

激光与光电子学进展

基于聚酰亚胺材料的光纤布拉格光栅湿度传感器

邢心魁^{1,2,3}, 蒋雪^{1,2,3}, 刘凡凡^{1,2,3}, 邝卡斌^{1,2,3}, 覃荷瑛^{1,2,3*}

¹桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;

²桂林理工大学有色金属矿产勘查与资源高效利用协同创新中心, 广西 桂林 541004;

³广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 提出了一种以聚酰亚胺(PI)为湿敏材料的FBG湿度传感器。首先,在PI毛细管内灌注PI溶液,以在光纤布拉格光栅(FBG)表面实现均匀涂膜。然后,用偶联剂增强湿敏材料和光栅之间的粘结。最后,制作了三组不同厚度和长度的湿度传感器,测试了其湿度传感特性和温度交叉敏感特性。实验结果表明,PI薄膜越厚,湿度传感器的拟合度越低,灵敏度越高,薄膜厚度为0.13 mm的FBG湿度传感器灵敏度为5.5 pm/%RH、量程为30%RH~98%RH、拟合度为0.99、非线性误差为2%,具有良好的可操作性、推广性和适用性。

关键词 传感器; 光纤传感器; 湿度传感器; 聚酰亚胺; 湿敏材料

中图分类号 TP212

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1328002

Fiber Bragg Grating Humidity Sensor Based on Polyimide Material

Xing Xinkui^{1,2,3}, Jiang Xue^{1,2,3}, Liu Fanfan^{1,2,3}, Kuang Kabin^{1,2,3}, Qin Heying^{1,2,3*}

¹School of Civil and Architectural Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

²Collaborative Innovation Center for Exploration of Nonferrous Metal Deposits and Efficient Utilization of Resources, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

³Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract This study proposes a fiber Bragg grating (FBG) humidity sensor using polyimide (PI) as a humidity-sensitive material. First, to homogeneously coat the FBG's surface, a PI solution is perfused into a PI capillary. Then, a coupling agent is used to strengthen the bond between the humidity-sensitive material and FBG. Finally, three groups of humidity sensors with different thicknesses and lengths are fabricated, and their humidity sensing and temperature cross-sensitivity characteristics are tested. The experimental results show that the thicker the PI film is, the lower the fitting degree is and the higher the humidity sensor's sensitivity is. The FBG humidity sensor with a film thickness of 0.13 mm shows a sensitivity of 5.5 pm/%RH, a detection range of 30%RH-98%RH, a fitting degree of 0.99, and a nonlinear error of 2%, with good operability, popularization, and applicability.

Key words sensors; fiber optic sensor; humidity sensor; polyimide; humidity sensitive material

1 引言

湿度是衡量水蒸气含量的重要参数,在工农业生产、生态工程、水文气象、化学医药和国防科技等领域都需要对湿度进行严格检测和控制^[1]。传统的湿度传感器大致分为电解质型、高分子材料型以及半导体陶瓷型等湿度传感器,这些传感器普遍存在长期稳定性差、测量精度低、响应速度慢、应用范围有限等问题。因此,如何提高湿度传感器的性能具有重要研究

价值^[2]。

相比传统的湿度传感器,光纤布拉格光栅(FBG)湿度传感器具有抗电磁干扰、尺寸小、传输距离远、耐腐蚀、耐高温、灵敏度高以及无源等优点^[3-4]。FBG本身对湿度不敏感,需要在FBG表面涂敷湿敏材料,根据其吸水膨胀、失水收缩引起的应变达到间接测试湿度的目的。对于FBG湿度传感器的研究主要从涂覆工艺、湿敏材料和涂覆区结构等方面进行。本文基于FBG的应变特性和湿敏材料的吸水性能,研究了以聚

收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2021-07-30; 录用日期: 2021-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(51768014)、广西创新驱动发展专项(桂科AA20302006)

通信作者: *qinheylinglx@163.com

酰亚胺(PI)作为湿敏材料的FBG湿度传感器。通过研究PI和栅区的耦合程度、不同湿敏薄膜厚度及涂覆区域不同长度对灵敏度的影响,确定了最佳传感器的制作方案,并对传感器的温湿灵敏度进行了研究。

2 FBG湿度传感器的原理

FBG在纤芯内沿轴向形成周期性的折射率变化,且只对符合布拉格条件波长附近的窄带光具有反射作用。根据耦合原理,反射光的中心波长可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中, λ_B 为反射光的中心波长, n_{eff} 为纤芯有效折射率, Λ 为FBG的周期。

