

激光与光电子学进展

基于静电纺丝纳米纤维膜的光纤温湿度传感器

邓理¹, 张建奇¹, 孙浩^{1*}, 李金泽¹, 马天鸿¹, 李立彤², 洪登²

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

²长飞光纤光缆股份有限公司光纤光缆制备技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430073

摘要 设计一种由锥形无芯光纤级联光纤布拉格光栅组成的温湿度传感器,并在锥区采用静电纺丝的方式制备一层聚乙烯醇/羧甲基纤维素的复合纳米纤维膜。湿度的变化可以改变纳米纤维膜的有效折射率和厚度,从而影响光纤中光的传输损耗,进而使输出光谱功率发生变化,温度的波动会引起光纤光栅中心波长的漂移,通过监测输出光谱波峰功率和中心波长的变化量即可实现温湿度传感。对所设计的传感器进行温湿度响应测试,传感器的相对湿度灵敏度为 0.0198 dB/%,相对温度灵敏度为 11.730 pm/°C。结果表明静电纺丝法是一种制备光纤传感器表面湿度敏感涂层的有效方法。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 温湿度传感; 静电纺丝; 聚乙烯醇; 羧甲基纤维素

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0906006

Optical Fiber Temperature and Humidity Sensor Based on Film Prepared by Electrospinning Nanofibers

Deng Li¹, Zhang Jianqi¹, Sun Hao^{1*}, Li Jinze¹, Ma Tianhong¹, Li Litong², Hong Deng²

¹School of Physics and optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

²State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Yangtze Optical Fiber and Cable Joint Stock Limited Company, Wuhan, Hubei 430073, China

Abstract A temperature and humidity sensor based on cascaded fiber Bragg gratings comprising tapered coreless fibers is designed. A composite nanofiber membrane is prepared for this sensor comprising a layer of polyvinyl alcohol/carboxymethyl cellulose nanofibers, each containing a biconical connector prepared by electrospinning in the cone area. Changes in humidity change the effective refractive index and thickness of the nanofiber film, thereby affecting the transmission loss of light through the fiber, and then changing the output spectral power. In addition, temperature fluctuations cause the center wavelength of the fiber grating to shift. Monitoring the peak power and peak wavelength of the output spectrum (changes in the center wavelength) enables temperature and humidity sensing. Temperature and humidity response tests are performed on the designed sensor. The relative humidity sensitivity of the sensor is 0.0198 dB/%, and the relative temperature sensitivity is 11.730 pm/°C. Results show that electrospinning is an effective method for preparing moisture-sensitive coatings on the surface of optical fiber sensors.

Key words fiber optics; optical fiber sensor; temperature and humidity sensor; electrospinning; polyvinyl alcohol; carboxymethyl cellulose

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.3735

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-10-08; 录用日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(61705172)、光纤光缆制备技术国家重点实验开放课题基金(SKLD1907)、湖北省自然科学基金面上项目(2018CFB457)、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2020GZKF007)

*E-mail: hsun@xidian.edu.cn

1 引言

温度和湿度是人们在日常生活中接触最多的物理量,人们的饮食活动和动植物的生存繁衍均与环境的温湿度紧密相连,而且在机械制造、航空航天、医疗、制药、石油和化工等领域对温湿度的精确掌控均有着较高的要求。随着社会经济的发展,各行各业对温湿度指标的要求更严格,对温湿度传感器各方面性能的要求也越来越高。传统的温湿度传感器在某些极端的环境中使用会受到限制,但是光纤传感器具有抗电磁干扰、灵敏度高、质量轻、体积小、耐腐蚀和电绝缘等诸多优点,因此近年来光纤温湿度传感器受到越来越多科研人员的关注。

