

# 基于光子晶体光纤的迈克耳孙干涉仪型湿度传感器

邵敏<sup>1</sup>, 孙浩男<sup>1</sup>, 张蓉<sup>1</sup>, 刘颖刚<sup>1</sup>, 乔学光<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065;

<sup>2</sup>西北大学物理学院, 陕西 西安 710069

**摘要** 提出一种基于光子晶体光纤(PCF)的光纤迈克耳孙干涉仪,传感器结构由单模光纤(SMF)与一段 PCF 熔接构成。SMF 与 PCF 之间的粗锥作为耦合器,既能激发出 PCF 中的高阶包层模,又能耦合 PCF 端面反射回的纤芯基模与高阶包层模,形成模间干涉。由于 PCF 中的空气孔全部暴露在环境中,湿气与光纤充分作用,有效提高了传感器的湿度灵敏度。传感实验结果表明,在 30%~90% 的相对湿度范围内,传感器的湿度灵敏度为  $-0.095$  dB/%,线性拟合度为 0.998;在 20~100 °C 的温度范围内,传感器的温度灵敏度为 0.008 nm/°C,线性拟合度为 0.997,温度引起的湿度测量误差为 0.01%/°C;稳定性实验结果显示,该传感器的湿度测量标准误差为 0.25%;呼吸测试表明,传感器的响应时间为 190 ms。所设计的传感器结构简单、制作简便、灵敏度高、稳定性好、响应快,在湿度监测领域有较好的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 湿度传感器; 迈克耳孙干涉仪; 光子晶体光纤; 湿度灵敏度

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2406002

## Michelson Interferometric Humidity Sensor Based on Photonic Crystal Fiber

Shao Min<sup>1</sup>, Sun Haonan<sup>1</sup>, Zhang Rong<sup>1</sup>, Liu Yinggang<sup>1</sup>, Qiao Xueguang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Science, Xi'an Shiyu University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

<sup>2</sup> School of Physical, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China

**Abstract** A fiber-optic Michelson interferometer based on a photonic crystal fiber (PCF) is proposed, constructed by fusing a piece of PCF and a single-mode fiber (SMF). The taper between the SMF and the PCF works as a coupler. It excites the high-order cladding modes and couples the fundamental mode of the core and high-order cladding mode after being reflected by the end face of the PCF to form an intermodal interference. Since all the air holes in the PCF are exposed to the environment, the moisture and the fiber are fully affected, effectively improving the sensor's humidity sensitivity. The experimental results show that the humidity sensitivity of the designed sensor is  $-0.095$  dB/% with a linearity of 0.998 in a 30%–90% relative humidity range. The temperature sensitivity is 0.008 nm/°C with a linearity of 0.997 from 20 °C–100 °C, and error in the humidity measurement, caused by temperature, is 0.01%/°C. The stability experiment indicates a humidity standard deviation of 0.25%, and the human breathing test shows a sensor response time of 190 ms. Importantly, the designed sensor has a simple structure, high sensitivity, good stability, fast response time, and is easy to fabricate, indicating excellent potential in humidity detection applications.

**Key words** fiber optics; humidity sensor; Michelson interferometer; photonic crystal fiber; humidity sensitivity

**OCIS codes** 060.2310; 280.4788; 060.2370; 060.5295

## 1 引 言

光纤湿度传感器因具有尺寸小、耐腐蚀、抗电磁干扰、灵敏度高等优势而受到了广泛关注。目前,研

究者们已研制出多种光纤湿度传感器,根据传感原理,传感器可分为光纤光栅型<sup>[1-3]</sup>、倏逝场型<sup>[4-5]</sup>及干涉型<sup>[6-11]</sup>。其中,干涉型光纤湿度传感器主要有三种,即迈克耳孙干涉仪(MI)、马赫-曾德尔干涉仪

收稿日期: 2020-03-31; 修回日期: 2020-07-15; 录用日期: 2020-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(61805197,61927812)

