

激光与光电子学进展

单光栅半涂覆温湿度传感技术的研究

赵林^{1*}, 冯锦来¹, 邹泽宇^{2,3}, 郭凤军^{2,3}, 张长峰^{2,3}, 王金玉¹, 王纪强¹

¹齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250104;

²山东省农产品贮运保鲜技术重点实验室, 山东 济南 250103;

³国家农产品现代物流工程技术研究中心, 山东 济南 250103

摘要 相比传统监测手段, 光纤传感器具有灵敏度高、本质绝缘性高、抗电磁干扰能力强等优势, 但基于光纤布拉格光栅的湿度传感器易受温度和应力影响, 存在湿度测量误差大、稳定性差等问题。针对这些问题, 提出了一种单光栅半涂覆温湿度传感器的制备方法。首先, 在光栅的一半栅区上涂覆湿敏材料, 另外一半栅区为裸光栅。然后, 对裸光栅的反射光谱峰值曲线进行高斯拟合, 建立环境温度与中心波长 λ 的函数关系。最后, 分析了光栅反射光谱曲线和峰值功率围成的面积 S 与不同环境湿度的关系, 建立面积 S 与环境相对湿度的函数模型, 并采用温湿度发生器对传感器进行测试。实验结果表明, 在 10%RH~90%RH (%RH 为相对湿度) 范围内, 该传感器具有较好的重复性, 湿度监测灵敏度为 2.95/%RH, 响应时间为 6.6 min, 满足仓储等行业对温湿度的监测需求, 为相关领域的温湿度监测提供了一种新的解决方案。

关键词 光栅; 温湿度; 光谱曲线; 高斯拟合; 光谱面积

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0705001

Research on Single Grating Semi-Coated Temperature and Humidity Sensing Technology

Zhao Lin^{1*}, Feng Jinlai¹, Zou Zeyu^{2,3}, Guo Fengjun^{2,3}, Zhang Changfeng^{2,3},
Wang Jinyu¹, Wang Jiqiang¹

¹Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences),
Jinan, Shandong 250104, China;

²Shandong Province Key Laboratory of Storage and Transportation Technology of
Agricultural Products, Jinan, Shandong 250103, China;

³National Engineering Research Center for Agricultural Products Logistics,
Jinan, Shandong 250103, China

Abstract Optical fiber sensors have the advantages of high sensitivity, high-inherent insulation, and good anti-electromagnetic interference ability compared to standard monitoring technologies. However, humidity sensors based on fiber Bragg gratings are easily affected by temperature and stress, resulting in issues such as significant humidity measurement errors and low stability. This paper proposes a fabrication method based on a single grating half-coated temperature and humidity sensor to solve these problems. First, a moisture-sensitive material is coated on half of the grating, and the other half is a bare grating area. Then, the bare grating reflection spectrum peak curve

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-06-03; 录用日期: 2021-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(62005138)、山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KC012)、齐鲁工业大学(山东省科学院)科教产融合创新试点工程项目(2020KJC-ZD04)

通信作者: *linzhao1225@126.com

is then Gaussian fitted to establish the functional relationship between ambient temperature and center wavelength λ . Finally, the relationship between the area S enclosed by the grating reflection spectrum curve and the peak power under various environmental humidity conditions is analyzed. The function model of the area S and the relative humidity of the environment is established. The sensor is tested by a temperature and humidity generator. The experimental result shows that the sensor has good repeatability in the range of 10%–90%RH (%RH is relative humidity). The humidity monitoring sensitivity is 2.95/%RH, and the response time is 6.6 min, which matches the temperature and humidity monitoring requirements in storage and other fields while also providing a new solution for temperature and humidity monitoring in related fields.

