

引用格式: WANG Ning, TIAN Wen-hao, ZHANG Hao-sheng, *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

# 石墨烯量子点法布里珀罗光纤湿度传感器

王宁, 田文昊, 张昊生, 于晓丹, 尹晓蕾, 杜永刚

(中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580)

**摘 要:** 制作了一种利用普通单模光纤和石墨烯量子点材料共同构建的法布里珀罗湿度传感器. 利用搭建的实验系统, 在环境相对湿度 11%RH~85%RH 范围内进行了湿度响应实验, 并对湿度上升和下降过程分别进行了测量. 湿度上升过程中灵敏度为 0.560 6 nm/RH%, 线性度为 0.999 47; 湿度下降过程中灵敏度为 0.565 5 nm/RH%, 线性度达 0.999 36. 实验结果表明, 该湿度传感器具有较高的响应灵敏度、较好的线性响应特性和测量重复性. 另外对该传感头的温度响应特性进行实验研究, 得到了较好的线性响应结果, 温度响应灵敏度为 0.035 nm/°C, 残差平方和为 0.012 41, 灵敏度标准差为  $2.305 \times 10^{-4}$ , 湿度响应灵敏度约为温度响应的 17 倍. 对其动态响应特性进行了典型测试, 在相对湿度 43% 条件下得到了干涉光谱波长漂移的动态响应数据, 得到了较快的动态响应, 其响应时间和恢复时间分别为 6.5 s 和 9.0 s. 研究结果为研制低成本、易制作、高灵敏的光纤湿度传感器提供了一种有益的探索.

**关键词:** 湿度测量; 温度测量; 光纤传感器; 法布里珀罗; 石墨烯量子点

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204909.0906003

## Optical Fiber Fabry-Perot Humidity Sensor by Graphene Quantum Dots

WANG Ning, TIAN Wen-hao, ZHANG Hao-sheng, YU Xiao-dan, YIN Xiao-lei, DU Yong-gang  
(College of Science, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong 266580, China)

**Abstract:** A kind of Fabry-Perot optical fiber humidity sensor is fabricated by normal single-mode optical fiber and Graphene Quantum Dots. By the established experimental system, the humidity response experiments were carried out in the relative humidity range of 11% RH ~85% RH. The sensitivity was 0.560 6 nm/%RH with 0.999 47 linearity at humidity rising, and 0.565 5 nm/%RH sensitivity with 0.999 36 linearity at humidity falling. The experimental results showed that the humidity sensor has high humidity response sensitivity, good linear response characteristics and measurement repeatability. Furthermore, the temperature responding characteristic is also experimentally investigated. The good linear temperature responding results are got with 0.035 nm/°C sensitivity, 0.012 41 residual sum of squares,  $2.305 \times 10^{-4}$  sensitivity stand error. The humidity response sensitivity is about 17 times of temperature response. Typical tests are given for dynamic response characteristics. The dynamic response data of interference spectrum wavelength drift under 43% RH showed fast dynamic response characteristic. The response time and recovery time were 6.5 s and 9.0 s respectively. The research results provide a beneficial exploration for developing low cost, easily fabricated and high sensitive optical fiber humidity sensor.

**Key words:** Humidity measurement; Temperature measurement; Optical fiber sensor; Fabry-Perot; Graphene quantum dots

基金项目: 国家自然科学基金(No.61805285), 山东省自然科学基金(No.ZR2018PF015)

第一作者: 王宁(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感. Email: qfwangning@163.com

收稿日期: 2020-05-18; 录用日期: 2020-07-20

<http://www.photon.ac.cn>

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.2430; 120.6780

## 0 引言

作为影响人类生产和生活的重要因素之一<sup>[1]</sup>,湿度的测量在许多领域都有非常重要的作用,例如医疗、生物技术、微电子生产、文物保护、仓库、计算中心等场合都需要监测空气中湿度的变化.传统湿度计存在缺陷<sup>[2]</sup>,如传统电子湿度传感器<sup>[3]</sup>对电磁干扰的抵抗能力较差,难以在较恶劣的条件下工作,同时存在响应时间较长,灵敏度低等问题,其性能具有一定的局限性.近年来,出现了各种基于不同传感结构的光纤湿度传感器研究报道<sup>[4-6]</sup>.由于光纤自身对湿度敏感性较差,目前主要的方法是将某些聚合物、金属氧化物及其化合物作为湿度敏感材料与光纤结合,利用湿度敏感材料的湿敏特性转化为光纤中光信号某些参数的改变,从而达到湿度测量的目的.