\* E-mail: shaomin@xsyu.edu.cn

(MZI)、法布里-珀罗干涉仪(FPI),这些干涉型光纤湿度传感器具有结构设计灵活和灵敏度高等优点。所使用的光纤除单模光纤(SMF)外,还有多模光纤(MMF)、空芯光纤(HF)及光子晶体光纤(PCF)等。

光子晶体光纤是近年来出现的一种新型微结构光纤,其纤芯是石英或空气孔,包层由沿轴向排列的空气孔和石英组成。由于光子晶体光纤具有无截止波长单模传输、大模场面积、高双折射效应等特性,在光纤传感与通信领域应用广泛。关于光子晶体光纤应用于湿度传感器研制的研究较多,2012年,Mathew等<sup>[12]</sup>提出一种在光子晶体光纤空气孔中填充琼脂糖的湿度传感器。2013年,Li等<sup>[13]</sup>通过在光子晶体光纤表面涂覆聚乙烯醇实现了湿度测量。2017年,Lopez-Torres等<sup>[14]</sup>通过在光子晶体光纤表面涂覆一层SnO<sub>2</sub>纳米材料制得湿度传感器。2018年,Tong等<sup>[15]</sup>将石墨烯量子点涂覆在光子晶体光纤表面进行湿度测量。上述基于光子晶体光纤的湿度传感器均是通过填充或涂敷湿敏材料来提高传感器的湿度响应特性。湿敏材料能够有效提高传感器的湿度灵敏度,但湿度传感器性能会受湿敏材料的影响,同时,温度、湿度交叉敏感问题也有待解决。而且湿敏材料的制备、涂覆或填充过程也会增加传感器的制造难度和成本。

本文设计了一种基于光子晶体光纤的湿度传感器。在该传感器中,通过熔接单模光纤与光子晶体

光纤形成粗锥结构,从而激发高阶包层模。由于光子晶体光纤的空气孔完全暴露在空气中,环境湿度的变化会引起光纤包层中高阶模传播常数和光纤端面反射率的改变,因此调制干涉条纹,通过检测传感器的反射光谱就可得到环境湿度的变化信息。所设计的传感器未使用湿敏材料进行增敏,传感器制作简单、结构紧凑、稳定性好、机械强度高,具有良好的应用前景。

## 2 传感器原理

传感器结构如图1所示,在一根单模光纤的一端熔接一段光子晶体光纤,其中熔接点为光纤粗锥。传感器的原理为由光源发出的光经单模光纤入射至光子晶体光纤,由于粗锥处光纤直径突然增大,单模光纤中一部分能量进入光子晶体光纤的包层部分,并激发出光子晶体光纤的包层模。其余部分光仍沿着光子晶体纤芯继续传输,即纤芯基模。纤芯基模和包层模经光子晶体光纤端面反射后继续在光子晶体光纤中传输,当再次到达光纤粗锥时,包层内的光重新耦合进纤芯,与纤芯基模发生干涉并从单模光纤输出。

由于不同模式的光的传播常数不同,因此纤芯与包层中的光在经过相同的传播距离后重新在光纤粗锥处耦合时会产生相位差。由干涉理论可知,迈克耳孙干涉仪的输出光强<sup>[16]</sup>为

$$I = (I_{\text{core}} + \sum_m I_{\text{cladding}}^m + \sum_m 2\sqrt{I_{\text{core}} \cdot I_{\text{cladding}}^m} \cos \Delta\varphi_1 + \sum_{m,n} 2\sqrt{I_{\text{cladding}}^m \cdot I_{\text{cladding}}^n} \cos \Delta\varphi_2) \cdot R, \quad (1)$$

式中: $I_{\text{core}}$ 、 $I_{\text{cladding}}^m$ 和 $I_{\text{cladding}}^n$ 分别为参与干涉的纤芯基模、第 $m$ 阶包层模和第 $n$ 阶包层模的光强; $\Delta\varphi_1$ 为纤芯基模与第 $m$ 阶包层模的相位差; $\Delta\varphi_2$ 为第 $m$ 阶包层模与第 $n$ 阶包层模的相位差; $R$ 为光子晶体光纤端面的反射率。相位差表示为

$$\Delta\varphi_{1,2} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff},2} L, \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为入射波长; $\Delta n_{\text{eff}}$ 为纤芯基模与第 $m$ 阶包层模的有效折射率差; $\Delta n_{\text{eff}2}$ 为第 $m$ 阶包层模与第 $n$ 阶包层模的有效折射率差; $L$ 为光子晶体光纤的长度。 $R$ 的表达式为

$$R = \left( \frac{n_{\text{core}} - n}{n_{\text{core}} + n} \right)^2, \quad (3)$$