Key words gratings; temperature and humidity; spectral curve; Gaussian fitting; spectral area

1 引言

温湿度是一个重要的物理参数,在烟草、武器炸药存储、电力、土木工程、化工等领域,温湿度的变化会严重影响仓储产品的质量及设备运行状态。温湿度的监测方式主要有毛发式、干湿球式、电阻或电容式湿度传感器^[1-2],相比传统监测手段,光纤传感器具有监测灵敏度高、本质绝缘、抗电磁干扰能力强等优势,特别是在易燃易爆环境中,光纤传感器具有传统监测手段无法比拟的优势^[3]。

目前,光纤温湿度传感器的研究主要有基于光纤布拉格光栅(FBG)、光纤干涉仪、倏逝波及表面等离子体共振(SPR)等方法^[4-7]。其中,干涉法湿度传感器具有较高的灵敏度,Wang等^[8]研发的法布里-珀罗(F-P)干涉湿度传感器的检测灵敏度为4.2 nm/%RH(%RH为相对湿度),但系统结构复杂,难以实现大规模、多点监测的现场应用。Yan等^[9]采用SPR的方式,将传感器在0%RH~70%RH范围内的湿度检测灵敏度提升到0.54 nm/%RH,但SPR传感器表面易受外部灰尘及其他碎屑的干扰,进而影响测量结果,对现场环境的要求较高。基于长周期及倾斜光栅的湿度传感器是光纤湿度传感器的重要分支,但该方式的湿度传感器难以实现对仓储环境的大容量、多点在线监测,且对涂覆光栅的温度补偿仍是目前需要解决的难题^[10-12]。基于FBG的湿度传感器具有结构简单,可实现大容量及准分布式测量等优势,成为了人们的研究热点^[13-15]。实际应用过程中,由于传统双光栅结构中湿敏光栅及温敏光栅热膨胀系数、有效光弹系数对外界温度、应力响应的差异性,温度补偿效果不佳,传感器长期运行时存在湿度测量误差大、易受温度影响等弊端。针对粮食仓储、能源等领域,传感器的低成本、小型化仍然是光学湿度测量在未来工程化及产业推广方面亟

需解决的难题^[16]。

本文在传统FBG湿度传感器的基础上,提出了一种单光栅温湿度传感器设计方案。对单光栅一半的栅区涂覆湿敏材料,将另外一半栅区作为裸光栅,通过建立两段光栅光谱与温湿度的函数关系,实现了单光栅温湿度的同步测量。

2 单光栅的湿度传感原理

单光栅半涂覆光纤温湿度传感器的原理及涂层结构如图1所示,其中, L 为光栅栅区的总长度。

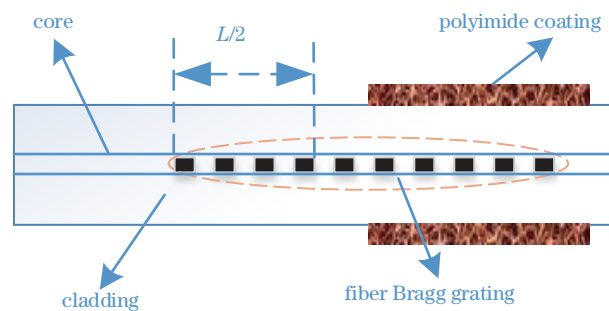


图1 单光栅温湿度传感器的涂层结构

Fig. 1 Coating structure of single grating temperature and humidity sensor

当外界环境中的被测量(应变、温度)发生变化时,光栅反射光中心波长的变化量可表示为

$$\Delta\lambda/\lambda = (1 - P_e)\epsilon + [(1 - P_e)\alpha + \xi]\Delta T, \quad (1)$$

式中, λ 为反射光的中心波长, $\Delta\lambda$ 为反射光的中心波长变化量, 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 为温度变化量^[17]。

基于单光栅的光纤温湿度传感器,在一半栅区上涂覆湿敏材料,受周围湿度变化的影响,涂有湿敏材料的光栅区域B会发生吸湿膨胀或脱湿收缩,进而产生应变,导致FBG的中心波长发生变化,可

表示为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon_{RH} + (1 - P_e)\epsilon_T + \xi\Delta T, \quad (2)$$

式中, λ_B 和 $\Delta\lambda_B$ 分别为区域 B 的反射光中心波长及其变化量, ϵ_{RH} 、 ϵ_T 分别为涂覆湿敏材料后光纤湿膨胀和热膨胀引起的应变, 可统一表示为

$$\epsilon_x = \left(\frac{A_p E_p}{A_p E_p + A_f E_f} \right) [\alpha_{p(x)} - \alpha_{f(x)}] \Delta x, \quad (3)$$

