

## 一种准确测量温湿度的光纤 Bragg 光栅传感器\*

巫涛江<sup>1,2,3</sup>, 赵雅<sup>1,2,4</sup>, 赵杰<sup>1,2</sup>, 李玉洁<sup>1,2</sup>, 马利<sup>3</sup>, 赵明富<sup>3</sup>

(1. 电梯智能运维重庆市高校工程中心, 重庆 402260; 2. 重庆能源职业学院, 重庆 402260;

3. 重庆理工大学, 重庆 400054; 4. 重庆第二师范学院, 重庆 400065)

**摘要:** 为了准确测量电梯轿厢内温湿度变化信息, 研制了一种结构简单的光纤 Bragg 光栅(FBG)温湿度传感器。传感器由光栅长度为 20 mm 的 FBG 构成, 其中光栅长度为 12 mm 的区域采用湿腐蚀法腐蚀至 7.8  $\mu\text{m}$ , 并在其表面涂覆聚酰亚胺湿敏材料, 用于响应湿度变化信息; 未被腐蚀的 8 mm 光栅用于响应温度变化信息。实验研究了光纤腐蚀区域和未腐蚀区域对温湿度的响应特性, 湿敏膜涂覆厚度对光栅腐蚀区湿度响应特性的影响, 湿敏涂覆后光栅腐蚀区对温度的响应特性, 以及传感器对变温变湿环境的响应特性。实验结果表明: 当湿敏膜厚度为 80  $\mu\text{m}$  时, 光栅腐蚀区对湿度的响应灵敏度为 17.1 pm/(%RH); 未腐蚀区域对温度的响应灵敏度为 9.9 pm/ $^{\circ}\text{C}$ ; 变温(30~70  $^{\circ}\text{C}$ )变湿(20~90%RH)环境测试时, 传感器能准确测量温度及湿度。

**关键词:** 温湿度; 聚酰亚胺; 光纤 Bragg 光栅; 准确测量; 灵敏度

中图分类号: TN204

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.191411

中文引用格式: 巫涛江, 赵雅, 赵杰, 等. 一种准确测量温湿度的光纤 Bragg 光栅传感器[J]. 电子技术应用, 2020, 46(6): 68-72.

英文引用格式: Wu Taojiang, Zhao Ya, Zhao Jie, et al. A fiber Bragg grating sensor for accurate measurement of temperature and humidity[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(6): 68-72.

### A fiber Bragg grating sensor for accurate measurement of temperature and humidity

Wu Taojiang<sup>1,2,3</sup>, Zhao Ya<sup>1,2,4</sup>, Zhao Jie<sup>1,2</sup>, Li Yujie<sup>1,2</sup>, VIGAN MAX-MARLEY<sup>3</sup>, Zhao Mingfu<sup>3</sup>

(1. Elevator Intelligent Operations Engineering Center of Chongqing University, Chongqing 402260, China;

2. Chongqing Energy College, Chongqing 402260, China;

3. Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

4. Chongqing University of Education, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** To accurately measure the temperature and humidity in the elevator car, a simple fiber Bragg grating(FBG) temperature and humidity sensor was developed. The sensor was composed of FBG with a grating length of 20 mm, where in the region with a grating length of 12 mm was etched to 7.8  $\mu\text{m}$  by wet etching, and a polyimide moisture sensitive material was coated on the etched surface to measure relative humidity. The unetched 8 mm FBG was used to detect temperature. In the experiments, firstly, the response characteristics of the etched and unetched FBGs to the temperature and humidity were studied. Secondly, the influence of the thickness of the polyimide film on the humidity response of the etched FBG was examined. Thirdly, the response of the etched FBG with polyimide coating to temperature was checked. Fourthly, we investigated the response of the sensor that includes etched and unetched FBGs in variable temperature and humidity environment. The experimental results show that when the thickness of the humidity sensitive film was 80  $\mu\text{m}$ , the response sensitivity of the etched FBG to humidity was 17.1 pm/(%RH). The sensitivity of the unetched FBG to temperature was 9.9 pm/ $^{\circ}\text{C}$ . The sensor can accurately measure temperature and humidity in the temperature range of 30 to 70  $^{\circ}\text{C}$  and in the humidity range of 20~90%RH.

