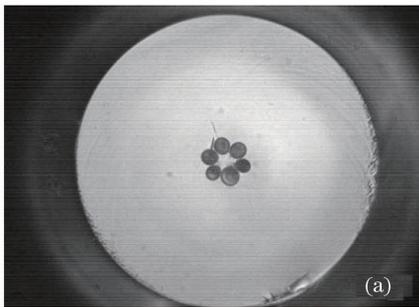
基金项目: 国家自然科学基金(60807019, 60537040)、重庆市自然科学基金(CSTC2008BB2165)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0602)资助课题。

作者简介: 朱涛(1976—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光纤传感及通信技术等方面的研究。

E-mail: zhutao@cqu.edu.cn

逐渐成为近年来的研究热点^[7]。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(比如微电子工业)中都需要使用湿度计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发生受潮和霉变。传统的湿度计对电磁干扰的抵抗能力较差,而且不能应用于较恶劣环境条件下的测量,因此在特定环境具有一定的局限性。Liwei Wang 等^[8]提出在长周期光纤光栅的表层涂覆一种水凝胶来实现对环境湿度的测量,但长周期光纤光栅容易受到温度的影响,从而需要引入温度补偿^[9,10]。

本文采用普通单模光纤、空芯光纤(HCF)和多模光子晶体光纤来制作全光纤 F-P 干涉(FPPI)湿度传感器^[11],提出在 F-P 干涉腔内填充一种具有较强吸水性的新型纳米复合水凝胶,水凝胶吸水以后其折射率会发生变化,从而引起干涉光光程差的变化,通过测量干涉光光程差的变化即可测量周围环境湿度的变化。这种传感器结构进一步降低了温度漂移带来的影响,具有体积小、成本低、制作简单、适用范围广、在相应折射率变化范围内精度高显著



优点,更重要的是这种基于光学的湿度计可以有效解决传统湿度计抗电磁干扰能力较差等缺陷,在抗恶劣环境方面具有较大的应用潜力。

2 传感器的制作

全光纤干涉式法布里-珀罗(PCF-F-P)湿度传感器是在一段空芯光纤两端利用电弧放电熔接方法,分别熔接上普通单模光纤(SMF-28)和 MM-HNA-5 型多模光子晶体光纤,并在 F-P 腔内填充一种新型纳米复合水凝胶制作而成。其中空芯光纤外径为125 μm,内径为 40μm,MM-HNA-5 型多模光子晶体光纤中心为直径 5 μm 的纯二氧化硅,第二层有大小约为 10.5 μm 的 6 个扇形空孔(连通空芯 PCF 内部和外环境,方便水蒸气快速进入 F-P 腔内被水凝胶吸收),最外包层直径为 115 μm 的纯二氧化硅,其端面如图 1(a)所示,最后制作完成的湿度传感器结构如图 1(b)所示,其中,空芯光纤的长度为 198 μm,MM-HNA-5 型多模光子晶体光纤的长度为 45 μm。

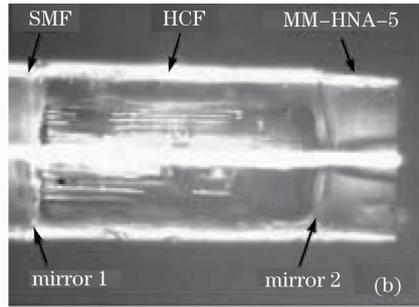


图 1 湿度传感器。(a) 端面图; (b) 侧面图

Fig. 1 Image of the humidity sensor. (a) the cross section; (b) the profile

实验所用水凝胶是将丙烯酰胺、经磷酸钠改性的锂皂石(俗称“粘土”)、过硫酸钾以及硫代硫酸钠按一定的比例完全溶解在去离子水中形成预聚液,并向预聚液中鼓入氮气 30 min,以去除溶液中残留的氧气,然后将溶液置于 40 ℃ 的恒温箱中保温 5 天制作而成。水凝胶的形成是一个“液态——黏糊态——白色胶状”的过程,其在黏糊态时与光纤具有较好的亲和性。实验中,当水凝胶预聚液在 40 ℃ 恒温箱中保存 2~8 h 左右时呈现黏糊态,用玻璃棒将水凝胶均匀地填充进 F-P 腔内,然后将填充后的 F-P 传感器继续在恒温箱中保温到纳米水凝胶完全形成。待完全形成以后,再在其右端熔接上 MM-HNA-5 型多模光子晶体光纤,并在显微镜下切割到设计长度,从而形成一