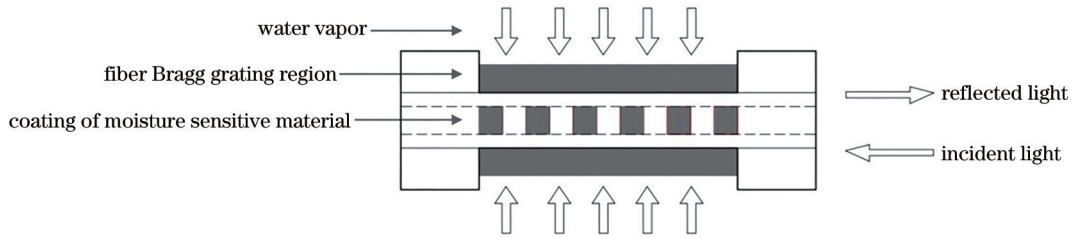


图1 FBG湿度传感器的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the FBG humidity sensor

涂覆PI材料的FBG中心波长漂移与相对湿度变化^[6]满足

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon_{\text{RH}} + (1 - P_e)\epsilon_T + [\xi + \alpha_{f(T)}]\Delta T, \quad (3)$$

式中, ϵ_{RH} 、 ϵ_T 分别为涂覆湿敏薄膜后光纤的湿膨胀应变和热膨胀应变^[7],可分别表示为

$$\epsilon_{\text{RH}} = \int_0^{\Delta X_{\text{RH}}} \beta(X_{\text{RH}}, T) dX_{\text{RH}}, \quad (4)$$

$$\epsilon_T = [\alpha_{P(T)} - \alpha_{f(T)}]\Delta T, \quad (5)$$

式中, X_{RH} 为湿度, β 为涂覆湿敏薄膜后光纤的湿膨胀系数。由弹性理论^[8]得到

$$\beta = \left(1 - \frac{C_o}{E_f V_f + E_p V_p} \cdot E_f V_f\right) [\alpha_{P(X_{\text{RH}})} - \alpha_{f(X_{\text{RH}})}], \quad (6)$$

式中, C_o 为湿敏薄膜与光纤表面之间结合系数, V_p 、 V_f 分别为薄膜和光纤的体积, E_p 、 E_f 分别为薄膜和光纤的杨氏模量, $\alpha_{P(X_{\text{RH}})}$ 、 $\alpha_{P(T)}$ 分别为湿敏薄膜的湿膨胀系数和热膨胀系数, $\alpha_{f(X_{\text{RH}})}$ 、 $\alpha_{f(T)}$ 分别为光纤的湿膨胀系数和热膨胀系数。将式(6)代入式(4),得到

$$\epsilon_{\text{RH}} = \left(1 - \frac{C_o}{E_f V_f + E_p V_p} \cdot E_f V_f\right) [\alpha_{P(X_{\text{RH}})} - \alpha_{f(X_{\text{RH}})}] \Delta X_{\text{RH}} \quad (7)$$

由于FBG自身对水分子不灵敏,即其湿膨胀系数 $\alpha_{f(X_{\text{RH}})}$ 几乎为0。在湿应变和热应变的同时作用下,存在

被测物理量(应变、温度)只要引起 n_{eff} 和 Λ 的变化,都会导致反射光中心波长的漂移。温度和应变引起的 λ_B 漂移^[5]可表示为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T, \quad (2)$$

式中, P_e 为光纤的弹光系数, ϵ 为作用在光纤上的轴向应变, α 为光纤的热膨胀系数, ξ 为光纤的热光系数, ΔT 为温度的变化量。

FBG对湿度不敏感,因此可以通过在FBG栅区涂覆一层湿敏材料(实验中选用PI)达到测量湿度变化的目的。PI具有良好的感湿性,当湿度发生变化时,PI涂层会吸湿发生膨胀引起应变,导致FBG的中心波长发生偏移。图1为PI湿度传感器的原理图。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \left[1 - \frac{E_f r_f^2 C_o}{E_f r_f^2 + E_p (t^2 + 2tr_f)} \right] \alpha_{P(X_{\text{RH}})} \Delta X_{\text{RH}} + (1 - P_e) [\alpha_{P(T)} - \alpha_{f(T)}] \Delta T + [\xi + \alpha_{f(T)}] \Delta T, \quad (8)$$

