引用本文：汤亚琦，董新永. 基于光学游标效应增敏的光纤湿度传感器[J]. 光通信技术，2022，46(2)：62-65.

基于光学游标效应增敏的光纤湿度传感器

汤亚琦[1]，董新永[1,2*]

（1. 中国计量大学 光学与电子科技学院，杭州 310018；2. 广东工业大学 信息工程学院，广州 510006）

摘要：由于传统的湿度传感器测量湿度的准确性和稳定性易受环境影响，提出一种基于光学游标效应增敏的光纤湿度传感器，通过在单模光纤的尾端依次熔接一小段空芯毛细管和单模光纤，获得 2 个级联的光学法布里－珀罗（F-P）干涉仪，调整腔长使二者干涉谱的自由光谱范围接近，从而通过光学游标效应获取更高的湿度灵敏度，对湿度的响应由涂覆在光纤传感头端面的聚乙烯醇凝胶薄膜实现。实验结果表明：在相对湿度（RH）变化范围为 40%~65%时，基于光学游标效应增敏的传感器比单 F-P 型光纤传感器的湿度灵敏度高了 4.05 倍。

关键词：光纤传感器；空芯毛细管；游标效应；湿度传感；法布里-珀罗腔

中图分类号：TN256　**文献标志码**：A　**文章编号**：1002-5561(2021)02-0062-04

DOI：10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.02.012　开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

Optical fiber humidity sensor based on optical vernier effect sensitization

TANG Yaqi[1], DONG Xinyong[1,2*]

（1. Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China）

Abstract: Because the accuracy and stability of traditional humidity sensors are easily affected by the environment, an optical fiber humidity sensor based on optical vernier effect sensitization is proposed. Two cascaded optical Fabry-Perot (F-P) interferometers are obtained by successively welding a small hollow core capillary and single-mode fiber at the tail end of single-mode fiber. Adjusting the cavity length makes the spectrum range of the two interference spectrum close to each other, thus obtaining higher humidity sensitivity through the optical cursor effect. The sensing of humidity is realized by polyvinyl alcohol gel film coated on the end of the optical fiber sensing head. The experimental results show that the humidity sensitivity of the sensor based on optical vernier effect is 4.05 times higher than that of the single F-P optical fiber sensor when the relative humidity (RH) varies from 40% to 65%.

Key words: optical fiber sensor, hollow core fiber, vernier effect, humidity sensing, Fabry-Perot cavity

0 引言

相对湿度（RH）是影响人类健康和生活的主要因素之一，在植物生长、文物保护、化学试剂储存和疾病预防[1]等领域具有不可忽视的重要作用。近年来，光纤传感器由于体积小、抗电磁干扰和灵敏度高等优点被广泛用于传感领域[2-5]。其中，光纤法布里-珀罗（F-P）传感器因其结构简单、体积小和重复性好等优势在温度、应变和折射率等测量领域[5-7]获得了广泛应用。例如：王宁等人[8]提出一种将普通单模光纤和石墨烯量子点材料共同构建形成 F-P 湿度传感器，在 RH 为 11%~85%范围内的灵敏度达到了 0.5655 nm/RH%；ZHAO Y 等人[9]提出了以石墨烯量子点（GQDs）和聚乙烯醇（PVA）复合材料作为湿度敏感膜填充到空芯毛细管中实现湿度传感，当 RH 在 13.47%~81.34%范围内变化时，其波长漂移与 RH 呈现出良好的线性关系，灵敏度为 117.25 pm/RH%。

收稿日期：2021-04-06。

基金项目：国家自然科学基金项目（61775204、11974083）资助。

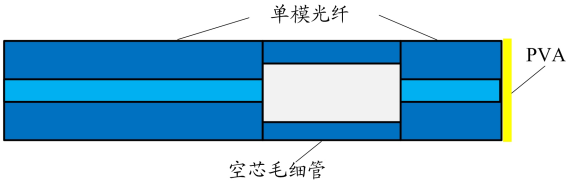
作者简介：汤亚琦（1996—），安徽铜陵人，男，硕士，现就读于中国计量大学光学工程专业，主要从事光纤传感与气体传感研究工作，参与了深圳技术大学的学生创业园暑期项目“可植入肉体的分布式光纤温度传感器研发”。

