

DOI:10.16136/j.joel.2023.02.0294

基于并联法布里-珀罗干涉仪游标效应的增敏光纤湿度传感器

马行超, 张熙梓, 郭允, 吴玉纯, 王东宁, 徐贲*

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了提高光纤湿度传感器的灵敏度, 提出了一种基于并联光纤法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometers, FPIs)游标效应的增敏型湿度传感器, 并进行了实验验证。该传感器由两个基于内径 $4\ \mu\text{m}$ 石英毛细管的光纤 FPI 通过 2×2 耦合器并联组成, 其中一个 FPI 作为传感 FPI, 其末端镀有湿敏特性的琼脂糖薄膜, 另一个作为参考 FPI。论文分析了器件的湿度传感工作原理, 实验结果论证了该理论分析的正确性。实验显示, 并联 FPI 游标效应器件在 $40\% \text{RH}—60\% \text{RH}$ 范围内其灵敏度高达 $0.8439\ \text{nm}/\% \text{RH}$, 较之单一 FPI 的灵敏度提高了 9 倍, 是并联 FPI 反射谱直接波谷追踪波长解调灵敏度的 44 倍。增加 FPI 末端湿敏膜厚度, 其灵敏度进一步提高至 $1.12\ \text{nm}/\% \text{RH}$ 。该传感器制备简单、尺寸小、灵敏度高, 在湿度测试方面具有潜在的应用价值。

关键词: 光纤传感; 法布里-珀罗干涉仪(FPI); 游标效应; 湿度

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)02-0113-07

Sensitivity-enhanced fiber humidity sensor based on parallel Fabry-Perot interferometers with Vernier effect

MA Xingchao, ZHANG Xizi, GUO Yun, WU Yuchun, WANG Dongning, XU Ben*

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

Abstract: To attain high humidity sensitivity, a sensitivity-enhanced sensor based on parallel fiber Fabry-Perot interferometers (FPIs) with the Vernier effect is proposed and experimentally demonstrated. It is made up of two optical fiber FPIs, each of which is based on a short capillary section with an inner diameter of $4\ \mu\text{m}$. A 2×2 coupler connects the two FPIs in parallel. The sensing element is one FPI covered with humidity-sensitive agarose film at its end face, whereas the reference element is the other. The theoretical study of the sensor's operating principle and the experimental findings are in good agreement. Within the range of $40\% \text{RH}—60\% \text{RH}$, high sensitivity of $0.8439\ \text{nm}/\% \text{RH}$ is achieved. It is 44 times more sensitive than the direct tracing of a specific resonance dip in the superimposed reflection spectrum and is 9 times more sensitive than a single FPI. The thickness of the humidity-sensitive film is then increased, significantly improving the humidity sensitivity up to $1.12\ \text{nm}/\% \text{RH}$. The easy fabrication, compact size, and high sensitivity of the proposed sensor indicate that it has a promising future in humidity detection.

Key words: optical fiber sensing; Fabry-Perot interferometer (FPI); Vernier effect; humidity

0 引言

光纤湿度传感器具有抗腐蚀, 抗电磁干扰, 适

用于恶劣环境, 同时体积小、质量轻, 更适合狭小空间工作等优点, 得到广泛的关注。其传感结构包括光纤光栅^[1,2]、马赫-曾德干涉仪(Mach-Ze-

* E-mail: xuben@cjlu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-23 修订日期: 2022-06-15

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY19F050010)和微光机电系统技术教育部重点实验室(天津大学)开放基金(MOMST 2016-1)资助项目

hnder interferometer, MZI)^[3,4]、法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI)^[5,6]和萨格纳克(Sagnac)干涉仪^[7]等。其中基于光纤 FPI 的湿度传感器因分辨率高、结构紧凑等诸多优点尤其受到大众的青睐。