式中: $n_{\text{core}}$ 和 $n$ 分别为纤芯和周围介质的折射率。

传感器的光子晶体光纤中有多个空气孔,而且在设计传感器时,这些空气孔全部暴露在环境中,使

得环境空气更容易进入。因为空气孔的折射率完全由环境空气决定,这意味着包层模的有效折射率与环境空气的湿度有关。当环境湿度发生改变时,高阶包层模的有效折射率会发生变化。而纤芯基模由于被包层阻隔,不与周围环境直接接触,环境空气的变化不会改变纤芯的有效折射率,因此各阶模式间的有效折射率差会随环境湿度的变化而变化。同时,光子晶体光纤的端面反射率也会随环境湿度改变而变化。由(1)式可知,这些因素都会引起传感器输出光强的变化,所以通过检测干涉光谱的光强变化来获得外界环境的湿度信息。

## 3 实验与讨论

实验中使用的单模光纤(SMF28, Corning公司)的纤芯/包层直径分别为9.1/125  $\mu\text{m}$ ,光子晶体

光纤的纤芯/包层直径分别为  $9.1/125 \mu\text{m}$ , 每个空气孔的直径为  $3 \mu\text{m}$ , 相邻两气孔间距为  $9.3 \mu\text{m}$ , 光子晶体光纤包层中的气孔围绕纤芯按正六边形排列, 如图 1(b) 所示。使用光纤熔接机 (SI77B, Furukawa 公司) 对两根光纤进行对芯熔接, 熔接前使用光纤切刀对两根光纤端面进行切割, 切割后端面应平整光滑。然后将准备好的两根光纤放置

在熔接机夹具上, 采用手动熔接的方法, 熔接参数是熔接强度为  $130 \text{ mA}$ 、熔接时间为  $1400 \text{ ms}$ 、推进距离为  $5 \mu\text{m}$ , 当光纤处于熔融状态时, 两边夹具沿轴向推进, 形成粗锥, 熔接完成后在电子显微镜下的粗锥结构如图 1(c) 所示。最后对光子晶体光纤进行切割, 即可得到具有不同长度的光子晶体光纤干涉仪。

