



光子学报  
*Acta Photonica Sinica*  
ISSN 1004-4213, CN 61-1235/O4

## 《光子学报》网络首发论文

题目: 光纤-明胶法布里-珀罗干涉湿度传感器  
作者: 钟禹宋, 董新永, 徐鹏柏, 杨军  
收稿日期: 2021-06-18  
网络首发日期: 2021-08-24  
引用格式: 钟禹宋, 董新永, 徐鹏柏, 杨军. 光纤-明胶法布里-珀罗干涉湿度传感器. 光子学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1235.O4.20210823.1608.002.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 光纤-明胶法布里-珀罗干涉湿度传感器

钟禹宋<sup>1,2</sup>, 董新永<sup>1,2\*</sup>, 徐鹏柏<sup>1,2</sup>, 杨军<sup>1,2</sup>,

(<sup>1</sup>广东工业大学信息工程学院, 广州 510006)

(<sup>2</sup>广东工业大学 广东省信息光子技术重点实验室, 广州 510006)

**摘要** 通过在单模光纤尾端熔接几十微米长的空芯光纤及在空芯光纤尾端涂覆明胶湿度敏感膜, 构成法布里-珀罗干涉结构, 感应湿度变化引起的明胶膜厚度变化对干涉腔长的调制, 通过光谱测量实现了对相对湿度的传感。研究结果显示, 该传感器在温度为 20°C 下, 20%~80%RH 的湿度范围内, 灵敏度达到 192 pm/%RH, 并拥有较好的测量精度和重复性。此外, 还对传感器在温度分别为 15°C 和 25°C 下进行湿度上升实验, 获得灵敏度分别为 173 pm/%RH 和 194 pm/%RH。为了同时监测环境温度的变化, 我们在传感器的尾纤级联了光纤光栅, 实现对温度的同时测量。该光纤湿度传感器制作简单、灵敏度高、可同时测量温度, 可望在湿度测量领域获得重要应用。

**关键词** 光纤传感器; 湿度测量; 明胶; 法布里-珀罗干涉仪

**中图分类号**: TN253

**文献标识码**: A

## Optical fiber and gelatin based Fabry-Perot interferometric humidity sensor

ZHONG Yusong<sup>1,2</sup>, DONG Xinyong<sup>1,2\*</sup>, XU Pengbai<sup>1,2</sup>, YANG Jun<sup>1,2</sup>,

(<sup>1</sup>School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

(<sup>2</sup>Guangdong University of Technology Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangzhou, 510006, China)

**Abstract** A Fabry-Perot interferometer (FPI) was constructed by fusion splicing a hollow core fiber (HCF) with a length of tens of microns at the end of a single-mode fiber and coating gelatin film at the free end of the HCF. Relative humidity measurement was achieved by detecting wavelength shift of the interference spectrum with humidity level changes. Experimental results show that high sensitivity of 192 pm/%RH has been obtained in the temperature range of 20°C within the range of 20%-80%RH and the measurement accuracy and repeatability are quite good. In addition, the sensitivity of 173 pm/%RH and 194 pm/%RH were obtained by humidity increasing experiments at 15°C and 25°C, respectively. In order to measure temperature has also been achieved by cascading a fiber Bragg grating sensor with the FPI sensor head. The optical fiber humidity sensor possesses several advantages including simple fabrication, high sensitivity, and temperature measurement. It has good potential in the field of humidity measurement.

**Key words** Optical fiber sensor; Humidity measurement; Gelatin; Fabry-Perot interferometer

**OCIS Codes**: 060.2370; 280.0280; 160.5470; 120.2230

**基金项目**: 国家自然科学基金 (61775204, 11974083), 光纤光缆制备技术国家重点实验室开放课题 (SKLD1905), 广东省引进创新创业团队项目 (2019ZT08X340)

**第一作者**: 钟禹宋 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤湿度传感. E-mail:1075233357@qq.com

**导师 (通讯作者)**: 董新永 (1975—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术及光纤激光器. E-mail: dongxy@gdut.edu.cn

收稿日期: 2021-06-18; 录用日期: 2021-08-19

## 0 引言

湿度测量在食品、医药、仓储、环境监测等领域有着广泛需求。随着社会的发展，人们对湿度测量的范围、测量精度、响应速度等指标的要求越来越高。常规的基于电子技术的湿度传感器，易受电磁信号干扰，长期稳定性差。而光纤湿度传感器以结构紧凑、重量轻、不受电磁干扰等特点，近年来吸引了越来越多的研究兴趣。