*** 通信作者**：董新永（1975—），男，博士，研究员，主要从事光纤通信与传感相关工作。

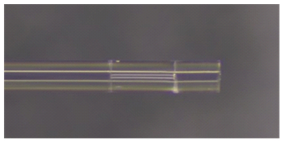
游标效应是利用主尺与副尺之间微小的刻度值差异实现测量精细化，通过副尺将微小的长度差放大，从而提高测量精度。近年来，游标效应作为一种增敏手段被成功应用到光纤传感技术中[10-12]，虽然该效应在折射率和温度等方面有着更为广泛的应用，但其在湿度测量方面的应用较少。因此，本文提出一种基于光学游标效应的光纤湿度传感器。

1 基于光学游标效应的光纤湿度传感器的结构制备及工作原理

本文提出的基于光学游标效应的光纤湿度传感器的示意图如图 1(a)所示，该传感器是通过在单模光纤的末端依次熔接一小段空芯毛细管和单模光纤，再在单模光纤的端面涂敷一层 PVA 凝胶构成的。其中，空芯毛细管构成的 F-P 腔作为参考腔，单模光纤和 PVA 薄膜构成的 F-P 腔作为传感腔，用来探测外界环境湿度的变化。该传感器结构的制备具体步骤为：①使用光纤熔接机将空芯毛细管与单模光纤熔接起来，并保证熔接点位置没有塌陷、挤压等现象；②熔接完成后将光纤固定在特种光器件微加工平台(LDS2.5)的光纤夹具上，同时对光纤负载 150 g 拉力拉紧，然后使用超声波切割刀切割空芯毛细管；③将熔接有空芯毛细管的单模光纤从特种光器件微加工平台取出，使用熔接机将切割后的空芯毛细管与另外一段单模光纤相熔；④再次通过特种光器件微加工平台切割熔接上的单模光纤，使得参考腔与传感腔的光程差相近但不相等。然后，通过浸渍镀膜机以 50 mm/min 的下降速度将制备好的传感结构垂直浸入配制好的 PVA 水凝胶中放置 4 min，再以 50 mm/min 的上升速度缓慢匀速提拉出来，在室温下静置干燥 7 h。待样品完全干燥后，即获得光纤湿度传感头。最后，将该传感头放入湿度箱内进行测量。图 1(b)为基于光学游标效应的光纤湿度传感器 18 倍显微镜照片，其中空芯毛细管的内径为 20 μm，外径为 125 μm，切割长度为 166 μm，单模光纤的长度为 128 μm。为了验证游标效应的增敏性能，本文制作了一个在单模光纤末端熔接一小段空芯毛细管并在其表面涂覆 PVA 湿敏膜形成的单 F-P 光纤湿度传感器作为对比，如图 1(c)所示，其中空芯毛细管的长度为 187 μm，PVA 膜厚为 18 μm，对应 F-P 腔腔长为 169 μm。



(a) 基于光学游标效应的光纤湿度传感器结构示意图


(b) 基于光学游标效应的光纤湿度传感器实物图

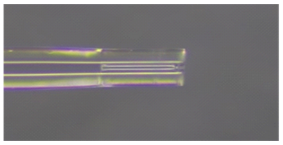

(c) 单 F-P 型的光纤湿度传感器实物图

图 1 基于光学游标效应的光纤湿度传感器结构图和实物图

基于光学游标效应的光纤湿度传感器的参考腔和传感腔的自由光谱范围(FSR)分别为

$$FSR_r=\frac{\lambda^2}{2n_1L_1} \tag{1}$$

$$FSR_s=\frac{\lambda^2}{2n_2L_2} \tag{2}$$

其中，n_1 和 n_2 分别为参考腔和传感腔的腔内有效折射率，L_1、L_2 分别为参考腔和传感腔的腔长，λ 为工作波长。当传感 F-P 腔内产生的 2 束反射光满足相干条件时，强度 I_s 公式为

$$I_s=I_{s1}+I_{s2}+2\sqrt{I_{s1}I_{s2}}\cos(\varphi) \tag{3}$$

其中，I_{s1} 和 I_{s2} 分别为前、后 2 束反射光的光强，$\varphi=4\pi n_2L_2/\lambda+\varphi_0$，$\varphi_0$ 为初始相位。当相位条件满足 $\varphi=(2m+1)\times\pi$ 时，就会形成干涉波谷。当外界 RH 变化时，对应波谷波长变化量 $\Delta\lambda$ 表示为