个完整的 F-P 湿度传感器。制作完成以后的 F-P 传感器干涉谱如图 2 所示。

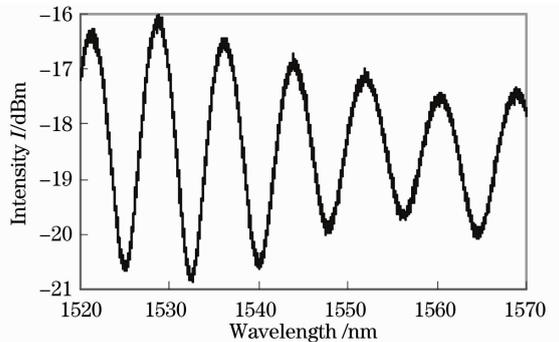


图 2 湿度传感器干涉谱

Fig. 2 Interference spectrum of the humidity sensor

3 传感器的理论分析

F-P 湿度传感器结构原理如图 3 所示,由普通单模光纤与空芯光纤形成第一个反射面,空芯光纤与 MM-HNA-5 型光子晶体光纤形成第二个反射

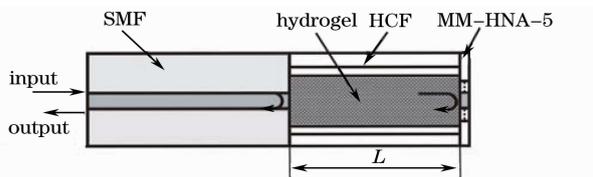


图 3 湿度传感器原理结构图

Fig. 3 The configuration of the humidity sensor

面,从两个面上反射回来的光形成 F-P 干涉,当 F-P 腔两端面反射率 R 较小并且相等时,F-P 干涉光光强 I 为^[12]

$$I = 2R \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi nL}{\lambda} \right) \right] I_0, \quad (1)$$

式中 I_0 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。在实验中采用宽带光源,那么(1)式中的波长 λ 不再是一个固定的

常数值,此时传感器输出光强 I 不仅与 F-P 有关,还与波长 λ 有关,成为腔长 L 和波长 λ 的双参数函数,则(1)式变为

$$I = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} 2R \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi nL}{\lambda} \right) \right] I_0 d\lambda, \quad (2)$$

在假设宽带光源各波长单色光光强均匀分布、反射率很小的情况下,一个腔长为 L 的 F-P 腔有一个确定的、近似余弦关系的光谱分布,且该干涉谱的周期仅与光程差 Δ 有关,与光强无关,从而避开了与光强相关的光源及环境等外界干扰的影响,抗干扰能力增强。

在(1)式中,光波长 λ 、光频 ν 和光速 c 之间的关系为 $\nu = c/\lambda$,代入(1)式:

$$I = 2R \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi nL}{c} \nu \right) \right] I_0, \quad (3)$$

在各波长强度相等的理想宽带光源条件下,(3)式中 I_0 为常数,光纤 F-P 传感器的反射光强 I 与光频率 ν 呈余弦函数关系,函数的周期与传感器的腔长相关,对(3)式进行连续傅里叶变换,可以得到:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(j\Omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} I \exp(-j\Omega\nu) d\nu = \int_{-\infty}^{+\infty} 2R \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi nL}{c} \nu \right) \right] I_0 \exp(-j\Omega\nu) d\nu = \\ &= 2\pi R I_0 \left[2\delta(\Omega) - \delta \left(\Omega + \frac{4\pi nL}{c} \right) - \delta \left(\Omega - \frac{4\pi nL}{c} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

在光频谱分析中,对负频率成分和直流分量不予考虑,则光纤 F-P 传感器反射光强输出信号频谱角频率 Ω 为

$$\Omega = \frac{4\pi nL}{c}, \quad (5)$$

而干涉光光程差满足

$$\Delta = 2nL, \quad (6)$$

式中 n , L 分别为 F-P 腔内介质的折射率和 F-P 腔物理长度。则(5)式可写成

$$\Omega = \frac{4\pi nL}{c} = \frac{2\pi\Delta}{c}, \quad (7)$$

于是可得

$$\Delta = \frac{\Omega c}{2\pi}. \quad (8)$$

通过对传感器反射输出光强信号进行高通滤波,滤除直流分量后进行傅里叶变换,就可完成对光纤 F-P 传感器的解调。实验所用 F-P 腔的物理长度 L 为一稳定值,F-P 腔内介质(水凝胶)折射率随环境相对湿度的变化而变化。因此,可以通过水凝