**Key words:** temperature and humidity; polyimide; fiber Bragg grating; accurate measurement; sensitivity

### 0 引言

随着猪链球菌、非典、流脑、口蹄疫、禽流感等传染病的爆发, 广大市民越来越注重疾病的防治工作。这些传染疾病可通过空气、接触、飞沫等方式传播。电梯作为

一个公共的场所, 出现在每个城市的高层建筑物之中, 其通风情况直接影响着疾病的传播机率。同时, 轿厢内温湿度直接关系到乘坐的舒适性和电子元器件的使用寿命<sup>[1]</sup>。为使轿厢内温湿度维持在既可有效抑制疾病传播, 又可让乘客感到舒适, 同时提高器件使用寿命的状态, 必须对轿厢内温湿度进行优化检测和控制。然而有

\* 基金项目: 重庆市教委科研基金项目(KJQN201905604, KJQN201905605, KJQN201805604)

# 测控技术与仪器仪表 Measurement Control Technology and Instruments

效的、精准的过程控制,必须对轿厢内温湿度进行在线实时监测。

目前用于温度和湿度测量的传感器很多<sup>[2-10]</sup>,其中光纤温度和湿度传感器具有微结构、抗电磁干扰、远距离传输、使用寿命长、响应速度快、灵敏度高、成本低等优点,已被广泛采用<sup>[11-13]</sup>。虽然现有光纤温度和湿度传感器具有上述诸多优点,但是已报到的光纤温度和湿度传感器主要为单一参数测量,很少有关于同一光纤传感单元实现温湿度双参数同时测量的文献报道。因此,在现有的光纤温度和光纤湿度传感器基础之上,研制出一种结构简单、高性价比的光纤温湿度传感器,用于电梯轿厢内湿度实时检测十分必要。

本文为了实现电梯轿厢内温湿度变化信息监测,利用光纤 Bragg 光栅(FBG)和聚酰亚胺湿敏材料研制了一种结构简单的温湿度传感器,实验研究了光纤对湿度的响应特性,湿敏薄膜涂覆厚度对传感器的湿度响应灵敏度及湿度响应时间的影响,湿敏材料涂覆后传感器对湿度的响应特性,以及变温变湿环境下传感器的响应特性。

## 1 材料及装置

### 1.1 光纤 Bragg 光栅

FBG 芯径  $d$ 、包层直径  $D$ 、光栅长度  $L$ 、光栅间距  $\Lambda$  和中心波长  $\lambda_B$ (25 °C 测量值)分别为 8.3  $\mu\text{m}$ 、125  $\mu\text{m}$ 、20 mm、539.25 nm 和 1 547.076 nm。为了同时准确测量温度和湿度,将其中长度为 12 mm 的光栅区域保护层去除,然后采用氢氟酸与氨水混合液将其腐蚀至 7.8  $\mu\text{m}$ , 光纤腐蚀方法参考文献[5],腐蚀后的光栅区域用作温度和湿度敏感区,记为 FBG\_2;剩余未被去除保护层的 8 mm 光栅,由于具备完整的包层和纤芯结构,其光栅区域内的光信息不受到外界湿度和折射率变化的影响,因此该区域只对温度具有响应特性,用作温度敏感区,记为 FBG\_1。同时响应温湿度的 FBG 结构示意图如图 1 所示。

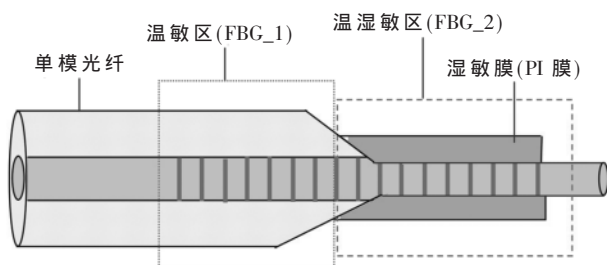


图 1 传感器结构示意图

### 1.2 湿敏膜及 FBG 温湿敏感区制备

聚酰亚胺湿敏溶胶制备步骤如下:(1)在室温下,取 40 mL 的 N-甲基吡咯烷酮(NMP)溶液加入到烧瓶中,在氮气保护下持续搅拌(转速 60 rpm)30 min 后,加入 1.100 g 4,4'-二氨基二苯醚(ODA)粉末,等待 4,4'-二氨基二苯醚的粉末完全溶解后,取 1.112 g 均苯四甲酸二酐(PMDA)颗粒分 3 次依次加入到烧瓶中,连续反应 6 h

