

DOI:10.16136/j.joel.2022.05.0696

基于琼脂薄膜的微型端面光纤 F-P 湿度传感器

赵云楠¹, 王伟^{1,2*}, 牛慧莉², 孙哲¹, 康家雯¹

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安工业大学 兵器科学与技术学院, 陕西 西安 710021)

摘要:提出了一种基于琼脂薄膜的微型法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)光纤湿度传感器。传感器通过将标准单模光纤插入空芯玻璃管并在玻璃管端面浸涂琼脂薄膜形成双 F-P 结构。当环境相对湿度变化时,琼脂薄膜的体积和折射率发生改变,从而引起干涉光发生波长偏移。搭建了湿度传感实验系统,对传感器的湿度传感特性进行了表征,在 50%RH—80%RH 的相对湿度范围内实现了高达 1.2324 nm/%RH 的相对湿度测量灵敏度。该传感器尺寸紧凑、成本低、具有较好的线性灵敏度,且制备方式简单。

关键词:光纤传感器;湿度;琼脂;法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)腔

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)05-0465-06

Micro end fiber F-P humidity sensor based on Agr film

ZHAO Yunnan¹, WANG Wei^{1,2*}, NIU Huili², SUN Zhe¹, KANG Jiawen¹

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

2. School of Ordnance Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: A miniature Fabry Perot (F-P) optical fiber humidity sensor based on agar film is proposed. The sensor forms a double F-P structure by inserting a standard single-mode optical fiber into an empty core glass tube and dipping agar film on the end face of the glass tube. When the ambient relative humidity changes, the volume and refractive index of agar film change, resulting in wavelength shift of interference light. The humidity sensing experimental system is built to characterize the humidity sensing characteristics of the sensor. The relative humidity measurement sensitivity of up to 1.2324 nm/%RH is realized in the relative humidity range of 50%RH—80%RH. The sensor has the advantages of compact size, low cost, good linear sensitivity and simple preparation method.

Key words: optical fiber sensor; humidity; agar; Fabry-Perot (F-P) cavity

1 引言

湿度传感器在生态工程、食品加工、文物保护、制药、农业生产等多个领域中广泛地使用,对湿度传感器的环境适应性、测量范围、响应速度和测量精度等要求越来越高^[1]。近几十年来,相比传统传感器,光纤式传感器由于灵敏度高、体积小、质量小、抗电磁干扰、耐腐蚀、可远距离传感、可多路复用等独特优势^[2],在学术界和产业界备受关注,在很多湿度传感器上已得以应用。光纤湿度传感器也成为了湿度传感器的发展方向。

光纤湿度传感器根据其测量原理不同可分为

光功率检测型^[3]和波长检测型^[4,5]。光功率检测型即外界的湿度变化会改变传输光功率,如锥形光纤^[6,7]及塑料包层石英光纤等^[8]类型的湿度传感器。波长检测型^[9,10]即外界的湿度变化引起涂敷在传感器表面湿敏材料的有效折射率以及厚度发生改变,进而引起中心波长的漂移,如基于布拉格光纤光栅、长周期光纤光栅^[11,12]、光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)腔^[13]等湿度传感器。

光纤 F-P 腔湿度传感器的探针体积小和结构紧凑,可做成探针伸入到需要测量的位置,容易封装,更有利于实际应用。CHENG 等^[14]采用毛玻璃和壳聚糖薄膜构成 F-P 传感器,该传感器的灵