光纤湿度传感器通常由光纤传感结构（如光纤光栅<sup>[1-2]</sup>、光纤干涉仪<sup>[3]</sup>、D型光纤<sup>[4]</sup>、微纳光纤<sup>[5-6]</sup>等）与湿度敏感膜结合构成。在众多光纤湿度传感器中，基于光纤干涉仪的光纤湿度传感器具有灵敏度高、结构简单等优点，因此获得重点关注，不同的光纤干涉结构如迈克尔逊干涉仪（Michelson interferometer, MI）<sup>[7-8]</sup>、马赫-曾德尔干涉（Mach-Zehnder interferometer, MZI）<sup>[9-13]</sup>、法布里-珀罗干涉（Fabry-Perot interferometer, FPI）<sup>[14-18]</sup>和萨格纳克干涉<sup>[19]</sup>等都吸引了不少研究。

目前已报道的光纤湿度敏感材料也有很多种，通常为有机高分子聚合物材料（如聚乙烯醇、壳聚糖、琼脂糖等）、新型碳纳米材料（如碳纳米管和石墨烯等），以及有机高分子聚合物与碳纳米材料的复合物等。2011年 ZHAO Y 等<sup>[20]</sup>将聚乙烯醇涂覆在腐蚀后的多模光纤，并将其两端与单模光纤熔接，形成 MZI 结构光纤湿度传感器，在 80%~89%RH 范围内获得了 0.18 nm/%RH 的灵敏度。2013年 ZHANG S Q 等<sup>[21]</sup>将聚乙烯醇涂覆光子晶体 MZI 结构，在 30%~95%RH 的范围内获得了 -99.5 pm/%RH 的灵敏度。2012年 CHEN L H 等<sup>[22]</sup>采用玻璃毛细管与湿度敏感聚合物材料壳聚糖结合，得到光纤 FPI 湿度传感器，灵敏度为 0.13 nm/%RH。2014年 HU P B 等<sup>[23]</sup>采用壳聚糖涂覆光纤 MI 结构，获得了灵敏度为 135 pm/%RH 的湿度测量。2012年 MATHEW J 等<sup>[24]</sup>报道一种琼脂糖涂覆光子晶体光纤 MI 结构湿度传感器，获得灵敏度为 0.06 dB/%RH。2016年 GAO R 等<sup>[25]</sup>在空芯光纤的表面沉淀氧化石墨烯，利用空芯光纤的反谐振现象和氧化石墨烯的吸水膨胀特性，获得 0.22 dB/%RH 的湿度灵敏度，且具有响应时间快、对温度不敏感等优点。同年，Wang Y Q 等<sup>[26]</sup>将氧化石墨烯/聚乙烯醇涂覆在级联锥形光纤 MZI 结构的表面，获得了灵敏度为 0.193 dB/%RH 的湿度测量。2018年 MA Q F 等<sup>[27]</sup>利用碳纳米管/聚乙烯醇涂覆细芯光纤构成的 MI 结构，获得 -0.4573 dB/%RH 的灵敏度。值得注意的是，2019年 LIU Y 等<sup>[28]</sup>采用湿度敏感材料明胶涂覆多芯光纤 MI 结构，实现了灵敏度高达 -0.185 nm/%RH 的湿度测量，该湿度传感器具有灵敏度高、稳定性好等优点。

本文在前期研究基础上，提出一种基于明胶敏感膜的光纤法布里-珀罗干涉湿度传感器。利用与单模光纤熔接的空芯光纤及涂覆在空芯光纤端面的明胶膜，构建了 FPI 结构，湿度引起明胶膜厚度的变化改变了 FPI 的腔长，通过对干涉光谱的测量实现了灵敏度达 192 pm/%RH 的湿度传感。该传感器具有灵敏度高、重复性好等优点。另外，通过级联光纤光栅传感器，还实现了温度的测量。

## 1 传感器的原理和制备

光纤湿度传感器的结构如图1所示。入射光在从单模光纤的纤芯进入空芯光纤时，由于界面两侧折射率的不同发生菲涅尔反射，部分光被反射回单模光纤，其余部分进入空芯光纤。进入空芯光纤的光在遇到空芯光纤尾端的明胶膜时同样发生菲涅尔反射，该部分反射光在耦合进入单模光纤后，与第一部分反射光合束产生干涉，形成法布里-珀罗干涉。

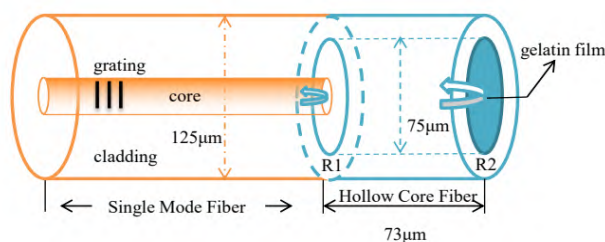


图1 传感探头的结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed sensing probe

由光的干涉理论可知，两束反射光干涉形成的光强可以表示为

$$I = I_0 \left[ R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda} + \varphi\right) \right] \quad (1)$$