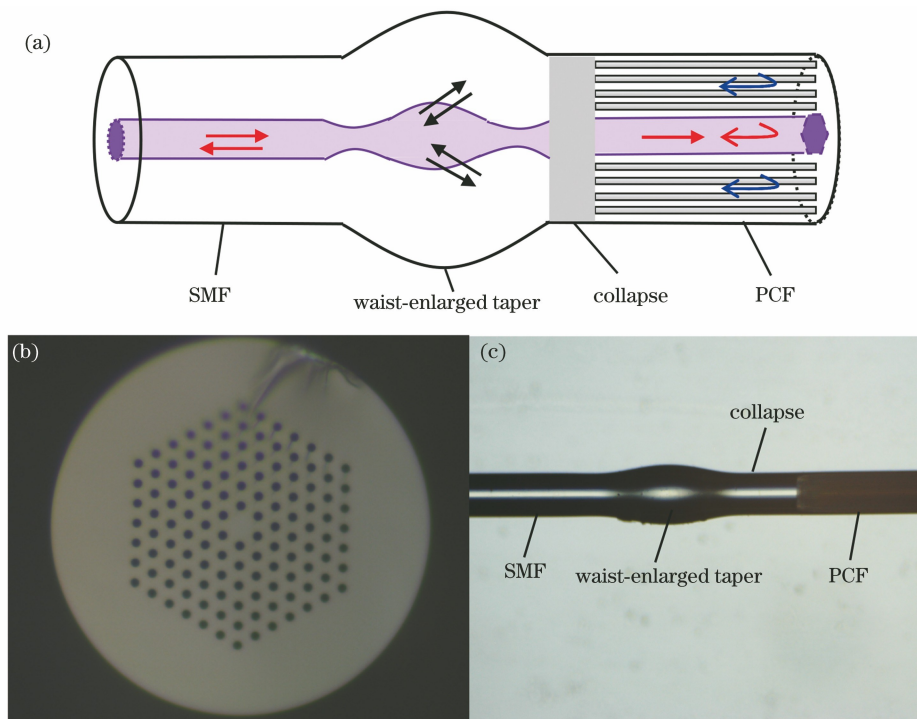


图 1 传感器结构图与光纤照片。(a)传感器结构示意图;(b)PCF 端面示意图;(c)电子显微镜下的粗锥结构

Fig. 1 Diagram of sensor structure and fiber photo. (a) Schematic of the designed sensor structure;

(b) cross sectional view of PCF; (c) microscope image of waist-enlarged taper

图 2 是不同长度光子晶体光纤干涉仪的反射光谱, 可以观察到清晰的干涉条纹。当光子晶体光纤长度为  $8, 11, 16 \text{ mm}$  时, 反射光谱的条纹对比度分别为  $4.5 \text{ dB}, 9.1 \text{ dB}, 10.0 \text{ dB}$ 。该传感器尽管未镀制金属增反膜, 但仍可获得较高的干涉条纹对比度, 说明所设计方法可行。

为了讨论传感器的模式干涉原理, 对图 2 光谱进行快速傅里叶变换, 得到空间频谱, 如图 3 所示。由图 3 可知, 每个传感器的空间频谱中均有一个明显的主峰和几个较弱的次峰, 说明有多个模式参与了干涉, 其中一个模式为主要模式, 它决定干涉光谱的主要轮廓。

湿度传感实验装置如图 4 所示, 将传感器样品的一端固定在一载玻片上, 另一端与解调仪 (Micron Optics sm125) 相连。密封湿度箱内放置一盛有饱和  $\text{NaCl}$  溶液的烧杯, 用来提供湿度环境。

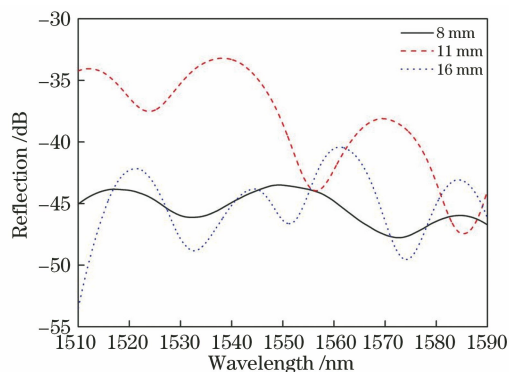


图 2 不同 PCF 长度的传感器的反射光谱

Fig. 2 Reflection spectra of the designed sensor with different PCF lengths

将电子湿度计的探测头 (AR837, Smart Sensor) 置于湿度箱内, 用来标定实验过程中的湿度。实验中湿度箱内的相对湿度 (RH) 从  $30\%$  增至  $90\%$ , 湿度值稳定后每间隔  $10\%$  记录传感器的反射光谱。湿

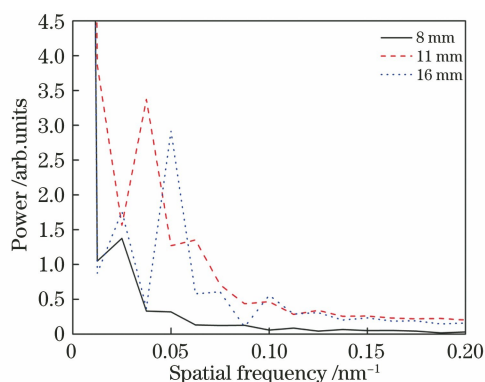


图 3 不同 PCF 长度的传感器的空间频谱  
Fig. 3 Spatial frequency spectra of the designed sensor with different PCF lengths