在测量湿度的过程中,将 FPI 与湿敏材料相结合,通过湿敏薄膜吸收空气中的水分,其体积或折射率发生改变,从而使干涉腔长改变,追踪谐振波谷的漂移而实现光纤传感器的湿敏测量^[8]。如 CHEN 等^[9]将单模光纤与空芯光纤熔接,在空芯光纤的末端涂敷壳聚糖薄膜,形成空气腔 FPI 结构,该器件的灵敏度约 0.13 nm/% RH (relative humidity)。壳聚糖的浓度对器件的性能影响明显,浓度过高会使涂敷面厚薄不平,浓度过低会难以维持壳聚糖的亲湿优势。ZHAO 等^[10]直接将聚酰亚胺涂敷在光纤的端面形成 FPI 结构,聚酰亚胺分子孔吸收液态水,其灵敏度约 0.164 nm/% RH。为提高湿度测量灵敏度, HUANG 等^[11]将单模光纤末端涂敷多孔阳极氧化铝,多孔结构吸收环境中的水分子折射率发生变化,湿度灵敏度达 0.31 nm/% RH,但此结构响应和恢复时间较长。YANG 等^[12]通过电子蒸发开发了多孔 TiO₂-SiO₂-TiO₂ 的 FPI,灵敏度进一步提高到 0.43 nm/% RH,但制备多孔传感所需的技术方法结构复杂且昂贵^[13]。因此,选择“吸水”性能好且制备简单的湿敏材料是改善湿度传感器的关键。琼脂糖不易溶于水,对 SiO₂ 的附着力强,折射率随环境湿度改变而呈线性变化,作为湿敏材料具有良好的应用前景^[14,15]。

近年来对光学游标效应^[3-7,16-20]的研究为提高传感器的灵敏度创造了空间。利用串联的两个干涉仪干涉光谱自由光谱范围(free spectral range, FSR)相近的特点从而形成游标效应,如通过级联 MZI^[3,4]、FPI^[5,6]或 Sagnac^[7]等构成串联干涉仪结构,实现了较之单个干涉仪的灵敏度高数倍或数十倍的气压、折射率或温度等物理量的传感测量。

本文采用性能良好的湿敏材料琼脂糖,结合光学游标效应增敏技术,提出基于并联光纤 FPI 游标效应的增敏型湿度传感器。实验结果显示该传感器的最大湿度灵敏度高达~1.12 nm/% RH,较之单一 FPI 其灵敏度提高了一个数量级。

1 传感器的结构和工作原理

图 1 给出了基于游标效应的并联光纤 FPI 湿度传感器的结构示意图。每个 FPI 均由单模光纤末端熔接一小段内径 4 μm 的毛细管组成。由于毛细管的内径小于单模光纤的模场直径(~10 μm),因此在

单模光纤与毛细管的熔接处 M1,来自宽带光源的光在此处一部分产生反射回单模光纤,一部分光泄露到毛细管壁内继续向前传输直至毛细管末端端面 M2 发生反射再次耦合进单模光纤中,从而构成毛细管壁充当固态腔的 FPI。其中一个 FPI 的毛细管末端端面涂敷湿敏材料琼脂糖薄膜,充当传感器件,另一个 FPI 充当参考器件,各 FPI 中的毛细管长度相近。两个 FPI 通过一个 2×2 的 50:50 光纤耦合器构成并联 FPI 结构。

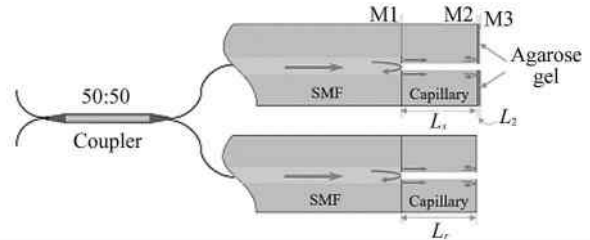


图 1 并联 FPI 湿度传感器结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of humidity sensor with parallel FPIs

琼脂糖膜层虽然有两个反射面,但厚度 L₂ 非常小,加之其折射率和毛细管壁的折射率接近,可以简化将毛细管和薄膜看成一个整体(后续实验结果验证了这点)。进一步,单模光纤端面的反射率很低(~4%),传感 FPI 可简化为双光束干涉,其反射光强 I_s 可以表示为:

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} + 2\sqrt{I_{s1}I_{s2}} \cos\left(\frac{2\pi(n_s L_s + n_2 L_2)}{\lambda}\right), \quad (1)$$

式中, I_{s1} 和 I_{s2} 分别表示单模光纤/毛细管界面和琼脂糖膜层/空气界面反射回单模光纤的光强, n_s、L_s 和 n₂、L₂ 分别表示毛细管壁琼脂糖的折射率与长度/厚度。当相位 φ = 2π(n_sL_s + n₂L₂)/λ 等于 π 的奇数倍时,反射光强出现最小值,对应反射光谱中的波谷,对应波长 λ_{dip} 可以表示为:

$$\lambda_{dip} = \frac{2\pi(n_s L_s + n_2 L_2)}{2m + 1}, \quad (m = 1, 2, 3 \dots). \quad (2)$$