由于光纤本身的材质对湿度不敏感,所以大部分光纤湿度传感器都需要在光纤的表面上涂覆一层湿敏涂层,用来增强光纤传感器的湿度敏感特性。因水溶性高分子化合物具有强亲水性,在水中溶解或溶胀可以形成特定的水溶液或分散体系,又因其对湿度变化非常敏感,可用在由湿敏材料制作的湿度传感器中^[1]。近年来,研究者们利用高分子化合物湿度敏感材料制作了多种光纤湿度传感器。2018年,柴敬等^[2]研制出了一种涂覆聚酰亚胺薄膜材料的光纤布拉格光栅湿度传感器,实验结果表明聚酰亚胺薄膜具有良好的湿度响应特性。2019年,王勇能等^[3]研究了一款基于光纤错位熔接的马赫-曾德尔干涉仪型光纤湿度传感器,并在此结构的表面上涂覆湿敏特性优良的明胶,该湿度传感器在 38.4%~73.4% 的相对湿度范围内的灵敏度最高可达 0.124 nm/%。2019年,Li等^[4]提出了一种基于空心光纤和羟丙基甲基纤维素水凝胶膜的光纤法布里-珀罗干涉仪相对湿度传感器,该传感器在 40%~99% 的相对湿度范围内具有良好的响应。

聚乙烯醇(PVA)是一种用途非常广泛的有机高分子化合物,颜色呈乳白色或微带黄色,形状为蜡状薄片或颗粒。PVA是一种重要的化工原料,可以用于加工木材粘合剂^[5]、塑料薄膜^[6]、织物处理剂^[7]、乳化剂^[8]和纸张涂层^[9]等。PVA可溶于水,微溶于二甲基亚砷,不溶于汽油、甲苯和甲醇等。PVA具有较好的保水性,因此可用作湿敏材料,近十年来研究者们报道了多种基于聚乙烯醇湿敏涂层的光纤湿度传感器。2012年,Wong等^[10]提出了涂覆PVA的光子晶体光纤湿度传感器,有9%的传感器显示出0.6 nm/%的高相对湿度的灵敏度。

2013年,Wang等^[11]通过聚乙烯醇涂层的菲涅耳反射型光纤传感器与阵列波导光栅对多点湿度进行测量。2018年,Shao等^[12]在SPR(Surface Plasmon Resonance)传感器上涂覆PVA膜,显示出了该传感器的相对湿度的灵敏度最高可达1.01 nm/%。羧甲基纤维素(CMC)是将天然的纤维通过化学改性的方法获得的一种阴离子型纤维素醚类化合物,其具有非常好的成膜性、保水性和生物可降解性,并且具有无毒性,使用安全^[13]。CMC外观通常呈粉末颗粒状,没有特殊气味,具有很强的吸湿性,分散于水中可以形成澄清胶体溶液^[14]。PVA分子链上有大量的羟基,为此其具有较强的亲水性,而CMC可作为改性剂对PVA进行改性,在PVA中添加CMC能够达到降低结晶度和增加膜渗透性能的目的。PVA和CMC的交联改性可以提高湿度敏感特性,因此PVA/CMC膜的亲水性优于纯PVA膜^[15]。

无芯光纤(NCF)是一种没有纤芯只有包层的光纤,而且NCF中的折射率都是相同的,因此可将NCF本身作为纤芯,将外界环境作为包层。NCF对外界环境的温度变化非常敏感,故可用作温度传感器的材料。对NCF进行拉锥可以提高折射率灵敏度,能够更容易感知外界环境的温度变化。2015年,Chen等^[16]使用NCF制作了温度补偿折射率传感器,同年Zhou等^[17]将单模光纤与涂覆金膜的NCF连接,用以制作折射率传感器。基于单模-无芯-单模的结构具有很大的发展潜力,光纤布拉格光栅(FBG)是通过改变光纤纤芯的折射率使其产生周期性变化而形成的光栅^[18]。当环境温度发生变化时,这会导致光栅的栅区周期和折射率发生变化,从而引起光栅的中心波长发生位移,通过检测中心波长的变化量即可检测环境温度。普通的FBG对湿度变化不敏感,因此可将温度用作光纤湿度传感器的温度校准之一。

综上,本文设计并制作一种基于PVA/CMC静电纺丝复合纳米纤维膜的光纤温湿度传感器。传感器由单模光纤(SMF)串联一段1 cm长的锥形NCF并级联上一段的FBG组成,锥区的最小直径约为30 μm ,PVA/CMC复合纳米纤维膜的厚度约为10 μm 。对传感器的温湿度响应特性进行测试,证明这种传感器具有良好的温湿度传感能力。