光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)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,已在温度、应变、溶液浓度、折射率测量等领域有所应用,将光纤法布里-珀罗腔结构用于湿度传感器也有相关报道.姚军等制作了基于大偏置熔接的全光纤法布里-珀罗湿度传感器,在 38%RH~78%RH 的相对湿度范围内,获得了 0.1 nm/%RH 的相对湿度响应灵敏度<sup>[7]</sup>.刘楠等利用涂覆聚酰亚胺构成双光束干涉型 F-P 型光纤传感器,实现了温度和湿度的双参量的测量<sup>[8]</sup>,其湿度的响应灵敏度达到了 1.29 pm/%RH.赵勇等将石墨烯量子点和聚乙烯醇化合物填充在空芯光纤中,与单模光纤熔接,制作了新颖的线性度较好的光纤 F-P 型光纤湿度传感器<sup>[3]</sup>,湿度灵敏度为 117.25 pm/%RH.MIGUL H 等选择由聚乙烯亚胺和氧化石墨烯的交替涂层作为敏感材料,利用薄膜溅射的方法制作薄膜,制作了光纤 F-P 湿度传感器<sup>[9]</sup>,但该结构在低湿度环境和高湿度环境条件下的灵敏度差别较大,湿度测量的均匀性有待提高. ANTÓNIO V 等利用一端空心硅管与光纤熔接,并利用浸涂方法在端面涂覆聚偏二氟乙烯(PVDF)形成腔镜,制作了光纤 F-P 腔湿度传感器<sup>[10]</sup>,获得了 32.54 pm/%RH 湿度测量灵敏度.RICARDO O 等利用空芯光纤,将光纤法布里-珀罗与光纤光栅粘合作了湿度传感器<sup>[11]</sup>,低湿度和高湿度测量灵敏度差别较大,同时其测量灵敏度有待提高.目前报道中有些光纤湿度传感器灵敏度较高但采用了较为复杂制作工艺,或采用成本较高的特种光纤,有的在湿度响应灵敏度、线性响应范围、高低湿度响应的一致性等方面有待提高.

本文提出了一种制作简单、成本低廉、高灵敏度的光纤 F-P 湿度传感器.该光纤传感器利用普通单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)和石墨烯量子点(Graphene Quantum Dots, GQDs)填充材料直接构建光纤 F-P 腔,利用石墨烯量子点材料的湿度敏感特性进而直接影响光纤 F-P 腔干涉光谱的方法,实现了对环境相对湿度的测量,验证了该结构对环境湿度变化具有明显的线性响应和较高的响应灵敏度,并对其湿度响应的重复性和动态响应特性进行了测量,同时对温度响应特性进行了研究.研究表明,该传感在湿度响应方面具有灵敏度高、线性度好、重复性好等特点,其湿度和温度响应特性的较大差别有利于湿度和温度的交叉响应分离,为研发低成本易制作的光纤湿度传感器提供了一种有意义的解决方案.

## 1 传感器制作与实验系统

### 1.1 传感器制作

光纤 F-P 腔结构如图 1 所示,两根端面平整的普通单模光纤与石墨烯量子点材料共同构成 F-P 腔,图 1(a)为结构示意图,图 1(b)为制作传感头过程的实拍照片.实验中传感头的制作首先将单模光纤剥除涂覆层,利用光纤切割刀获得平整的光纤反射端面,而后将其固定在光纤调整架上,另一端连接 Micron Optics SM125 光纤传感分析仪.再取一根单模光纤进行端面处理后固定在另一光纤调整架上,利用调整架将两根光纤对准并进行仔细调整,直到在 SM125 光纤传感分析仪上获得较好的 FP 腔干涉光谱.待光谱图像稳定后,使用滴定管滴入光纤 F-P 腔内 3~5 mL 石墨烯量子点溶液,为了承载石墨烯量子点溶液,防止其大范围扩散造成的粘接不充分,在靠近光纤的下方放置一方形塑料垫片,如图 1(b)所示.滴入后再次观察光谱,确认波形是否恶化.如变化剧烈导致干涉光谱恶化,需再次微调光纤调整架,直至获得较好的干涉光谱.石墨烯量子点材料涂覆完成后,静置干燥 24 h.待样品完全干燥固结后,即获得光纤湿度传感探头,选取波形稳定性良好的探头放入湿度环境中进行测量.