相邻波谷之间的间隔,即 FSR 为

$$FSR = \frac{\lambda_{dip}^2}{2(n_s L_s + n_2 L_2)}. \quad (3)$$

琼脂糖吸收空气中水分后,其折射率 n₂ 和体积发生变化(转化为厚度 L₂ 发生变化),根据式(2)可知,此时传感器反射光谱中谐振波谷发生相应漂移,即该器件对湿度敏感,其灵敏度进一步可表示为:

$$S_H = \frac{2}{2m + 1} \left(\frac{\partial n_2}{\partial H} L_2 + \frac{\partial L_2}{\partial H} n_2 \right) = \frac{2}{2m + 1} (\alpha_{n,H} n_2 L_2 + \xi_{L,H} n_2 L_2) =$$

$$\frac{n_2 L_2 (\alpha_{n,H} + \xi_{L,H})}{n_s L_s + n_2 L_2} \lambda_{\text{dip}} = \frac{K}{R+1} \lambda_{\text{dip}}, \quad (4)$$

式中, $\alpha_{n,H}$ 和 $\xi_{L,H}$ 分别是湿度引起的琼脂糖折射率和厚度变化系数, $K = \alpha_{n,H} + \xi_{L,H}$, 其值由湿敏材料决定, 在一定湿度范围内为一常数, $R = \frac{n_s L_s}{n_2 L_2}$ 反映湿敏器件的结构参数。

式(4)给出了传感器的相对湿度灵敏度与湿度系数 K 、结构参数 R 以及干涉光谱谐振波谷 λ_{dip} 之间的函数关系, 为传感器性能优化提供了良好的理论指导, 如湿敏膜的厚度增加, 其湿度灵敏度增大。当 $L_s = 0$ 时意味着湿敏膜直接构成一个 FPI, 其湿度灵敏度只与湿度敏感材料的湿度系数 K 和谐振波谷波长 λ_{dip} 有关, 与薄膜的厚度无关。

当图 1 中并联的两个 FPI 满足关系 $n_s L_s + n_2 L_2 \approx n_s L_r$, 参考 FPI 不受湿度的影响, 仅传感 FPI 对湿度敏感, 此时并联 FPI 的叠加光谱产生游标效应。前期研究工作表明, 基于游标效应的叠加光谱包络解调可有效地提高器件的灵敏度^[18-20], 且灵敏度放大因子 M 可表示为:

$$M = \frac{FSR_r}{|FSR_r - FSR_s|}, \quad (5)$$

式中, FSR_s 和 FSR_r 分别表示传感器件和参考器件的干涉谱 FSR 。

2 传感器的制备与湿度传感测试系统

制备图 1 中所示器件, 需用到普通单模光纤 (SMF28, corning) 和石英毛细管 (TSP005150, polymicro technologies)。石英毛细管的内径 4—5 μm , 外径 $\sim 126 \mu\text{m}$ 。将石英毛细管熔接于单模光纤末端, 在显微镜的辅助下精确切割毛细管的长度, 实验测得两个 FPI 中的毛细管长度分别为 $\sim 180 \mu\text{m}$ 和 $\sim 207 \mu\text{m}$, 将前者选作传感 FPI, 后者为参考 FPI。将 1 g 琼脂糖粉末溶于 100 mL 的去离子水中, 保持溶液温度不变, 用磁力搅拌器搅拌溶液, 直至琼脂糖粉末完全溶解, 形成 $\sim 1\%$ wt 的琼脂糖凝胶溶液。采用浸涂法将末端熔接 180 μm 毛细管的光纤结构快速浸入琼脂糖凝胶溶液中并快速取出, 悬挂放置在恒温恒湿的环境中 24 h 待之凝固, 在毛细管末端形成一层琼脂糖凝胶薄膜^[15]。在显微镜下用另一根光纤锥戳破毛细管端面薄膜中心部分, 使之形成环状的凝胶薄膜。图 2(a) 给出了传感 FPI 的镀膜前后的反射光谱(其中插图是传感 FPI 的显微照片), 在波长测量范围内波形均呈近似正弦曲线, 且镀膜后的 FSR 较镀膜前仅减小 $\sim 0.04 \text{ nm}$, 这应证

了前文工作原理部分将毛细管和薄膜看成一个整体且镀膜后的反射光谱近似看成是单模光纤/毛细管界面和琼脂糖薄膜/空气界面反射回单模光纤形成的双光束干涉的分析。图 2(b) 给出了镀膜前后并联 FPI 结构的叠加谱, 高频的密集条纹被低频信号调制, 密集条纹的周期由独立的 FPI FSR 决定, 而低频的包络则由并联的两个 FPI FSR 之差决定, 符合典型的游标效应特征。