令 S_{RH} 、 S_T 分别为湿度和温度的灵敏度,可表示为

$$S_{\text{RH}} = (1 - P_e) \left\{ 1 - \frac{E_f r_f^2 C_o}{E_f r_f^2 + E_p [(t/2)^2 + 2(t/2)r_f]} \right\} \alpha_{P(X_{\text{RH}})}, \quad (9)$$

$$S_T = (1 - P_e) [\alpha_{P(T)} - \alpha_{f(T)}] + [\xi + \alpha_{f(T)}], \quad (10)$$

式中, r_f 为光纤半径, t 为湿敏薄膜的总厚度(涂覆湿敏薄膜后光纤直径与原始光纤直径的差),则式(3)可以变换为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = S_{\text{RH}} \Delta X_{\text{RH}} + S_T \Delta T. \quad (11)$$

由式(11)可以发现,湿度和温度对FBG中心波长变化的作用表现为相互独立和可线性叠加的;由式(9)、式(10)可以发现,通过增大湿敏材料的涂层厚度 t 和FBG与PI薄膜间的表面结合系数 C_o 或降低光纤包层厚度均可提高FBG湿度传感器的湿度灵敏度^[9]。湿敏薄膜的厚度在达到一定程度时,产生的力相对较大,若薄膜与光栅之间的结合力较弱,可能引起薄膜层和光栅之间发生滑移,从而影响传感器的性能,因此研究涂覆层厚度、涂覆层长度以及涂覆层与光栅之间的粘结方式是研制工作的重要内容。

3 FBG 湿度传感器的制作

3.1 湿敏材料的性能

PI 具有耐热、耐低温、耐辐射、阻燃和无毒的特性以及优异的机械性能、尺寸稳定性、化学稳定性和生物相容性等综合性能^[10-12],是目前湿敏综合性能最佳的有机高分子材料之一。作为湿敏材料,PI 具有良好的线性膨胀性,在高湿度和低湿度都具有很好的感湿特性。毛细管作为一种几何尺寸精密的材料,管径极小且表面光滑平整。实验结合质量分数为 20%、热膨胀系数为 $20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的 PI 溶液以及外径分别为 0.18、0.24、0.34、0.46、0.56 mm 的 PI 毛细管,以达到最优的涂覆效果。

3.2 FBG 栅区表面的预处理

为了提高传感器的灵敏度,在涂覆 PI 溶液之前进行 FBG 栅区表面预处理,并采用偶联剂作为预处理方法。选用 3-氨丙基三甲氧基硅烷($\text{C}_6\text{H}_{17}\text{NO}_3\text{Si}$)作为偶联剂^[13],该液体无色透明,不溶于水。进行 PI 溶液涂覆前,用酒精对栅区表面进行消毒处理,然后将栅区浸泡在 $\text{C}_6\text{H}_{17}\text{NO}_3\text{Si}$ 溶液中,1 min 后将其取出烘干备用。该偶联剂分别与 FBG 中的羟基和 PI 中的氨基结合,以提高 FBG 栅区与 PI 之间的结合力。

3.3 FBG 湿度传感器的制作

实验制作的 FBG 湿度传感器采用的单模光纤栅区长度为 10 mm,光纤外径为 0.211 mm,内径为 0.11 mm,中心波长为 (1536 ± 0.2) nm,用 PI 在其表面形成一层薄膜。实验样品规格如表 1 所示。其中,内径表示毛细管的内径,厚度为毛细管外径减去光栅内径的值。

表 1 实验样品的参数

Table 1 Parameters of experimental samples

Type	Outer diameter /mm	Inner diameter /mm	Thickness /mm
Sample	0.18	0.15	0.07
	0.24	0.20	0.13
	0.34	0.30	0.23
	0.46	0.40	0.35
	0.56	0.50	0.45

首先,用剥线钳将栅区的保护层剥掉,用酒精消毒并进行栅区预处理;然后,将长度不小于 10 mm 的毛细管套入光纤(非光栅区),把栅区浸泡在 PI 溶液中几秒后取出,将毛细管推向栅区,将多余的 PI 溶液挤出并放置在烘烤灯上使其初凝,且尽量使 FBG 在毛细管内居中;最后,把初凝的试件放置在烘干箱中烘干,升温至 100°C ,恒温处理 0.5 h,再升温至 150°C ,保温 40 min 后继续升温至 $280\sim 300^{\circ}\text{C}$,根据不同的图层厚度加热 0.5~1.0 h,并保温 1.0 h 使 PI 薄膜固化,取出后在室温中降温冷却。多次重复上述操作,分别制作了几组不同涂覆厚度和长度的 PI 薄膜,如图 2 所示。