$$\Delta\lambda=\frac{4}{2m+1}\left(\frac{\partial n_2}{\partial(RH)}L_2+\frac{\partial L_2}{\partial(RH)}n_2\right)=\lambda\left(\frac{\partial n_2}{\partial(RH)}\frac{1}{n_2}+\frac{\partial L_2}{\partial(RH)}\frac{1}{L_2}\right) \tag{4}$$

其中，m 为整数。

当这 2 个腔的 FSR 接近但不相等时，这种级联 F-P 腔就会产生光学游标效应，形成周期性的包络，该包络的强度 $I_{envelope}$ 公式可以表示为

$$I_{envelope}=A+B\cos\left[\frac{4(n_1L_1-n_2L_2)\pi}{\lambda}\right] \tag{5}$$

其中，A 和 B 为该包络的直流和交流分量。该包络的 FSR[13]与级联的 2 个 F-P 腔的 FSR 相关，可表达为

$$FSR_{envelop}=\frac{FSR_1\cdot FSR_2}{|FSR_1-FSR_2|}=M\cdot FSR_2 \tag{6}$$

从式(6)可知，2 个 F-P 腔的 FSR 越接近，包络的 FSR 越大。M 为放大因子，$M=FSR_1/|FSR_1-FSR_2|$ 表现为光学游标效应放大灵敏度的能力。当外界 RH 发生变化时，由于传感 F-P 腔的干涉光谱会因湿敏膜的膨胀或收缩产生漂移，使级联 F-P 腔的干涉光谱包络也产生

漂移，联立式(5)和式(6)，得到此包络对应的波长漂移量可以表示为

$$\Delta\lambda_{envelope}=\frac{4M}{2m+1}\left(\frac{\partial n_2}{\partial(RH)}L_2+\frac{\partial L_2}{\partial(RH)}n_2\right)=\lambda M\left(\frac{\partial n_2}{\partial(RH)}\frac{1}{n_2}+\frac{\partial L_2}{\partial(RH)}\frac{1}{L_2}\right) \quad (7)$$

2 实验结果与讨论

为了研究所制备的湿度传感器的湿度灵敏度，本文将该传感器放置于密封的湿度箱内，湿度箱内同时放置电子湿度计用于测量箱内的 RH 值。整个实验中所用的熔接机型号为 Fujikura80S+，光谱仪(OSA)型号为 AQ6370D，用于湿度测量的敏感膜为高分子聚合物 PVA。PVA 内含有大量羟基，具有很好的亲水性。当外界湿度增加时，PVA 会吸收水分子发生体积膨胀；当外界湿度降低时，PVA 需要与外界环境保持热力平衡，会释放水分子发生体积收缩。以 PVA 为湿敏膜制备的 F–P 腔因在不同的湿度环境下产生膨胀或收缩效应发生腔长改变，影响光纤中传输的光信号，实现对环境湿度的感知。

图 2 为该传感实验的装置图，宽带光源(BBS)的波长范围为 1250~1650 nm，OSA 用来检测该传感器的波长偏移，其波长分辨率为 0.02 nm。当 BBS 发出的光信号通过环形器传到该传感器的传感头，经过传感头反射后的光信号通过环形器最终被 OSA 接收。整个实验在室温(25 ℃)条件下进行。实验过程中，通过气泵分别将湿润空气和干燥空气泵入湿度箱内，实现湿度箱内的 RH 范围在 40%~65%变化。