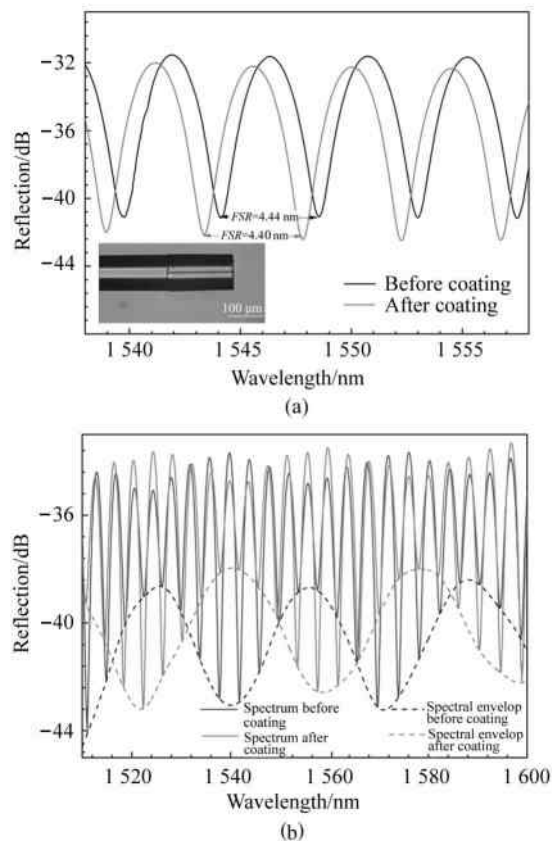


图 2 镀膜前后反射光谱:(a) 传感 FPI 独自的反射光谱;
(b) 并联 FPI 的传感器叠加反射光谱

Fig. 2 Reflection spectrum before and after coating:
(a) Reflection spectrum of the single sensing FPI;
(b) Superimposed reflection spectrum of the sensor with parallel FPIs

图 3 为湿度传感测试系统装置示意图。来自宽带光源 (ASE, ALS-CI-17-B-FA, Amonics) 的光, 覆盖波长范围 1500—1600 nm, 经 50 : 50 的 2×2 光纤耦合器分束输入给并联的两个 FPI, 其中传感 FPI 置于湿度箱内, 参考 FPI 置于箱外的实验室环境。两个 FPI 的反射光经光纤耦合器后输入光谱仪 (OSA, Yokogawa, AQ6370D), OSA 记录下传感 FPI 和参

考 FPI 的叠加光谱。实验室内保持恒定的温度 (~25 °C) 和相对湿度 (~41% RH)。湿度箱内温度与室温相等,其内相对湿度可调范围为 41% RH—65% RH,控制精度为 ±1% RH。实验时,箱内湿度以 3% RH 步进调节,待箱内每个设定的相对湿度值达到稳定时(保持约 5 min),光谱仪记录相应的反射光谱(光谱仪采样波长分辨率为 0.02 nm)。

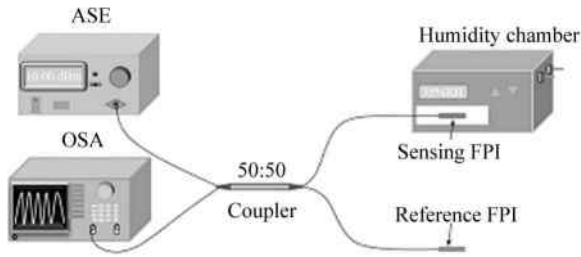


图 3 湿度传感测试系统装置示意图

Fig. 3 Experimental setup for humidity sensing

3 湿度响应测试与分析

图 4 给出了单独传感 FPI 的湿度响应测试结果。湿度箱内温度保持 ~25 °C。图 4(a) 显示,随着湿度箱内相对湿度的升高,该干涉仪的反射光谱向长波长方向发生明显漂移(即红移),在 41% RH 升高至 65% RH 的过程中,总的波长漂移量约 2.2 nm。追踪 1550 nm 附近的谐振波谷,确定在各相对湿度时的中心波长值,如图 4(b) 所示。利用最小二乘法线性函数拟合得相关系数 $R^2 = 0.9944$,意味着谐振波谷中心波长漂移量与湿度之间存在良好的线性关系,其斜率表征传感器的湿度灵敏度,约为 0.091 nm/%RH。进一步,为了测试该传感 FPI 的湿度响应重复性,湿度箱内相对湿度从 65% RH 降低至 41% RH 过程中监测了同一谐振波谷的漂移情况,测量结果如图 4(b) 所示。对比湿度升高和降低过程中同一相对湿度值下谐振波谷的中心波长,差异较小,说明该传感 FPI 具有良好的重复性。