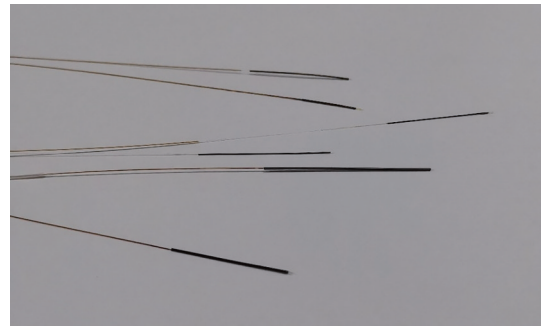


图 2 PI 涂膜的实验成品

Fig. 2 Experimental product of PI coating film

4 实验结果与分析

4.1 实验系统

实验中组合使用的实时测量系统如图 3 所示。其中:恒温恒湿箱的湿度变化范围为 20%~98%,湿度波动值为 $\pm 2.5\%$ RH;温度范围为 $-40\sim 150^{\circ}\text{C}$,温度偏差为 $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 。解调仪的型号为 FBG4ch100 Hz,分辨率为 0.001 nm,可解调波长范围为 1528~1568 nm。将 FBG 传感器放在恒温恒湿箱中,传感器尾纤一端连接至 FBG 解调仪,通过控制恒温恒湿箱的温湿度变化,用解调仪测试不同条件下的光纤波长变化情况。

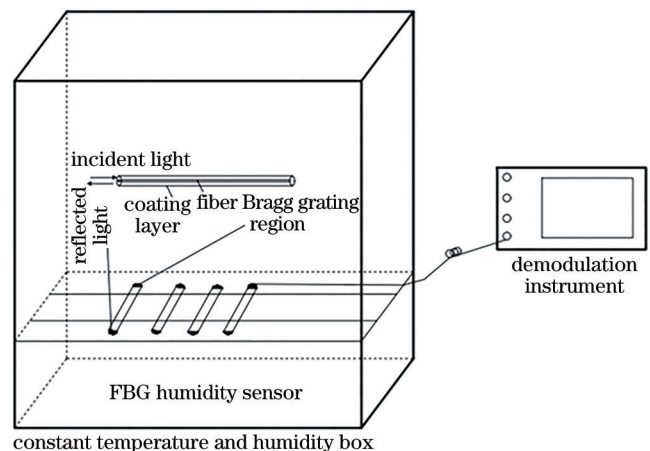


图 3 FBG 湿度传感器的实验系统

Fig. 3 Experimental system of the FBG humidity sensor

4.2 实验结果与分析

由式(9)可知,PI 薄膜越厚,湿度传感器的灵敏度越高,但薄膜厚度达到一定程度时,产生的力可能引起湿敏材料薄膜层和光栅之间的滑移,导致传感器的性能发生改变,因此,制作传感器时重点考虑了膜层厚度和涂覆长度。本方法制作的厚度为 0.07 mm 的传感器灵敏度较低,不具备较好的实用价值,因此,后续主要讨论厚度为 0.13、0.23、0.35 mm 的 FBG 湿度传感器性能,且三种厚度分别有 10、20、30 mm 三种长度,分别对其进行了性能测试。实验结果表明,厚度为

0.35 mm 的传感器在长度 10~30 mm 范围内表现出的特性不明显,因此,对厚度为 0.35 mm 的传感器增加了 40、50 mm 两种长度的样品进行测试。实验设定恒