其中， $I_0$ 为入射光的强度， $R_1$ 和 $R_2$ 分别代表单模光纤与空芯光纤界面的反射率和空芯光纤与明胶膜界面的反射率， $\lambda$ 为波长， $d$ 为两束光的光程差， $\varphi$ 为初始相位。当两反射面反射率 $R_1$ 、 $R_2$ 越大，干涉光谱越清晰敏锐，光谱分辨率越高。可用精细度 $F$ 表示为

$$F = \frac{\pi \cdot \sqrt[4]{R_1 R_2}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}} \quad (2)$$

由上式可知，在不考虑FPI腔内的损耗情况，反射率 $R_1 R_2$ 与对应光谱的精细度 $F$ 呈正相关，两反射面的反射率 $R_1$ 、 $R_2$ 可表示为

$$R_1 = \frac{(n - n_1)^2}{(n + n_1)^2}, \quad R_2 = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (3)$$

其 $n$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 分别代表FPI腔内介质、单模光纤纤芯、薄膜的折射率。当腔内的介质为空气时，折射率约等于1，通过计算可得到 $R_1 \approx 4\%$ ，而 $R_2$ 的反射率也远远小于1。因此，形成的干涉光谱锐度较低，形状类似于正弦函数。干涉光谱的自由光谱范围可表示为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL} \quad (4)$$

其中， $L$ 为FPI传感探头的腔长。干涉光谱波谷的波长可表示为

$$\lambda_m = \frac{4nL}{2m} \quad (m=1,2,3,\dots) \quad (5)$$

由上式可知， $\lambda_m$ 取决于腔长 $L$ 和折射率 $n$ ，其相对变化可由下式表示

$$\frac{\Delta\lambda_m}{\lambda_m} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta L}{L} \quad (6)$$

其中， $\Delta\lambda_m$ 为波谷波长的变化量， $\Delta n$ 为折射率的变化量， $\Delta L$ 为FPI腔长的变化量

当外界湿度增加时，明胶膜会吸收空气中的水分子而体积膨胀，使FPI的腔长变短，干涉光谱往短波长移动。当外界湿度减小时，明胶膜会向空气中释放水分子而体积缩小，使FPI的腔长变长，干涉光谱往长波长移动。因此，通过测量传感器的干涉光谱，可以实现对环境相对湿度的测量。

传感探头的制作采用标准SM-28单模光纤和外径为125  $\mu\text{m}$ 、内径为75  $\mu\text{m}$ 的空芯光纤，具体流程如下：首先利用光纤熔接机(Atomwave:SFS-A60+)设置手动模式(重叠量为15  $\mu\text{m}$ ，光纤预熔时间为200ms，放电1功率为标-25bit)将两种光纤熔接起来。然后，利用天平称取5g明胶粉末，加入到95ml去离子水中，放入超声波振荡器振荡30min，获得浓度为5%的稳定明胶水溶液。再利用玻璃棒蘸取微量明胶溶液，在显微镜下将明胶涂覆在熔接后的空芯光纤自由端的端面上。最后在室温下放置7h干燥成膜，从而获得光纤法布里-珀罗传感探头。其结构显微图如图2所示。

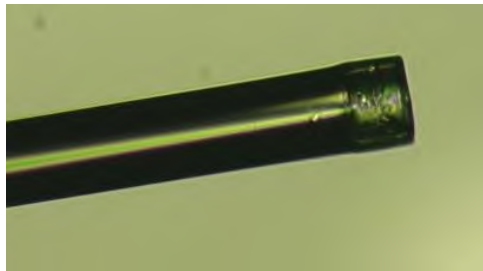


图2 光纤FPI传感探头的显微图

Fig. 2 Micrograph of the proposed FPI sensing probe

此外，我们通过级联光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)，利用光纤光栅只对温度敏感，实现对温度的同时测量。光纤光栅的制备采用248nm准分子激光器和相位掩模法，其中心波长为1562nm，反射

率大于85%，3dB带宽为小于0.3nm。

## 2 实验结果与讨论

湿度传感测量的实验装置如图 3 所示，由宽带光源（Broadband Source, BBS）、光纤环行器（Fiber Optic Circulator, OC）、光纤传感探头、光谱分析仪（Optical Spectrum Analyzer, OSA）和恒温恒湿箱（Temperature and Humidity Control Chamber, THCC）组成。实验中将制作好的传感探头放置在恒温恒湿箱中，利用光纤夹具将传感探头固定在箱内，且用挡风罩遮挡传感探头，避免箱内气流直接吹向传感探头。