式中, x 为相对湿度或温度 T , Δx 为相对湿度或温度的变化量, A 为材料的横截面积, E 为材料的杨氏模量, 下标 p 和 f 分别表示涂覆材料与光纤, $\alpha_{p(x)}$ 为湿敏薄膜的湿膨胀系数或热膨胀系数, $\alpha_{f(x)}$ 为光纤的湿膨胀系数或热膨胀系数^[18]。光栅另一部分为裸光栅 C, 其中心波长变化量为

$$\Delta\lambda_C/\lambda_C = (1 - P_e)\alpha \cdot \Delta T + \xi\Delta T, \quad (4)$$

表 1 FBG 的参数

Table 1 Parameter of the FBG

Fiber type	Reflectivity / %	3 dB bandwidth / nm	Side-mode suppression ratio / dB	Length of grating area / mm
Acrylate SMF-28e	95	0.205	18.5	12

光栅涂覆之前, 先用酒精对 FBG 表面进行擦洗, 保证光纤表面清洁, 然后将清洁好的 FBG 放入硅烷偶联剂(3-APTS)浸泡 10 min, 增强 PI 对附着光栅的应力传递。为保证光栅两部分反射光谱能获得更清晰稳定的峰值信号, 将浸入偶联剂后的光栅一半浸入聚酰亚胺溶液 30 s, 在干燥箱(温度为 150 °C)中干燥 5 min, 重复该过程数次, 最后将涂覆完成的光栅放入干燥箱(温度为 180 °C)中 60 min, 完成光栅及涂覆层的固化。用图 2 中的兆仪光电显微镜 ZYGD-300 观察光栅涂层结构, 结果如图 3 所示。



图 2 光电显微镜的实物图

Fig. 2 Physical image of the photoelectric microscope

联立(2)式与(4)式, 得到

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - \frac{\Delta\lambda_C}{\lambda_C} = (1 - P_e)(\epsilon_{RH} + \epsilon_T - \alpha\Delta T). \quad (5)$$

由(5)式可以发现, 光栅两部分反射光谱中心波长的相对偏移量受三个因素的影响, 即涂覆部分湿度引起的应变 ϵ_{RH} 、热膨胀引起的应变 ϵ_T 及未涂覆部分光纤本身热膨胀对光栅产生的应变 $\alpha\Delta T$ 。

3 单光栅温湿度传感器的制备

传感器采用单模 FBG 作为敏感元件, FBG 的具体参数如表 1 所示。涂层选用化学及热稳定性强、耐腐蚀的聚酰亚胺(PI)作为湿敏材料(由北京波米科技有限公司生产, 固体含量为 13%, 粘度为 5000~6000 cP)。

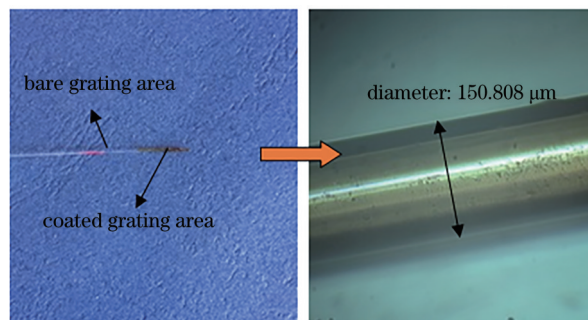


图 3 半涂覆光栅及涂层效果

Fig. 3 Semi-coated grating and coating effect

4 测试平台及传感器的性能分析

4.1 测试平台

为测定光纤湿度传感器的性能, 搭建了实验测试平台, 其原理如图 4 所示。采用北京立丰世通 CF-1000 便携式温湿度发生器控制环境参数, 其技术指标如表 2 所示。光纤湿度传感器置于温湿度发生器内部, 传感器的另一端连至 FBG 解调仪(波长测量精度为 ± 1 pm, 波长解调范围为 1525~1565 nm), 通过解调传感探头 FBG 反射光谱的变化量建立波长 λ 与相对湿度的函数关系。

