

基于表面等离子体共振效应的单模光纤高灵敏度温湿度传感器

刘卓瑶¹, 常建华^{1,2*}, 倪海彬¹, 戴腾飞^{1,2}, 徐遥¹

¹南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;

²南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044

摘要 本文提出了一种基于表面等离子体共振(SPR)效应的温湿度传感器,利用包层腐蚀将纤芯光耦合进包层,并在光纤外侧涂覆二甲硅氧烷(PDMS)和聚乙烯醇(PVA),以实现环境温度和相对湿度双参量测量。实验结果表明:所提出的传感器具有良好的温湿度响应特性,在 20~70 °C 温度范围内的平均灵敏度达到 $-2.01 \text{ nm}/\text{C}$,在 30%~78% 相对湿度范围内的平均灵敏度达到 $-4.36 \text{ nm}/\%$ 。该传感器具有灵敏度高、稳定性好、交叉敏感性低等优点,可以广泛应用于温湿度传感领域。

关键词 传感器; 光纤传感; 单模光纤; 表面等离子体共振; 温湿度传感

中图分类号 TN25 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221086

1 引言

温度和相对湿度的精确测量在医疗卫生、农业生产、环境检测和生物化学等领域具有重要意义^[1-2]。传统的机械湿度计、温度计以及基于电容和电阻的温湿度传感器可以在一定程度上满足温湿度测量的需求,但其存在占用空间大、容易老化等缺点。光纤传感器以体积小、质量轻、抗电磁干扰、耐腐蚀等独特优势获得了广泛关注^[3]。光纤传感器种类繁多,从种类上可以分为单模光纤^[4]、多模光纤^[5]、边孔光纤^[6]、无芯光纤^[7]、多孔光纤^[8]传感器等;从激发包层模式的方式上又可以分为腰椎放大光纤^[9]、错位熔接光纤^[10-11]、包层腐蚀光纤^[12]传感器等。在此基础上,研究人员将光纤与湿敏材料相结合,设计了以光栅结构^[13-14]、干涉结构^[15-17]和表面等离子体共振效应为基础的光纤温湿度传感器。表面等离子体共振(SPR)效应因可以提高光纤感知周围介质折射率变化的灵敏度而受到了广泛关注^[18-19]。2018年,Shao等^[20]报道了一种基于侧面抛光且涂有聚乙烯醇的单模光纤SPR湿度传感器,在相对湿度为80%~90%时该湿度传感器的灵敏度达到了 $-4.97 \text{ nm}/\%$ 。2020年,刘海等^[21]提出了一种基于SPR效应的金-PDMS涂覆光子晶体光纤温度传感器,当温度在22~47 °C范围内变化时,其灵敏度达到了 $-8.18 \text{ nm}/\text{C}$ 。这些传感器只能对相对湿度或温度进

行单一测量,而温度和相对湿度作为两个密切相关的参量在同一个应用场景中经常需要同步测量。2021年,Ying等^[22]设计了一种双D型结构,使用甲苯和聚乙烯实现了温度和相对湿度的双参量测量,温湿度灵敏度分别达到 $-1.02 \text{ nm}/\text{C}$ 和 $-0.79 \text{ nm}/\%$,但该传感器选取苯类材料作为传感材料,这种材料有毒性且易挥发,安全性和可逆性都不易得到保障。

本文提出了一种基于SPR的单模光纤(SMF)温湿度传感结构。该传感结构由去除部分包层的单模光纤外侧镀银后涂覆湿敏材料制成。该传感结构采用单模光纤腐蚀包层的方法激发包层模式,提升了光纤SPR传感器的灵敏度;同时,该传感结构用二甲硅氧烷(PDMS)和聚乙烯醇(PVA)分别作为湿敏材料和干敏材料,解决了苯和烯类材料稳定性和可重复性较差的问题。在实验中测试了传感器的温度响应特性以及不同厚度PVA膜传感器样品的湿度响应特性,结果表明:质量分数为2%的PVA溶液滴涂形成的湿敏膜传感器具有较好的稳定性和较低的交叉敏感性。该传感器具有良好的温湿度响应特性,而且制备简单、交叉敏感性低,可用于温湿度检测。

2 原理以及结构的制备

2.1 理论研究

基于SPR的单模光纤温湿度传感器的结构如图1

收稿日期: 2022-07-27; 修回日期: 2022-08-24; 录用日期: 2022-09-07; 网络首发日期: 2022-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(61875089, 62175114)、江苏省研究生科研创新计划(KYCX22_1193)、江苏省大学生实践创新训练计划项目(202210300085Y)

通信作者: *jianhuachang@nuist.edu.cn

所示。该传感结构在腐蚀包层的单模光纤外镀一层厚度为 40 nm 的银膜,银膜外两侧分别涂覆对温度敏感的 PDMS 膜和对湿度敏感的 PVA 薄膜。利用 HF 酸腐蚀去除部分包层后,包层直径减小,激发出包层模

式。实验选用的光纤型号为 SMF-28e,光纤纤芯折射率为 1.446,包层折射率为 1.439,纤芯直径为 8.2 μm ,原包层直径为 125 μm ,传感部分包层直径腐蚀至 15 μm ,传感结构长度约为 10 mm。

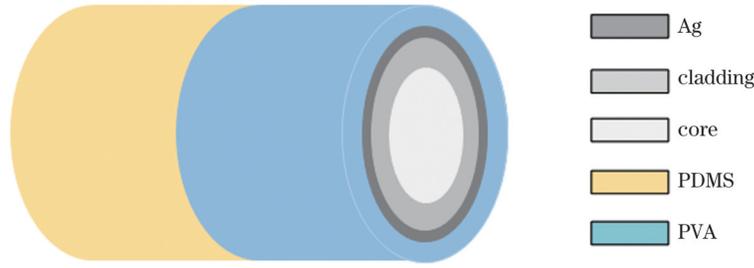


图 1 传感结构示意图

Fig. 1 Schematic of sensing structure

由于光束在光纤中全内反射传播,因此光纤 SPR 传感器的工作原理是克雷奇曼模型。在该模型中,入射光通过玻璃基板(例如棱镜或纤维芯)后以等于或大于衰减全反射角(ATR)的角度入射到有金属薄膜(例如金或银)的表面。SPR 由表面等离子体极化子(SPP)激发,这些极化子是由自由电子振荡和金属/电介质界面上的电磁波组合产生的^[23]。光纤 SPR 传感器的结构由纤芯、包层、金属层和外部环境介质层共 4 层结构组成,其中包层、金属层以及外部环境介质层的介电常数分别以 ϵ_0 、 ϵ_1 及 ϵ_2 表示。当纤芯中耦合进入包层的光以大于 ATR 的角度入射至包层与金属层界面时,会在此界面发生全反射,其中一部分能量将以倏逝波的形式进入金属层。通常情况下,金属表面等离子体波(SPW)的传播常数可以表示为

$$K_{\text{sp}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}, \quad (1)$$