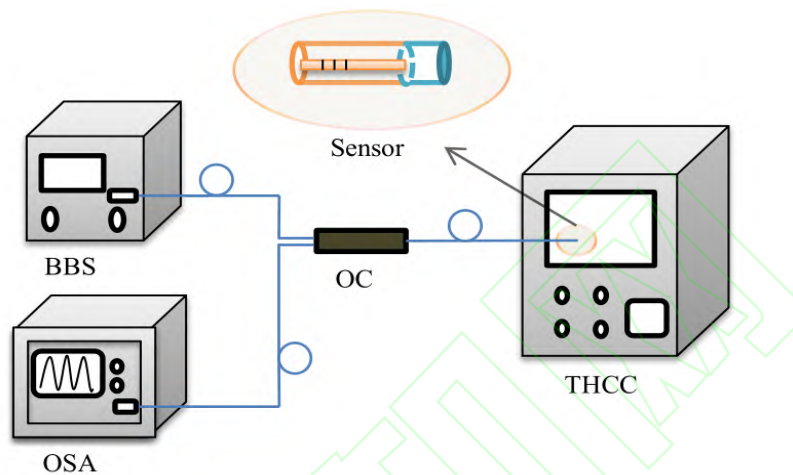


图3 实验测量装置  
Fig. 3 Experimental setup

实验中我们制作了空芯光纤长度分别为  $73\ \mu\text{m}$ 、 $110\ \mu\text{m}$  和  $220\ \mu\text{m}$  的三个传感探头，对应的干涉谱如图 4 所示。结果表明，随着空芯光纤长度的增加，自由光谱范围逐渐减小，分别为  $17.104\ \text{nm}$ 、 $10.192\ \text{nm}$  和  $5.256\ \text{nm}$ ，这与公式（4）的理论预期是吻合的。同时，干涉光谱的对比度也随空芯光纤增长而变小，主要是由于光在空芯光纤中的传输损耗大导致的。在光谱测量过程中，我们发现空芯光纤更短的传感探头虽然可以获得更大自由光谱和对比度，但其制备难度大且干涉光谱不稳定，易受外界环境扰动的影响。因此，后面的湿度测量实验我们采用了空芯光纤长度为  $73\ \mu\text{m}$  的传感探头。

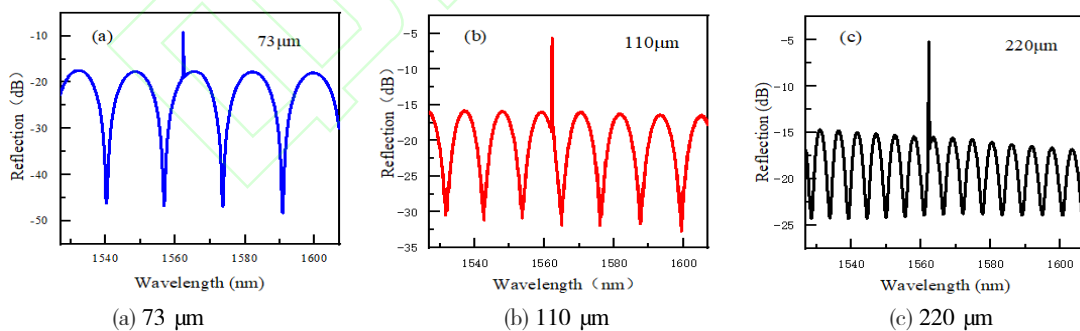


图 4 不同空芯光纤长度的 FPI 传感探头的光谱

Fig. 4 Spectra of the FPI sensing probe with different hollow core fiber lengths

湿度测量实验中，首先将恒温恒湿箱的温度设置为  $20^\circ\text{C}$ ，然后将相对湿度从  $20\%RH$  以  $5\%RH$  的湿度步进提升，在每一个湿度值稳定 10 分钟后测量光谱，直到相对湿度为  $80\%RH$ 。在湿度增加的测量完成之后，又进行了相对湿度从  $80\%RH$  下降到  $20\%RH$  的实验测量。

图 5 为 FPI 传感探头在不同相对湿度情况下测量得到的干涉光谱。由图可见，干涉光谱随相对湿度的增加发生了明显的蓝移，说明湿度增加导致了 FPI 腔长的变短，与前面的分析结论是一致的。当相对湿度从  $20\%RH$  变化到  $80\%RH$  时，干涉光谱的蓝移达到  $11.53\ \text{nm}$ ，而光纤光栅的反射波长几乎不随湿度变化。