2 传感器的设计与制作

传感器的基本结构如图1所示,制作步骤如下。首先,使用米勒钳剥掉光纤表面的涂覆层,使用切

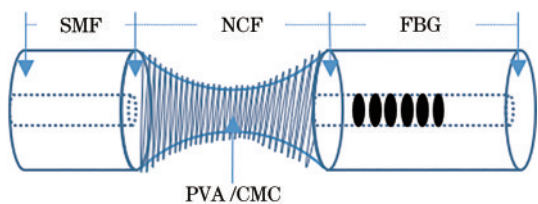


图 1 光纤温湿度传感器的结构

Fig. 1 Structure of optical fiber temperature and humidity sensor

割刀切平 SMF、NCF 和 FBG, 使用光纤熔接机将 SMF (纤芯直径为 $10\ \mu\text{m}$, 包层直径为 $125\ \mu\text{m}$)、NCF (直径为 $125\ \mu\text{m}$, 长度为 $5\ \text{mm}$) 和 FBG (中心波长为 $1560\ \text{nm}$, 反射率大于 90%) 熔接在一起。将熔接好的 NCF 使用光纤熔接机的拉锥模式进行拉锥, 经过多次试验确定放电电压为 $60\ \text{V}$, 放电时间为 $190\ \mu\text{s}$, 推进速度为 $0.75\ \text{mm/s}$, 在上述条件下能够形成较为稳定的锥形结构。将制作好的光纤结构放置在显微镜下, 使用光学显微镜观察锥区, 形貌如图 2 所示。从图 2 可以看到, 锥区的直径约为 $30\ \mu\text{m}$ 。最后, 在锥区上喷涂一层 PVA/CMC 复合纳米纤维。

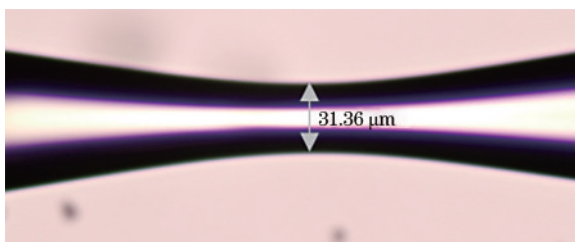


图 2 光学显微镜下的锥区图

Fig. 2 Cone area image under optical microscope

PVA/CMC 复合胶体溶液的制备步骤: 将 $1.6\ \text{g}$ 的 PVA (分析纯) 和 $0.2\ \text{g}$ 的 CMC (分析纯) 混合加入到 $20\ \text{mL}$ 的去离子水中, 然后将混合溶液使用磁力搅拌机搅拌 $1\ \text{h}$, 直到溶质完全溶解且溶液分布均匀。

采用静电纺丝法制备 PVA/CMC 复合纳米纤维膜的步骤: 将拉锥后的 NCF 使用夹具固定在金属板上, 并放置在静电纺丝机中; 接着使用注射器吸取一定量的 PVA/CMC 混合溶液, 并安装在静电纺丝机的高精密推注装置上; 然后将注射器对准锥区, 正极 (注射器) 和负极 (收集器) 之间的距离为 $15\ \text{cm}$, 在电压为 $18.5\ \text{kV}$ 的强电场中, 推料速度设为 $0.0015\ \text{mm/s}$, 推料时间设为 $4\ \text{min}$, 在强电场的作用下, 喷射形成的 PVA/CMC 纳米纤维丝附着在光纤锥区的表面, 如图 3 所示; 最后, 将制作好的传感器放在干燥箱中保存 $12\ \text{h}$, 使喷射的 PVA/CMC 纳米纤维丝能够稳定地附着在光纤上。使用扫描电子显微镜观察静电纺丝后的光纤形态, 如图 4 所示。从图 4 可以看到, 纳米纤维已经密集牢靠地依