4.2 温度响应

保持温湿度发生器的相对湿度恒定在 30%RH,

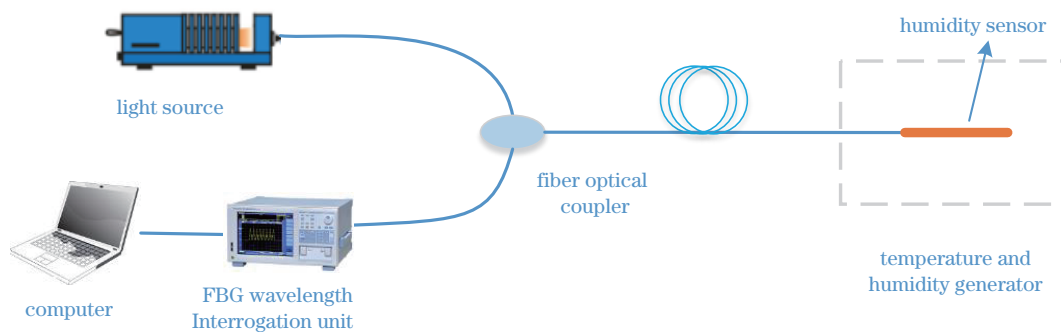


图 4 实验测试平台的原理

Fig. 4 Principle of the experimental test platform

表 2 CF-1000 温湿度发生器的参数

Table 2 Parameter of CF-1000 temperature and humidity generator

Humidity range / %RH	Humidity measurement accuracy / %RH	Temperature range / °C	Temperature measurement accuracy / °C
7-95	±1 (7%RH-80%RH), ±1.5 (80%RH-95%RH)	5-50	±0.1

将温度依次调整为 8, 20, 30, 42 °C, 分别记录不同温度下光栅的反射光谱, 结果如图 5 所示。可以发现, 光栅未涂覆部分, 其波长只受温度影响。对裸光栅部分不同温度下的反射光谱峰值进行高斯拟合, 拟合得到波长 λ 的曲线如图 6 所示, 光栅反射中心波长与温度的变化曲线如图 7 所示。中心波长与温度的拟合方程为 $y = 106.782x - 164760.115$, R^2 为相关系数, 两者的函数关系可表示为

$$T = k_T \cdot \Delta\lambda_T + T_0, \quad (6)$$

式中, T_0 为基准温度, $\Delta\lambda_T$ 为未涂覆部分光栅的波长变化量, k_T 为波长-温度曲线的斜率。

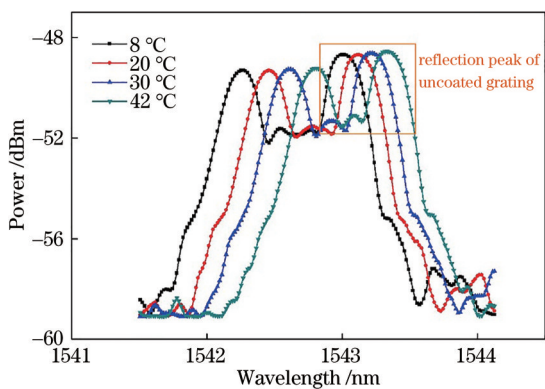


图 5 不同温度下 FBG 的反射光谱

Fig. 5 Reflectance spectra of the FBG at different temperatures

涂覆湿敏材料部分光栅的中心波长变化量一方面受湿度影响, 另一方面温度变化会引起湿敏材料膨胀或收缩, 中心波长变化量也受涂覆层应力的

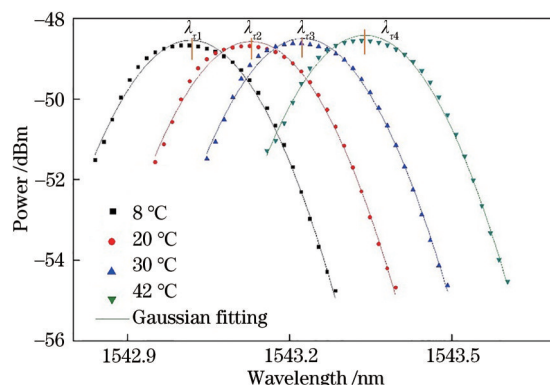


图 6 未涂覆光栅峰值的高斯拟合曲线

Fig. 6 Gaussian fitted curve of uncoated grating peak

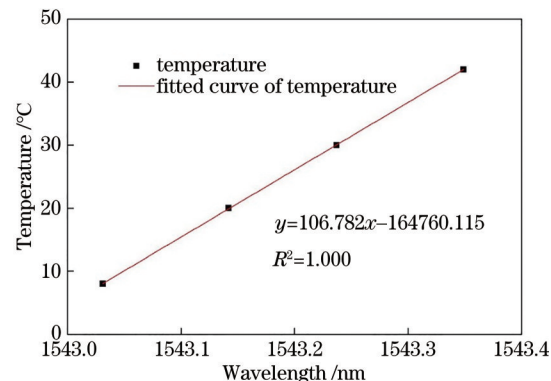


图 7 温度随波长的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of temperature with wavelength