胶折射率变化引起干涉光光程差的变化,来实现对环境相对湿度的测量。

4 湿度实验及讨论

进行湿度测量的实验装置如图 4 所示。传感器置于湿热箱内,高低温交变湿热箱 SDJ402 在恒温条件下为水凝胶增湿。湿热箱为重庆华茂仪器有限公司生产的温度和湿度都可调的高低温交变湿热箱(SDJ402),该实验箱温度控制范围为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$,控制精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度控制范围为 $38\% \sim 98\%$ 。测量仪器为美国微光光学公司(Micron Optics Inc)生产的 Si720 光纤传感分析仪,输入光源为分析仪自带宽带光源(波长范围为 $1520 \sim 1570\text{ nm}$,波长分辨率为 0.5 pm)。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% 以每次变化 10% 升湿至 98% (相对湿度为 38% 和 78% 时干涉谱比较如图 5 所示),得到 7 组数据列入表 1 中,处理后结果如图 6 所示(为保证珐

F-P 内的水凝胶可以充分吸收空气中的水蒸汽,引起自身折射率的变化,每次改变需稳定 5 min 后再采集数据)。

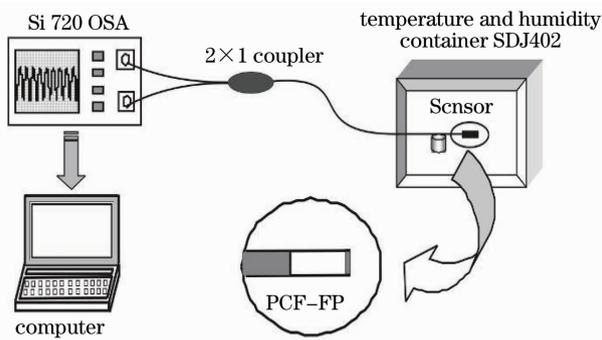


图 4 湿度实验装置

Fig. 4 Experimental setup for humidity measurement

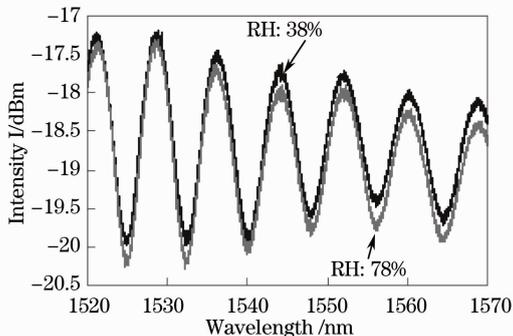


图 5 不同湿度时传感器干涉谱

Fig. 5 Interference spectrum of the sensor with different relative humidity

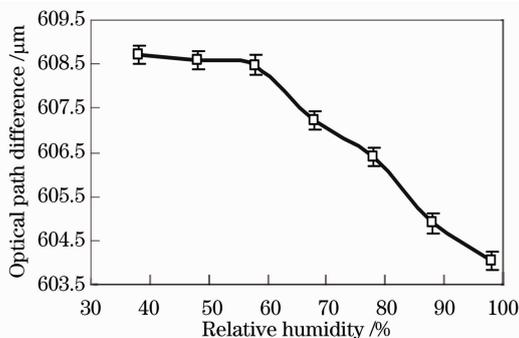


图 6 光程差与相对湿度的关系

Fig. 6 Relation between optical path difference and relative humidity

由图 6 可知,当相对湿度从 38 % 变化到 98 % 时,传感器干涉光光程差从 608.7180 μm 下降到 604.0488 μm ,变化了 4.6692 μm ,在水凝胶折射率变化范围内灵敏度为 77.82 nm/(1%)。在相对湿度 38 % ~ 58 % 变化范围内,光程差变化不大,在 58 % ~ 98 % 的变化范围,光程差变化较大,并且具有一定的线性趋势,但仍然存在细微的波动。通过

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

Relative humidity / %	Optical path difference / μm
38	608.7180
48	608.5828
58	608.4768
68	607.2304
78	606.3880
88	604.8948
98	604.0488

分析,认为其中原因可能有四点:1)水凝胶为化合物,自身含有一定水分,在 38 % ~ 58 % 这个湿度变化范围,因水凝胶自身湿度与环境湿度接近,水凝胶吸收环境水分较慢,引起的折射率变化不大,对湿度计的灵敏度及线性度产生一定的影响。可以通过优化水凝胶各成分的配制比例,形成吸水速率更快、更稳定的水凝胶来解决。2)水凝胶吸水后体积发生变化,溶胀流动性增强,导致水凝胶在 F-P 腔内有一定流动,从而影响实验的重复性,这可以通过在水凝胶形成过程中延长保温时间,让各种成分充分反应,加强水凝胶的稳定性来加以解决。3)水凝胶在 F-P 腔内填充越完全,相对湿度改变范围引起的干涉光光程差变化越大。在目前手工填充条件下,F-P 腔内水凝胶有可能未完全填充满,使得光程差变化尚未达到最大值。因此可以改进填充工艺,让水凝胶填满整个 F-P 腔,以提高湿度传感器的灵敏度。4)实验所用水凝胶为实验室自制水凝胶,因此可以通过优化水凝胶折射率变化范围来得到更加稳定、水凝胶折射率变化范围更大的湿度计,以增大光程差变化范围,有效降低实验误差。