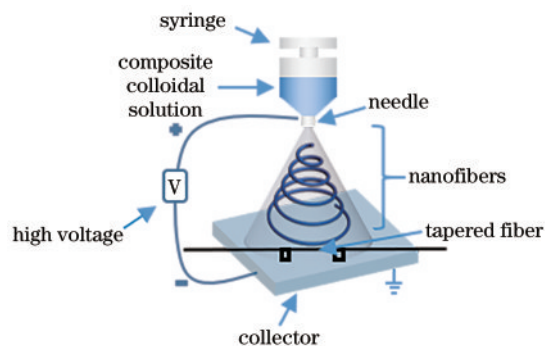


图 3 静电纺丝示意图

Fig. 3 Schematic of electrospinning

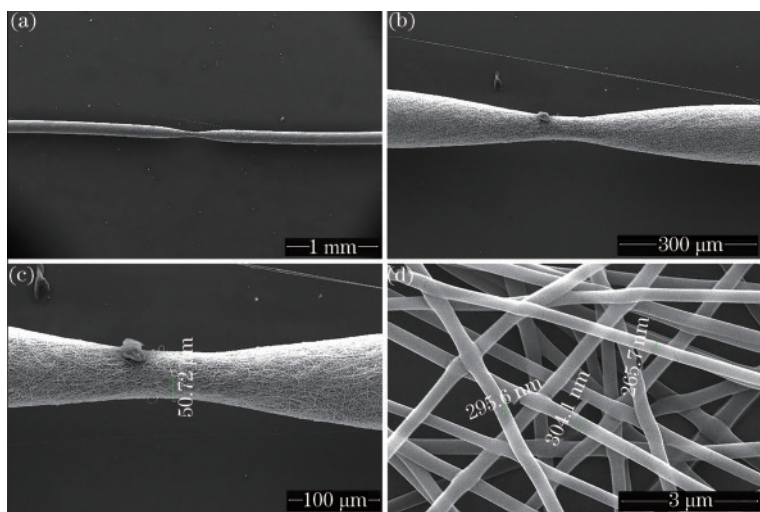


图 4 静电纺丝后的光纤形貌。(a) $100\times$; (b) $500\times$; (c) $1000\times$; (d) $50000\times$

Fig. 4 Optical fiber morphology after electrospinning. (a) $100\times$; (b) $500\times$; (c) $1000\times$; (d) $50000\times$

附在光纤表面,整个光纤上的纳米纤维分布均匀,说明制作的薄膜均匀性很好。从图4(c)可以看到,光纤锥区的直径约为 50 μm ,说明静电纺丝形成的纳米纤维素膜的厚度约为 10 μm 。从图4(d)可以看出,采用这种静电纺工艺制备的纳米纤维的直径约为 300 nm,表面光滑,相互之间交叉重叠,大多数纤维呈直线状。

3 实验与讨论

图5为光纤传感器的实验系统,包含波长范围为 1525~1610 nm 的宽带光源和型号为 YOKOGAWA AQ6370B 的光谱仪,光谱仪的测量波长范围为 600~1700 nm,动态测量范围为 70 dB。恒温恒湿箱型号为 BPS-50CL,其中 OSA 为光谱分析仪,BBS 为宽带光源。

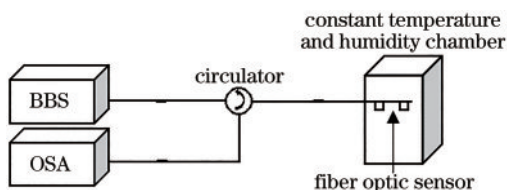


图5 传感器温湿度的测试装置示意图
Fig. 5 Schematic of sensor temperature and humidity test device