影响。光栅两部分热膨胀系数不同, 随着温度的增加, 光栅两部分之间的相对距离逐渐减小。设反射光谱的峰值功率为 P_{max} , 光谱面积截取阈值为 k , 则

由光谱曲线与直线 $P_{\max}-k$ 围成的面积 S 如图 8 所示。 S 可表示为

$$S = \sum_{i=0}^n [P_i - (P_{\max} - k)], \quad (7)$$

式中, P_i 为光谱曲线任意点的功率值, 且 $P_i - (P_{\max} - k) > 0$, n 为光谱曲线的数据点数量。面积 S 比光栅两部分波长差 $\Delta\lambda$ 包含更丰富的光谱信息, 可进一步降低光谱噪声及波长拟合导致的测量误差, 提高传感器的监测精度。恒定湿度环境下, 当 $k=6$ 时, 曲线面积 S 与温度的函数关系如图 9 所示。可以发现, 随着温度的升高, 光谱面积 S 逐渐减小, 且温度每升高 1°C , 曲线面积 S 减小 1.09, S 与温度变化的函数关系可表示为

$$S = k_s \cdot (T - T_0) + S_0, \quad (8)$$

式中, T_0 与 S_0 分别为特定环境温度及该温度下光谱曲线与 $P_{\max}-k$ 直线围成的面积, k_s 为曲线斜率。

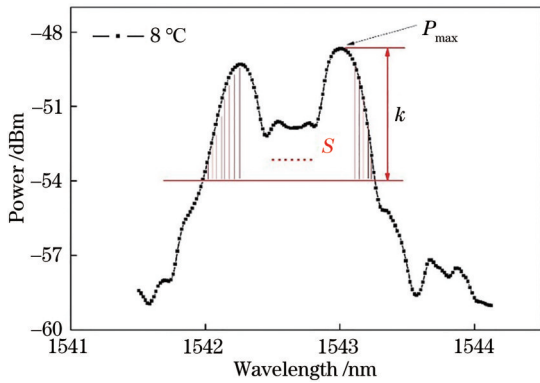


图 8 光谱面积的计算

Fig. 8 Calculation of spectral area

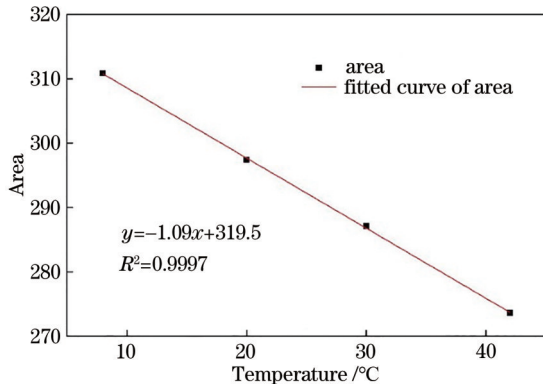


图 9 曲线面积与温度的关系

Fig. 9 Relationship between curve area and temperature

4.3 湿度响应

保持温湿度发生器温度恒定 23°C , 依次将湿度调整为 8%RH、30%RH、50%RH、70%RH、

90%RH, 分别记录不同湿度环境下光栅的反射光谱, 结果如图 10 所示, 面积 S 与相对湿度值的函数曲线如图 11 所示。对面积 S 与相对湿度函数曲线进行 3 次多项式拟合, 得到温度恒定时相对湿度与面积 S 的函数关系为

$$H = aS^3 + bS^2 + cS + d, \quad (9)$$

式中, a, b, c, d 分别为三次多项式拟合系数。联立 (6) 式、(8) 式、(9) 式, 得到环境温度 T 、光谱曲线面积 S 、环境湿度 H 三者的函数映射关系, 进而实现对温度及相对湿度的实时监测。