以后,得到透明淡黄色的聚酰胺酸(PAA)溶液;(2)将制备好的 PAA 溶液静止 30 min,等到溶液中的气泡消失后,量取 5 mL 的吡啶溶液,加入到 PAA 溶液中,在磁力搅拌下互溶;(3)取 1 000  $\mu\text{L}$  和 500  $\mu\text{L}$  的丙酸酐溶液分别加入到步骤(2)中的混合液中,在搅拌的条件下持续反应 24 h,得到橙黄色的聚酰亚胺(Polyimide, PI)溶液,记该溶液为聚酰亚胺湿敏溶胶(PI 溶胶)。

FBG\_2 温湿敏感区制备步骤如下:(1)将 FBG\_2 区域浸入酒精中,超声清洗 10 min(超声功率 160 W),然后采用氮气将其吹干备用;(2)采用提拉法将清洗干净的 FBG\_2 区域浸入到 PI 溶液中进行镀膜,提拉速度控制在 6 mm/min;(3)将涂覆有 PI 溶胶的 FBG 放入真空干燥箱中,首先在 100 °C 干燥 30 min,然后缓慢升温至 150 °C,在 150 °C 干燥 30 min,最后将温度升至 200 °C,在 200 °C 干燥 5 h,即得到 PI 涂覆 FBG(温湿敏感区)。为获得不同厚度的 PI 膜,需重复步骤(2)和(3)。制备好的 FBG 传感器反射光谱如图 2 所示。图 2 中,FBG\_1 的谐振中心波长为 1 547.071 nm,涂覆有 10  $\mu\text{m}$  PI 膜的 FBG\_2 谐振中心波长为 1 544.905 nm。

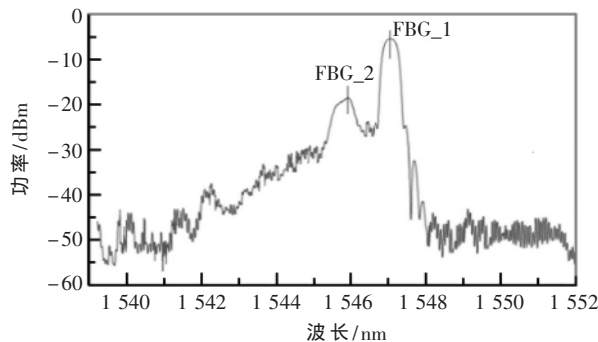


图 2 传感器在 25 °C 空气中的反射光谱

### 1.3 温度测量装置

FBG 温湿度传感器测试系统如图 3 所示,该系统主要由带宽激光光源(1 510~1 590 nm)、3 dB 耦合器、SM125-500 光纤光栅解调仪、单模光纤跳线、FBG 传感器及温湿控制箱构成。其中温湿箱湿度可控范围为 20~98% RH(湿度波动  $\pm 2.5\%$  RH),温度可控范围为 0~150 °C(温度波动  $\pm 0.3$  °C)。