温恒湿箱的温度稳定在 25 °C 不变,湿度变化范围为 30%RH~98%RH,得到 FBG 湿度传感器中心波长偏移量与湿度之间的关系如图 4 所示。

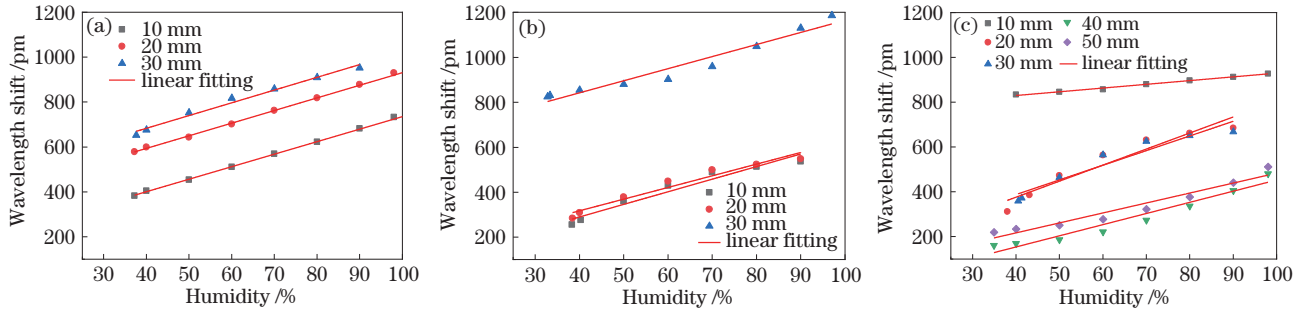


图 4 涂覆不同厚度 PI 薄膜的 FBG 的湿度传感特性曲线。(a) 0.13 mm; (b) 0.23 mm; (c) 0.35 mm

Fig. 4 Humidity sensing characteristic curves of FBG coated with PI films of different thickness. (a) 0.13 mm; (b) 0.23 mm; (c) 0.35 mm

不同型号 FBG 湿度传感器的灵敏度和拟合度如表 2 所示,表中的数值均为多次实验获得的平均值,且均方差都不超过 0.2 pm/%RH。从涂覆薄膜长度来看:涂覆厚度为 0.13 mm 和 0.23 mm 的 FBG 湿度传感器的灵敏度基本不受长度的影响,这表明涂覆区吸湿膨胀产生的力较小,不会引起栅区和涂覆区之间的滑移;涂覆厚度为 0.35 mm 的 FBG 湿度传感器灵敏度随涂覆长度的变化不够规律,当涂覆长度(10 mm)与栅区等长时,传感器的灵敏度最低,涂覆长度为 20 mm 时灵敏度最高;随着涂覆长度的进一步增长,灵敏度下降,长度达到 50 mm 时传感器的灵敏度和拟合度都趋于稳定,这表明长度趋于临界值。综上所述,薄膜厚度为 0.35 mm 时,湿敏材料吸湿膨胀产生的力对于较短涂覆长度的传感器足够引起栅区和涂覆区的滑移,其性能将受涂覆区长度影响,且灵敏度变换不够规律可能与制作工艺有关。

图 5 为厚度为 0.45 mm 的样品及其呈现的气泡。从涂覆薄膜的厚度来看,PI 薄膜越厚,湿度传感器的拟合度越低、灵敏度越高,且在厚度达到一定时,PI 溶液凝固收缩易产生气泡,破坏涂覆层的均匀性。湿敏材料吸湿膨胀产生的力会造成湿敏材料和 FBG 之间的滑移,均会导致传感器灵敏度的部分不规律和拟合度的下降。

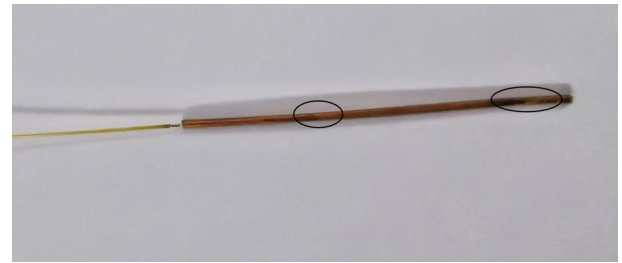


图 5 样品及其呈现的气泡

Fig. 5 Sample and the bubbles it presents

表 2 涂覆不同厚度、长度 PI 薄膜 FBG 的湿度传感特性和拟合度
Table 2 Humidity sensing characteristics and fitting degree of FBG films coated with PI films of different thickness and length

Thickness / mm	Length / mm	Sensitivity / (pm%RH)	Fitting
0.13	10	5.5	0.99
	20	5.4	0.99
	30	5.4	0.99
0.23	10	5.6	0.95
	20	5.7	0.95
	30	5.7	0.95
0.35	10	1.7	0.99
	20	7.2	0.92
	30	6.5	0.92
	40	5.0	0.94
	50	4.4	0.94