式中: c 为真空中的光速; ω 为入射光的角频率。倏逝波的传播常数对于入射光来说可以表示为

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0} \sin \theta, \quad (2)$$

式中: θ 为入射角度。在表面等离子体(SP)的谐振激发满足入射光的偏振垂直于金属表面(即 p 偏振光)的条件下,倏逝波的传播常数等于表面等离子体波的传播常数,即

$$\frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0} \sin \theta. \quad (3)$$

此时倏逝波与表面等离子体波之间发生共振,入射光波中满足共振条件的光能量转化为等离子体波的振荡能量,使得反射光减少,最终在出射光谱上出现共振吸收峰。

传感器的透射光谱可以通过菲涅耳公式求得,透射率的计算公式为

$$R = \left| \frac{r_{01} + r_{12} \exp(2ik_z d)}{1 + r_{01} r_{12} \exp(2ik_z d)} \right|^2, \quad (4)$$

式中: R 为总透射率; d 为金属膜厚度; r_{01} 和 r_{12} 分别为光纤与金属膜界面处的反射率以及金属膜与介质界面处的反射率,可以表示为

$$r_{ik} = \frac{\sqrt{\epsilon_i - \epsilon_0 \sin^2 \theta} / \epsilon_i - \sqrt{\epsilon_k - \epsilon_0 \sin^2 \theta} / \epsilon_k}{\sqrt{\epsilon_i - \epsilon_0 \sin^2 \theta} / \epsilon_i + \sqrt{\epsilon_k - \epsilon_0 \sin^2 \theta} / \epsilon_k} \quad (i=0, 1; k=1, 2); \quad (5)$$

k_z 为金属膜中波矢的垂直分量,表达式^[21]为

$$k_z = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_0 \sin^2 \theta}. \quad (6)$$

为了分析光在光纤中的传输特点,用 FDTD Solutions 软件对该结构光纤内的光传输行为进行模拟仿真。图 2 展示了当环境折射率在 1.33~1.39 范围内

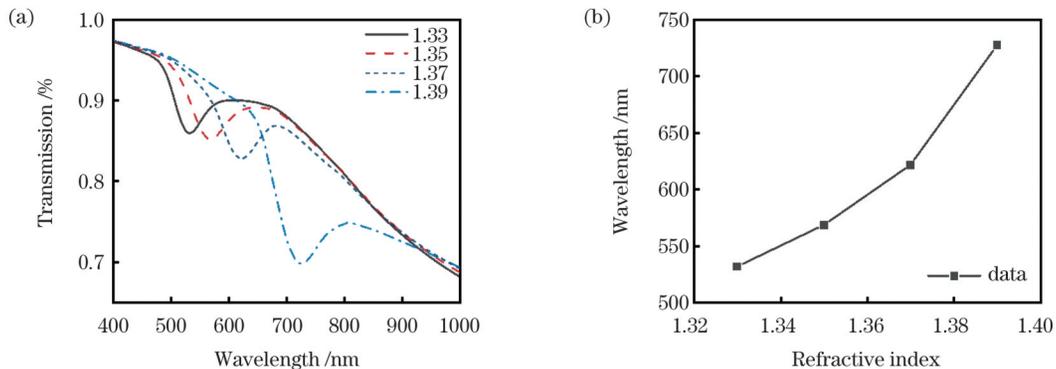


图 2 SPR 共振峰对环境折射率的响应。(a)透射谱;(b)中心波长偏移

Fig. 2 Response of SPR resonance peak to refractive index. (a) Transmission spectra; (b) central wavelength shift

变化时该结构共振峰中心波长的仿真结果。从图 2 可以看出,当环境折射率从 1.33 变化至 1.39 时,共振峰向长波长方向偏移了 208.38 nm。这一仿真结果表明该结构对环境折射率变化有较好的响应。温湿度传感响应特性测试就是基于温湿度敏感材料实现对环境温湿度的监测,即当温湿度敏感材料的折射率发生变化时测试传感器的响应特性。该仿真结果证明了上述传感结构设计方案的可行性,为后续温湿度测量提供了理论基础。

温敏材料 PDMS 的折射率随着环境温度的升高而降低,两者基本呈线性关系^[21];当环境温度为 20 °C 时,PDMS 的折射率约为 1.4085;当环境温度升至 70 °C 时,其折射率约为 1.3861。湿敏材料 PVA 的折射率随着环境相对湿度的升高而降低^[24];当环境相对湿度为 30% 时,PVA 的折射率约为 1.48;当环境相对湿度为 75% 时,折射率约为 1.41。

2.2 传感结构的制备

传感结构的制备流程如图 3 所示。首先将单模光纤中间去除长度为 10 mm 左右的涂覆层,之后将 HF 酸溶液(体积分数为 37.6%)滴涂在去除涂覆层的光纤表面,直至浸没光纤^[25];多次使用光学显微镜对光纤的腐蚀状况进行观察,直至 HF 酸溶液将包层直径腐蚀到 15 μm 左右时将光纤移走;然后将处理好的光纤固定在载玻片上,放入磁控溅射镀膜机(JSD350)中镀膜