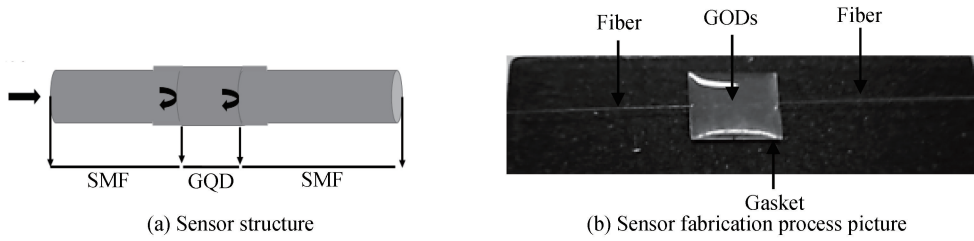


图1 光纤 F-P 腔传感器结构

Fig.1 Optical fiber Fabry-Perot cavity sensor structure

这种光纤 F-P 腔干涉仪,两根单模光纤与 GQDs 的接触面构成两个反射面,光纤中传输光在两个反射面处均发生反射,如图 1(a),进而形成干涉叠加,两反射光束的光程差可表示为

$$L = 2n_e d \quad (1)$$

式中,  $n_e$  是石墨烯量子点材料在某波长下的有效折射率,  $d$  表示两个反射端面之间的距离(即 FP 腔腔长)。两反射波形成的干涉强度可以表示为

$$I = I_0 [R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{2\pi L}{\lambda} + \varphi_0\right)] \quad (2)$$

式中,  $I_0$  为光纤中入射光强度,  $R_1$ 、 $R_2$  为分别两个反射面反射率,  $\lambda$  表示光源的波长,  $\varphi_0$  为相位常数。

光线在腔内往返一次的相位差可表示为

$$\phi = \frac{4\pi n_e d}{\lambda} \quad (3)$$

式中,FP 传感器的腔长为  $d$ ,  $\lambda$  为光在真空中的波长;  $n_e$  为 F-P 腔内介质的折射率,当相位满足干涉相长条件时,光强到达最大值,此时反射光谱的一个波峰对应的波长为  $\lambda_m$ 。即当  $\phi = 2m\pi$  时( $m$  为整数),共振波峰的波长的表达式为

$$2m\pi = \frac{4\pi n_e d}{\lambda_m} \quad (4)$$

即

$$\lambda_m = \frac{2n_e d}{m} \quad (5)$$

由式(5)可知,  $\lambda_m$  取决于有效腔长  $d$  和有效折射率  $n_e$ 。因此,干涉光谱的漂移情况为

$$\frac{\Delta\lambda_m}{\lambda_m} = \frac{\Delta n_e}{n_e} + \frac{\Delta d}{d} \quad (6)$$

式中,  $d$  为腔长,  $n_e$  为 F-P 腔中敏感单元有效折射率。由于石墨烯量子点材料在外界湿度变化时,会发生折射率和体积(腔长)的变化,进而引起光程差的变化,最终导致干涉光谱发生漂移。通过测量干涉光谱信号变化,可以实现环境相对湿度的测量。

石墨烯量子点作为一种新型碳纳米材料,其物理和化学性质引起了人们的关注,如吸水后电子密度降低<sup>[12,13]</sup>,进而导致折射率降低,同时与水分子相互作用会引起膨胀<sup>[14]</sup>,这些性质已经应用于电化学湿度传感器中。其制备方法有自上而下法与自下而上法两种<sup>[15]</sup>。相比之下,自上而下方法制备石墨烯量子点材料成本较昂贵,设备要求高,制备条件苛刻、耗时长,且产品产率较低。自下而上制备的方法中,最简单的就是通过热裂解柠檬酸的方法合成石墨烯量子点。该法制备的原理是调整柠檬酸的碳化程度,柠檬酸自身所带的羧基官能团在高温条件下发生自身脱水缩合形成石墨烯量子点。热解法的优点在于成本低廉、设备要求低、步骤简单、实验安全性高等。本实验采取该方法制备石墨烯量子点材料,并制得石墨烯量子点溶液用于实验。实验中将 2.5 g 石墨烯量子点粉末和 50 mL 去离子水放入烧杯,搅拌均匀使其溶解,使用磁力搅拌器搅拌 5 min 以获得更好效果,最终获得石墨烯量子点溶液浓度为 50 mg/mL。