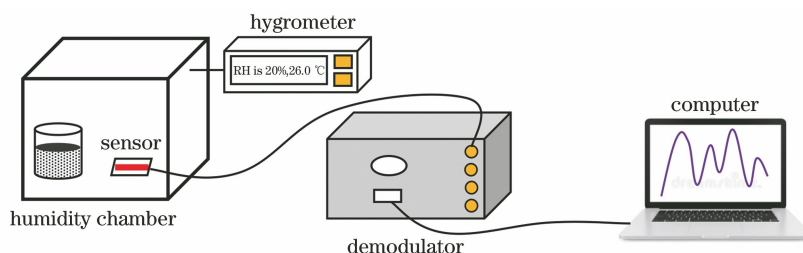


图 4 湿度传感实验装置  
Fig. 4 Setup of humidity sensing experiment

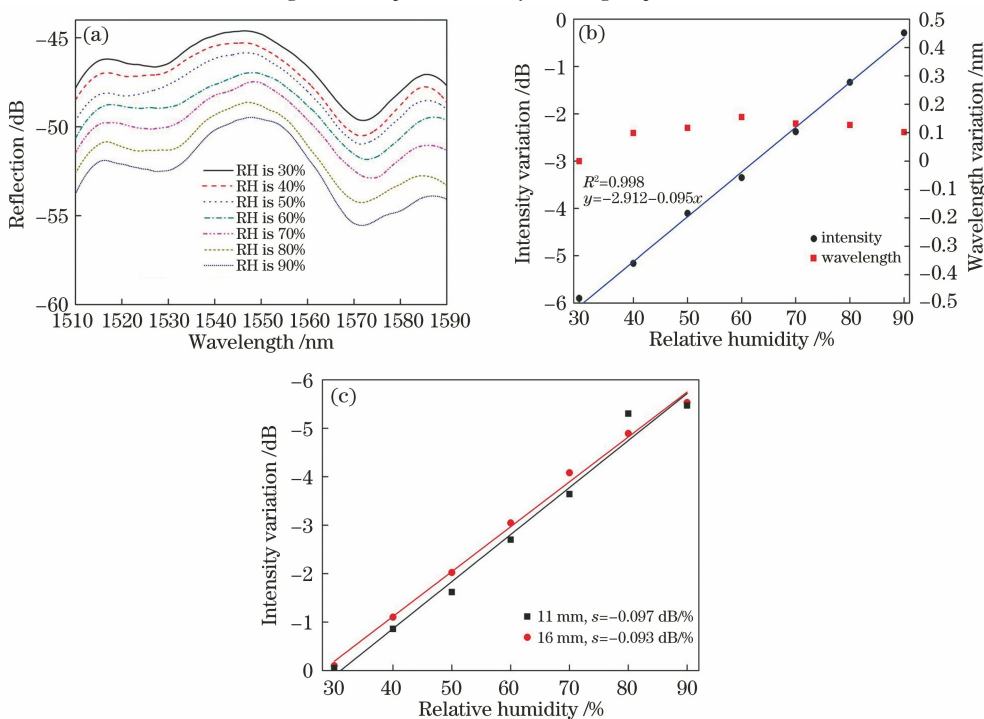


图 5 传感器湿度响应。(a)不同相对湿度下传感器的反射光谱;(b)强度和波长随相对湿度的变化曲线;  
(c)不同 PCF 长度传感器的相对湿度灵敏度曲线  
Fig. 5 Humidity response of the sensor. (a) Reflection spectra of the designed sensor under different relative humidities;  
(b) intensity and wavelength varying with relative humidity; (c) relative humidity sensitivity of the designed sensor with different PCF lengths

度实验中,温度保持在 26.0 °C。

实验中,先对长度为 8 mm 的光子晶体光纤传感器进行湿度响应测试,在不同相对湿度下的反射光谱如图 5(a)所示。可以看出,随着环境相对湿度增加,反射光谱的光强发生明显变化,而波长漂移相对较小。随着湿度增加,位于 1516 nm 处的干涉峰的强度变为 5.7 dB。图 5(b)为干涉谷的强度和波长随湿度的变化曲线,实验结果表明,在相对湿度为 30%~90%时,传感器灵敏度  $s$  为  $-0.095$  dB/%,线性拟合度为 0.998。相对湿度引起的波长变化量最大为 0.15 nm,引起波长改变的主要原因是随着相对湿度增加,有少量水分子会依附在光纤表面,存在着一定的应力,这使传感器的光谱发生漂移。