将制作的光纤传感器放置在恒温恒湿箱中并进行温湿度响应测试,传感器的应变及弯曲会对测量结果造成较大的影响,故将锥区部分固定成一条

直线,避免受到其他因素的干扰。宽带光源发出的光通过环形器后从 SMF 传输到 NCF 锥区中,由于 NCF 的模场直径会发生变化,为此一部分传输光将产生损耗;经过锥区后的入射光进入 FBG 栅区中,满足布拉格条件的光将被光栅反射回来并再次经过 NCF 锥区;最后反射光通过环形器后传输到光谱仪中。吸附水蒸气后,纳米纤维膜的折射率和厚度会发生相应的改变,最终引起光信号的传输损耗发生变化。将 FBG 作为反射滤光片,传输过来的光将由 FBG 反射后并再次经过 NCF,通过环形器后传输到光谱仪中,通过光谱仪观察反射光信号的变化即可实现湿度的测量。由于普通 FBG 的波长对湿度变化不敏感,而温度的改变会引起 FBG 的中心波长发生位移,因此可以通过监测 FBG 中心波长的变化来测量温度。

3.1 湿度响应测试

将恒温恒湿箱的温度固定在 50 $^{\circ}\text{C}$,由于受到湿度箱本身参数的限制,在 40%~80% 的相对湿度范围内,每隔 10% 记录一次实验数据。实验开始之前,将所设计的光纤传感器放置在恒温恒湿箱中保持 30 min,使其处于稳定的工作环境以减小实验误差,提高实验数据的可靠性,实验结果如图6所示,分别对应相对湿度增加过程和相对湿度减小过程的反射光谱变化量。从图6可以看到,随着相对湿度的增加,功率逐渐变大;相反,随着相对湿度的降低,功率逐渐变小。

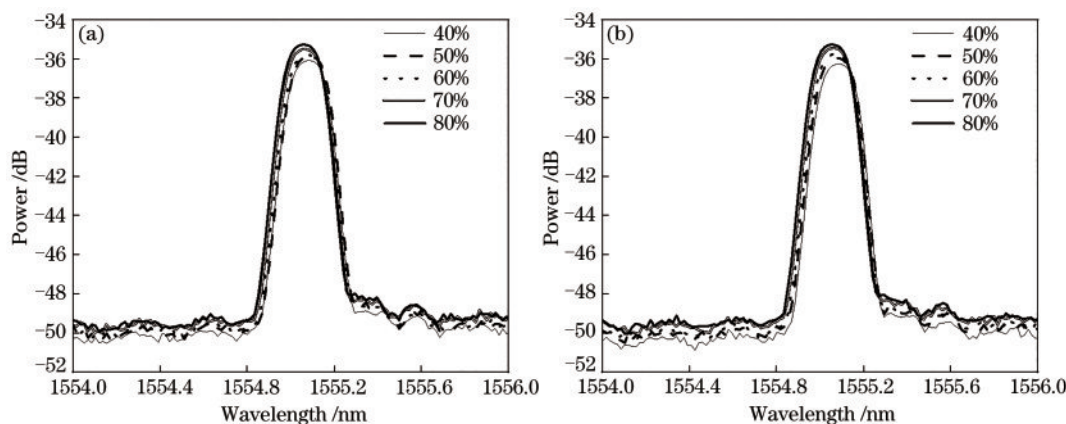


图6 反射光谱与相对湿度的关系。(a)相对湿度升高;(b)相对湿度降低
Fig. 6 Relationship between variation of reflectance spectrum and relative humidity. (a) Relative humidity increased; (b) relative humidity decreased

对两组数据进行拟合可以得到波峰的功率与不同相对湿度之间的关系,结果如图7所示。从图7可以看到,功率与相对湿度近似呈线性关系,拟合直线的差异主要是来自 PVA/CMC 纳米纤维

膜的湿滞效应。湿度响应拟合公式在相对湿度升高的过程中为 $y = 0.01978x - 36.8974$,降低的过程中为 $y = 0.02476x - 37.233$ 。拟合直线的斜率表示相对湿度每变化 1%,功率分别变化 0.1978 dB 和