## 1.2 实验系统

图2为该光纤湿度传感器的实验系统示意,包括传感器探头、湿度瓶、MicronOpticsSM125光纤传感

分析仪、计算机数据采集解调模块等。SM125 输出功率为 18 mW, 波长范围为 1 510~1 590 nm, 扫描频率为 2 Hz, 波长精度与稳定性达到了 1 pm, 动态测量范围为 50 dB, 可作为光源和光谱测量设备。出射光经光纤进入 F-P 传感探头, 从 F-P 腔的两反射端面反射回来的光发生干涉, 由 Micron Optics SM125 接收测得干涉光谱, 利用计算机将光谱数据采集并进行解调处理, 可得到干涉光谱的强度及相位信息, 当环境湿度变化时, 可测得光谱数据与环境湿度的变化关系。

将制作好的传感探头放置某湿度环境中, 进行传感器的相对湿度的测量。本实验相对湿度环境的获得采用了饱和盐溶液湿度瓶, 该套湿度瓶提供了 11%~85% 相对湿度环境, 实验时利用湿度计对湿度瓶湿度值进行校准后再进行测量。将传感器探头分别放入不同湿度的饱和盐溶液中, 利用 Micron Optics SM125 光纤传感分析仪测得干涉光谱变化, 进而得到湿度与干涉光谱峰值波长变化关系的实验数据。传感器探头与湿度瓶之间的相对位置利用自行设计的固定支架进行控制, 保证传感头放入湿度瓶过程中快速而顺畅, 且传感头在湿度瓶中位置高度较为合适, 不会触碰饱和盐溶液。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 湿度响应测量

进行湿度测量实验时, 将光纤 F-P 腔传感器固定在已搭建好的测量平台上, 采用相对湿度 11% RH 到 85% RH 范围内不同相对湿度的饱和盐溶液瓶进行测量。实验中将传感器探头迅速放入饱和盐溶液瓶中, 观察干涉光谱峰值波长漂移范围。实验中由于所采集光谱移动范围较大, 部分干涉峰甚至出现平移出光谱仪波长测量范围的情况, 应注意干涉光谱中干涉峰移动周期个数。待光谱稳定后记录此时的实验数据, 再从饱和盐溶液中取出实验样品, 观察此时光谱条纹反向移动恢复情况, 待光谱稳定好后再记录光谱测量数据。本轮测量结束后, 重复进行下一轮湿度响应测量或更换湿度瓶继续重复测量。本测量实验使用的光纤 F-P 腔腔长为 97.6  $\mu\text{m}$ , 干涉光谱的自由光谱范围(Free Spectrum Range, FSR)为 5.5 nm。由于该传感器对湿度响应较为灵敏, 峰值波长漂移会超出 FSR 光谱范围, 为了不影响测量结果, 光谱漂移过程中要注意观察峰值波长漂移的范围, 并及时记录光谱数据, 避免因峰值波长漂移范围过大影响数据处理结果。实验中干涉光谱的漂移情况如图 3 所示。

随着相对湿度的增加, 峰值波长向右移动, 从左到右相对湿度值分别为 11%、22%、33%、43%、54%、65%、74% 和 85%。峰值波长的移动源于 FP 腔内石墨烯量子点材料与水汽的相互作用, 导致腔内材料的折射率以及腔长发生了变化, 从而影响了 FP 腔两反射光束的光程差, 如式(2)所示, 干涉光强发生相应改变, 最终使干涉光谱产生了移动。该光谱数据的变化证明了制作的传感器探头具有显著的湿度响应特性。实验中每套光谱分别采集了 5 个干涉峰的波长漂移数据, 多次采集并对每个干涉峰的波长漂移值进行汇总, 为减小误差, 同一湿度条件下取各干涉峰波长漂移量的平均值进行数据处理。

利用所得光谱数据, 可获得湿度变化与峰值波长漂移量的关系。为了进一步验证该光纤湿度传感器湿度响应的重复性, 在相对湿度 11%~85% 范围内, 对湿度上升和湿度下降过程进行了往返测量。湿度变化与峰值波长漂移关系曲线及湿度往复变化测量结果如图 4 所示, 测量初始周围环境湿度为 22%, 环境温度为

