

Double-Layer Microwave Humidity Sensing Based on One-Dimensional Nanomaterials*

JIANG Shipeng, LIANG Junge*, WANG Xiao, WU Jiakang, GU Xiaofeng

(Engineering Research Center of Internet of Things Technology Application, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: With the promotion of sensing technology, microwave humidity detection has been gradually formed and developed in an all-around way. At present, the research mainly focuses on the structure design of microwave devices while neglecting the corresponding improvement of the preparation of humidity-sensitive materials. For its high specific surface area and porosity, one-dimensional nanomaterials are preferred sensitive materials to improve the detection sensitivity. In this paper, a double-layer microwave sensor based on a novel split-ring resonator was designed. Accordingly, the one-dimensional polyacrylonitrile nanomaterial was prepared by high voltage electrospinning technology. The most robust electric field section was set as the sensitive region. The sensitivity of 0.05 dB/%RH (based on insertion loss), 0.15 °/%RH (based on phase), humidity hysteresis of 1.63%RH (based on insertion loss), 3.56%RH (based on phase), and stability with the maximum error is 0.21%RH are achieved in the humidity range of 10%RH ~ 90%RH. The results show that, besides optimizing the device structure, the preparation technology of the sensitive material also highly affects the detection characteristics of the microwave humidity sensor.

Key words: microwave sensor; nanomaterials; electrospinning technology; humidity sensor

EEACC: 7230 doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2021.11.003

基于一维纳米材料的双层微波湿度传感研究*

江世鹏, 梁峻阁*, 王晓, 吴佳糠, 顾晓峰

(江南大学物联网技术应用教育部工程研究中心, 江苏 无锡 214122)

摘要: 微波湿度检测方案在传感技术的推进下逐渐形成并得到全面发展, 现阶段的研究主要从微波器件的结构设计展开, 而忽视了对应的湿敏材料制备及优化。一维纳米材料因其高比表面积和孔隙率, 是有助于提高检测灵敏度的优选敏感材料。本文设计了一款基于新型分裂环谐振器的双层微波传感器, 利用高压静电纺丝技术制备了聚丙烯腈一维纳米材料, 将该湿敏材料置于器件强电场聚集区域, 在 10%RH~90%RH 湿度范围内实现了 0.05 dB/%RH (基于插入损耗)、0.15 °/%RH (基于相位) 的检测灵敏度、1.63%RH (基于插入损耗)、3.56%RH (基于相位) 的湿滞, 在稳定性检测中实现了最大误差 0.21%RH。结果表明除微波检测电极设计, 湿敏材料的制备工艺也显著影响了微波湿度传感器的检测特性。

关键词: 微波传感器; 纳米材料; 静电纺丝技术; 湿度传感器

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2021)11-1433-07

湿度传感器在食品保鲜、环境监测、农业生产等领域有广泛的应用需求。微波检测技术提供了谐振频率、插入损耗、回波损耗和相位^[1-3]等表征参量, 可基于检测范围、灵敏度、湿滞、响应恢复时间和稳定性实现微波检测特性的优化^[4-6]。

基于微波检测技术, 一些新型设计方案被相继提出。例如, Yeo 等人^[7]设计了一款应用于湿度检

测的指状电容缺陷地结构微带谐振器, 通过涂覆不同湿敏材料验证了器件的湿敏特性。Ekmekci 等人^[8]提出了多种基于双分裂环谐振器的超材料湿度传感器, 测试显示这些谐振器在宽频率范围内具有较高的感湿灵敏度。薛严冰等人^[9]设计了一款具有超材料特性的电耦合电容电感谐振器, 测试结果显示, 该传感器的频移灵敏度随着湿度的上升而

项目来源: 中国博士后科学基金(2020M671439, 2020T130283); 中国国家自然科学基金(61903160); 江苏省自然科学基金(BK20190581)