对光子晶体光纤长度为 11 mm 和 16 mm 的传感器也分别进行湿度传感实验研究,结果如图 5(c) 所示。光子晶体光纤长度为 11 mm 和 16 mm 的相对湿度灵敏度分别为  $-0.097 \text{ dB}/\%$  和  $-0.093 \text{ dB}/\%$ , 线性拟合度分别为 0.970 和 0.993。可以看出,光子晶体光纤长度对传感器的灵敏度有一定的影响,通过优化长度,可以获取较高的湿度灵敏度。

温度传感实验研究中,将光子晶体光纤长度为 8 mm 的传感器放入温箱中,温度从  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  逐渐升至

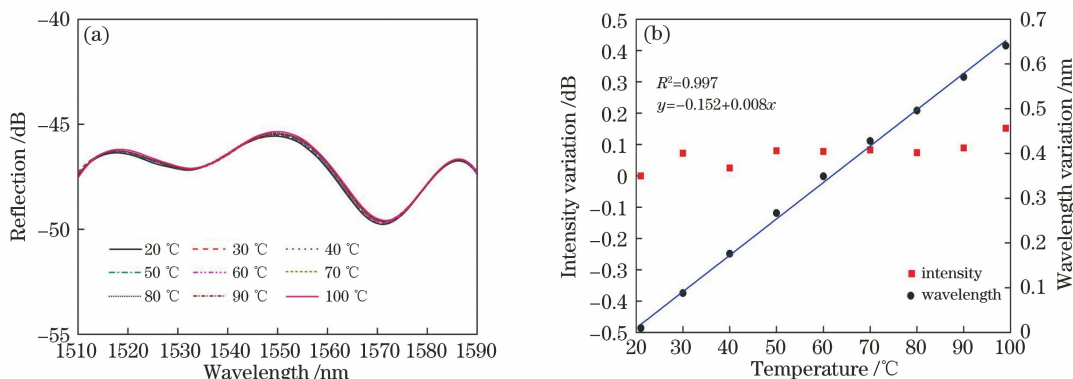


图 6 传感器温度响应。(a)不同温度下传感器的反射光谱;(b)强度和波长随温度的变化曲线  
Fig. 6 Sensor's temperature response. (a) Reflection spectra of the designed sensor under different temperatures; (b) intensity and wavelength varying with temperature

稳定性是衡量传感器性能的参数之一,故对传感器进行稳定性测试。将传感器放置在温湿度恒定的密封箱内( $20\%$ ,  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ),持续监测 60 min,传感器的反射光谱及强度随时间的变化如图 7 所示。计算得到相对湿度的标准误差为  $0.25\%$ ,这高于之前报道的基于错位熔接的湿度传感器( $0.49\%$ )<sup>[16]</sup>,也高于文献[17]报道的基于涂覆壳聚糖的湿度传感器( $0.46\%$ ),说明所设计的传感器具有较好的稳定性,在实际应用中具有较大潜力。

湿度传感器的另一个重要参数就是响应时间。实验中,将传感头放在靠近人嘴的位置,测量人在呼吸过程中产生的湿度变化。呼吸实验中使用的解调仪(Micron Optics si155)的采样频率为 5 Hz,实验结果如图 8 所示。图 8 给出了 5 s 内传感器对 5 次呼吸的响应,显示传感器的响应时间和恢复时间为 190 ms,表明所设计的传感器具有较好的重复性。

对已报道的基于光子晶体光纤的湿度传感器进行总结,如表 1 所示。从表 1 可知,大部分湿度传感器都采用涂覆或填充湿敏材料的方式。所设计的传感器没有选择任何湿度增敏技术,避免了温度变化导致湿敏材料性质不稳所引起的传感器性能的变