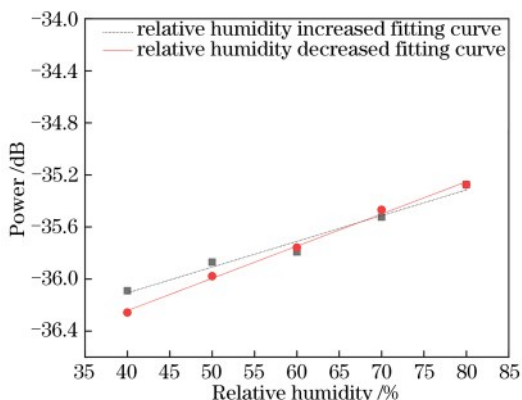


图 7 功率与相对湿度变化的拟合关系

Fig. 7 Fitting relationship between power and relative humidity

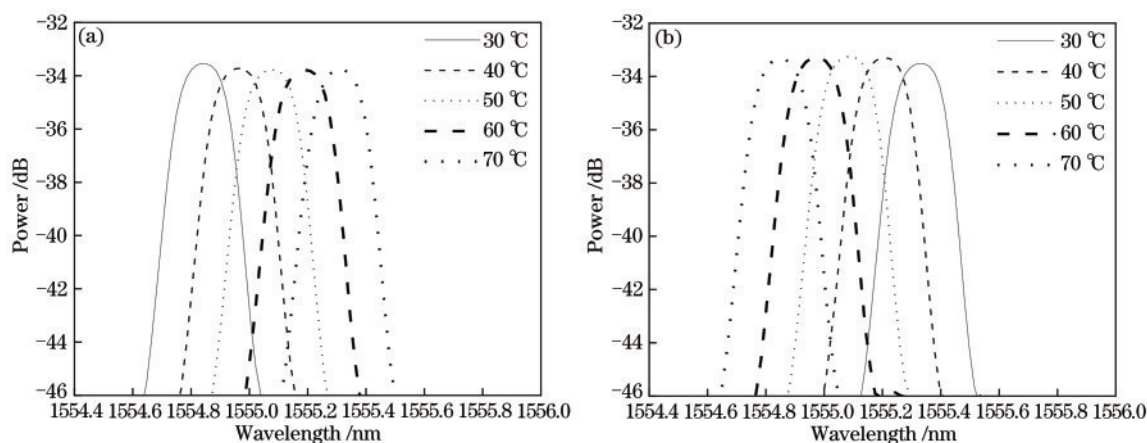


图 8 反射光谱与温度的关系。(a)温度升高;(b)温度降低

Fig. 8 Relationship between reflectance spectrum and temperature. (a) Temperature increased; (b) temperature decreased

对两组数据进行拟合可以得到中心波长与不同温度之间的关系,结果如图 9 所示。从图 9 可以看到,中心波长与温度近似呈线性关系。温度响应拟合公式在温度升高的过程中为 $y = 0.01173x +$

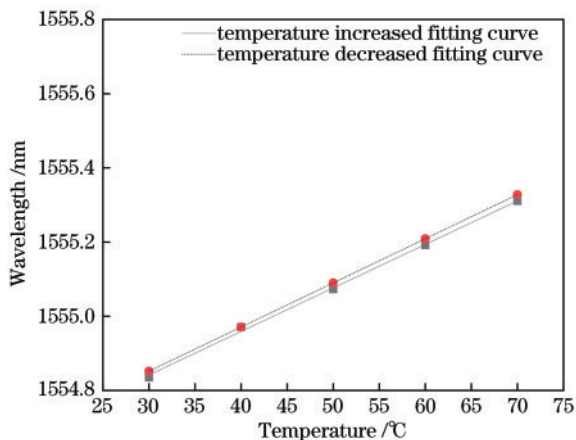


图 9 中心波长与温度的拟合关系

Fig. 9 Fitting relationship between center wavelength and temperature

0.2476 dB, 即湿度升高过程中的相对湿度灵敏度为 0.0198 dB/%, 湿度降低过程中的相对湿度灵敏度为 0.0248 dB/%, 实验结果表明所设计的湿度传感器对湿度响应灵敏。

3.2 温度响应测试

完成相对湿度的测量后,对传感器进行温度响应测试。将恒温恒湿箱的相对湿度固定在 50%, 因温度太高会引起水分蒸发,故温度设在 30~70 °C, 每隔 10 °C 记录一次实验数据。反射光谱随温度的变化关系如图 8 所示。从图 8 可以看到,随着温度的增加,中心波长向长波方向漂移;相反,随着温度的降低,中心波长向短波方向漂移。