厚度为 40 nm 的银膜。镀膜结束后将光纤传感结构部分翻转至背面,再重复一次镀膜操作,以保证整个光纤传感结构镀膜均匀。

在低湿度环境中,纤芯以及包层的折射率远低于 PVA 的折射率,若湿敏膜较厚,倏逝波穿透深度内的材料的有效折射率就会高于纤芯,影响全反射条件,使得光能量大量泄漏,无法激发表面等离子体共振。因此需要保证湿敏涂层的厚度足够薄(远小于倏逝波穿透深度),此时倏逝波将穿透湿敏涂层并接触一部分空气,空气和涂层的平均折射率满足激发表面等离子体共振的要求^[20]。在 3 个小烧杯中依次加入 0.1、0.2、0.5 g PVA 粉末,再分别加入 10 g 水,放置于烘胶台(BP-2B)上加热至 60 °C 并不停搅拌直至粉末完全溶解,静置后冷却至常温,得到质量分数分别为 1%、2%、5% 的 PVA 溶液。由于 PDMS 的折射率远低于光纤包层的折射率,且难以控制其膜厚,因此本实验中不对不同厚度 PDMS 膜的传感结构进行对比实验。将一块载玻片超声清洗 20 min 后取出,用无水乙醇擦拭干净并将传感结构固定在载玻片上。先在光纤传感结构的一侧滴涂适量液态 PDMS,然后放置在 60 °C 烘干台上加热至 PDMS 完全凝固,待其冷却至室温后取少量配制好的 PVA 溶液涂覆在光纤传感结构的另一侧,并加热至干燥。滴涂 1%、2%、5% PVA 溶液得到的样品依次记为 s-1、s-2、s-3。

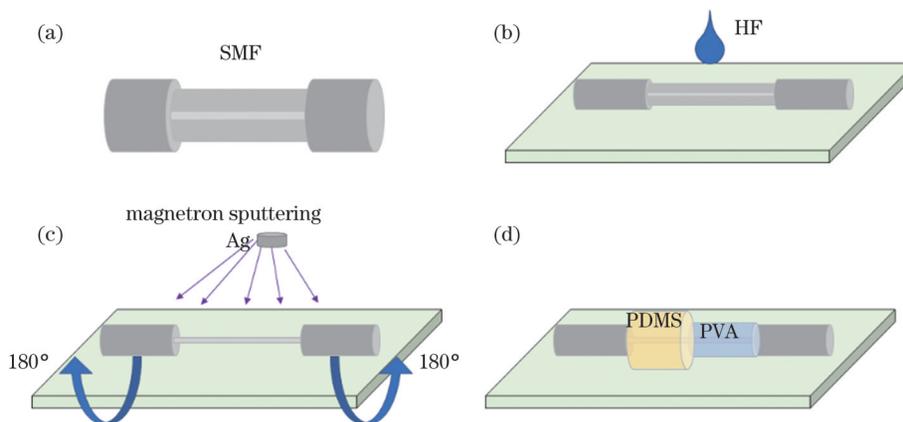


图 3 传感器制备流程图

Fig. 3 Sensor fabrication process

3 实验结果与讨论

3.1 传感器涂覆敏感材料前的折射率响应特性

选用该结构在空气中的透射光谱作为参考光谱,如图 4(a)所示,其中的小图是光纤传感结构在光学显微镜下放大 10 倍观察到的图像。当介质与光纤折射率相差较大时不能满足产生共振峰的条件,因此本结构在空气中并不能产生表面等离子体共振吸收峰。将该结构在空气中的透射光谱作为参考光谱并不会对温湿度的吸收峰测量造成影响^[26-27]。在折射率为 1.33 (水的折射率)的条件下对该结构的透射光谱进行测

试,测试结果如图 4(b)所示。可见,相对传输光谱中出现了共振峰,中心波长为 502.27 nm,共振峰谷深约为 22%。测试结果表明该传感结构对环境折射率变化有响应,说明去除部分包层使纤芯光向包层耦合可以激发包层模式。

3.2 传感器涂覆敏感材料后的温度响应特性

温度实验系统的搭建如图 5 所示,其中右上角小图为实验装置实物图。实验装置由宽谱光源(SLED, HL-2000 型卤素光,波长范围为 360~2500 nm)、光谱分析仪(型号为 E820,波长检测范围为 350~960 nm)、加热平台和计算机组成。如图 5 所示,光纤两端分别

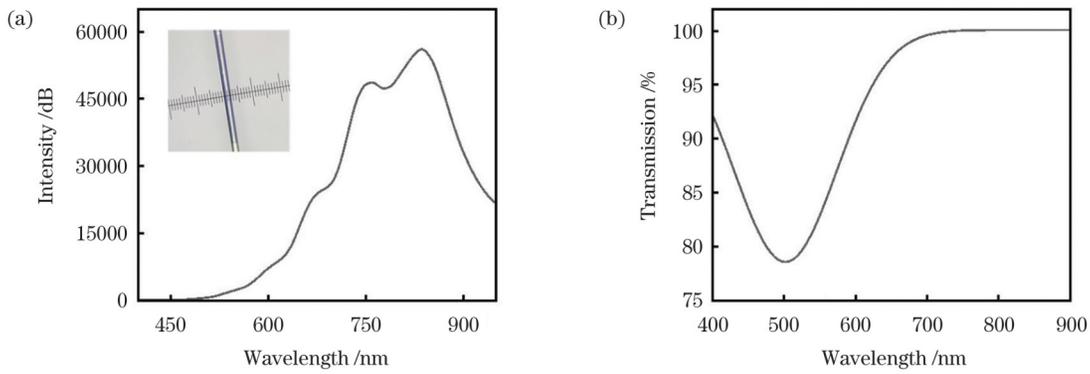


图 4 折射率响应。(a)参考光谱;(b)折射率为 1.33 时的透射光谱

Fig. 4 Response of refractive index. (a) Reference spectrum; (b) transmission spectrum at refractive index of 1.33