* E-mail: wangwei@xatu.edu.cn

收稿日期:2021-10-05 修订日期:2021-11-17

基金项目:陕西省自然科学基金(2020JM-560)资助项目

敏度为 0.13 nm/%RH。MATHEW 等^[15]提出了琼脂涂抹光子晶体光纤传感器,得到的灵敏度为 0.06 dB/%RH。RAN 等^[16]将氧化后的石墨烯沉淀在光纤端面,利用氧化后石墨烯的溪水特性制作出一种湿度传感器,具有 0.22 dB/%RH 的灵敏度。王宁等^[17]制作出石墨烯量子点 F-P 光纤湿度传感器,得到了 0.565 nm/%RH 的灵敏度。叶文毫等^[18]采用聚乙烯醇为传感材料,在单模光纤(single-mode fiber, SMF)右端熔接一段空芯光纤并蘸取聚乙烯醇得到 F-P 腔结构,并测量湿度,具有 0.982 nm/%RH 的灵敏度,但是其传感器线性度较差。同年钟禹宋等人采用明胶为介质制备出与叶文毫等人类似的传感器,获得了较好的线性度,但是其灵敏度仅为 0.192 nm/%RH。为解决传统光纤法布里-珀罗湿度传感器灵敏度低且制备复杂的问题,本文采用琼脂作为湿敏材质制备了一种微型端面光纤法布里-珀罗湿度传感器。在结构上,一段标准 SMF 插入空芯玻璃管内一定长度并用紫外胶胶合,在玻璃管内形一定长度的空气腔。采用浸渍法在空芯玻璃管另一端形琼脂薄膜,空气为介质的 F-P 腔作为参考腔,琼脂为介质的 F-P 腔作为传感腔。湿度变化直接引起琼脂体积发生变化为该湿度传感器的主导因素^[19]。因此相邻两束连续的反射光之间的相位差发生相应的变化。通过监测干涉光波长的偏移,可以解调出被测环境的湿度信息。实验论证了该传感器具有较高的线性灵敏度,且制作工艺简单。

2 传感器的结构与制作

本文提出的基于琼脂的微型端面光纤法布里-珀罗湿度传感器,其结构如图 1 所示。标准 SMF 切平端面与空芯玻璃管空气层交界面形成第 1 个反射面,空气层和琼脂薄膜前表面的交界面形成第 2 个反射面,琼脂薄膜后表面和外界空气的交界面形成第 3 个反射面。第 1 个反射面与第 2 个反射面之间形成空气腔,其内部介质折射率即为空气的折射率 n_{air} ;第 2 个反射面与第 3 个反射面间形成琼脂膜腔,其内部介质折射率为琼脂折射率 n_{Agar} 。由于存在 3 个反射面,该传感器为由空气腔和琼脂膜腔构成的双法珀腔式传感器。

其制作步骤如下:1) 去除标准 SMF 一段长度的涂覆层,将端面切平,同时切取一小段空芯玻璃管,并修整其断面;2) 在显微镜下,将切平端面的标准 SMF 插入空芯玻璃管内,保证标准 SMF 的端面与玻璃管右端面留有约 300 μm 左右的长度,并用紫外胶固定玻璃管左端与空芯玻璃管的连接处;3) 配比浓度为 0.75% 的琼脂溶液,将空芯玻璃管端面浸没进

琼脂溶液,在空芯玻璃管端面成膜,静置 1 h 等待琼脂溶液凝固。

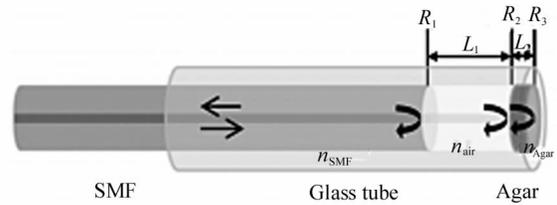


图 1 双腔光纤 F-P 琼脂湿度传感器结构简图

Fig. 1 Structure diagram of double cavity optical fiber F-P agar humidity sensor

琼脂溶液浓度不同,琼脂分子间作用和聚合物链纠缠越不同,琼脂浓度越低分子间作用和聚合物链纠缠越小,形成的琼脂膜吸水膨胀效果越好,但琼脂溶液浓度过低又会导致所成琼脂薄膜机械强度不好,综合考虑后选用浓度为 0.75% 的琼脂溶液成膜,此时琼脂膜的折射率为 1.336^[20]。将空芯玻璃管垂直伸入琼脂溶液,由于毛细作用,溶液会在空芯玻璃管中随着时间推移而升高,可以通过控制空芯玻璃管伸入溶液的时间来控制成琼脂薄膜的厚度,取插入时间为 3—10 s 之间膜厚约为 10 μm 到 40 μm ,静置 30 min 左右成琼脂膜,成膜后传感器即制作完成,在光学显微镜下所拍照片如图 2 所示。其中,标准 SMF 的外径为 125 μm ,空芯玻璃管的内径为 130 μm 、外径为 600 μm 。