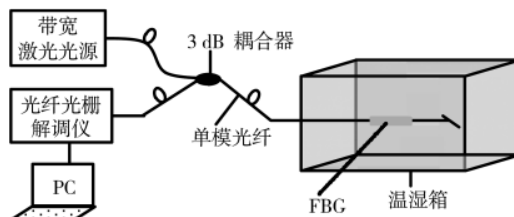


图 3 测试系统框图

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 未经腐蚀和腐蚀 FBG 区域对温湿度的响应

为获得温湿度准确测量的 FBG 传感器,在湿度为

# 测控技术与仪器仪表 Measurement Control Technology and Instruments

45%RH 时,实验首先研究了 FBG\_1 和 FBG\_2 对温度和湿度的响应特性,其实验结果如图 4 和图 5 所示。

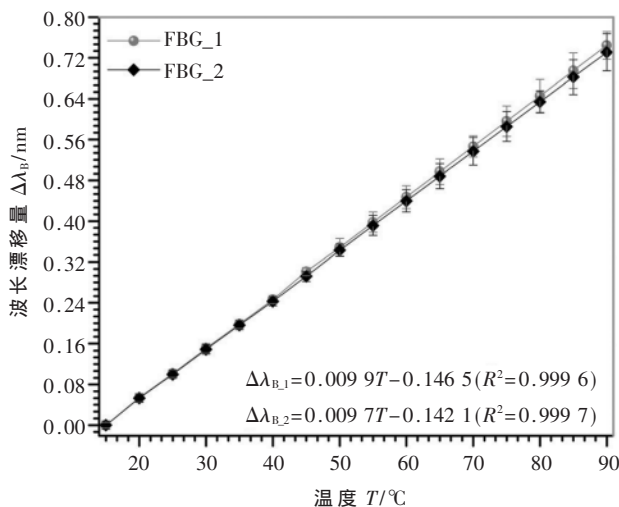


图 4 FBG\_1 和 FBG\_2 对温度的响应特性

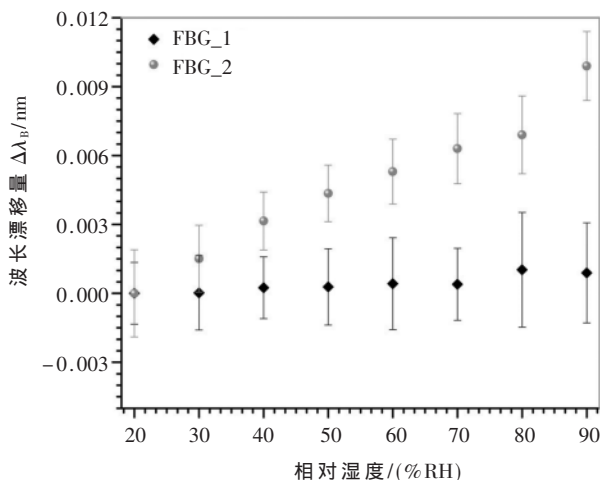


图 5 FBG\_1 和 FBG\_2 对湿度的响应特性

图 4 显示,未经腐蚀和腐蚀后的 FBG 区域都能准确响应温度变化信息,其中未经腐蚀的 FBG\_1 对温度的响应灵敏度为 9.9 pm/°C,略高于腐蚀后的 FBG\_2 对温度的响应灵敏度 9.7 pm/°C。

图 5 显示,在 25 °C 温度时,FBG\_1 对外界环境湿度变化信息不敏感。而经过腐蚀后的 FBG\_2 能响应外界湿度变化信息。其原因在于,空气的折射率随着湿度的增大而增加,当腐蚀后的 FBG 区域处于变湿环境时,其内部传输的光信息受到外界折射率变化的影响,因此,FBG\_2 的谐振中心波长发生漂移。虽然 FBG\_2 能对湿度做出响应,但是灵敏度低。

## 2.2 PI 涂覆 FBG 区域对湿度的响应特性

为了提高 FBG\_2 对湿度的响应灵敏度,在 25 °C 温度条件下,实验研究了不同 PI 湿敏涂覆厚度下 FBG\_2 对湿度的响应灵敏度和响应时间,实验结果如图 6 和图 7 所示。