用 2×2 光纤耦合器将制备的传感 FPI 和参考 FPI 并联,仅将传感 FPI 置于湿度箱内,参考 FPI 置于箱外,保持箱内外的温度恒定,约 25 °C。图 5(a) 显示并联结构的湿度响应。随着湿度的增高,叠加光谱向长波长方向略微漂移。图 5(a) 插图显示了 1518.4 nm 附近的谐振波谷随湿度的变化而发生漂移的情况。湿度从 41% RH 升高至 65% RH,该谐振波谷中心波长共漂移约 0.440 nm。图 5(b) 给出了湿度增高过程中该谐振波谷的中心波长在不同相对湿度时的具体值,应用最小二乘法线性拟合,得相关

系数 $R^2 = 0.9745$,表明谐振波谷中心波长与湿度之间存在良好的线性关系,其斜率表征湿度灵敏度,仅约 ~0.0199 nm/%RH。同样,对湿度降低过程的响应特性也进行了测量,图 5(b) 显示该并联结构的湿度响应具有良好的重复性。

对图 5(a) 中测得的不同湿度下原始叠加光谱的极小值进行函数拟合,得到一系列包络曲线,如图 6(a) 所示,其中插图给出了 53% RH 时的叠加光谱包络拟合情况。可看出,原始光谱的极小值可用三角函数拟合,相关系数 $R^2 = 0.9829$ 。随着相对湿度的增高,叠加光谱的包络曲线向短波长方向发生明显漂移,湿度从 41% RH 升高至 65% RH,包络的总漂移量达 ~20 nm。图 6(b) 给出了追踪包络曲线中在 1550 nm 附近的波谷不同湿度下的中心波长。同理,应用最小二乘法线性拟合,得相关系数 $R^2 = 0.9829$,表明该波谷中心波长与湿度之间存在良好

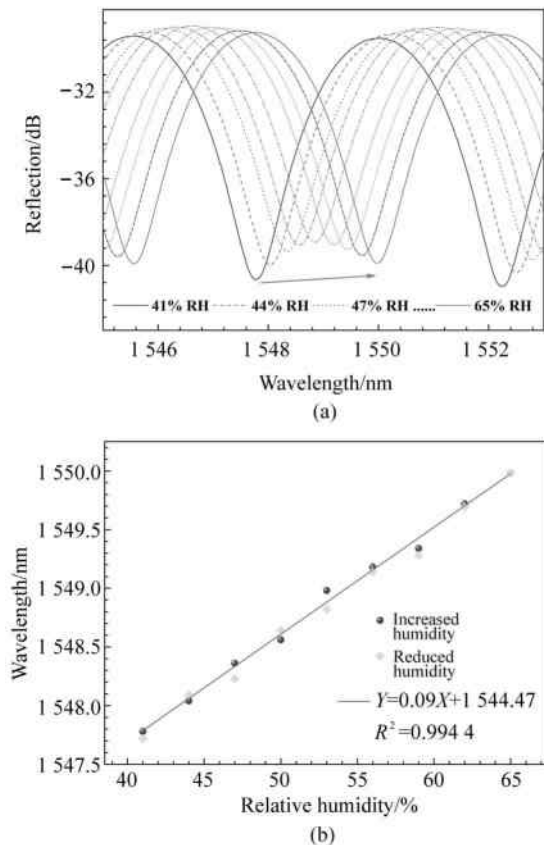


图 4 单一传感 FPI 的湿度响应:

- (a) 单一传感 FPI 的在不同相对湿度时的反射光谱;
- (b) 谐振波长与相对湿度的关系

Fig. 4 Humidity response of single sensing FPI: (a) Reflection spectra of the single sensing FPI at different relative humidities; (b) Resonance dip wavelength versus relative humidity