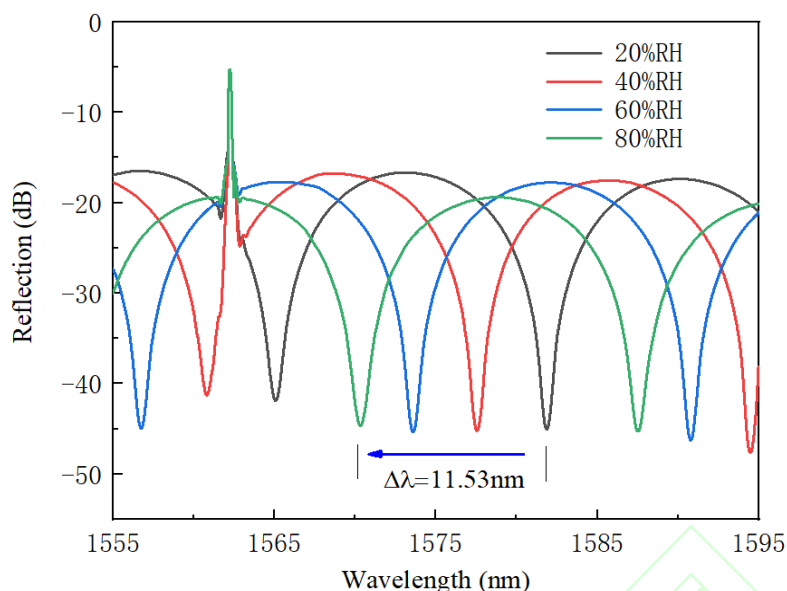


图 5 不同相对湿度下传感器的光谱

Fig. 5 Spectra of the sensor at different relative humidity

利用实验测量的光谱数据,可获得相对湿度与干涉谱波长及光纤光栅反射波长的关系,如图6所示。由图可见,在相对湿度20%~80%/RH范围内,FPI传感探头光谱的波长漂移量与湿度呈良好的线性关系,线性拟合得到湿度测量灵敏度为192 pm/%RH,线性度 $R^2=0.99656$ 。此外,在相对湿度上升和下降两个过程中,湿度变化与波谷波长漂移的实验数据较为一致,说明了该传感探头具有可逆性。

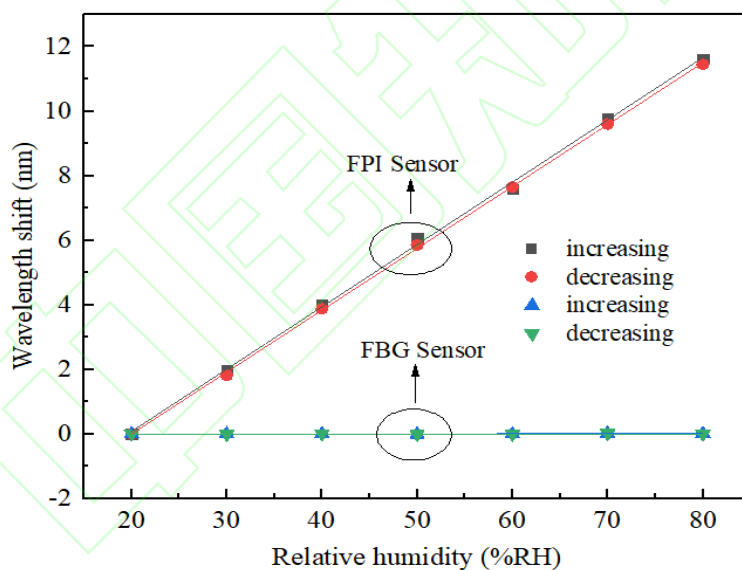


图 6 传感器的波长漂移量随相对湿度的变化

Fig. 6 Variation of the sensor wavelength with relative humidity

另外,我们还对传感探头进行了相对湿度的上升和下降的三次重复实验,实验结果如图7所示。由图可见,三次来回重复实验中波长漂移量存在较小偏差,通过计算获得六组数据的均方差为 $3.96 \times 10^{-2}$ ,表明该传感器在湿度测量中具有较好的重复性。

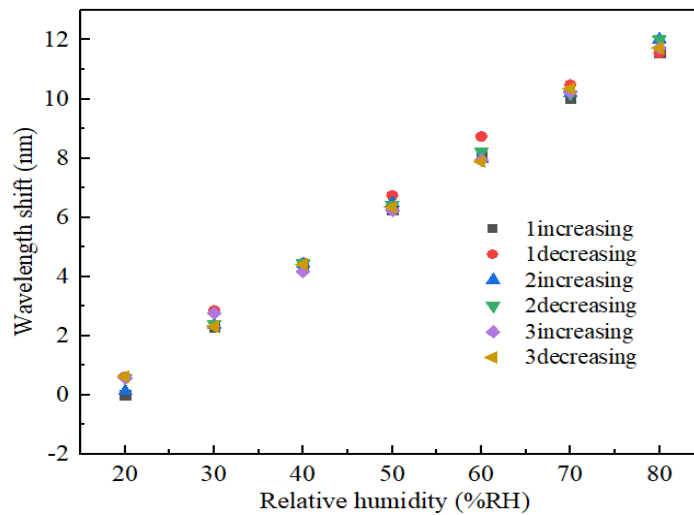


图 7 传感器湿度重复测试结果  
Fig. 7 Repetitive experiment of the sensor.