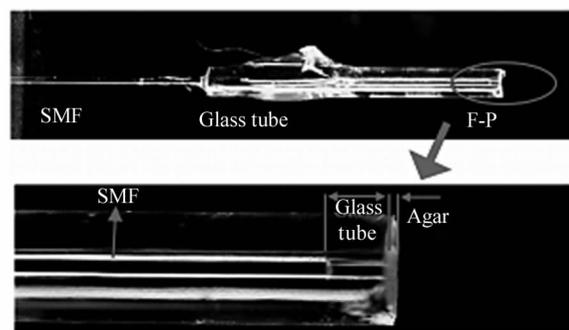


图 2 双腔光纤 F-P 湿度传感器实物图

Fig. 2 Physical drawing of dual cavity optical fiber F-P humidity sensor

3 传感器测量原理

基于琼脂的复合双腔 F-P 光纤湿度传感器的结构如图 1 所示,它由 SMF、空芯玻璃管及蘸在玻璃管顶端的琼脂传感膜构成。该传感器内部具有 3 个反射镜,分别为 SMF-空气界面、空气-琼脂膜界面及琼

脂膜-空气界面。该传感器是双 F-P 腔结构。光在 3 个界面的反射率分别为 R_1 、 R_2 和 R_3 ，其表达式为：

$$R_1 = \frac{(n_{SMF} - n_{air})^2}{n_{SMF} + n_{air}}, \quad (1)$$

$$R_2 = R_3 = \frac{(n_{SMF} - n_{Agar})^2}{n_{SMF} + n_{Agar}}, \quad (2)$$

式中， n_{SMF} 为 SMF 折射率， n_{air} 为空芯玻璃管的空气折射率， n_{Agar} 为琼脂膜的折射率。光在传感器的 3 个反射面中发生反射，三束不同光路的光因为不同相位延迟而产生干涉。总的反射光光强可以表示为^[21]：

$$I_R = R_1 + A^2 + B^2 + 2B \sqrt{R_1} \cos[2(\varphi_1 + \varphi_2)] + 2A \sqrt{R_1} \cos(2\varphi_1) + 2AB \cos(2\varphi_2), \quad (3)$$

$$A = (1 - k_1)(1 - R_1) \sqrt{R_2}, \quad (4)$$

$$B = (1 - k_1)(1 - k_2)(1 - R_1)(1 - R_2) \sqrt{R_3}, \quad (5)$$

式中， k_1 为空气谐振腔的传输损耗， k_2 为琼脂膜谐振腔的传输损耗。

光在 F-P 腔的传输相移可以表示为：

$$\varphi_{air} = \frac{2\pi n_{air} L_1}{\lambda}, \quad (6)$$

$$\varphi_{Agar} = \frac{2\pi n_{Agar} L_2}{\lambda}, \quad (7)$$

式中， φ_{air} 和 φ_{Agar} 分别表示为光经过空气腔和琼脂腔所产生的相移， n_{air} 和 n_{Agar} 表示为空气介质和琼脂介质的折射率， L_1 和 L_2 表示为空气腔的长度和琼脂腔的长度， λ 为光波长。

干涉光谱的自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 可表示为：

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL}. \quad (8)$$

当反射光强最大时，反射光谱曲线达到波峰位置，此时光的波长满足如下表达式为：

$$\lambda_k = \frac{2nL}{2k + 1}, (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (9)$$

其相对变化可以表示为：

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta RH} = \lambda \left(\frac{1}{n} \frac{dn_{Agar}}{dRH} + \frac{1}{n} \frac{dL_2}{dRH} \right), \quad (10)$$