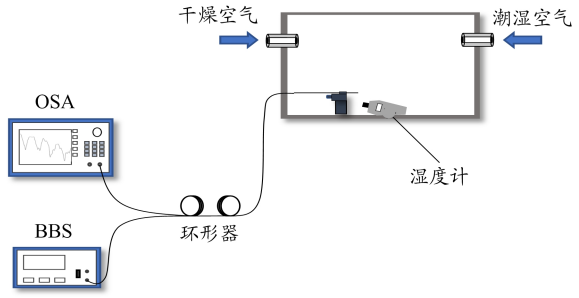
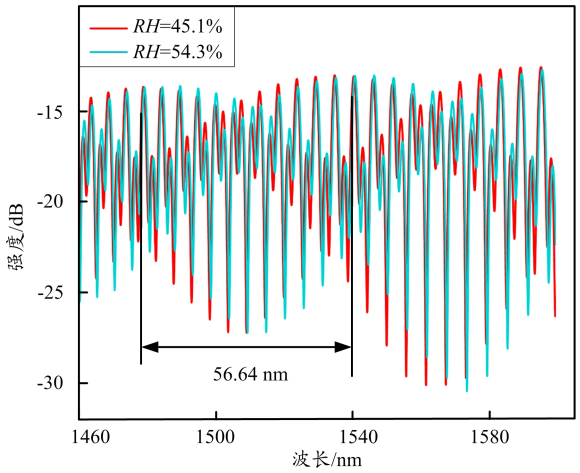
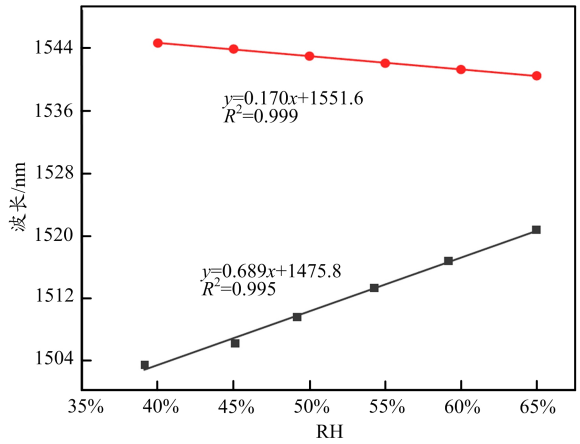


图 2 传感实验装置图

图 3(a)为基于光学游标效应的湿度传感器的响应光谱图。可以看出，随着 RH 的增加，反射光谱向长波方向漂移，主要原因是 PVA 凝胶在 RH 增加的条件下吸水膨胀，增加了传感腔的腔长，使得反射光谱向长波方向漂移。图 3(b)为有无光学游标效应的光纤湿度传感器波长漂移与 RH 的关系。其中，黑色直线显示了当 RH 从 65%降至 40%时，基于光学游标效应的光