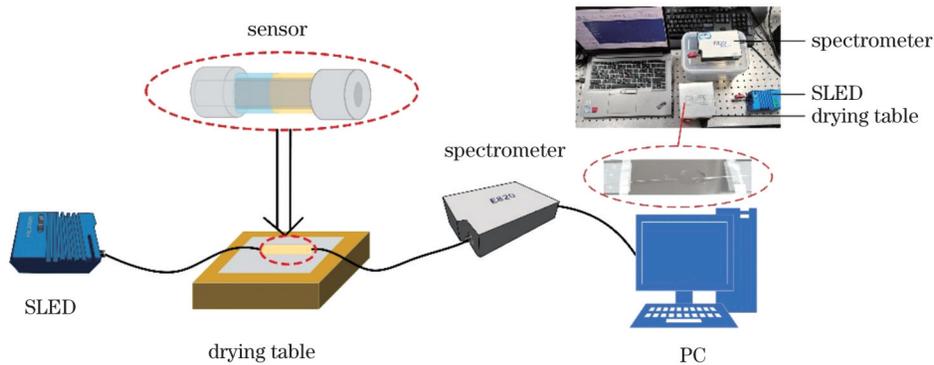


图 5 温度测试实验装置图

Fig. 5 Temperature test device

连接光源和光谱仪,图中虚线圈出部分为光纤传感结构,其放置于加热平台上;光谱仪另一端连接计算机,由计算机端显示光谱仪接收的光谱信号。

将加热平台的温度从 20 °C 升高至 70 °C,每隔 10 °C 记录一次光谱数据。温度升高会导致 PDMS 的折射率下降,介电常数 ϵ_2 下降。由式(4)、(6)可知,当光纤中的光入射角 θ 固定时,光传输的透射率 R 是关于介电常数 ϵ_2 、入射波长 λ 的函数,满足最低透射率时 λ 的位置即为共振峰的位置。因此,当介电常数下降

时,满足最低透射率的入射波长也会减小,即共振峰左移^[18]。测试结果如图 6(a)所示,可见,随着温度升高,共振峰逐渐向短波长方向偏移。这一结果与理论结果一致。当温度为 20 °C 时,共振峰的中心波长为 815.94 nm;当温度升高到 70 °C 时,共振峰的中心波长偏移到 715.69 nm,平均灵敏度达到 -2.01 nm/°C。对不同温度下共振峰的中心波长描点进行线性拟合可得到图 6(b),可以看出:在 20~70 °C 内,中心波长与温度基本呈线性关系,线性度为 99.5%。

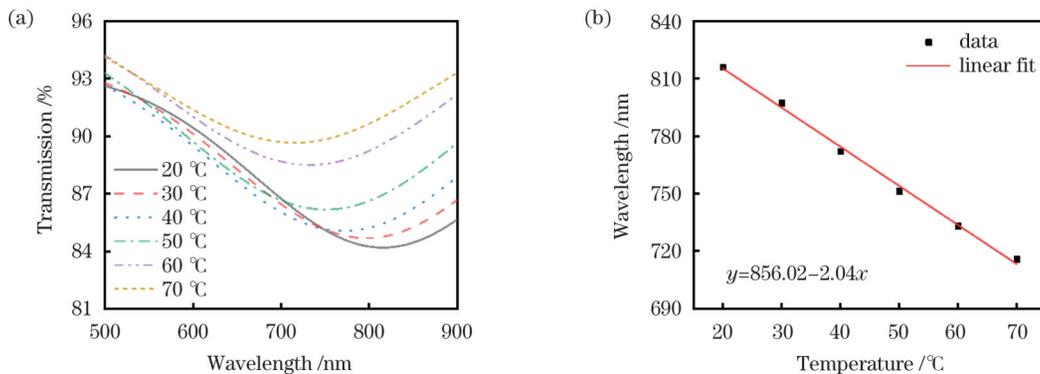


图 6 温度响应特性。(a)透射谱;(b)温度灵敏度

Fig. 6 Response of temperature. (a) Transmission spectra; (b) sensitivity of temperature

稳定性和交叉敏感性都是传感性能的重要指标,因此在 20 °C 和 70 °C 两个固定温度下测试了该传感器的温度传感稳定性和交叉敏感性。在相同的相对湿度

下,分别在 20 °C 和 70 °C 下每隔 15 min 记录一次样品的光谱,得到共振峰中心波长在 1 h 内的变化,如图 7(a) 所示。测试结果表明:在不同的温度(20、70 °C)下,

PDMS 产生的共振峰具有良好的稳定性,1 h 内共振峰中心波长的起伏值为 0.16 nm,标准差分别为 0.06 和 0.08。在相同的温度下,样品在不同相对湿度下的共振峰中心波长变化如图 7(b)所示。可见,在温度分别

为 20 °C 和 70 °C 的条件下,当环境的相对湿度在 30%~75% 范围内变化时,共振峰的中心波长几乎没有变化。这一结果说明 PDMS 的疏水性较强,其折射率受环境相对湿度的影响并不显著。

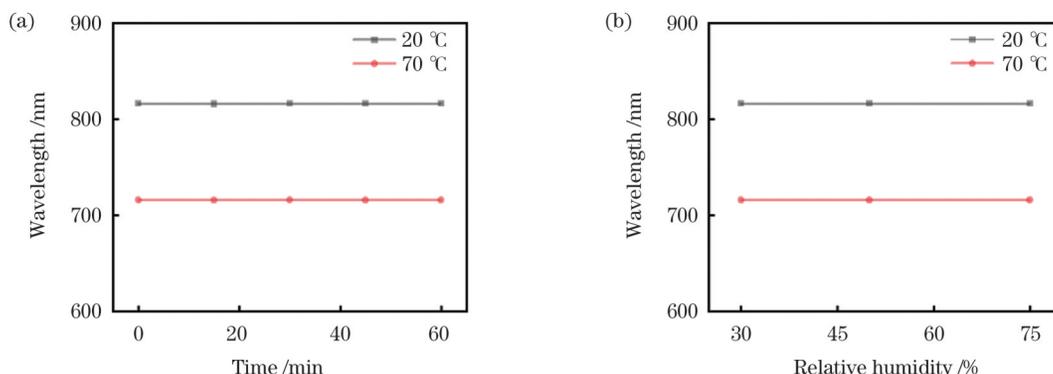


图 7 稳定性和交叉敏感性测试。(a)稳定性测试;(b)在不同相对湿度下的敏感性

Fig. 7 Stability and cross-sensitivity test. (a) Stability test; (b) sensitivity at different relative humidity values