式中， RH 为湿度。

从式(10)可以得出，当传感器周围环境相对湿度增加时，琼脂膜会吸水膨胀，导致琼脂膜腔的腔长增大，同时折射率相应减少^[18]，从而引起波长偏移。因此，通过测量传感器干涉光谱的包络谱的波峰位置变化，可实现对环境相对湿度的测量。

根据式(3)利用 MATLAB 仿真了琼脂膜腔在不同的腔长、不同折射率以及腔长和折射率共同变化的情况下，传感器干涉谱的变化情况。图 3 为不同腔长 L_2 下的干涉谱。根据所制备的传感器尺寸，在 $L_1 = 300 \mu\text{m}$ ， $k_1 = k_2 = 0.01$ ， $n_{SMF} = 1.768$ ， $n_{air} = 1$ ， $n_{Agar} = 1.336$ 的情况下， L_2 分别取 $22.9 \mu\text{m}$ 、 $23.0 \mu\text{m}$ 和 $23.1 \mu\text{m}$ 。由图 3 可以得出， L_2 的变化对干涉谱产生影响，随着 L_2 的增大，干涉谱往右移。

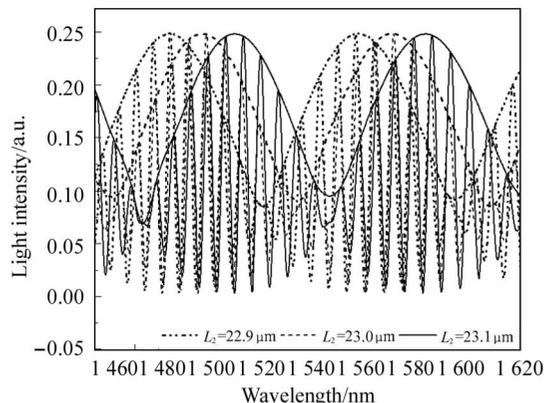


图 3 不同 L_2 下的干涉谱

Fig. 3 Interference spectrum under different L_2

图 4 为不同折射率 n_{Agar} 下的干涉谱的变化。根据所制备的传感器尺寸，在 $L_1 = 300 \mu\text{m}$ ， $L_2 = 22.9 \mu\text{m}$ 的情况下， n_{Agar} 分别取 1.336、1.333、1.330。可以得出， n_{Agar} 的变化对干涉谱产生影响，随着 n_{Agar} 的减小，干涉谱往左移，光强变弱。

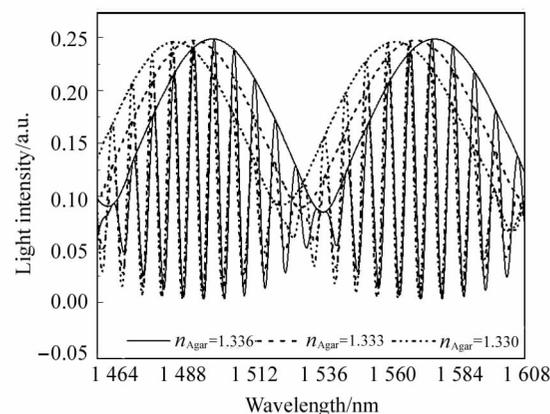


图 4 不同 n_{Agar} 下的干涉谱

Fig. 4 Interference spectrum under different n_{Agar}

图 5 为腔长 L_2 和折射率 n_{Agar} 共同变化时对干涉谱的影响。由于外界湿度增加时，琼脂膜会吸水膨胀，导致腔长变大，折射率减小。根据所制备的传感器尺寸，在 $L_1 = 300 \mu\text{m}$ ， $n_{SMF} = 1.768$ ， $n_{air} = 1$ 的情