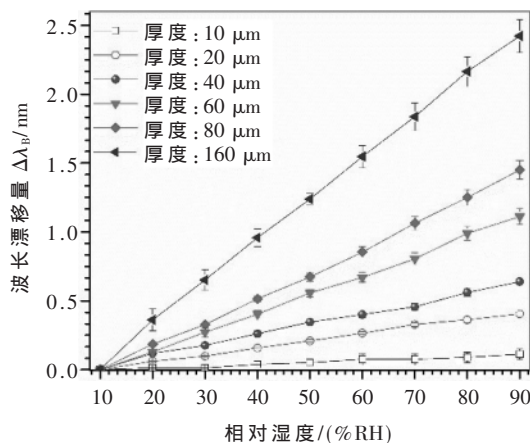


图 6 FBG\_2 表面 PI 涂覆厚度对湿度响应特性的影响

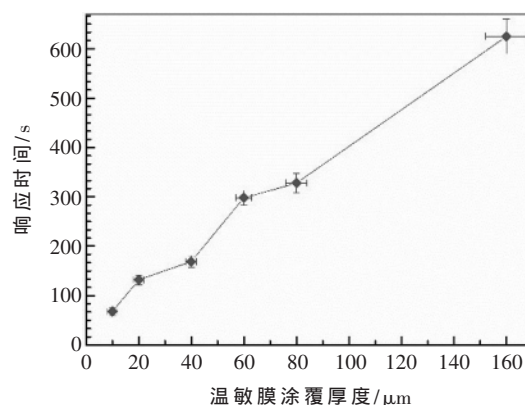


图 7 不同 PI 涂覆厚度下传感器的响应时间

如图 6 所示,传感器 FBG\_2 对湿度的灵敏度远高于未被 PI 涂覆时的灵敏度(如图 5 所示),且 FBG\_2 对湿度的灵敏度随着 PI 涂覆厚度的增加而增大,其原因在于 PI 湿敏薄膜吸收水分子后,将发生膨胀变形,导致 FBG\_2 的谐振中心波长发生漂移。涂覆有 PI 湿敏材料的 FBG 谐振中心波长变化量( $\Delta\lambda_B$ )与温度变化量( $\Delta T$ )和湿度变化量( $\Delta H$ )间的关系可表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_H \Delta H + K_T \Delta T \quad (1)$$

式中, $K_H$  和  $K_T$  分别表示 FBG 对温度和湿度的灵敏度系数,且  $K_H \propto$  PI 涂敷厚度,  $K_T \propto$  PI 涂敷厚度<sup>[14]</sup>。

从式(1)可知,FBG\_2 对湿度的灵敏度随着涂敷厚度的增加而增大。虽然越厚的 PI 膜,FBG\_2 对湿度的灵敏度越大,但是传感器对湿度的响应时间也越长。当测量湿度从 10%RH 变化到 90%RH 时,传感器输出信号稳定所需要的时间,如图 7 所示。因此,在实际应用过程中,需综合考虑传感器的响应灵敏度和响应时间。在 PI 厚度为 80 μm 时,传感器对湿度的灵敏度和响应时间都能很好地满足工程实际需求。此时,FBG\_2 谐振中心波长与湿度之间的函数关系为:  $\Delta\lambda_{B2} = 0.017 1 \Delta H - 0.204 6$  ( $R^2 = 0.996 4$ );响应时间为 328 s。因此,在后续的实验中,选择 FBG\_2 区域表面 PI 涂敷厚度为 80 μm 作为研究对象。



# 测控技术与仪器仪表

Measurement Control Technology and Instruments

## 2.3 PI 涂覆 FBG 区域对温度的响应特性

从式(1)中可以看出,FBG 表面经 PI 涂敷后,不仅对湿度敏感,而且对温度也敏感。因此,为了表征 PI 膜对温度的增敏特性,在湿度为 45%RH、PI 涂敷厚度为 80  $\mu\text{m}$  时,实验观测了 FBG\_2 对温度的响应特性,如图 8 所示。

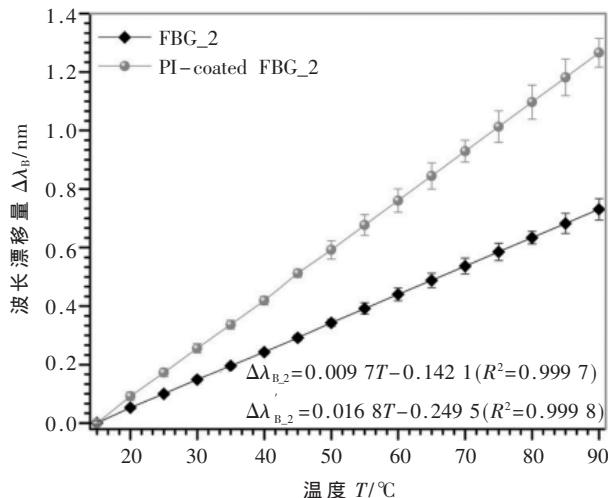


图 8 涂覆有 PI 湿敏膜的 FBG\_2 对温度的响应特性

从图 8 中可以看出,FBG\_2 表面涂敷 80  $\mu\text{m}$  PI 膜后,对温度的响应灵敏度增加。其原因在于,在固定湿度环境条件下,PI 膜的形变随着温度的升高而增大。由式(1)知,在相同温度变换范围内,PI 涂敷后 FBG\_2 灵敏度为 16.8  $\text{pm}/^\circ\text{C}$ ,相比于 PI 涂敷前增大。此外,由图 4、图 6 和图 8 的实验数据可得到 FBG 传感器(包含 FBG\_1 温敏区和 FBG\_2 温湿敏区)谐振中心波长变化量与温度和湿度变化量之间的矩阵关系式:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B_1} \\ \Delta\lambda_{B_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & K_{T_1} \\ K_{H_1} & K_{T_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 9.9 \\ 17.1 & 16.8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (2)$$