1554.4899, 在温度降低的过程中为 $y = 0.0119x + 1554.495$ 。拟合直线的斜率表示温度每变化 1 °C, FBG 的中心波长漂移 11.730 pm 和 11.900 pm, 即温度升高过程中的灵敏度为 11.730 pm/°C, 温度降低过程中的灵敏度为 11.900 pm/°C, 实验结果符合光纤布拉格光栅的温度敏感特性。

比较几种光纤相对湿度传感器的性能指标,结果如表 1 所示。从表 1 可以看到,传感器可提供相对理想的湿度灵敏度和较宽的测量范围,性能均衡。

采用静电纺丝的方法在光纤锥区制备一层纳米纤维膜,通过监测传感器反射光谱的峰值功率和中心波长的变化,可以获取传感器所处环境的温度和湿度信息。PVA 和 CMC 的复合纤维是一种良好的湿敏材料,可用于制作光纤湿度传感器或其他类型的湿度传感器。静电纺丝是一种制备纳米纤维材料的良好处理方法,相比于传统涂覆的方法,其可以非常方便牢固地将湿敏材料固定在光纤的表面上,未来应用前景广阔,具有很高的研究价值。

表 1 几种光纤相对湿度传感器的性能指标

Table 1 Performance indicators of several optical fiber relative humidity sensors

Sensor structure	Relative humidity sensitivity /dB	Relative humidity detecting range /%	Coating material	Ref.
SMF-HCF-SMF	0.00542	35.0-85.0	None	[19]
Taper-fiber-MKR	0.03400	28.6-53.4	None	[20]
SMF-PCF	0.06000	14.0-86.0	Agarose gel	[21]
FBG-AI-PCFI	0.02600	20.0-60.0	Agarose	[22]

最后,对湿度和温度进行重复测量实验。实验结果表明,传感器的温度重复性非常好,这是因为温度测量是通过监测光纤布拉格光栅的中心波长来实现的,FBG在不受外力的情况下,温度传感器的稳定性和重复性都非常好;然而静电纺丝法制备的纳米纤维是无序堆叠在一起所形成的一层纤维膜,在温度和湿度重复测量过程中由于受到温湿度的影响,纳米纤维膜的微观结构会出现局部塌陷或变形,导致其湿度传感器的重复性不够理想。下一步工作重点就是通过改进静电纺丝的工艺参数和硬件设备来改善传感器的重复性。

4 结 论

本课题组提出并制作一种用于温湿度测量的光纤传感器,传感器由锥区涂覆PVA/CMC复合纳米纤维膜的NCF级联FBG组成。湿度会改变PVA/CMC纳米纤维膜的折射率和厚度,从而改变光信号的功率,温度会引起FBG的中心波长发生位移。实验结果表明,当湿度测量范围为40%~80%时,传感器在湿度上升过程中的相对湿度灵敏度为0.0198 dB/%,湿度降低过程中的相对湿度灵敏度为0.0248 dB/%;当温度测量范围为30~70℃时,传感器在温度上升过程中的灵敏度为11.730 pm/℃,温度降低过程中的灵敏度为11.900 pm/℃。该传感器具有成本低、结构简单和响应快的特点,可对传感器所处环境的温度和湿度进行同时检测。

参 考 文 献

- [1] Grudina N V, Bydanova V V, Grudin N S. Study of toxic properties of a high-molecular-weight water-soluble polymer[J]. Russian Agricultural Sciences, 2019, 45(1): 86-88.
- [2] Chai J, Liu Q, Zhang B, et al. Temperature and humidity coupling of physical model materials based on optical fiber humidity sensor[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38

(2): 210-216.

柴敬,刘奇,张渤,等.基于光纤湿度传感器的物理模型材料温湿度耦合研究[J].西安科技大学学报,2018,38(2):210-216.