况下,分别设置 $n_{\text{Agar}} = 1.336, L_2 = 22.9 \mu\text{m}; n_{\text{Agar}} = 1.333, L_2 = 23.0 \mu\text{m}; n_{\text{Agar}} = 1.330, L_2 = 23.1 \mu\text{m}$ 。可以得出,模拟条件下当 n_{Agar} 和 L_2 共同变化时,干涉谱往右移。实验测得的光谱变化规律与模拟仿真光谱变化规律一致。

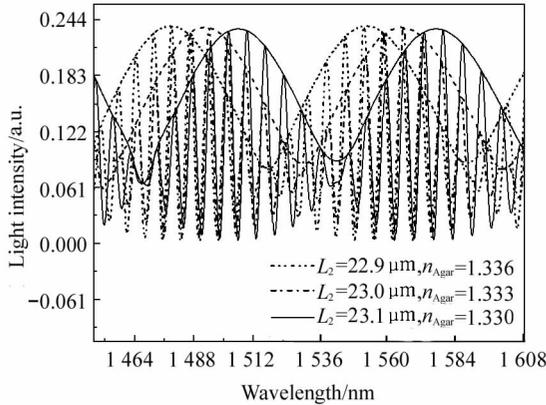


图5 不同 n_{Agar} 和 L_2 下的干涉谱
Fig. 5 Interference spectrum under different n_{Agar} and L_2

4 实验与分析

为了验证并测试基于琼脂的复合双腔光纤 F-P 琼脂湿度传感器的性能,利用宽带光源、光纤环形器、光谱仪及恒温恒湿试验箱等搭建了如图 6 所示的湿度实验测量系统。其中,宽带光源为超辐射发光二极管(super-luminescent diode, SLD),中心波长为 1560 nm,最大输出功率为 5.7 mW,3 dB 带宽约为 90 nm,输出为高斯型光谱。光谱仪采用日本横河公司生产的型号为 AQ6370D 的高精度光谱仪,具有

1100 nm 的波长带宽,0.01 nm 的测量精度。恒温恒湿试验箱为苏州江凯机械设备有限公司生产的可程式恒温恒湿试验箱,湿度最佳范围在 25%RH—90% RH。将双腔光纤 F-P 琼脂湿度传感器通过紫外胶固定在可移动金属台上,并放置在恒温恒湿试验箱内。实验中,湿度环境设置的范围为 50%RH—80% RH。

宽带光在双腔光纤 F-P 琼脂湿度传感器内的 3 个界面发生反射并产生干涉效应。光谱仪从光纤环形器 3 端口接收干涉光谱并进行分析和显示。图 7 (a)和图 7(b)分别为该传感器的干涉光谱和归一化干涉光谱,其干涉光谱信号包含 4 个光谱信号成分,分别为空气腔对应信号、琼脂腔对应信号、两个腔的差频信号和两个腔的和频信号。传感器光谱进行归一化后提取的上包络为琼脂腔对应的光谱信号如图 7(b)所示。

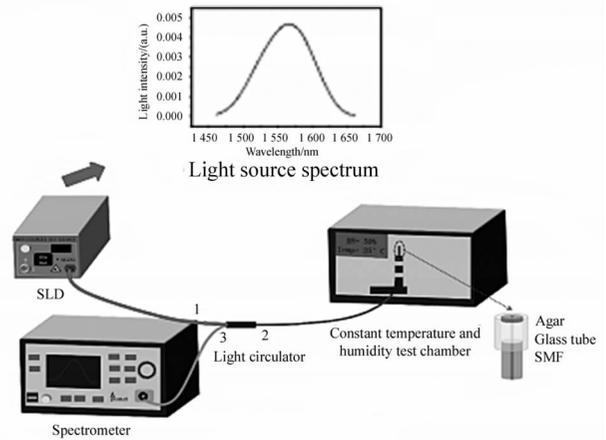


图6 双腔光纤 F-P 琼脂湿度传感器实物图
Fig. 6 Physical diagram of dual cavity optical fiber Fabry-Perot FP agar humidity sensor