(a) 不同湿度下，基于光学游标效应光纤湿度传感器的响应光谱图



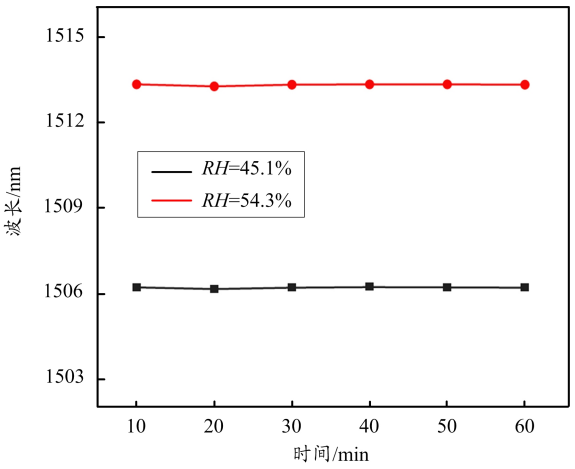
(b) 有无光学游标效应的光纤湿度传感器波长漂移与 RH 的关系

图 3 基于光纤游标效应的湿度传感器的响应光谱及波长漂移与 RH 的关系

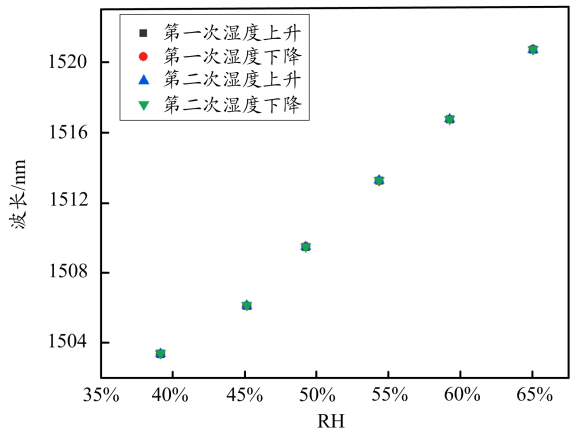
纤湿度传感器的干涉包络波长漂移与 RH 的关系。可以看出，该传感器的灵敏度为 0.689 nm/RH%，线性拟合度为 0.995，具有良好的线性关系；而图 3(b)中红线显示了单 F–P 光纤湿度传感器波长漂移与 RH 的关系，可以看出该传感器的灵敏度仅为 0.17 nm/RH%，而且随着箱内 RH 的增大波长向短波方向漂移。两者对比可知，当环境 RH 为 40%~65%时，基于光学游标效应增敏的光纤湿度传感器灵敏度获得了 3.05 倍的提升。实验结果显示该传感器干涉包络的 FSR 为 56.64 nm。通过理论计算得出该传感器干涉包络的 FSR 为 57.6 nm，与实验结果相符。

为了研究该传感器在长时间工作状态下的稳定性，实验选择在 RH 分别为 45.1%和 54.3%的环境中，每隔 10 min 扫描测量一次反射光谱，结果如图 4(a)所示。可以看出，随着时间的流逝，在 RH 环境下包络的漂移很小，性能十分稳定，其中最大的偏差为 0.03 nm，

表明该湿度传感器在长时间工作下也可以保持良好的稳定性，并且性能可逆。本文进一步研究了该传感器的重复性，在 2 个不同的时间节点下，对湿度传感器进行重复测量，使环境湿度从高到低或者从低到高变化，结果如图 4(b)所示。可以看出，RH 为 40%~65%时，2 次实验传感器的湿度响应几乎相同，证明了此传感器可以多次使用，不会影响其传感特性，具有良好的可重复性。



(a) 稳定性实验



(b) 重复性性实验

图 4 基于游标效应的湿度传感器的稳定性和重复性实验

3 结束语

本文提出并制备了一种基于光学游标效应增敏的光纤湿度传感器，该传感器是由一小段空芯毛细管级联一小段单模光纤和涂敷在单模光纤端面的湿敏材料构成，形成 2 个 F–P 腔。当 2 个 F–P 腔的 FSR 相近时，便可产生游标效应，使传感器的湿度灵敏度获得了提升。实验结果表明：该传感器的 RH 在 40%~65%内的灵敏度为 0.689 nm/RH%，约是单个空芯毛细管组成的 F–P 型湿度传感器的 4.05 倍。该传感器具有结构简单、制作成本低等优点，可以应用在环境检测、生物医疗和工业生产等领域。

参考文献：

[1] DU B, YANG D, SHE X, et al. MoS_2-based all-fiber humidity sensor for monitoring human breath with fast response and recovery [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 251: 180–184.

[2] KANO S, KIM K, FUJII M. Fast-response and flexible nanocrystal-based humidity sensor for monitoring human respiration and water evaporation on skin[J]. ACS Sens, 2017, 2(6): 828–833.

[3] 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.

[4] ZHENG S J, ZHU Y N, KRISHNASWAMY S. Fiber humidity sensors with high sensitivity and selectivity based on interior nanofilm-coated photonic crystal fiber long-period gratings[J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2013, 176: 264–274.

[5] WANG B, TIAN J, HU L, et al. High sensitivity humidity fiber-optic sensor based on all-agar fabry-perot interferometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(12): 4879–4885.

[6] NAN T, LIU B, WU Y, et al. High-temperature fiber sensor based on two paralleled fiber-optic Fabry-Perot interferometers with ultrahigh sensitivity[J]. Optical Engineering, 2020, 59(2): 1–11.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] ZHAO C, HAN F, LI Y, et al. Volatile organic compound sensor based on PDMS coated Fabry–Perot interferometer with vernier effect [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(12): 4443–4450.

[11] ZHANG P, TANG M, GAO F, et al. Cascaded fiber-optic Fabry-Perot interferometers with Vernier effect for highly sensitive measurement of axial strain and magnetic field[J]. Opt Express, 2014, 22(16): 19581–19588.

[12] ZHAO Y, TONG R J, CHEN 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, 2019, 285: 329–337.

[13] LEI X, DONG X. High-sensitivity Fabry-Perot interferometer high-temperature fiber sensor based on vernier effect [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(10): 5292–5297.