3.3 传感器涂覆敏感材料后的湿度响应特性

湿度实验系统的搭建如图 8 所示,其中右侧小图为实验装置实物图。实验装置由宽谱光源、光谱分析仪、密闭容器、湿度计和计算机组成。湿度传感实验使用与温度传感实验相同的光源,光谱仪采用的是 NIRQuest(256-2.5)近红外光谱仪,其波长检测范围为 900~2500 nm。将湿度计(GM1362)测量的环境相对湿度值作为参考,以便于对不同环境相对湿度下的共振峰进行记录。将光纤传感部分放入狭小的密闭容器

中,并固定在容器侧壁,同时在容器中加入可饱和盐溶液。随着时间推移,密闭容器中的相对湿度会受可饱和盐溶液挥发的影响而逐渐趋于一个稳定值。不同种类的饱和盐溶液对应不同的相对湿度,在理想情况下,KCl 饱和盐溶液能在密闭环境中营造的环境最大相对湿度为 84.3%,乙酸钾饱和盐溶液营造的环境最小相对湿度为 22.5%。但是由于实验环境以及容器密封性等因素的影响,实验中的环境相对湿度与理论值存在一定差距。

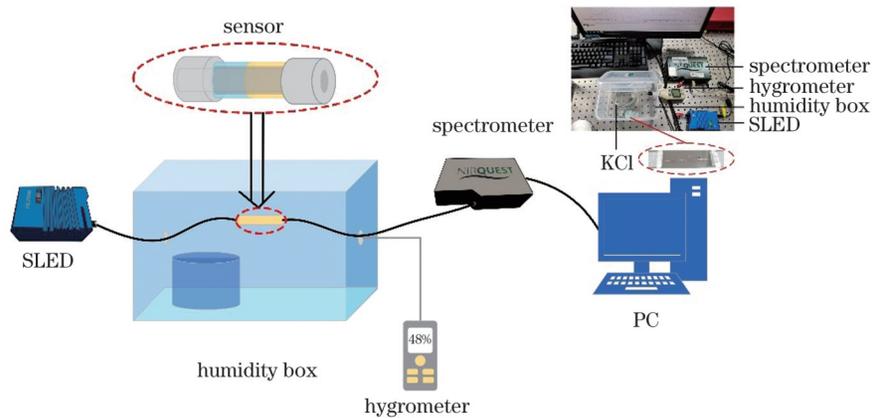


图 8 相对湿度测试装置

Fig. 8 Relative humidity test device

湿度实验在 20 °C 的环境温度下进行。图 9 分别显示了外界环境相对湿度变化时样品 s-1、s-2、s-3 相对传输光谱图的共振峰偏移情况。从图中可以看出,随着容器内环境相对湿度增大,样品 s-1、s-2、s-3 的三个共振峰向短波长方向偏移。由于 PVA 的亲水性较强,当环境相对湿度上升时,PVA 薄膜因吸水后的折射率下降而引起共振峰波长偏移,其原理与 PDMS 类似。如图 9(a)、(c)、(e)所示,不同质量分数的 PVA 溶液可以在光纤表面形成不同厚度的 PVA 膜,膜的厚度会影响银表面介

电常数 ϵ_s 的大小。因此,在相对湿度相同的环境下,共振吸收峰的中心波长同时也受 PVA 膜厚度的影响,样品 s-1、s-2、s-3 产生的不同中心波长的共振峰分别在 1500、1800、2100 nm 左右。其中:当空气相对湿度为 33% 时,样品 s-1 共振峰的中心波长为 1642.45 nm,当空气相对湿度上升到 78% 时,共振峰的中心波长向左偏移到 1447.61 nm,平均灵敏度达到 $-4.33 \text{ nm}/\%$;当空气相对湿度为 30% 时,样品 s-2 共振峰的中心波长为 1945.22 nm,当空气相对湿度上升到 78% 时,共振峰的

中心波长向左偏移到 1736.10 nm, 平均灵敏度达到 $-4.36 \text{ nm}/\%$; 当空气相对湿度为 33% 时, 样品 s-3 共振峰的中心波长为 2128.41 nm, 当空气相对湿度上升到 78% 时, 共振峰位置向左偏移到 1926.07 nm, 平均灵敏度达到 $-4.50 \text{ nm}/\%$ 。实验结果表明: 样品 s-2 对环境相对湿度变化的灵敏度较高且共振峰深度稳定; 样

品 s-1 的灵敏度与样品 s-2 较为接近, 但由于包层模式在不同波长处的吸收峰强度可能会有所不同, 出现了共振峰深度随波长偏移而减小的现象; 样品 s-3 的平均灵敏度较高, 但共振峰深度不稳定且共振峰中心波长接近光谱仪量程的上限。使用函数对各样品的灵敏度进行拟合, 结果如图 9(b)、(d)、(f) 所示。