在完成上述实验后，我们还在不同环境温度下对传感探头进行了测试，获得不同温度下波长漂移量与相对湿度的关系如图 8 所示。由图可知，在分别为 15°C 和 25°C 的恒定温度下，FPI 传感探头光谱的波长漂移量与湿度呈较好的线性关系，线性拟合得到湿度测量灵敏度分别为 173 pm/%RH 和 194 pm/%RH。因此，根据三个不同温度下的实验结果，可以发现环境温度越高传感器的湿度测量灵敏度越高。可能与明胶在不同温度下的吸收水分子的能力变化有关。而当温度高于 30°C 时，由于明胶膜的熔点与环境相对湿度有关，在高湿度环境中湿度测量的干涉光谱波长无法长时间稳定。

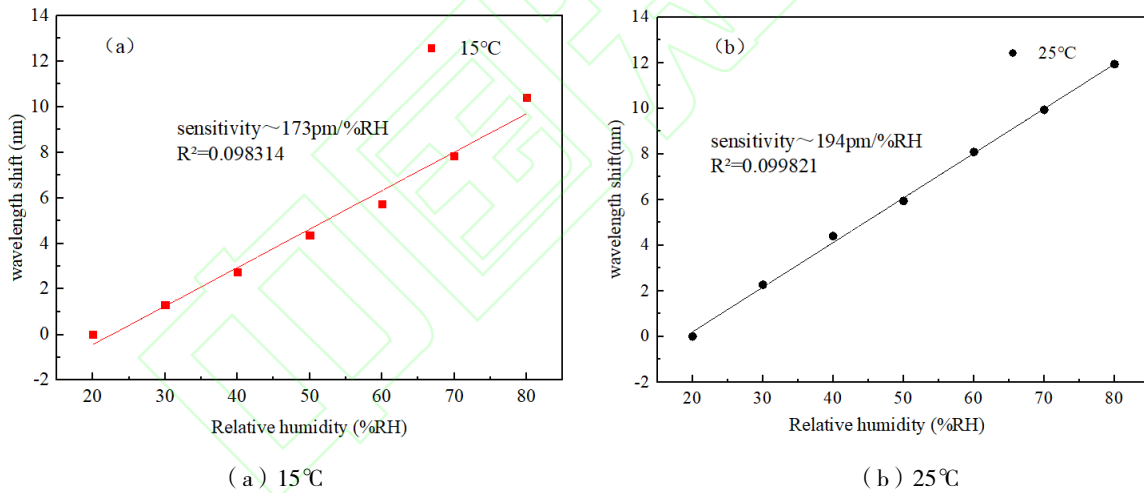


图 8 不同温度下传感器的波长漂移量随相对湿度的变化  
Fig. 8 Variation of the sensor wavelength with relative humidity at different temperatures

湿度传感器的时间稳定性测量过程如下：将传感探头放在恒定温度为 20°C，湿度分别为 20%RH、40%RH 和 80%RH 的条件下，在 30min 内每隔 5min 测量一次，测得的波长随时间的结果如图 9 所示。结果表明，在三个不同的相对湿度环境下，波长值较为稳定，最大偏差在  $\pm 0.3\text{nm}$  以内，对应的湿度测量精度误差为  $\pm 1.56\%RH$ 。

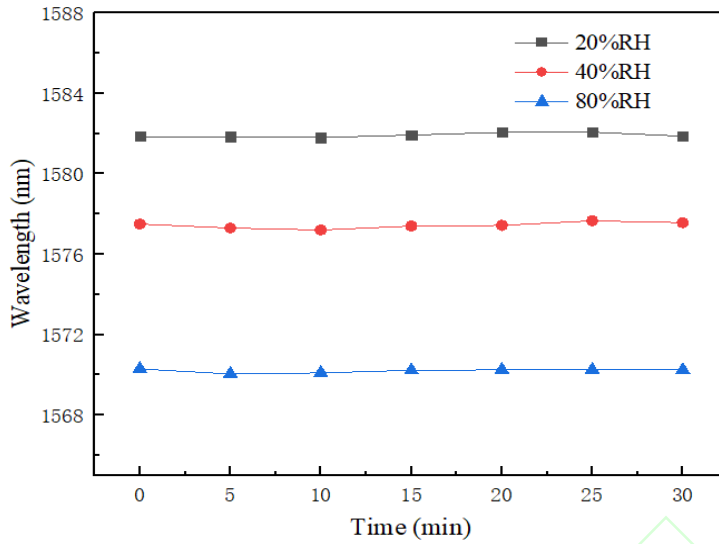


图 9 传感器在不同相对湿度下的时间稳定性测量结果

Fig. 9 Stability measurement results of the sensor at different relative humidity