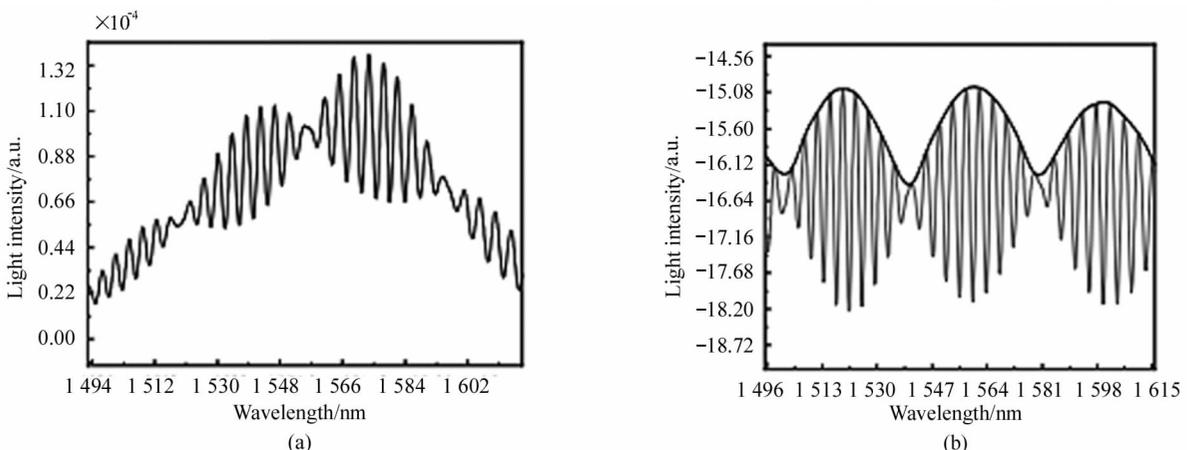


图7 双腔光纤 F-P 琼脂湿度传感器的干涉光谱:(a) 干涉光谱;(b) 归一化光谱及其上包络
Fig. 7 Interference spectrum of dual cavity fiber F-P agar humidity sensor:
(a) Interference spectrum; (b) Normalized spectrum and its upper envelope

在 25 ℃ 恒温状态下,调整相对湿度为 55%RH、60%RH、65%RH。等待 30 min,湿度状态稳定后,记录相应位置干涉光谱数据,并对其进行归一化计算,归一化之后的干涉光谱图如图 8 所示。从图中可以得出随着湿度的增加,琼脂腔对应光谱信号的波长发生明显偏移且光谱偏移量与湿度变量之间为线性关系。

在 25 ℃ 恒温状态下,对湿度范围 50%RH—80%RH,间隔 5%RH,选取 7 个湿度测试点对湿度进行测量。每个测试点测试 5 次湿度数据取平均,以保证测量数据的准确性。在不同相对湿度下,对归一化光谱信号进行上包络提取,针对同一波峰位置,观察其位置的变化,如图 9(a)所示。并得出图 9 (b)所示的包络波峰位置随湿度变化的关系图,经过线性拟合后可以得出波峰位置和湿度之间的线性表达式,其斜率表征传感器的灵敏度。经计算可以得出,较高的灵敏度为 1.2324 nm/%RH,线性度为 0.9702,其线性度较好。

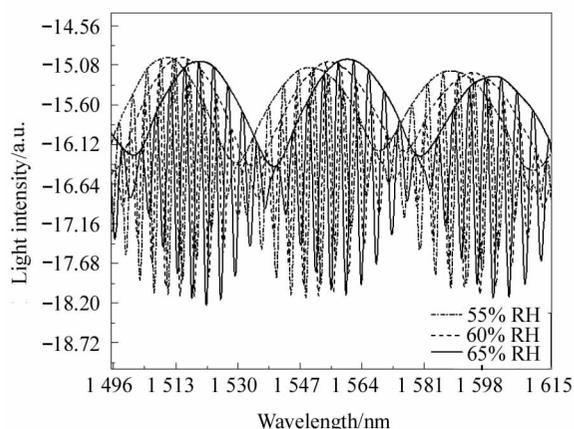
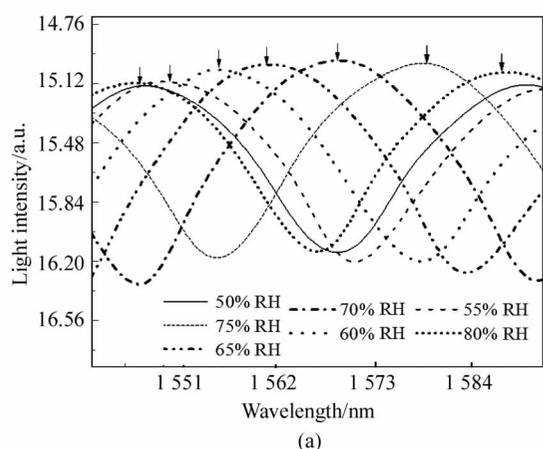