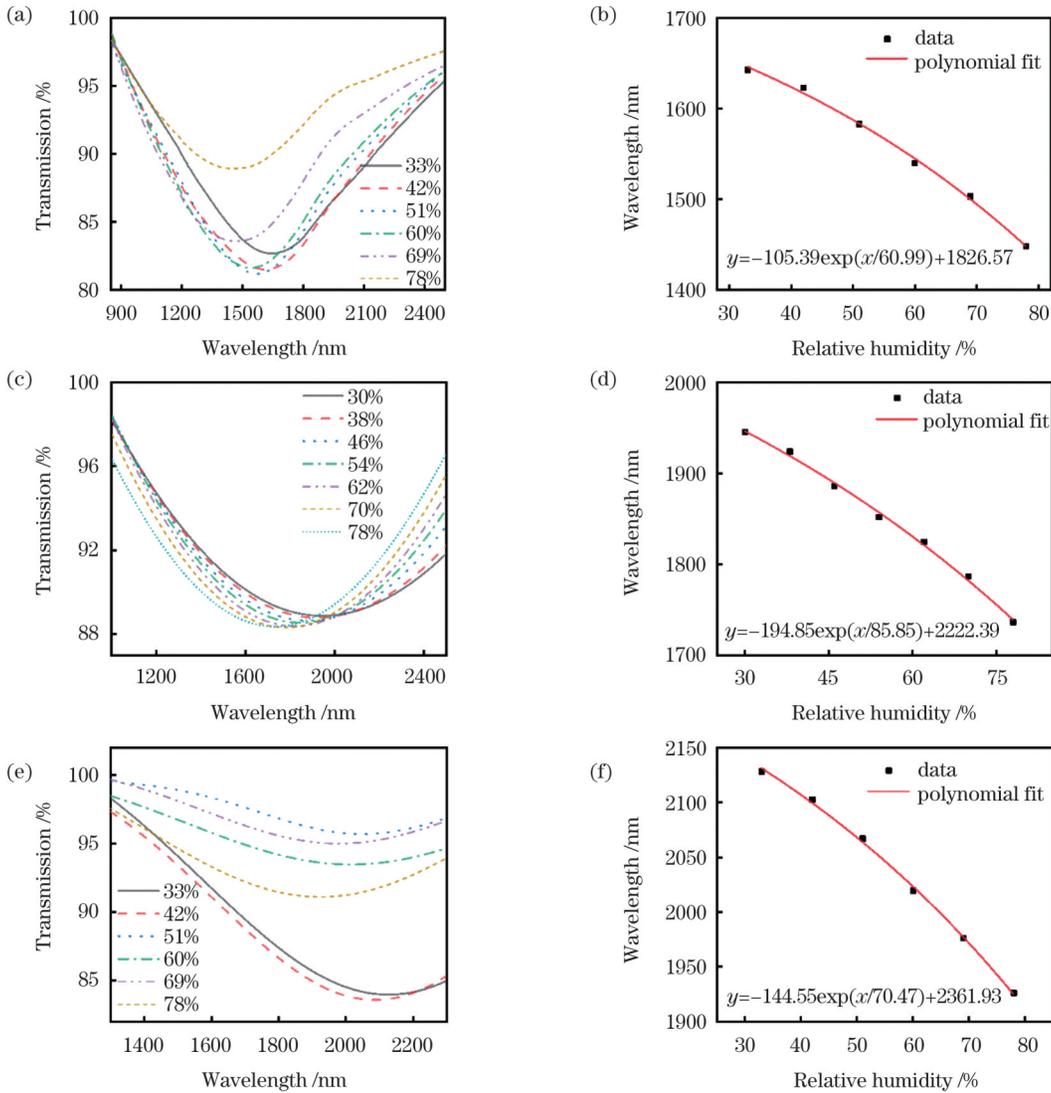


图 9 不同样品的湿度响应特性。(a)(b) 样品 s-1; (c)(d) 样品 s-2; (e)(f) 样品 s-3

Fig. 9 Humidity response of different samples. (a)(b) Sample s-1; (c)(d) sample s-2; (e)(f) sample s-3

样品 s-2 的灵敏度较高且共振峰深度较稳定, 因此对其进行稳定性测试。在密闭容器中放置三种不同的饱和盐溶液, 以获得三种不同的稳定相对湿度, 分别在 29.8%、56.1%、79.5% 三个固定相对湿度水平下测试样品 s-2 的稳定性。当容器内的相对湿度稳定时, 对样品 s-2 的光谱进行记录, 1 h 内每隔 15 min 记录一次, 结果如图 10(a) 所示。从图 10(a) 中可以看出, 在上述三个稳定的相对湿度下, 湿度传感的稳定性较好, 在 1 h 内共振峰中心波长的起伏值为 6.3 nm, 标准差分别为 2.46、2.36 和 2.36。这可能是由于受到了仪器设备稳定性或容器密封性的影响。进一步对 PVA 的温度敏

感性进行测试。实验选取样品 s-2 在室内相对湿度为 45% 时的共振峰光谱作为样本, 记录了 20~90 °C 范围内共振峰的偏移情况, 如图 10(b) 所示。可见, 随着温度升高, 共振峰中心波长向左偏移, 温度为 20 °C 时, 中心波长为 1882.71 nm, 温度升高至 90 °C 时, 中心波长偏移至 1864.22 nm, 平均变化为 $-0.2641 \text{ nm}/\text{C}$ 。对 PVA 的温度敏感性进行线性校正分析: 若以室温为 20 °C 时的测量值为基准, 则在不同温度条件下校准后的湿度值 H 可以近似地表示为

$$H = 0.2641(T - 20) + h_1, \quad (7)$$

式中: T 为当前温度; h_1 为原测量湿度值。

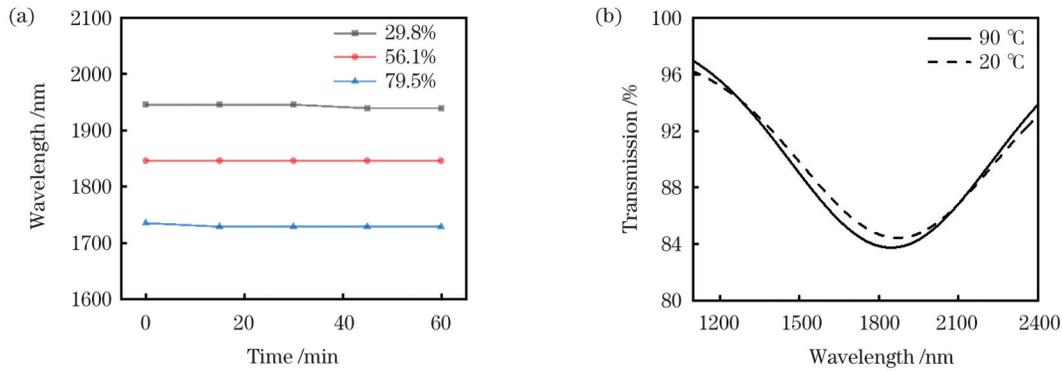


图 10 稳定性和交叉敏感性测试。(a)样品 s-2 的稳定性测试;(b)不同温度下的敏感性

Fig. 10 Stability and cross-sensitivity testing. (a) Stability test of sample-2; (b) sensitivity at different temperatures

3.4 分析与比较

本文提出的是一种基于单模光纤的表面等离子体共振(SMF-SPR)传感结构,由于单模光纤的纤芯直径非常小,光在纤芯中传输的模式单一,因此 SMF-SPR 传感器的灵敏度与同类其他基于波长解调的 SPR 温湿度传感器相比具有较大优势^[23]。表 1 给出了所设计的传感器与其他类型光纤温湿度传感器(包括光纤布拉