收稿日期: 2021-06-25 修改日期: 2021-07-21

显著增加,在 75%RH~88%RH 高湿范围内灵敏度达到了 71.5 MHz/%RH。上述研究针对微波器件的结构设计进行了创新,以提高微波湿度传感器的检测灵敏度、湿滞等特性,而对于湿敏材料制备工艺这一同样重要的因素的研究有所欠缺。

静电纺丝技术是将高电压作用于液体上以生成一维纳米材料的方法,是加工制备传感器敏感材料的重要工艺。目前已有 In_2O_3 ^[10]、 SnO_2 ^[11]、 TiO_2 ^[12] 等上百种一维复合纳米材料通过高压静电纺丝技术得以成功研制,主要分为纳米线、纳米管、纳米棒等一维纳米结构。静电纺丝纳米线可以广泛的应用于生物工程、传感器、军事、环保等众多领域^[13-14]。

本文提出了新型双层微波传感器,第一层为分裂环谐振器(Split-ring Resonator, SRR)和金属馈电环的组合结构,第二层由嵌套式分裂环谐振器(Nested Split-ring Resonator, NSRR)和接地金属环组成。采用高压静电纺丝技术,制备了聚丙烯腈(Polyacrylonitrile, PAN)一维纳米薄膜作为湿敏材料。首先经过静电纺丝工艺制备的 PAN 纳米纤维随机取向,形成了含有大量微孔的非织造布毡。多孔结构有利于从环境中吸收水分,使纤维膜具有高相对湿度敏感性;其次 PAN 一维纳米材料的高比表面积、多孔结构和强亲水性促进了感湿薄膜的水分子吸收和释放;最后水分子与 PAN 亲水基团之间的氢键也可以更好地与水分结合^[15-16]。因此该微波湿度传感器具有高检测灵敏度、快速响应、湿滞低和稳定性高等优势。

1 实验与原理

1.1 湿敏薄膜的制备与表征

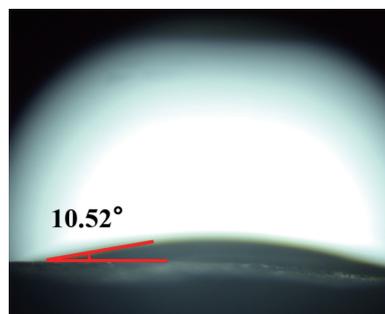
本文利用高压静电纺丝技术制备 PAN 湿敏薄膜,溶质为 PAN,溶剂选用 N,N-二甲基甲酰胺(N,N-dimethylformamide, DMF)。为保证制备过程中反应物的干燥,需将溶质 PAN 在 80 °C 条件下干燥 2 h。随后将 PAN 与 DMF 以 1:10 的重量比例混合,将其置于 80 °C 的水浴锅充分搅拌至溶质 PAN 完全溶解。最后静置 2 h 至澄清、透明、无气泡状态。

采用静电纺丝设备(ET-2535H,购自北京永康乐业科技发展有限公司),控制纺丝温度为 (20 ± 2) °C,纺丝湿度为 (25 ± 2) %RH。将配置好的 PAN 溶液放入注射器并固定于静电纺丝机器电机中。设置静电纺丝程序,正、负电压值分别为 19.43 kV 和 -1.81 kV,注射器的针管内径为 0.25 mm,推注速度为 0.3 mm/min,接收距离为 15 cm。在纺丝之前,将

胶带贴在静电纺丝接受台的铝箔上,开启电源进行纺丝。纺丝结束后,从铝箔上撕下胶带和薄膜如图 1(a),最后将胶带贴在微波器件敏感区域。湿敏薄膜与检测电极结合牢固,且不会因转移过程损坏薄膜本身的湿敏特性。