图 8 相对湿度为 55%RH、60%RH、65%RH 的干涉光谱图

Fig. 8 Interferogram with relative humidity of 55%RH,60%RH and 65%RH



(a)

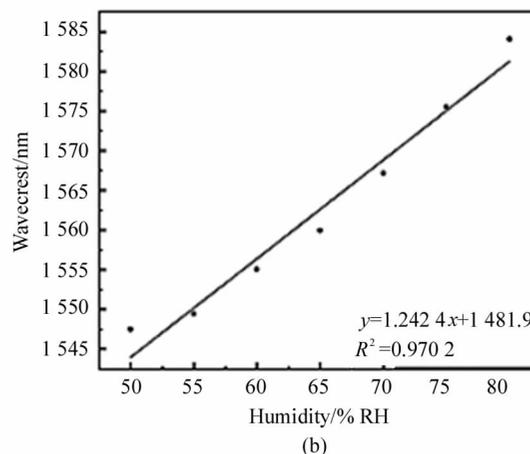


图 9 湿度在 50%RH 到 80%RH 之间的干涉峰位置变化及其灵敏度:(a) 包络波峰位置变化;(b) 包络波峰位置与湿度关系

Fig. 9 Interference peak position change and sensitivity of humidity between 50%RH and 80%RH:(a) Change of envelope peak position;(b) Relationship between envelope peak position and humidity

5 结论

本文提出的双腔光纤 F-P 琼脂湿度传感器,利用琼脂为传感材料形成 F-P 腔。琼脂构成的 F-P 腔从环境中吸收水分,从而改变琼脂膜的厚度,使得琼脂膜腔长发生改变引起 F-P 腔干涉条纹的波长漂移。在 50%RH 到 80%RH 的湿度环境范围内检测相对湿度,实验结果表明传感器的灵敏度为 1.2324 nm/%RH,线性度为 0.9702,证明该传感器可以用于湿度的测量,并且具有制作简单、成本低、灵敏度高和可靠性强等优点。

参考文献:

- [1] CHEN L H, LI T, CHAN C C, et al. Chitosan based fiber-optic Fabry-Perot humidity sensor[J]. Sensors and Actuators, B. Chemical, 2012, B169(1):167-172.
- [2] KE W M, LI Z H, ZHOU Z X, et al. Reduced graphene oxide-based interferometric fiber-optic humidity sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12):74-83.
柯伟铭,李振华,周智翔, . 基于还原氧化石墨烯的干涉型光纤湿度传感器[J]. 光学学报, 2019, 39(12):74-83.
- [3] LI Y J, DANG Y G, FEI D J, et al. Review of light intensity modulated humidity sensor[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2009, 28(7):5-8.
李雅娟,党亚固,费德君,等. 光强调制型光纤湿度传感