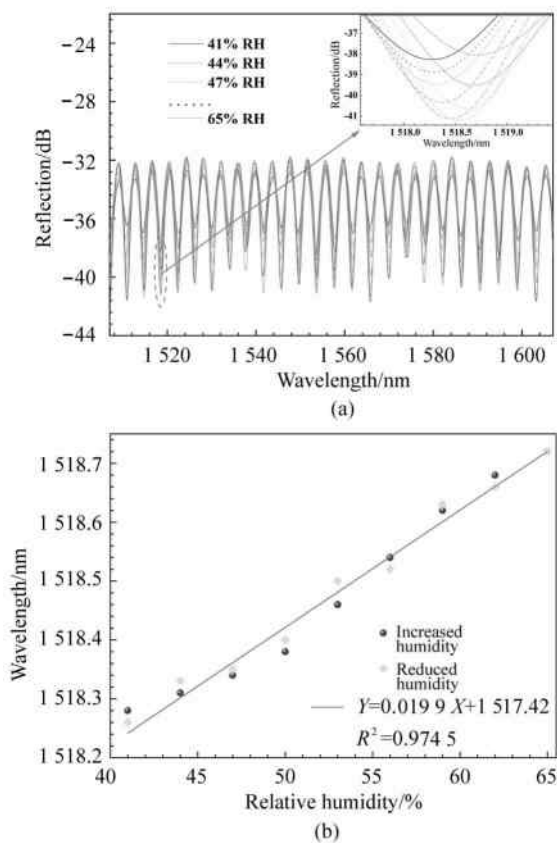


图 5 并联 FPI 结构的湿度响应特性:

(a) 不同湿度的反射光谱; (b) 谐振波长与湿度的关系

Fig. 5 Humidity response characteristics of parallel FPIs:

(a) Reflection spectra at different humidities;

(b) Resonance dip wavelength versus humidity

的线性关系,其斜率表征游标效应解调的湿度灵敏度,其值高达 $\sim 0.8439 \text{ nm}/\% \text{RH}$ 。该湿度灵敏度较之单一的传感 FPI 提高了 9 倍,较之叠加光谱直接波长解调的灵敏度提高了 40 余倍。对比箱内湿度增高和湿度降低过程测量的数据可看出应用光谱包络解调并联 FPI 结构的湿度响应具有良好的重复性。

分析式(4)可知,湿敏薄膜厚度增加有利于器件的灵敏度增高。为了验证这一分析结果,本文将传感 FPI 用浸涂法进行了二次镀膜,单独测量其反射光谱,得 FSR 为 4.38 nm ,较一次镀膜后减少了 0.02 nm 。将之与参考 FPI 并联,对叠加光谱进行包络拟合得其湿度响应特性如图 7 所示。图 7(a)给出了不同湿度下并联 FPI 结构的反射光谱包络。图 7(b)显示,在同样的湿度变化范围(从 $41\% \text{ RH}$ 至 $65\% \text{ RH}$),反射光谱包络向短波长方向漂移了 $\sim 23.52 \text{ nm}$ 。应用最小二乘法线性拟合发现叠加光

谱的包络波谷中心波长与湿度间存在较好的线性关系,且灵敏度从之前一次镀膜的 $0.8439 \text{ nm}/\% \text{RH}$ 提高至 $\sim 1.12 \text{ nm}/\% \text{RH}$,与前文式(4)的分析结果一致。

最后,本文测试并联 FPI 结构在恒定湿度下叠加光谱的稳定性。图 8 给出了将二次镀膜传感 FPI 置于湿度箱内分别保持恒定湿度 $47\% \text{ RH}$, $55\% \text{ RH}$ 和 $63\% \text{ RH}$ 时监测 120 min 内叠加光谱包络中 1570 nm 附近的波谷中心波长的稳定性,其标准差分别为: 0.142 nm , 0.078 nm 和 0.111 nm 。结果显示,该传感器具有良好的稳定性。