在实验中,大约需要 5 min 左右的时间干涉谱条纹才能达到稳定,才能开始采集数据。一方面,这是由 SDJ402 高低温交变湿热箱参数决定。每次改变箱内相对湿度,湿热箱需要一段时间调节,来保证箱内湿度达到平衡稳定,满足实验设定湿度值;另一方面,可以让湿度计结构中最后一段 MM-HNA-5 型多模光子晶体光纤(起水蒸汽进出通道作用)做到尽可能短,以缩短水蒸汽进入 F-P 腔内时间,并在保证测量精度的情况下进一步减小干涉腔长度来缩短响应时间,从而实现快速测量。此外,F-P 腔腔长越短,则传感器响应速度越快,但光程差变化范围小,灵敏度相对较低,而 F-P 腔腔长越长,则光程差变化范围越大,灵敏度会相应提高,但响应速度会相应减慢。通过对灵敏度和响应时间进行优化,可设计最佳腔长满足实际应用的需求。

在文献[5]中,在初始腔长为 2.1 mm 时,在 $-20^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内,该类型 F-P 腔的腔长变化只有约 $0.2\ \mu\text{m}$,因此温度变化对这种传感器的影响很小,即该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。

5 结 论

通过在 F-P 传感器的空芯干涉腔内填充一种纳米复合水凝胶实现了一种新型湿度传感器。实验结果表明在 $38\%\sim 98\%$ 的湿度变化范围内,其干涉光光程差从 $608.7180\ \mu\text{m}$ 变化到 $604.0488\ \mu\text{m}$,变化了 $4.6692\ \mu\text{m}$,在水凝胶折射率变化范围内其光程差与相对湿度的灵敏度为 $77.82\ \text{nm}/(1\%)$,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、温度影响小、不需温度补偿、相应折射率变化范围灵敏度高和抗电磁干扰等优点的湿度计在传感领域的湿度测量中将具有较大的应用潜力。

参 考 文 献

- Rao Yunjiang. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2006, **12**(3): 227~237
- Shaoji Jiang, Youcheng Liang, Xi Zhu *et al.*. Asymmetric Fabry-Pérot interferometric cavity for fiber optical sensors [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(10): 563~565
- Zhengyu Huang, Yizheng Zhu, Xiaopei Chen *et al.*. Intrinsic Fabry-Pérot fiber sensor for temperature and strain measurements [J]. *IEEE photonics technology letters*, 2005, **17**(11): 2403~2405
- Liao Xian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Simultaneous measurement of high-temperature and strain using a combined long-period fiber grating/ Fabry-Pérot sensor fabricated by laser pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 884~888
- 廖 弦, 饶云江, 冉曾令 等. 激光脉冲制作的长周期光纤光栅/法布里-珀罗高温-应变组合传感器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 884~888
- Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A miniature extrinsic Fabry-Pérot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 17~20
段德稳, 朱 涛, 饶云江 等. 基于空芯光子晶体光纤的微型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 17~20
- 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
- Z. L. Ran, Y. J. Rao, W. J. Liu *et al.*. Laser-micromachined Fabry-Pérot optical fiber tip sensor for high-resolution temperature independent measurement of refractive index [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(3): 2252~2263
- Liwei Wang, Yang Liu, Min Zhang *et al.*. A relative humidity sensor using a hydrogel-coated long period grating [J]. *Mea. Sci. Technol.*, 2007, **18**: 3131~3134
- Rao Yunjiang, Mo Qiuju, Zhu Tao. A novel-high sensitivity refractive index sensor with temperature self-compensating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 264~268
饶云江, 莫秋菊, 朱 涛. 一种新型温度自补偿高灵敏度折射率计 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 264~268
- Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Refractive index characteristic for edge-written long-period fiber gratings induced by CO₂ laser pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1730~1734
王久玲, 饶云江, 朱 涛 等. CO₂ 激光脉冲边缘写入的长周期光栅折射率特性研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1730~1734
- Y. J. Rao, T. Zhu, X. C. Yang *et al.*. In-line fiber-optic etalon formed by hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(18): 2662~2664
- Bi Weihong. Mathematical model for fiber-optical non-symmetrical Fabry-Pérot interferometric cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **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*, 2007, **20**(7): 873~878