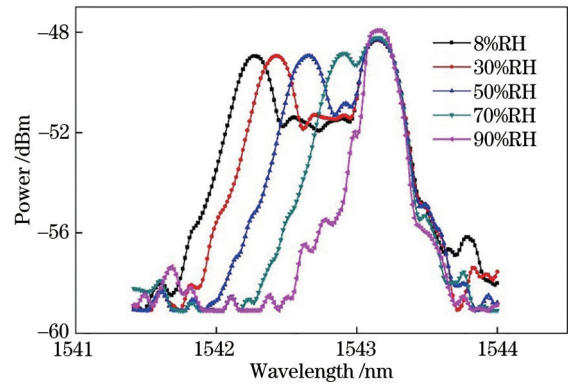


图 10 不同湿度下光栅的反射光谱

Fig. 10 Reflectance spectra of grating under different humidity

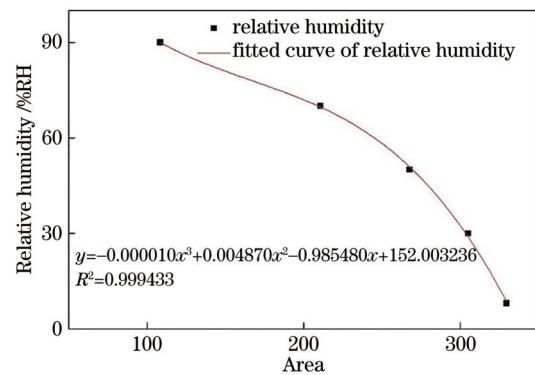


图 11 光谱面积与相对湿度函数曲线

Fig. 11 Function curve of spectral area and relative humidity

5 传感器的性能测试

5.1 重复性及响应测试

为了进一步验证单光栅温湿度传感器的性能, 用图 2 中的实验系统进行重复性实验, 设置温湿度发生器温度恒定为 23°C , 将湿度依次调整为 10%RH、30%RH、50%RH、70%RH、90%RH、70%RH、50%RH、30%RH、10%RH, 待每个温湿度点稳定后, 记录光栅反射光谱面积 S 与相对湿度值的函数曲线, 结果如图 12 所示。实验结果表明, 传

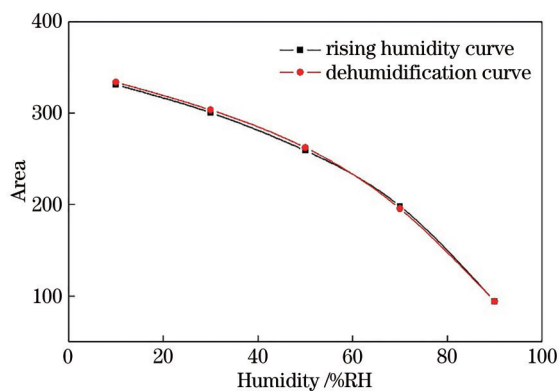


图 12 湿度的重复性测试

Fig. 12 Repeatability test of the humidity

感器在 10%RH~90%RH 范围内具有较好的重复性,且传感器的湿度监测灵敏度为 2.95/%RH。室温状态下,依次将传感器置于 K_2SO_4 (97.3%RH)与 LiCl(11.3%RH)饱和盐溶液中,使传感器所处环境产生阶跃相对湿度变化 Δ_{RH} ,光栅反射光谱曲线面积 S 随时间的变化曲线如图 13 所示。传感器的响应时间可表示为

$$t = |\Delta_{RH}| \times 63\%, \quad (10)$$

根据(10)式计算得到传感器的响应时间 t 约为 6.6 min。

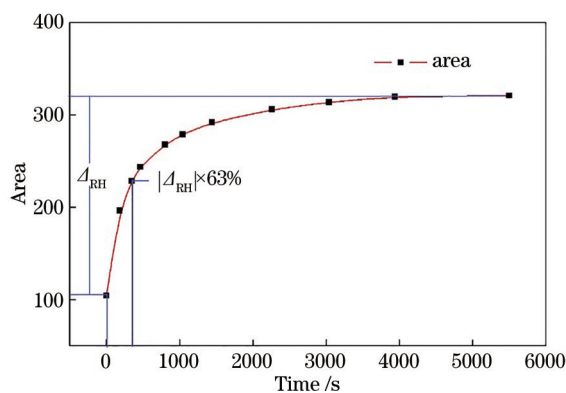


图 13 湿度响应随时间的变化曲线

Fig. 13 Variation curve of humidity response with time

5.2 传感器的监测精度测试

将温湿度发生器内的温度、湿度分别设置为 (14.0 °C, 18.0%RH)、(24.0 °C, 40.0%RH)、(35.0 °C, 65.0%RH),待发生器反应腔内部环境稳定后,获取不同环境下传感器光栅的反射光谱,根据传感器的标定系数,计算得到该传感器在不同环境下的温湿度值如表 3 所示。可以发现,单光栅结构光纤传感器具有较高的监测精度,温度监测误差小于 $\pm 1^\circ\text{C}$,湿度监测误差小于 $\pm 3\%RH$ 。