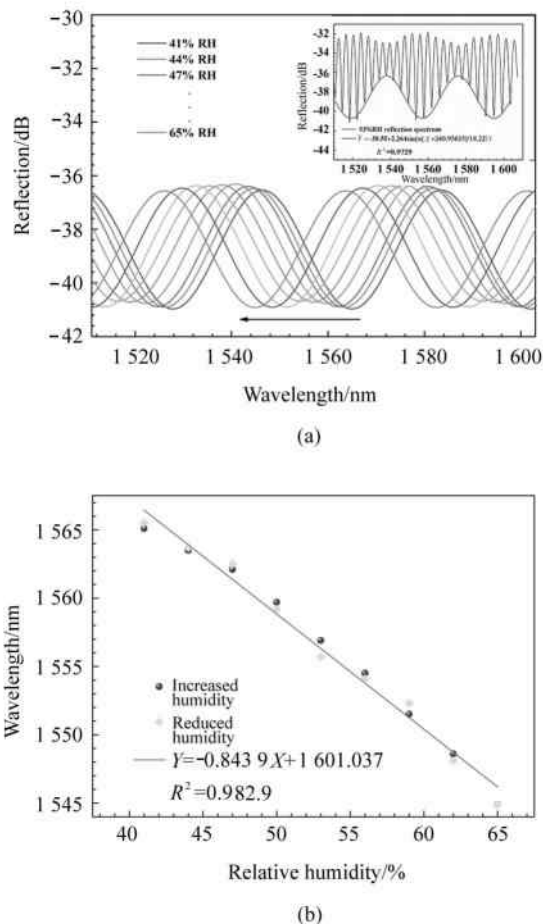


图 6 包络光谱在不同湿度下的响应特性:

(a) 不同湿度下干涉谱的包络拟合;

(b) 拟合曲线波谷中心波长与湿度的关系

Fig. 6 Response characteristics of envelope spectrum

under different humidities;

(a) Sinusoidal fitting results of the lower envelope curves in the reflection spectra

at different humidities; (b) Dip center wavelength of fitting curve versus humidity

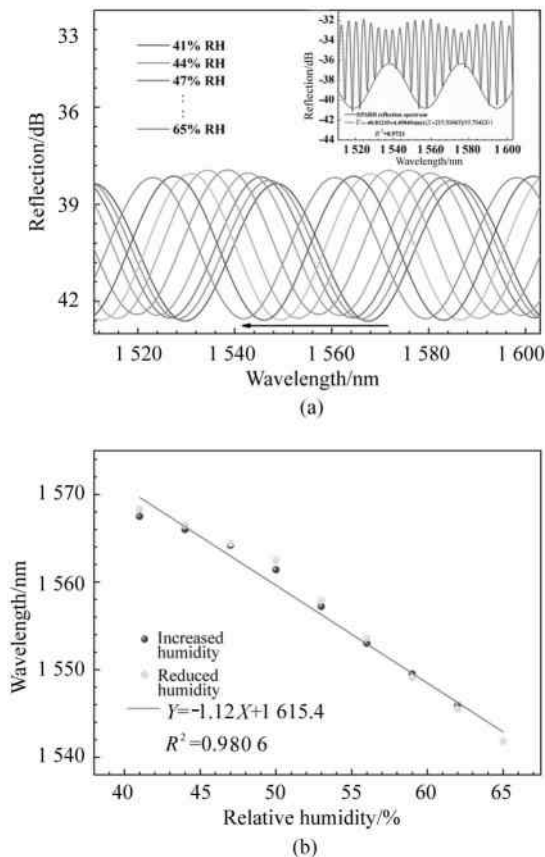


图7 增加琼脂糖薄膜厚度后并联 FPI 结构的湿度响应:

(a) 不同湿度下的反射光谱包络拟合;
(b) 拟合曲线波谷中心波长与湿度之间的关系

Fig. 7 Humidity response of the device with parallel FPIs after thickening the agarose film: (a) Sinusoidal fitting results of the lower envelope curves in the reflection spectra at different humidities; (b) Dip center wavelength of fitting curve versus humidity

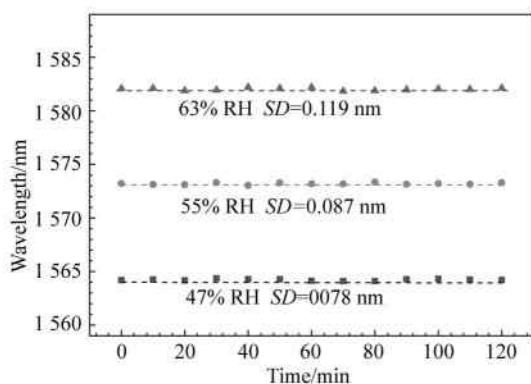


图8 并联 FPI 器件的湿度响应稳定性

Fig. 8 Humidity response stability of the device with parallel FPIs

4 结 论

本文提出了一种基于游标效应的并联 FPI 光纤湿度传感器, FPI 干涉仪由熔接于单模光纤末端的一小段内径较小的石英毛细管组成。其中传感 FPI 的石英毛细管末端涂敷有湿度敏感的琼脂糖薄膜。论文详细分析了传感器的工作原理, 论证了湿度灵敏度与器件结构参数之间的关系。基于并联游标效应, 传感器的灵敏度高达 $\sim 0.8439 \text{ nm}/\% \text{ RH}$, 是无游标效应的独立传感 FPI 的 9 倍, 是并联 FPI 结构反射光谱直接追踪谐振波谷波长解调的 44 倍。增厚湿敏膜的厚度, 灵敏度进一步提高至 $1.12 \text{ nm}/\% \text{ RH}$ 。实验结果显示该传感器具有良好的重复性和稳定性。结构紧凑、制备简单、灵敏度高的特点意味着该湿度传感器具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] 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, 等. 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.