化,节约成本的同时也降低了传感器的制作难度,且湿度灵敏度高于同类型的迈克耳孙干涉仪式湿度传感器。文献[19]的湿度灵敏度较高,但是该传感器的温度测量范围仅为  $20\sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ,这在实际应用中是不够的,且温度引起的测量误差为  $0.016\%/^\circ\text{C}$ ,高于本文的测量误差。对比结果表明,所设计的传感器还具有较快的响应速度,这说明其具有较大的应用价值。

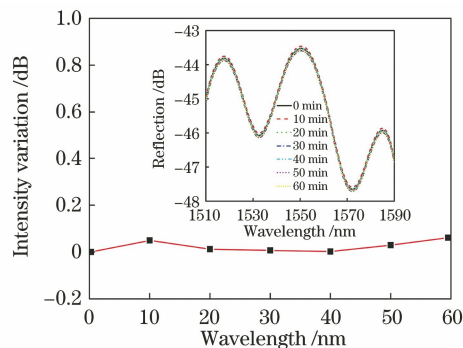


图 7 传感器的稳定性,插图为传感器在 RH 为  $20\%$ , 温度为  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  时的反射光谱

Fig. 7 Stability of the designed sensor, inset is reflection spectra at RH of  $20\%$ , temperature of  $27 \text{ }^\circ\text{C}$

化,节约成本的同时也降低了传感器的制作难度,且湿度灵敏度高于同类型的迈克耳孙干涉仪式湿度传感器。文献[19]的湿度灵敏度较高,但是该传感器的温度测量范围仅为  $20\sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ,这在实际应用中是不够的,且温度引起的测量误差为  $0.016\%/^\circ\text{C}$ ,高于本文的测量误差。对比结果表明,所设计的传感器还具有较快的响应速度,这说明其具有较大的应用价值。

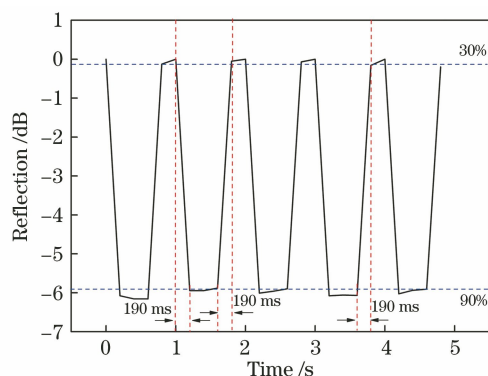


图 8 传感器的响应时间

Fig. 8 Response time of the designed sensor

## 4 结 论

设计制作了一种基于光子晶体光纤的迈克耳孙干涉仪式湿度传感器,其中单模光纤与光子晶体光纤在熔接时形成粗锥。光纤粗锥不仅增加了传感器的机械强度,而且更利于激发高阶模,提高了模式间耦合效率。实验结果表明:在 30%~90% 的相对湿度范围内,传感器的湿度灵敏度为  $-0.095 \text{ dB}/\%$ ,线性拟合度为 0.998;在  $20\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$  的温度范围内,传感器的温度灵敏度为  $0.008 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,线性拟合度为 0.997,温度引起的湿度测量误差为  $0.01\%/\text{ }^\circ\text{C}$ ;稳定性实验结果表明,传感器的相对湿度的测量标准

表 1 基于 PCF 的湿度传感器对比

Table 1 Comparison of humidity sensors based on PCF

Sensor structure	Coating or filling materials	Relative humidity range /%	Temperature range / $^\circ\text{C}$	Relative humidity sensitivity	Temperature sensitivity	Rise/Recovery time
MI <sup>[12]</sup>	Coating agarose	14–86	20–80	0.06 dB/%	0.066 dB/ $^\circ\text{C}$	400/500 ms
MZI <sup>[13]</sup>	Coating PVA	20–95	20–60	40.9 pm/%	3.1 pm/ $^\circ\text{C}$	
MZI <sup>[14]</sup>	Coating SnO <sub>2</sub>	20–90	15–40	0.96 nm/%	4.03 pm/ $^\circ\text{C}$	360/376 ms
MZI <sup>[15]</sup>	Coating GQDs	48–78	20–32	0.09 nm/%	0.235 nm/ $^\circ\text{C}$	
MI <sup>[18]</sup>	Coating PVA	30–90	22–50	0.6 nm/%	0.029 nm/ $^\circ\text{C}$	300/500 ms
MZI <sup>[19]</sup>	Filling agarose	20–80	20–55	2.2 dB/%	0.035 dB/ $^\circ\text{C}$	200/230 ms
MI		30–90	20–100	$-0.095 \text{ dB}/\%$	$0.008 \text{ nm}/^\circ\text{C}$	190/190 ms