在实际测量过程中,只需要利用 FBG 解调仪获得 FBG\_1 和 FBG\_2 的波长漂移量,然后利用矩阵(2),即可获得实际环境中的温湿度信息。

## 2.4 FBG 对变温变湿环境同时测量

为了验证 FBG 能同时测量温度和湿度变化信息,实验测量了当温度从 30  $^\circ\text{C}$  变化到 70  $^\circ\text{C}$ 、湿度从 20%RH 变化到 90%RH 时,FBG\_2 的谐振中心波长漂移量,如图 9 所示。

对比图 9、图 6(FBG\_2 对湿度的响应特性)和图 8(FBG\_2 对温度的响应特性)可以看出,当 FBG\_2 处于变温变湿环境时,FBG\_2 谐振中心波长漂移量受到温度和湿度双参数的影响。此时,FBG\_2 谐振中心波长漂移量难以准确测量温度和湿度。然而 FBG\_1 谐振中心波长漂移量只受环境温度的影响,对湿度变化信息不响应。因此,FBG\_1 可准确测量环境温度。当所测环境中的温度信息已知,利用矩阵(2)即可获得环境中的湿度信息,如图 10 所示。

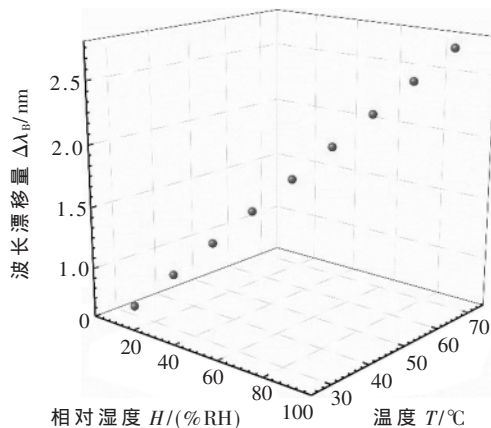


图 9 变温变湿下 FBG\_2 对温湿度的影响特性

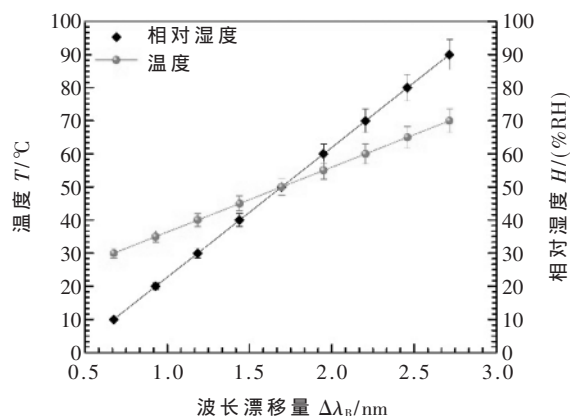


图 10 传感器对变温变湿环境中温度和湿度的响应

图 10 中,所测温湿度与真实温湿度之间的最大相对误差分别为 2.6% 和 3.8%。因此,采用 FBG\_1 与 FBG\_2 耦合可实现变温变湿环境中温度和湿度的准确测量。

## 3 结论

本文采用聚酰亚胺和 FBG 构建了一种用于环境中温湿度准确测量的传感器,实验研究了 FBG\_1 和 FBG\_2 对温湿度的响应特性,以及 FBG 在变温变湿环境下的响应特性。研究发现:在 20~90%RH 和 30~70  $^\circ\text{C}$  变温变湿测试环境中,当 FBG\_2 直径和光栅长度分别为 7.8  $\mu\text{m}$  和 12 mm、聚酰亚胺薄膜厚度为 80  $\mu\text{m}$  时,FBG\_2 能同时响应温度和湿度变化信息,且对温度和湿度的响应灵敏度分别为 16.8  $\text{pm}/^\circ\text{C}$  和 17.1  $\text{pm}/(\% \text{RH})$ ;FBG\_1 只对温度响应,其响应灵敏度为 9.9  $\text{pm}/^\circ\text{C}$ ;该传感器能准确测量变温变湿环境中的温度和湿度信息,湿度和温度的测量相对误差分别低于 3.8% 和 2.6%。本文研究成果可用于对电梯轿厢内温湿度和其他环境中的温湿度变化信息进行准确测量,对提高电梯品位和预防疾病传染都有一定价值。

## 参考文献

- [1] 朱明,王志荣,郭文杰,等.电梯故障率预测模型及其应用[J].中国安全科学学报,2017,27(9):74-78.
- [2] LEONG E C, FONG Y K, LEE D T T, et al. Expedited