表 3 传感器的温湿度检测结果

Table 3 Temperature and humidity detection results of the sensor

No.	Parameter	Standard value	Calculated value	Relative error
1	Temperature /°C	14.0	14.6	0.6
	Humidity /%RH	18.0	19.8	1.8
2	Temperature /°C	24.0	23.1	0.9
	Humidity /%RH	40.0	39.9	0.1
3	Temperature /°C	35.0	34.3	0.7
	Humidity /%RH	65.0	67.1	2.1

6 结 论

对光栅一半栅区涂覆聚酰亚胺湿敏材料,研发了一种单光栅温湿度传感器及监测方法,并进行了温湿度响应及性能测试。实验结果表明,光栅未涂覆湿敏材料部分光谱峰值曲线高斯拟合后的中心波长与环境温度仍然保持良好的线性关系。涂覆湿敏材料后的部分光栅温度变化引起湿敏材料的膨胀收缩,通过建立光谱曲线与直线 $P_{\max} - k$ 围成的区域面积 S 与环境相对湿度的函数映射,实现了对环境温湿度的监测。单光栅半涂覆温湿度传感器在实现对温湿度同步监测的同时,进一步降低了传感器的体积和成本,为仓储、能源领域的温湿度监测提供了一种新思路。

参 考 文 献

- [1] Sikarwar S, Yadav B C. Opto-electronic humidity sensor: a review[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 233: 54-70.
- [2] Yeo T L, Sun T, Grattan K T V. Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 144 (2): 280-295.
- [3] Raymond S G, Wagner P, Panczyk M, et al. Development of fibre Bragg grating based strain/temperature sensing system[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8258: 82581L.
- [4] Alwis L, Sun T, Grattan K T V. Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement: review of recent progress[J]. Measurement, 2013, 46(10): 4052-4074.
- [5] 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.

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.
- [6] 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.
- 邵敏, 孙浩男, 张蓉, 等. 基于光子晶体光纤的迈克尔孙干涉仪型湿度传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2406002.
- [7] Khijwania S K, Srinivasan K L, Singh J P. An evanescent-wave optical fiber relative humidity sensor with enhanced sensitivity[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 104(2): 217-222.
- [8] Wang B, Tian J 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.
- [9] Yan H T, Han D F, Li M, et al. Relative humidity sensor based on surface plasmon resonance of D-shaped fiber with polyvinyl alcohol embedding Au grating[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2017, 11(1): 016008.
- [10] Dissanayake K P W, Wu W P, Nguyen H, et al. Graphene-oxide-coated long-period grating-based fiber optic sensor for relative humidity and external refractive index[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 1145-1151.
- [11] Chiu Y D, Wu C W, Chiang C C. Tilted fiber Bragg grating sensor with graphene oxide coating for humidity sensing[J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 2129.
- [12] 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.
- [13] Wang W J, Sun T P, Peng J K, et al. Humidity sensor based on fiber Bragg grating coated with different pore-foaming agent doped polyimides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(22): 1963-1966.
- [14] Swanson A J, Raymond S G, Janssens S, et al. Development of novel polymer coating for FBG based relative humidity sensing[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 249: 217-224.
- [15] Zhao L, Wang J Q, Li Z, et al. Quasi-distributed fiber optic temperature and humidity sensor system for monitoring of grain storage in granaries[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(16): 9226-9233.
- [16] Lo Presti D, Massaroni C, Schena E. Optical fiber gratings for humidity measurements: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(22): 9065-9074.
- [17] Lin Y, Gong Y, Wu Y, et al. Polyimide-coated fiber Bragg grating for relative humidity sensing[J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(1): 60-66.
- [18] Yeo T L, Sun T, Grattan K T V, et al. Characterisation of a polymer-coated fibre Bragg grating sensor for relative humidity sensing[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 110(1): 148-156.