利用传感器的非线性误差衡量不同 FBG 湿度传感器的性能,涂覆厚度为 0.13 mm 的 FBG 湿度传感器非线性误差均小于 6%,其余型号均大于 6%。因此,选择涂覆厚度为 0.13 mm 的 FBG 湿度传感器研究其性能。为了判断湿度与温度的变化对该湿度传感器性能产生的影响,先测试了湿度恒定温度变化的情况,将涂覆厚度为 0.13 mm 的传感器放入恒温恒湿箱中,湿度分别恒定为 40%RH、50%RH、60%RH、70%RH,测试其性能在温度 0~100 °C 范围内的变化,调整间隔为 10 °C,且每次在恒温恒湿箱内保持 10 min 的温度不变,其结果如图 6 所示。

从图 6(a)可以发现,在不同湿度条件下传感器的中心波长漂移随温度的变化而变化,其拟合度始终稳定在 0.99,且非线性误差为 2%。从图 6(b)可以发现,其温度灵敏度在不同湿度条件下稳定在 12~13 pm/°C。根据需要,将恒温恒湿箱环境温度分别恒定在 25、35、45 °C,测试其性能在湿度 30%RH~98%RH 范围内的

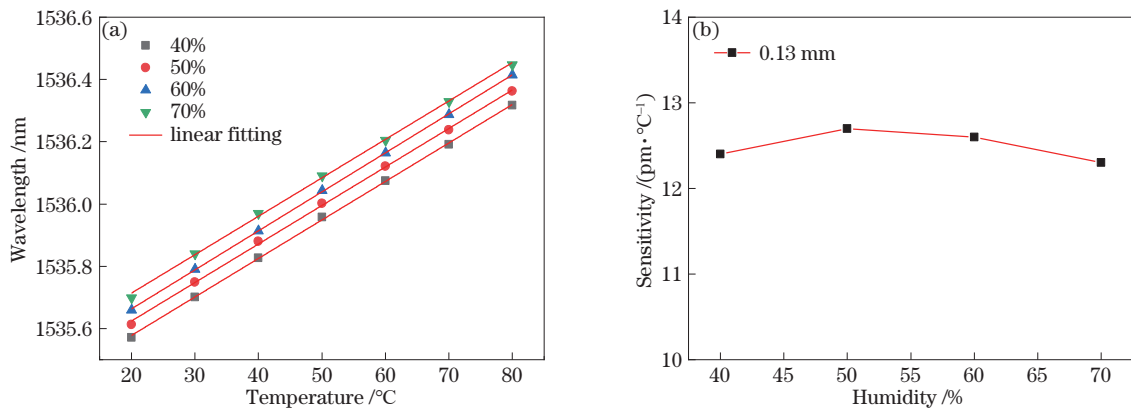


图6 湿度恒定下的仿真结果。(a)温度传感特性曲线;(b)温度灵敏度曲线

Fig. 6 Simulation results under constant humidity. (a) Temperature sensing characteristic curve; (b) temperature sensitivity curve

变化,结果如图7所示。其中,传感器的灵敏度稳定在 $5.5 \text{ pm}/\% \text{RH}$,拟合度为 0.99。

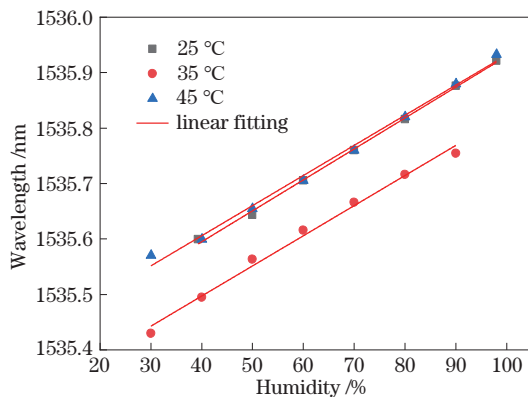


图7 温度恒定下的湿度传感特性曲线(厚度为 0.13 mm)

Fig. 7 Humidity sensing characteristic curve under constant temperature (thickness: 0.13 mm)

综上所述,温度和湿度与光栅传感的灵敏度均为线性关系,且两者对FBG中心波长的影响是相互独立的,因此,暂不考虑温度对传感器的影响。目前市场上流通的FBG湿度传感器灵敏度普遍为 $4 \text{ pm}/\% \text{RH}$,调查后购买了一款湿度传感器,其测量范围为 $30\% \text{RH} \sim 98\% \text{RH}$,灵敏度为 $4.37 \text{ pm}/\% \text{RH}$ 。对比发现,本方法制备的FBG湿度传感器性能更好,操作性更强,且实验研究的湿敏薄膜厚度虽然仅有 0.13 mm,却具有更高的灵敏度和拟合度,这表明FBG湿度传感器的性能与其制作工艺也有一定关系。