误差为 0.25%;呼吸测试显示,传感器的响应时间为 190 ms。与基于涂覆或填充湿敏材料的光子晶体光纤型湿度传感器相比,所设计的传感器具有制作简便、造价低廉、灵敏度高、稳定性好、测量准确、响应快等优点,在湿度传感领域具有巨大的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Woyessa G, Nielsen K, Stefani A, et al. Temperature insensitive hysteresis free highly sensitive polymer optical fiber Bragg grating humidity sensor [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (2): 1206-1213.
- [2] Wang Y Q, Shen C Y, Lou W M, et al. Fiber optic relative humidity sensor based on the tilted fiber Bragg grating coated with graphene oxide [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(3): 031107.
- [3] Geng J, Zhu X J, Zhang G A, et al. Bandwidth tunable microfiber-assisted Mach-Zehnder interferometer based on tapered-drawing fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (3): 0306004.
- [4] Liu Y, Zhang N, Li P, et al. Nanopatterned evanescent-field fiber-optic interferometer as a versatile platform for gas sensing [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 301: 127136.
- [5] Azad S, Sadeghi E, Parvizi R, et al. Sensitivity optimization of ZnO clad-modified optical fiber humidity sensor by means of tuning the optical fiber waist diameter [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 90: 96-101.
- [6] Wang P P, Ni K, Wang B W, et al. Methylcellulose coated humidity sensor based on Michelson interferometer with thin-core fiber [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 288: 75-78.
- [7] Liu H F, Miao Y P, Liu B, et al. Relative humidity sensor based on S-taper fiber coated with SiO<sub>2</sub> nanoparticles [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15 (6): 3424-3428.
- [8] Zhao Y, Li A W, Guo Q, et al. Relative humidity sensor of S fiber taper based on graphene oxide film [J]. *Optics Communications*, 2019, 450: 147-154.

- [9] Peng J K, Qu Y P, Wang W J, et al. Thin-film-based optical fiber Fabry-Perot interferometer used for humidity sensing[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(12): 2967-2972.
- [10] Shao M, Han L, Zhao X, et al. Liquid level sensor based on in-fiber Michelson interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328021.  
邵敏, 韩亮, 兆雪, 等. 基于在线型光纤迈克耳孙干涉仪的液位传感器[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328021.
- [11] 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.  
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.
- [12] 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.
- [13] Li T, Dong X Y, Chan C C, et al. Humidity sensor with a PVA-coated photonic crystal fiber interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(6): 2214-2216.
- [14] Lopez-Torres D, Elosua C, Villatoro J, et al. Enhancing sensitivity of photonic crystal fiber interferometric humidity sensor by the thickness of SnO<sub>2</sub> thin films [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 251: 1059-1067.
- [15] 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.
- [16] Sun H N, Shao M, Han L, et al. Large core-offset based in-fiber Michelson interferometer for humidity sensing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 55: 102153.
- [17] Hu P B, Dong X Y, Ni K, et al. Sensitivity-enhanced Michelson interferometric humidity sensor with waist-enlarged fiber bitaper [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 194: 180-184.
- [18] Wong W C, Chan C C, Chen L H, et al. Polyvinyl alcohol coated photonic crystal optical fiber sensor for humidity measurement[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 174: 563-569.
- [19] Gao R, Jiang Y, Ding W H. Agarose gel filled temperature-insensitive photonic crystal fibers humidity sensor based on the tunable coupling ratio [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 195: 313-319.