为了监测环境温度变化，我们对与传感探头级联的光纤光栅进行温度测试。将温度从 10℃逐步增加到 50℃，测得光纤光栅反射波长与温度的对应关系如图 10 所示。光纤光栅的波长随温度变化呈良好的线性响应，温度灵敏度为 10 pm/℃，线性度为 0.99723。

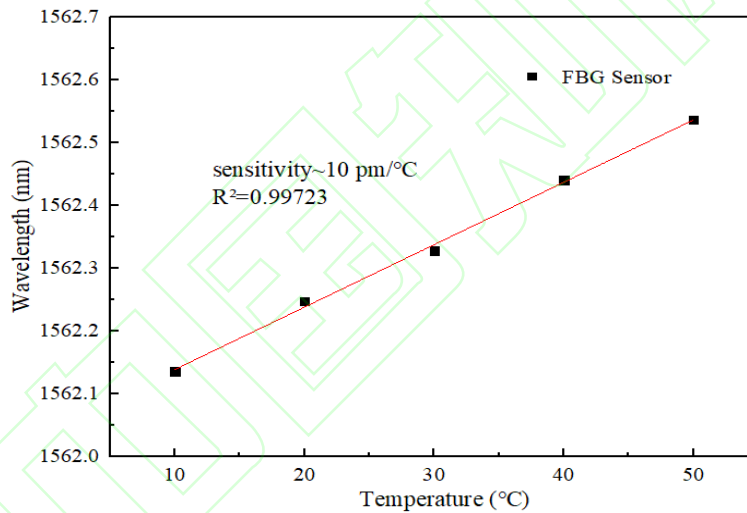


图 10 传感器波长随温度的变化

Fig. 10 Variation of the sensor wavelength t with temperature

表 1 为我们所提出的湿度传感器与部分已报道的干涉型光纤湿度传感器的性能比较表。比较可见，我们的湿度传感器在灵敏度和测量范围两个方面都具有较好的表现，综合性能具有较大的优势。

表 1 部分已报道光纤湿度传感器的性能比较

Table 1 Performance comparison of some reported optical fiber humidity sensors

Reference	Type	Measuring range (%RH)	Sensitivity
[3]	Loop resonator	30-50	0.0537 nm/%RH
[8]	MI	20-40 / 40-85	0.025 / 0.6 nm/%RH
[9]	MZI	13.77-77.87	-0.0901 nm/%RH
[17]	FPI	13.47-81.34	117.25 pm/%RH
[18]	FPI	20-90	0.0545 nm/%RH
[22]	FPI	20-95	0.13 nm/%RH
[23]	MI	57.3-83.5	135 pm/%RH
[28]	MI	45.0-81.7	-0.185 nm/%RH
This paper	FPI	20-80	192 pm/%RH



此外,由于构成干涉腔的明胶膜厚度较薄,在实际应用中,测量会受到环境振动、空气流动和气压变化等因素的影响。为了降低测量误差,可对传感探头进行隔振、避风和气压补偿等处理,以提高湿度测量的精度。

### 3 结论

本文报道了一种由空芯光纤和明胶敏感膜制成的光纤法布里-珀罗干涉湿度传感器,在 20%~80%RH 的湿度范围内,获得 192 pm/%RH 的湿度灵敏度。并在不同环境温度下对湿度传感器进行测试,发现其湿度灵敏度对温度有轻微的依赖性,温度越高灵敏度越高。此外,通过在光纤湿度传感器的尾纤上级联光纤光栅,实现了对环境温度的同时监测。该传感器具有结构简单、灵敏度高、温度可同时测量等优点,可望在生化和环境监测等领域获得应用。