[2] XIANG G H, HU M L, QIAO X G, et al. Study on the characteristics of FBG humidity sensor based on polyimide [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2012, 23(1): 41-45.
向光华, 忽满利, 乔学光, 等. 基于聚酰亚胺材料的 FBG 湿度传感特性研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(1): 41-45.

[3] LIN H F, LIU F F, DAI Y T, et al. Cascaded fiber Mach-Zehnder interferometers for sensitivity-enhanced gas pressure measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19: 2581-2586.

[4] ZHAO Y J, LIN H F, ZHOU C M, et al. Cascaded Mach-Zehnder interferometers with Vernier effect for gas pressure sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31: 591-594.

[5] YANG X M, WU S, CHENG H H, et al. Simplified highly-sensitive gas pressure sensor based on harmonic Vernier effect [J]. Optics and Laser Technology, 2021, 140: 107007.

[6] ZHANG Y A, HUANG J, LAN X W, et al. Simultaneous measurement of temperature and pressure with cascaded extrinsic Fabry-Perot interferometer and intrinsic Fabry-

- Perot interferometer sensors[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6):067101.
- [7] SHI J, WANG Y Y, XU Y X, et al. Remote gas pressure sensor based on fiber ring laser embedded with Fabry-Perot interferometer and Sagnac loop[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5):1-8.
- [8] LU L H, DONG X P, LU C X. High sensitivity interferometric optical fiber humidity sensor based on a moisture sensitive film[C]//*Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall (Piers-Fall)*, December 17-20, 2019, Xiamen, China. New York: IEEE, 2019:277-281.
- [9] CHEN L H, LI T, CHAN C C, et al. Chitosan based fiber-optic Fabry-Perot humidity sensor[J]. *Sensor and Actuators B*, 2012, 169:167-172.
- [10] ZHAO Y H, YUAN Y Q, GAN W B, et al. Optical fiber Fabry-Perot humidity sensor based on polyimide membrane: sensitivity and adsorption kinetics[J]. *Sensor and Actuators A: Physical*, 2018, 281:48-54.
- [11] HUANG C J, XIE W J, YANG M H, et al. Optical fiber Fabry-Perot humidity sensor based on porous Al_2O_3 film[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(20):2127-2130.
- [12] YANG M H, XIE W J, DAI Y T, et al. Dielectric multilayer-based fiber optic sensor enabling simultaneous measurement of humidity and temperature[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10):11892-11899.
- [13] WANG B, TIAN J J, LIU H, et al. High sensitivity humidity fiber-optic sensor based on all-agar Fabry-Perot interferometer[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2018, 18(12):4879-4885.
- [14] MIAO Y P, ZHANG K K, YUAM Y J, et al. Agarose gel-coated LPG based on two sensing mechanisms for relative humidity measurement[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(1):90-95.
- [15] NOVAIS S, FERREIRA M S, PINTO J. Relative humidity fiber sensor based on multimode interferometer coated with agarose-gel[J]. *Coatings*, 2018, 8(12):453-462.
- [16] HAI T G, WANG J X, SHEN J, et al. Study of the Vernier effect based on the Fabry-Perot interferometer: methodology and application [J]. *Photonics*, 2021, 8(8):80803004.
- [17] 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):094205.
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):094205.
- [18] LIAO H, LU X, JIANG X, et al. Sensitivity amplification of fiber-optic in-line Mach-Zehnder interferometer sensors with modified Vernier-effect[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22):26898-26909.
- [19] NAN T, LIU B, WU Y F, et al. Ultrasensitive strain sensor based on Vernier-effect improved parallel structured fiber-optic Fabry-Perot interferometer [J]. *Optics Express*, 2019, 27(12):17239-17250.
- [20] WANG C R, CHEN M Q, ZHAO Y, et al. Low temperature crosstalk optical fiber Fabry-Perot interferometer for highly sensitivity strain measurement based on parallel Vernier effect[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 67:102700.

作者简介:

徐贲 (1979—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光纤器件与传感方面的研究。