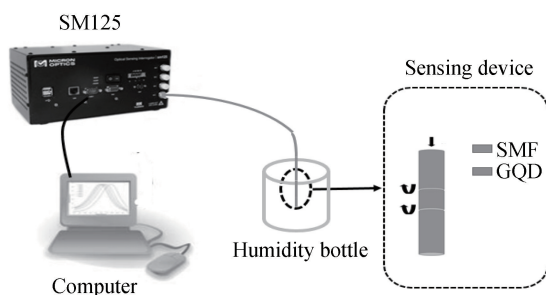


图 2 相对湿度测量实验系统

Fig.2 Relative humidity measurement experiment system

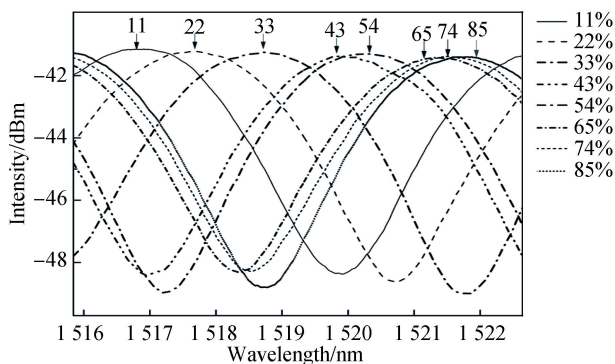


图 3 不同湿度下的传感器响应光谱

Fig.3 The response spectrum with different relative humidity

26.8 °C.从图 4 中可以看出,传感器干涉光谱的波长漂移量与相对湿度变化呈较好的线性关系,线性拟合结果反映湿度上升过程中灵敏度为 0.560 6 nm/% RH,线性度为 0.999 47,湿度下降过程中灵敏度为 0.565 5 nm/% RH,线性度达 0.999 36,实验结果同时表明该传感器具有较高的湿度响应灵敏度.另外,由图 4 中相对湿度增加过程和相对湿度减小过程的波长漂移数据曲线可以看出,两过程的线性响应实验数据较为一致,表明传感器在该湿度范围内具有较好的重复性和一致性.高湿度区域两线性湿度响应曲线稍有偏差,主要与高湿度瓶的湿度值误差有关.实验中为了观察传感器性能的稳定性,在相对湿度 54%条件下,持续观测干涉光谱峰值波长漂移情况.在持续 30 min 的连续测量过程中,峰值波长值较为稳定,最大漂移偏差 ±0.4 nm,漂移可能与湿度和温度的不稳定有关.

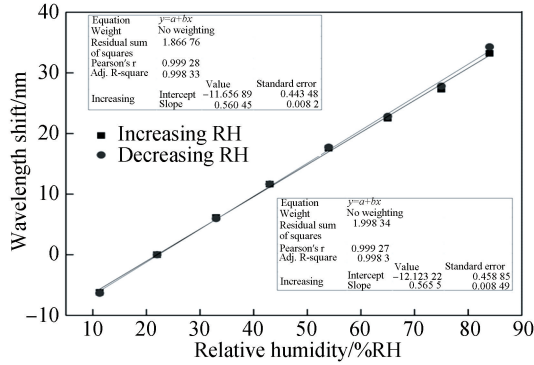


图 4 不同湿度下峰值波长漂移量

Fig.4 Peak wavelength shift with different relative humidity

测量过程中环境温度为 26.8 °C 左右,环境温度变化幅度最大 0.7 °C.为进一步研究温度与湿度的交叉响应,掌握温度变化对光谱漂移的影响,对传感头进行温度响应实验研究.

## 2.2 光纤传感头的温度响应特性

环境的温度变化既可以导致法珀腔自身的腔长变化,也可以引起石墨烯的热胀冷缩,因而使得光纤 FP 腔对温度和湿度都有响应.为了进一步研究该传感器的温湿交叉响应特性,将传感头进行了温度响应测量,得到了干涉峰值波长偏移与温度之间的对应关系.实验中在环境湿度 22%RH 条件下,在温度 26.8~45 °C 范围内间隔 0.2 °C 进行了干涉光谱测量,得到了温度变化对干涉峰值波长影响的实验数据,测得的温度响应数据如图 5 所示.