格光栅(FBG)温度传感器、马赫-曾德尔(MZI)湿度传感器以及基于 SPR 的温湿度双参量传感器)的灵敏度。可以看出:相比于 FBG、MZI 和 SPR2 传感器,本文提出的温湿度传感器不仅具有温度和湿度双参量传感特性,还具有较高的灵敏度;相比于 SPR1,本文提出的传感器在环境相对湿度低于 70% 时仍具有较高的灵敏度,同时可以实现温度的高灵敏度测量。

表 1 不同温湿度传感器的性能比较

Table 1 Performance comparison of different temperature and humidity sensors

Sensor type	Sensitization method	Year	Temperature sensitivity / (nm·°C ⁻¹)	Relative humidity sensitivity / (nm·% ⁻¹)
Proposed	PDMS & PVA	2022	-2.01	-4.36
MZI	RGO ^[15]	2019		-0.28
FBG	TiN ^[14]	2021	0.02	
SPR1	Side-throw & PVA ^[20]	2018		-4.97
SPR2	Toluene & polyethylene ^[22]	2021	1.02	0.79

4 结 论

本文设计了一种基于表面等离子体共振的温湿度传感器,该传感器在去除部分包层的光纤外侧镀制纳米银膜,再涂覆温湿敏材料,使激发包层模式的纤芯光与银发生 SPR 效应,最终实现了温湿度双参量高灵敏度测量。实验结果表明,湿度共振峰的中心波长随着 PVA 膜厚度降低而向短波长方向偏移。在 30%~78% 相对湿度范围内,质量分数为 2% 的 PVA 溶液滴涂的传感结构对相对湿度变化的平均灵敏度达到了 -4.36 nm/%;在 20~70 °C 的温度变化范围内,该传感器对温度变化的平均灵敏度达到了 -2.01 nm/°C,线性度达到 99.5%。温湿度交叉敏感性测试表明,PDMS 受环境相对湿度变化的影响较小,而 PVA 会在温度变化下发生较小的折射率变化。本文提出的温湿度传感器具有灵敏度高、量程大、稳定性好、交叉敏感性低的特点,可应用于温湿度传感领域。

参 考 文 献

[1] Velázquez-González J S, Monzón-Hernández D, Moreno-

- Hernández D, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a SPR-based fiber optic sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 242: 912-920.
- [2] Zhou Z H, Liu W, Yan H Z, et al. Nonlinear thermal emission and visible thermometry[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(4): 045001.
- [3] Li D R, Wang N N, Zhang T Y, et al. Label-free fiber nanograting sensor for real-time *in situ* early monitoring of cellular apoptosis[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(1): 016001.
- [4] Zhu Z D, Liu L, Liu Z H, et al. Surface-plasmon-resonance-based optical-fiber temperature sensor with high sensitivity and high figure of merit[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 2948-2951.
- [5] Zhu Z D, Liu L, Liu Z H, et al. High-precision micro-displacement optical-fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 1982-1985.
- [6] Wu S N, Tan Q, Forsberg E, et al. *In-situ* dual-channel surface plasmon resonance fiber sensor for temperature-compensated detection of glucose concentration[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 21046-21061.
- [7] Li B, Yan X, Zhang X N, et al. No-core optical fiber sensor based on surface plasmon resonance for glucose solution concentration and temperature measurement[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 12930-12940.
- [8] Gao D, Guan C Y, Wen Y W, et al. Multi-hole fiber based surface plasmon resonance sensor operated at near-infrared wavelengths[J]. *Optics Communications*, 2014, 313: 94-98.
- [9] 徐妍妍, 李俊, 李浩, 等. 基于拉锥七芯光纤的湿度传感器研究

- [J]. 中国激光, 2021, 48(23): 2306002.
- Xu Y Y, Li J, Li H, et al. Research on humidity sensor based on tapered seven core fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2306002.
- [10] Chen M Q, Wei H M, Zhao Y, et al. Temperature insensitive air-cavity Fabry-Perot gas pressure sensor based on core-offset fusion of hollow-core fibers[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 298: 111589.
- [11] Zheng H K, Zhao Y, Lü R Q, et al. Study on the temperature and salinity sensing characteristics of multifunctional reflective optical fiber probe[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-8.
- [12] Liu T, Ding H, Zhan C S, et al. Simply and cost-effectively fabricated AuNP-based fusion spliced transmissive optical fiber LSPR probes[J]. Optics Express, 2021, 29(5): 7398-7409.
- [13] Guo J Y, Shi B, Sun M Y, et al. Characterization of an ORMOCER[®]-coated FBG sensor for relative humidity sensing[J]. Measurement, 2021, 171: 108851.
- [14] Hsu C Y, Chiang C C, Hsieh T S, et al. Study of fiber Bragg gratings with TiN-coated for cryogenic temperature measurement [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 136: 106768.
- [15] 柯伟铭, 李振华, 周智翔, 等. 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): 1206007.
- 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): 1206007.
- [16] Yi D, Liu F, Geng Y F, et al. High-sensitivity and large-range fiber optic temperature sensor based on PDMS-coated Mach-Zehnder interferometer combined with FBG[J]. Optics Express, 2021, 29(12): 18624-18633.
- [17] Ma Q F, Ni K, Huang R. A carboxy-methyl cellulose coated humidity sensor based on Mach-Zehnder interferometer with waist-enlarged bi-tapers[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 33: 60-63.
- [18] Jin Y, Zhou L, Liang J, et al. Electrochemically driven dynamic plasmonics[J]. Advanced Photonics, 2021, 3(4): 044002.
- [19] 马金英, 刘铁根, 江俊峰, 等. 光纤表面等离子体共振传感灵敏度提高研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1906002.
- Ma J Y, Liu T G, Jiang J F, et al. Progress in sensitivity enhancement for optical fibre surface plasmon resonance sensing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1906002.
- [20] Shao Y, Wang Y, Cao S Q, et al. Mechanism and characteristics of humidity sensing with polyvinyl alcohol-coated fiber surface plasmon resonance sensor[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2029.
- [21] 刘海, 白冰冰, 张砚曾, 等. 基于 SPR 效应的金-PDMS 涂覆光子晶体光纤高灵敏度温度测量[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0404003.
- Liu H, Bai B B, Zhang Y Z, et al. High-sensitivity temperature measurement based on SPR in gold-PDMS-coated photonic crystal fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0404003.
- [22] Ying Y, Cheng S Y, Hu N, et al. Temperature and humidity sensor based on a double D-shaped optical fiber with incorporated toluene and polyethylene[J]. Instrumentation Science & Technology, 2021, 49(4): 404-415.
- [23] Liu Y, Peng W. Fiber-optic surface plasmon resonance sensors and biochemical applications: a review[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3781-3791.
- [24] Su D, Qiao X G, Rong Q Z, et al. A fiber Fabry-Perot interferometer based on a PVA coating for humidity measurement [J]. Optics Communications, 2013, 311: 107-110.
- [25] 恽斌峰, 陈娜, 崔一平. 基于包层模的光纤布拉格光栅折射率传感特性[J]. 光学学报, 2006, 26(7): 1013-1015.
- Yun B F, Chen N, Cui Y P. Refractive index sensing characteristics of fiber Bragg grating based on cladding mode[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(7): 1013-1015.
- [26] Yang Z, Xia L, Li C, et al. A surface plasmon resonance sensor based on concave-shaped photonic crystal fiber for low refractive index detection[J]. Optics Communications, 2019, 430: 195-203.
- [27] 冯李航, 曾捷, 梁大开, 等. 楔形结构光纤表面等离子体共振传感器研究[J]. 物理学报, 2013, 62(12): 124207.
- Feng L H, Zeng J, Liang D K, et al. Development of fiber-optic surface plasmon resonance sensor based on tapered structure probe [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(12): 124207.