- 器评述[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(7): 5-8.
- [4] CHAI J, LIU Q, ZHANG B, et al. Characterization and sub-structure morphology of a polyimide-coated FBG humidity sensor[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2016, 27(3): 239-246.
- 柴敬, 刘奇, 张渤, 等. 基于聚酰亚胺的 FBG 湿度传感特性及细观特征研究[J]. 光电子·激光, 2016, 27(3): 239-246.
- [5] ZHANG C, CHEN T, LIU S H, et al. Fabrication and performance study of FBG humidity sensor for PEMFC[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2020, 31(10): 1025-1035.
- 张城, 陈涛, 刘士华, 刘康杰. 用于 PEMFC 的 FBG 湿度传感器的制作及性能研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(10): 1025-1035.
- [6] CORRES J M, ARREGUI F J, MATIAS I R. Design of humidity sensors based on tapered optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technolog*, 2006, 24: 4329-4336.
- [7] LOKMAN A, NODEHI S, BATUMALAY M, et al. Optical fiber humidity sensor based on a tapered fiber with HEC/PVDF composite[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, 56(2): 380-382.
- [8] KHIJWANIA S K, SRINIVASAN K L, SINGH J P. An evanescent-wave optical fiber relative humidity sensor with enhanced sensitivity[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 104(2): 217-222.
- [9] YEO T L, SUN T, GRATAN K T V, et al. Characterization of apolymer-coated fiber Bragg grating sensor for relative humidity sensing[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 110(1): 148-155.
- [10] PASCAL K, PRAMOD K, RASTOGI, PHILIPPE G, et al. Relative humidity sensor with optical fiber Bragg gratings[J]. *Optical Letters*, 2002, 27(16): 1385-1387.
- [11] GU B B, YIN M J, ZHANG P, et al. Optical fiber relative humidity sensor based on FBG incorporated thin-core fiber modal interferometer[J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4140-4146.
- [12] SANDRA F H, CORREIA, PAULO A, EDISON P, et al. Optical fiber relative humidity sensor based on a FBG with a Di-Ureasil coating[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8847-8860.
- [13] LIU N. Research on optical fiber temperature and humidity sensor based on Mach-Zehnder and Fabry-Perot interference structures[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- 刘楠. 基于马赫曾德和法布里珀罗干涉结构的光纤温湿度传感器研究[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- [14] CHEN L H, LI T, CHAN C C, et al. Chitosan based fiber-optic Fabry-Perot humidity sensor[J]. *Sensors & Actuators B: Chemical*, 2012, 169: 167-172.
- [15] MATHEW J, SEMENOVA Y, FARRELL G. Relative humidity sensor based on an agarose-infiltrated photonic crystal fiber interferometer[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(5): 1553-1559.
- [16] RAN G, LU D F, JIN C, et al. Humidity sensor based on power leakage at resonance wavelengths of a hollowcore fiber coated with reduced graphene oxide[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2016, 222(JAN.): 618-624.
- [17] WANG N, TIAN W H, ZHANG H S, et al. Optical fiber Fabry-Perot humidity sensor by graphene quantum dots[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9): 107-114.
- 王宁, 田文昊, 张昊生, 等. 石墨烯量子点法布里珀罗光纤湿度传感器[J]. 光子学报, 2020, 49(9): 107-114.
- [18] YE W H, JIANG C, WANG J. Humidity sensor based on Fabry-Perot interferometer[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021, 34(4): 476-483.
- 叶文豪, 江超, 王解, 等. 法布里-珀罗干涉仪构成的湿度传感器[J]. 传感技术学报, 2021, 34(4): 476-483.
- [19] WANG B. High sensitivity fiber-optic humidity sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- 王博. 高灵敏度光纤湿度传感器[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [20] WANG B, TIAN J J, HU L, et al. High sensitivity humidity fiber-optic sensor based on all-Agar Fbry-Perot interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(12): 4879-4885.
- [21] YANG Y, XU B, LIU Y M, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor with fiber optic Fabry-Perot interferometer based on vernier effect[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(9): 195-201.
- 杨易, 徐贲, 刘亚铭, 等. 基于游标效应的增敏型光纤法布里-珀罗干涉仪温度传感器[J]. 物理学报, 2017, 66(9): 195-201.

作者简介:

王伟 (1973—), 男, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事仪器科学与技术 and 武器系统应用工程专业的教学和科研工作。