- [3] Wang Y N, Shen C Y. Optical fiber humidity sensors based on Mach-Zehnder interference [J]. Journal of China University of Metrology, 2019, 30(4): 463-467.
王勇能,沈常宇.基于马赫-曾德干涉的光纤湿度传感器[J].中国计量大学学报,2019,30(4):463-467.
- [4] Li J Z, Zhang J Q, Sun H, et al. An optical fiber relative humidity sensor based on hollow-core fiber and hydroxypropyl methylcellulose hydrogel film [J]. Optik, 2019, 195: 163172.
- [5] Prosanov I Y, Abdulrahman S T, Thomas S, et al. Complex of polyvinyl alcohol with boric acid: structure and use[J]. Materials Today Communications, 2018, 14: 77-81.
- [6] Tian H F, Wang G H, Yao Y Y, et al. Preparation and properties of poly(vinyl alcohol) films with urea/formamide complex plasticizers [J]. China Plastics, 2018, 32(9): 113-117.
田华峰,王格涵,姚媛媛,等.尿素/甲酰胺复配增塑聚乙烯醇薄膜的制备及性能研究[J].中国塑料,2018,32(9):113-117.
- [7] Zhang Y, Wang Q, Yuan J G. Poly(vinyl alcohol)-degrading enzyme[M]//Cavaco-Paulo A, Nierstrasz V A, Wang Q. Advances in textile biotechnology. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2019: 21-36.
- [8] Alade O S, Sasaki K, Ademodi B, et al. Polyvinyl alcohol (PVA) as an emulsifying agent for viscosity reduction of heavy and extra-heavy oils[EB/OL]. [2020-09-23]. https://www.researchgate.net/publication/318063242_Polyvinyl_alcohol_PVA_as_an_emulsifying_agent_for_viscosity_reduction_of_heavy_and_extra-heavy_oils.
- [9] Zhu P H, Kuang Y D, Chen G, et al. Starch/polyvinyl alcohol (PVA)-coated painting paper with exceptional organic solvent barrier properties for art preservation

- purposes [J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53 (7): 5450-5457.
- [10] 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.
- [11] Wang X P, Zhao C L, Li J H, et al. Multipoint relative humidity measurement by polyvinyl alcohol-coated Fresnel reflection-based optical fiber sensors with an array-waveguide grating [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(4): 043114.
- [12] 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): E2029.
- [13] Hartings M, Douglass K O, Neice C, et al. Humidity responsive photonic sensor based on a carboxymethyl cellulose mechanical actuator [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 265: 335-338.
- [14] Tabari M. Investigation of carboxymethyl cellulose (CMC) on mechanical properties of cold water fish gelatin biodegradable edible films [J]. *Foods*, 2017, 6 (6): 41.
- [15] Li G, Dai J M, Bai J J, et al. Alternative deposition and characterization of hydroxyapatite on PVA/CMC blend film [J]. *Ion Exchange and Adsorption*, 2015, 31(5): 385-390.
李光, 戴家木, 白敬敬, 等. HA 在 PVA/CMC 共混膜上的交互沉积及其表征 [J]. *离子交换与吸附*, 2015, 31(5): 385-390.
- [16] Chen Y F, Han Q, Liu T G, et al. Self-temperature compensative refractometer based on singlemode-multimode-singlemode fiber structure [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 212: 107-111.
- [17] Zhou X, Chen K, Mao X, et al. A reflective fiber-optic refractive index sensor based on multimode interference in a coreless silica fiber [J]. *Optics Communications*, 2015, 340: 50-55.
- [18] 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.
耿健, 朱晓军, 章国安, 等. 基于光纤布拉格光栅拉锥的带宽可调微光纤马赫-曾德尔干涉仪 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0306004.
- [19] Liu N, Hu M L, Sun H, et al. A fiber-optic refractometer for humidity measurements using an in-fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Communications*, 2016, 367: 1-5.
- [20] Xu K, Li H Y, Liu Y J, et al. Optical fiber humidity sensor based on water absorption peak near 2- μm waveband [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 1-8.
- [21] 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.
- [22] Mathew J, Semenova Y, Farrell G. Fiber optic hybrid device for simultaneous measurement of humidity and temperature [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(5): 1632-1636.