#### 参考文献

- [1] DONG X Y, LI T, LIU Y, et al. Polyvinyl alcohol-coated hybrid fiber grating for relative humidity sensing[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2011, 16(7): 077001
- [2] YANG J Y, DONG X Y, NI K, et al. Intensity-modulated relative humidity sensing with polyvinyl alcohol coating and optical fiber gratings[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 2620-2624
- [3] AHMAD H, RAHMAN M T, SAKEH S, et al. Humidity sensor based on microfiber resonator with reduced graphene oxide[J]. *Optik*, 2016, 127(5):3158-3161.
- [4] HUANG Y, ZHU W, LI Z, et al. High-performance fibre-optic humidity sensor based on a side-polished fibre wavelength selectively coupled with graphene oxide film[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 255: 57-69.
- [5] XING Z S, ZHENG Y, YAN Z F, et al. High-sensitivity humidity sensing of microfiber coated with three-dimensional graphene network[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 281: 953-959.
- [6] CÁNDIDO B, IGNACIO R, FRANCISCO J, 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.
- [7] SHAO Min, SUN Haonan ZHANG Rong, et al. Michelson Interferometric Humidity Sensor Based on Photonic Crystal Fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2406002  
邵敏, 孙浩男, 张蓉, 等.基于光子晶体光纤的迈克尔孙干涉仪型湿度传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2406002.
- [8] L. Alwis, T. Sun, K.T.V. Grattan. Fibre optic long period grating-based humidity sensor probe using a Michelson interferometric arrangement[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013,178: 694-699.
- [9] TONG R J, ZHAO Y, CHEN M Q, et al. Relative humidity sensor based on small up-tapered photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 280: 24-30.
- [10] AN J L, JIN Y X, SUN M, et al. Relative Humidity Sensor Based on SMS Fiber Structure With Two Waist-Enlarged Tapers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(8):2683-2686.
- [11] Li J X, Tong Z R, Jing L, et al. Fiber temperature and humidity sensor based on photonic crystal fiber coated with graphene oxide[J]. *Optics Communications*, 2020, 467:125707.
- [12] LIU Y, ZHOU A, YUAN L B. Sensitivity-enhanced humidity sensor based on helix structure-assisted Mach-Zehnder interference[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24):35609.
- [13] BIAN C, CHENG Y, ZHU W, et al. A Novel Optical Fiber Mach-Zehnder Interferometer Based on the Calcium Alginate Hydrogel Film for Humidity Sensing[J].*IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(11):5759-5765.
- [14] LI C, YU X, ZHOU W, et al. Ultrafast miniature fiber-tip Fabry-Perot humidity sensor with thin graphene oxide diaphragm[J]. *Optics letters*, 2018, 43(19): 4719-4722.
- [15] ZHAO Y, TONG R J, CHENG M Q et al. Relative Humidity Sensor based on Vernier Effect with GQDs-PVA Un-fully Filled in Hollow Core Fiber[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2018, 285: 329-337.
- [16] WANG Ning, TIAN Wenhao, ZHANG Haosheng, et al. Optical Fiber Fabry-Perot Humidity Sensor by Graphene Quantum Dots[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9): 0906003.  
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): 0906003.

- [17] ZHAO Y, TONG R j, CHEN M Q, et al. Relative humidity sensor based on hollow core fiber filled with GQDs-PVA [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 284:96-102.
- [18] LEE C L, YOU Y W, DAI J H, et al. Hygroscopic polymer microcavity fiber Fizeau interferometer incorporating a fiber Bragg grating for simultaneously sensing humidity and temperature[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 222:339-346.
- [19] SUN L P, LI J, JIN L, et al. High-birefringence microfiber Sagnac interferometer based humidity sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 231:696-700.
- [20] ZHAO, Y JIN Y X, LIANG H H, et al. All-fiber-optic sensor for relative humidity measurement[C]. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics. IEEE*, 2011, V2: 82-86
- [21] ZHANG S Q, DONG X Y, LI T, et al. Simultaneous measurement of relative humidity and temperature with PCF-MZI cascaded by fiber Bragg grating[J]. *Optics Communications*, 2013, 303:42-45.
- [22] 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, 169:167-172
- [23] HU P B, DONG X Y, KAI N, et al. Sensitivity-enhanced Michelson interferometric humidity sensor with waist-enlarged fiber bitaper[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 194:180-184.
- [24] 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.
- [25] GAO R, LI J, Jin L, RAN Y, et al. Humidity sensor based on power leakage at resonance wavelengths of a hollow core fiber coated with reduced graphene oxide [J].*Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 222:618-624.
- [26] WANG Y Q, LU D F, CHENG J et al. Fiber optic humidity sensor based on the graphene oxide/PVA composite film[J]. *Optics Communications*, 2016, 327, 229-234.
- [27] MA Q F, TOU Z Q, NI K, et al. Carbon-nanotube / Polyvinyl alcohol coated thin core fiber sensor for humidity measurement[J]. *Sensors and Actuators B Chemical*, 2018, 257:800-806.
- [28] LIU Y, ZHOU A, YUAN L B. Gelatin-Coated Michelson Interferometric Humidity Sensor Based on a Multicore Fiber With Helical Structure[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37: 2452-2457.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos. 61775204, 11974083), the Open Projects Foundation of Yangtze Optical Fiber and Cable Joint Stock Limited Company (No. SKLD1905), the Program for Guangdong Introducing Innovative and Enterpreneurial Teams (No.2019ZT08X340)