5 结 论

提出了采用毛细管和溶液结合的方法增大涂膜的均匀性,并通过耦合方式完成湿度传感器的制作。测量了三种不同薄膜厚度的湿度传感器性能,分别验证了厚度和长度对其性能的影响。实验结果表明,厚度为 0.13 mm 的FBG湿度传感器灵敏度能达到 $5.5 \text{ pm}/\% \text{RH}$,拟合度为 0.99、非线性误差为 2%,相比市场上流通的产品,本方法制备的FBG湿度传感器

具有更好的适用性、推广性和可操作性。

参 考 文 献

- [1] 邵长香, 赵扬, 陈南, 等. 激光微纳制造在传感领域中的应用[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202014.
Shao C X, Zhao Y, Chen N, et al. Application of laser micro-nano-fabrication in sensing field[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202014.
- [2] 刘云红. 光纤光栅传感器技术及其应用[J]. 传感器世界, 2005, 11(3): 20-23.
Liu Y H. The fiber grating sensors technology and its applications[J]. Sensor World, 2005, 11(3): 20-23.
- [3] 邵敏, 孙浩男, 张蓉, 等. 基于光子晶体光纤的迈克耳孙干涉仪型湿度传感器[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2406002.
Shao M, Sun H N, Zhang R, et al. Michelson interferometric humidity sensor based on photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2406002.
- [4] 张平, 刘彬, 刘正达, 等. 基于氧化石墨烯涂层的侧抛光纤马赫-曾德尔干涉仪温湿度传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0306003.
Zhang P, Liu B, Liu Z D, et al. Temperature and humidity sensor based on a graphene oxide-coated side-polished fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0306003.
- [5] Makovec A, Berruti G, Consales M, et al. Radiation hard polyimide-coated FBG optical sensors for relative humidity monitoring in the CMS experiment at CERN[J]. Journal of Instrumentation, 2014, 9(3): C03040.
- [6] Huang X F, Sheng D R, Cen K F, et al. Low-cost relative humidity sensor based on thermoplastic polyimide-coated fiber Bragg grating[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 127(2): 518-524.
- [7] 丁宏伟, 金永君. 光纤布拉格光栅湿度传感器研究[J]. 科技导报, 2008, 26(22): 54-57.
Ding H W, Jin Y J. Study on FBG humidity sensor[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(22): 54-57.
- [8] 黄雪峰, 盛德仁, 陈坚红, 等. 布拉格光纤光栅测量湿蒸汽两相流温/湿度的理论数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 40-46.
Huang X F, Sheng D R, Chen J H, et al. Theoretic

- mathematics model based on fiber Bragg grating sensor measurement in two-phase wet steam flow temperature/moisture[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 40-46.
- [9] 柴敬, 刘奇, 张渤, 等. 基于聚酰亚胺的FBG湿度传感特性及细观特征研究[J]. 光电子·激光, 2016, 27(3): 239-246.
Chai J, Liu Q, Zhang B, et al. Characterization and substructure morphology of a polyimide-coated FBG humidity sensor[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2016, 27(3): 239-246.
- [10] 李华南, 封伟, 王挺. 聚酰亚胺合成及应用进展[J]. 吉林建筑大学学报, 2017, 34(2): 102-106.
Li H N, Feng W, Wang T. Research progress in synthesis and application of quantum dots[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2017, 34(2): 102-106.
- [11] 李敏, 张佐光, 仲伟虹, 等. 聚酰亚胺树脂研究与应用进展[J]. 复合材料学报, 2000, 17(4): 48-53.
Li M, Zhang Z G, Zhong W H, et al. Study and application development of polyimides[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(4): 48-53.
- [12] 熊家国. 用于光纤湿度传感器中敏感材料的研究进展[J]. 建材世界, 2015, 36(5): 1-5.
Xiong J G. Research progress of the sensitive materials in the humidity optical fibre sensors[J]. The World of Building Materials, 2015, 36(5): 1-5.
- [13] Salon M C B, Belgacem M N. Competition between hydrolysis and condensation reactions of trialkoxysilanes, as a function of the amount of water and the nature of the organic group[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2010, 366(1/2/3): 147-154.