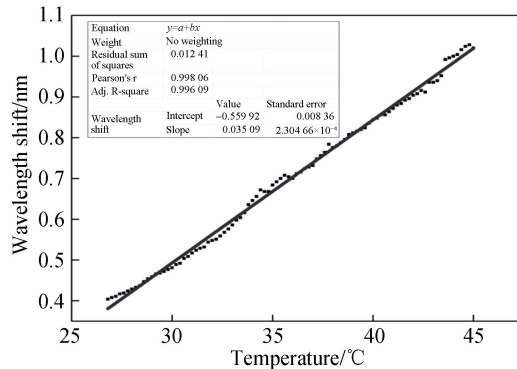


图 5 温度响应实验数据

Fig.5 Temperature response experiments results

从图 5 中可以看出,该光纤传感器对温度的响应总体有较好的线性关系,响应灵敏度利用线性拟合可得为 0.035 nm/°C,线性相关系数为 0.998 06,残差平方和为 0.012 41,灵敏度标准差为  $2.305 \times 10^{-4}$ ,由于温度控制误差导致部分数据点有一定的线性偏离.另外,该实验数据反映出传感器温度灵敏度远远小于湿度灵敏度,其湿度灵敏度约为温度灵敏度的 17 倍.二者响应灵敏度的较大偏差,有利于温湿交叉响应问题的解决.对于图 4 的湿度响应实验过程,环境温度的变化幅度最大为 0.7 °C,对湿度响应光谱漂移的最大影响为 0.023 1 nm.因此,该过程温度对湿度响应光谱测量数据影响非常微弱.

### 2.3 动态响应

为了研究传感器的动态响应,将 Micron Optics SM125 光纤传感分析仪设置为自动采集模式,采集频率为 2 Hz.启动自动采集系统后,静置该传感头数秒并采集干涉光谱数据图,确保光谱图像稳定后,将传感器样品迅速放入某饱和盐溶液湿度瓶中,观察光谱波形变化.静置足够长时间,待光谱波形稳定后,迅速将传感器撤出饱和盐溶液,静置样品数秒,待稳定后继续重复以上测量过程四次.整个过程由仪器配合计算机数据采集系统自动记录所有光谱实验数据,测量完成后关闭自动数据采集模式.提取光谱数据,进行干涉光谱数据分析和处理,光谱数据的处理以干涉峰峰值波长的漂移与时间的变化关系作为研究对象,最终获得该传感器湿度动态响应实验曲线.图 6 为相对湿度 43% 条件下四组动态响应数据图.

从图 6 中可以看出,该传感器在放入湿度瓶和撤出湿度瓶过程中均有非常明显的响应变化.同时,四次动态响应的重复测量结果表明,峰值波长的漂移量和恢复量较为统一和稳定,表明了该传感头在湿度动态响应性能方面较好的重复性和稳定性.在动态响应的整个过程中,当传感器置于某湿度瓶中时,传感器迅速感应周围湿度变化,波形随之产生漂移并在此湿度条件下稳定,当传感器撤出饱和盐溶液之后,响应曲线很快恢复至初始状态.为了详细研究动态响应的快慢,根据以上数据对传感头的具体响应时间进行了进一步的测量.取其中一个动态测量过程数据为例,动态响应时间数据如图 7.