High-Sensitivity Temperature and Humidity Sensor Based on Surface Plasmon Resonance Effect in Single-Mode Fiber

Liu Zhuoyao¹, Chang Jianhua^{1,2*}, Ni Haibin¹, Dai Tengfei^{1,2}, Xu Yao¹

¹ School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;

² Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China

Abstract

Objective Accurate measurement of temperature and relative humidity plays an important role in many fields, such as health care, environmental testing, and safety monitoring. Various sensor devices have been developed to meet various needs, but traditional mechanical hygrometers and thermometers, as well as temperature and humidity sensors based on capacitance and resistance, have disadvantages, such as large space occupation and deterioration from aging. Fiber sensors have become a popular research topic because of their small size, light weight, resistance to electromagnetic interference, corrosion resistance, and many other advantages. Researchers have designed optical fiber temperature and humidity sensors that use grating structures, interference structures, and surface plasmon resonance (SPR) effects by combining optical fibers with temperature- and humidity-sensitive materials. The SPR effect has attracted considerable attention because it improves the sensitivity of optical fibers in sensing the change in the refractive index of the surrounding medium. We propose an SPR-based single-mode fiber (SMF) temperature- and humidity-sensing structure. It is made of a single-mode fiber coated with a silver film that partially removes cladding and senses the changes in temperature and relative humidity via a sensitive material, which is on the outer side of the silver.

Methods The coating layer with a length of ~ 10 mm was first removed from the middle of a single-mode fiber, after which an HF acid solution with a volume fraction of 37.6% was applied dropwise to the surface of the fiber. The cladding was submerged in HF, and corrosion was observed several times with a microscope. The diameter of the cladding was corroded to ~ 15 μm after 1 h and 20 min. The treated fiber was then fixed on a glass slide and placed in a magnetron sputter coater to plate a silver film with a thickness of 40 nm. At the end of the first silver plating, the fiber-optic sensing structure was flipped to the back side, and silver plating was repeated to ensure uniform coating of the entire fiber-optic sensing structure. In the next step, an appropriate amount of liquid PDMS was applied dropwise to one side of the fiber-sensing structure, and a small amount of PVA solution was applied to the other side of the fiber-sensing structure. Finally, the structure was placed on a drying table at 60 $^{\circ}\text{C}$ until it completely solidified and was left to cool to room temperature. The sample drop-coated PVA solution with mass fraction of 1%, 2%, and 3% was recorded as s-1, s-2, s-3, respectively.

Results and Discussions The proposed sensing structure has advantages in temperature and humidity sensing. With an increase in temperature and relative humidity, the double-resonance absorption peaks are significantly shifted. The SPR peak has good stability with the change in time, the resonance peak gradually shifts to the short wavelength direction when the temperature increases, and the central wavelength shift is basically linear with the temperature change within 20–70 $^{\circ}\text{C}$ (Fig. 6). Owing to the hydrophobicity of PDMS, its refractive index is barely affected by relative humidity; therefore, the material has a weak cross-sensitivity (Fig. 7). In the humidity test, samples s-1, s-2, and s-3 produce resonance peaks at different central wavelengths (Fig. 9). The resonance peak of sample s-2 at a certain relative humidity was selected as the measurement sample, and the shift in the resonance peak was recorded under a change in temperature from 20 to 90 $^{\circ}\text{C}$ (Fig. 10). It can be observed from the figure that the wavelength of the center of the resonance peak shifts to the left as the temperature increases.

Conclusions In this study, a temperature and humidity sensor based on SPR is designed. The outer side of the fiber, with part of the cladding removed, was coated with a nano-silver film. This method excites the cladding modes of the fiber core light with silver to produce an SPR effect. Then, temperature- and humidity-sensitive materials were coated on silver film to achieve a highly sensitive measurement of temperature and relative humidity. The experimental results show that the central wavelength of the humidity resonance peak is blue-shifted as the thickness of PVA decreases. When the relative humidity varies in the range of 30%–78%, the average sensitivity of the sensing structure with 2% (mass fraction) PVA solution drop-coated reaches -4.36 nm/%. When the temperature varies in the range of 20–70 $^{\circ}\text{C}$, the average sensitivity of the sensor reaches -2.01 nm/ $^{\circ}\text{C}$, and the linearity reaches 99.5%. The temperature and humidity cross-sensitivity tests demonstrate that PDMS is barely affected by changes in relative humidity, whereas PVA undergoes smaller refractive index changes under temperature changes. The temperature and humidity sensor proposed in this study has the characteristics of high sensitivity, wide range, good stability, and low cross-sensitivity and can be applied to the field of temperature and humidity sensing.

Key words sensors; fiber sensing; single-mode fiber; surface plasmon resonance; temperature and humidity sensing