# 测控技术与仪器仪表 Measurement Control Technology and Instruments

- soil-water characteristic curve tests using combined centrifuge and chilled mirror techniques[J].Geotechnical Testing Journal, 2017, 41(1): 207-217.
- [3] TACHIBANA K, NAKAMURA T, KAWASAKI M, et al. Measurements of water molecule density by tunable diode laser absorption spectroscopy in dielectric barrier discharges with gas-water interface[J].Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 57(1): 0102BB.
- [4] 程君妮.基于光纤锥和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉湿度传感器[J].物理学报, 2018, 67(2): 173-179.
- [5] ZHONG N, LIAO Q, ZHU X, et al. Fiber Bragg grating with polyimide-silica hybrid membrane for accurately monitoring cell growth and temperature in a photobioreactor[J].Analytical Chemistry, 2014, 86(18): 9278-9285.
- [6] PENG J, QU Y, WANG W, et al. Thin-film-based optical fiber Fabry-Perot interferometer used for humidity sensing[J].Applied Optics, 2018, 57(12): 2967-2972.
- [7] 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.
- [8] SOLTANIAN M R K, AMIRI I S, ARIANNEJAD M M, et al. A simple humidity sensor utilizing air-gap as sensing part of the Mach-Zehnder interferometer[J].Optical and Quantum Electronics, 2017, 49(9): 308.
- [9] DISSANAYAKE K P W, WU W, 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.
- [10] ZHONG N, CHEN M, CHANG H, et al. Optic fiber with  $\text{Er}^{3+}$ :  $\text{YAlO}_3/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  coating and polymer membrane for selective detection of phenol in water[J].Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 273: 1744-1753.
- [11] 董航宇, 孙四梅, 江超, 等.基于单模光纤拉锥构成的光纤折射率传感器[J].激光杂志, 2019, 40(6): 37-40.
- [12] ZHONG N, LIAO Q, ZHU X, et al. Temperature-independent polymer optical fiber evanescent wave sensor[J].Scientific Reports, 2015, 5: 11508.
- [13] ZHONG N, CHEN M, WANG Z, et al. Photochemical device for selective detection of phenol in aqueous solutions[J].Lab on a Chip, 2018, 18(11): 1621-1632.
- [14] 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.

(收稿日期: 2019-12-24)

## 作者简介:

巫涛江(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 光纤传感器、电梯智能监测等。

赵雅(1990-), 女, 硕士, 助教, 主要研究方向: 光纤智能感知。

赵明富(1964-), 通信作者, 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 智能光纤感知技术、光纤传感技术等。



行业聚焦  
Focus on Industry

## 意法半导体推出最新的飞行时间传感器 VL53L3CX

2020年5月26日,意法半导体推出采用直方图算法专利的新产品,进一步扩大其 FlightSense™ ToF 测距传感器的产品范围。新产品可以测量多个目标的距离,而且测距准确度更高。

VL53L3CX 的测距范围是 2.5 cm~3 m,与传统红外传感器不同,测量准确度不受目标物体的颜色或反射率的影响,使终端产品设计人员能够在产品中引入强大的新功能,例如,使占用检测器能够忽略不需要的背景或前景物体,实现正确无误的占用状态探测,或者在传感器视野范围内报告多个目标的准确距离。

意法半导体的直方图算法专利可提高传感器对玻璃盖板串扰的抗扰性,并可以实现实时污渍补偿功能,防止外部污染影响测距准确度,另外环境光下的测距性能也得到了改善。此外,VL53L3CX 的线性度也表现出色,可提高短距离测量的准确度,从而提高服务机器人、吸尘器等设备的循墙、悬崖探测和避障能力。与所有 FlightSense 传感器一样,VL53L3CX 同样采用尺寸紧凑的多合一封装设计,可以简化传感器与客户设备的集成过程,低功耗有助于延长电池续航时间。

ToF 传感器为各种应用设备带来卓越的测距性能,使楼宇自动化和照明控制器的占用检测更可靠,物联网端点设备的接近感测更智能,便携式设备的自动唤醒更方便,以及自动卫浴设备的用户侦测更稳健。ToF 传感器的高精度和快速响应还增强了机器人、室内无人机等对精确运动控制有较高要求的设备的性能。

(来源:意法半导体)

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所