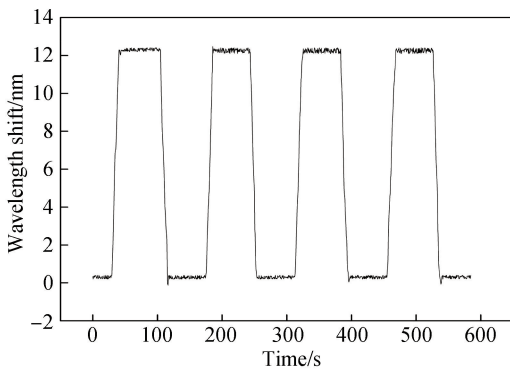


图 6 相对湿度为 43% 条件下光谱动态响应

Fig.6 The spectrum dynamic response at 43%RH

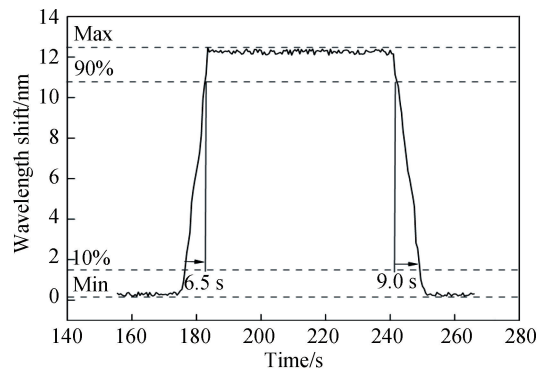


图 7 相对湿度为 43% 响应时间与恢复时间

Fig.7 Response time and recovery time at 43%RH

如图 7 所示,传感器的响应和恢复时间测量以波长飘移变化范围的 10% 到 90% 为时间测量的节点,利用以上数据测得响应和恢复时间.图 7 中该传感器的响应时间为 6.5 s,恢复时间为 9.0 s,该传感器具有较快的动态响应能力.同时可以看出,传感器的响应时间比恢复时间快,该现象与涂覆的湿度敏感材料特性有关,也是涂覆材料类 Fabry-Perot 腔光纤传感器常见的现象.湿度传感器的恢复时间取决于从传感器移除水蒸气的速度,与周围的空气流动等情况有直接关系.由于石墨烯量子点材料对于吸收水分和移除水分的时间快慢不同,从而出现了上述动态响应的差别.

表 1 给出了该传感器与部分已报道的其他光纤湿度传感器的比较,与表 1 中各参考文献中列出的湿度

表 1 其他光纤湿度传感器的比较

Table 1 Comparison of other fiber optic humidity sensors

Reference	Type	Humidity sensitive material	RH/%	Sensitivity	Response & recovery time/s
[16]	Biconically tapered optical fiber	Agarose gel	20~78.3	0.053 7 nm/%RH	5,55
[17]	Microstructured polymer fiber bragg grating	Polycarbonate	20~90	0.007 31 nm/%RH	10.5,25
[18]	Long-period grating	Titanium dioxide	0~10 10~20 40~75	1.027 nm/%RH 1.453 nm/%RH 2.72 nm/%RH	19,27.1
[19]	Side-polished twin-core fiber	Graphene-oxide	60~62.1	3.76 dB/%RH	3.6,6.4
[20]	wheel side-polishing and evaporation	graphene-oxide	32~85 85~97.6	0.145 nm/%RH 0.915 nm/%RH	2.73,7.27
[3]	F-P interferometer	PVA-GQDs	11.3~83.4	0.117 25 nm/%RH	4.3,11.5
Our work	F-P interferometer	GQDs	11~84	0.565 5 nm/%RH	6.5,9.0

传感器相比,本文提出的湿度传感器具有较高的响应灵敏度和较快的响应速度.在响应速度方面,与参考文献[19,20]相比,本传感器响应速度稍慢,但制作工艺较为简单、成本低廉.另外,参考文献[18]只在低湿度范围获得较高灵敏度,参考文献[19]在不同的湿度测量范围灵敏度差别较大且制作工艺较为复杂,参考文献[20]虽灵敏度较高但线性湿度测量范围有限,本文传感器在高低湿度测量范围内湿度线性响应的一致性方面具有一定优势.

### 3 结论

本文利用单模光纤与石墨烯量子点材料构建的光纤 F-P 腔,在 11%RH~84%RH 范围内验证了对环境相对湿度的高灵敏度响应,其灵敏度可达 0.565 5 nm/% RH.同时,经过湿度上升和下降过程湿度响应的重复性测量,验证了该传感器不仅具有较好的线性响应特性,同时具有较好的重复性.由于温度也会影响光纤法布里珀罗腔的干涉光谱,对该传感头的温度响应进行了实验研究.实验结果表明,该传感器对温度具有较好的线性响应,温度灵敏度达 0.035 nm/°C,该灵敏度远远小于湿度响应灵敏度.其动态响应测量结果表明,该传感器对湿度变化具有较短的响应时间,但恢复时间与响应时间相比具有明显的差别.恢复时间较长与石墨烯量子点的水溶性特性及水分移除速度有关.

由于该光纤湿度传感器制作方法简单,所用材料成本低廉,同时具有快速,灵敏度较高且重复性较好的特点,对研究低成本高性能的光纤湿度传感器提供了一种有益的探索.本文虽对该传感器的湿度响应、动态响应、温度特性等进行了初步研究,但传感器制作工艺和不同特性参数,如 F-P 腔长和石墨烯量子点涂覆溶液浓度等因素对其湿度响应特性影响仍需进一步深入研究,后续研究将围绕该方面问题进一步优化和提升传感器性能.

### 参考文献

- [1] ZHANG Yun-shan, QIAO Xue-guang, SHAO Min, *et al.* Humidity sensor based on waist-enlarged fiber tapers cascade structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0328004.  
张芸山,乔学光,邵敏,等.基于光纤锥级联结构的湿度传感器[J].光子学报,2015,**44**(3):0328004.
- [2] NIE Wei, XU Zheng-yu, KAN Rui-feng, *et al.* Measurement of low water vapor dew-point temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(8): 1682-1689.  
聂伟,许振宇,阚瑞峰,等.可调谐二极管激光吸收光谱技术测量低温流场水汽露点温度[J].光学精密工程,2018,**26**(8):1682-1689.
- [3] 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, **1**(284): 96-102.
- [4] 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*, 2018, **280**: 24-30.
- [5] ERWIN M. Low-coherence interferometric fiber optic sensor for humidity monitoring based on nafion thin film[J]. *Sensors*, 2019, **19**: 629-649.
- [6] ZHANG Xiang-dong, LI Yu-lin, PENG Wen-da, *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.
- [7] YAO Jun, ZHU Tao, DENG Ming, *et al.* A humidity sensor based on all-fiber fabry-perot interferometer formed by large offset splicing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(6): S114004.  
姚军,朱涛,邓明,等.基于大偏置熔接的全光纤法布里珀罗湿度传感器[J].中国激光,2012,**39**(6):S114004.
- [8] LIU Nan. Research on optical fiber temperature and humidity sensor based on Mach-Zehnder and Fabry-Perot interference structures[D]. Xian: Graduate Northwest University, 2017: 31-41.  
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,2017:31-41.
- [9] MIGUL H, BEARTRIZ A, ANDREW G, *et al.* High-performance optical fiber humidity sensor based on lossy mode resonance using a nanostructured polyethylenimine and graphene oxide coating[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, **1**(5): 408-414.
- [10] ANTÓNIO V, NATHALIE B, MIGUEL R, *et al.* Optical fiber humidity sensor based on polyvinylidene fluoride Fabry-Perot[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, **34**(4): 549-552.
- [11] RICARDO O, LÚCIA B, THIAGO H R, *et al.* Simultaneous detection of humidity and temperature through an adhesive based Fabry-Pérot cavity combined with polymer fiber Bragg grating[J]. *Optical and Laser in Engineering*, 2019, **114**(3): 37-43.
- [12] VIRGINIA R, IVÁN F. Graphene quantum dots as a novel sensing material for low-cost resistive and fast-response humidity sensors[J]. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 2015, **218**: 73-77.

- [13] HEMEN K, VINAY S P, MARYAM S B. Graphene quantum dot soil moisture sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, **233**: 582590.
- [14] TAHER A, MAHROKH S. A new humidity sensor based upon grapheme quantum dots prepared via carbonization of citric acid[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, **222**: 728-773.
- [15] BAI Jian-mei. Synthesis of graphene quantum dots and their application in photoluminescence sensing[D]. Nanchang: Graduate Nanchang University, 2013: 12-13.  
白建梅. 石墨烯量子点的制备及其在光致发光传感中的应用[D]. 南昌:南昌大学, 2013:12-13.
- [16] CÁNDIDO B, IGNACIO M, FRANCISCO J A, *et al.* Optical fiber humidity sensor based on a tapered fiber coated with agarose gel[J]. *Sensor and Actuators B: Chemical*, 2000, **69**(10): 127-131.
- [17] GETINET W, ANDREA F, MARKOS C, *et al.* Low loss polycarbonate polymer optical Fiber for high temperature FBG humidity sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, **29**(7): 575-578 .
- [18] CONSALES M, BERRUTI G, BORRIELLO A, *et al.* Nanoscale TiO<sub>2</sub>-coated LPGs as radiation-tolerant humidity sensors for high-energy physics applications[J]. *Optic Letters*, 2014, **39**: 4128-4131.
- [19] CHU R, GUAN C Y, BO Y, *et al.* All-optical graphene-oxide humidity sensor based on a side-polished symmetrical twin-core fiber Michelson interferometer[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, **284**: 623-627.
- [20] HUANG Y M, ZHU W G, LI Z B, *et al.* High-performance fiber-optic humidity sensor based on a side-polished fiber wavelength selectively coupled with graphene oxide film[J]. *Sensor and Actuators B:Chemical*, 2018, **255**: 57-69.