(a) 湿敏薄膜实物图



(b) 湿敏薄膜接触角

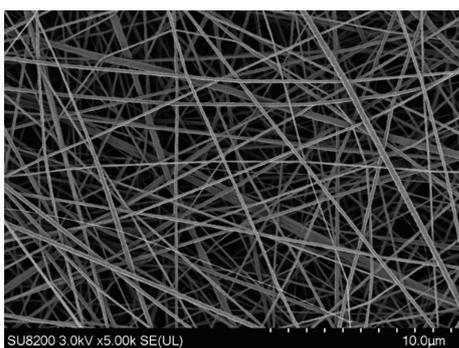
图 1 湿敏材料图

静电纺丝制备的湿敏薄膜如图 1(a)所示,使用光学接触角测量仪(OCA40,德国 DATA PHYSICS 公司),对其进行接触角测量(图 1(b)),经测量接触角为 10.52°。接触角定义为自固-液界面经过液体内部到气-液界面之间的夹角。数据表明制备的 PAN 纳米材料具有良好的亲水性。使用探针式轮廓仪(Dektak XT,德国 BRUKER 公司)测得 PAN 感湿薄膜厚度约为 80 μm。

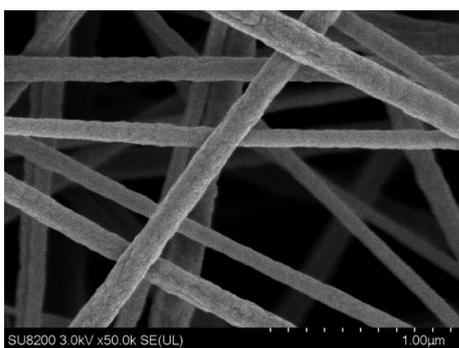
利用冷场发射扫描电子显微镜(FESEM, SU8200,日立高新技术公司)观测 PAN 湿敏薄膜的表面形貌。如图 2 所示, PAN 纳米线形貌均匀,直径在 100 nm 左右,图中纳米线间存在众多间隙,有利于水分子的吸收和扩散,进而提升反应速度,降低湿滞。

1.2 DNSRR 微波传感器的设计与仿真

优化过程如图 3 所示,在传统 SRR 结构的基础上,首先将两个分裂环置于双层,用顶层环激励底层;然后将顶层激励环内部嵌套一个分裂环以增强谐振;最后将底层结构改进成网状分裂环结构。经优化,插入损耗从 -20.82 dB 减小到 -30.53 dB,从而增加器件的检测分辨率和检测范围。



(a) 放大5k倍



(b) 放大50k倍

图 2 湿敏材料 FESEM 图

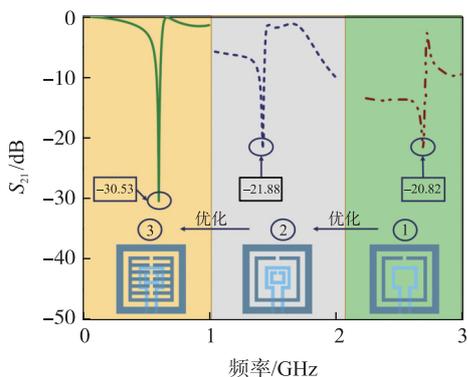


图 3 双层传感器的优化过程

利用 HFSS 软件分别对双层微波传感器、顶层 SRR 与馈电环组合结构进行仿真,相应的回波损耗 S_{11} 如图 4 所示。顶层互补型 SRR 在谐振处的回波损耗为 -19.54 dB , 双层微波谐振器实现了更低的回波损耗 (-29.24 dB), 表明双层结构实现了更好的阻抗匹配。

本文基于分裂环谐振器提出的双层磁耦合谐振结构,如图 5 所示,顶层是 SRR 结构,其周围设有一个矩形馈电环,用于馈电激励底层 NSRR 金属层。底层为 NSRR 结构,接地金属环分布于四周,双层结构的物理尺寸参数列于表 1。

使用 HFSS 软件对此双层结构进行电场仿真,其电场强度分布如图 6(a) 所示。在顶层馈电环的激励下,强电场区域主要分布在 NSRR 附近,强度高

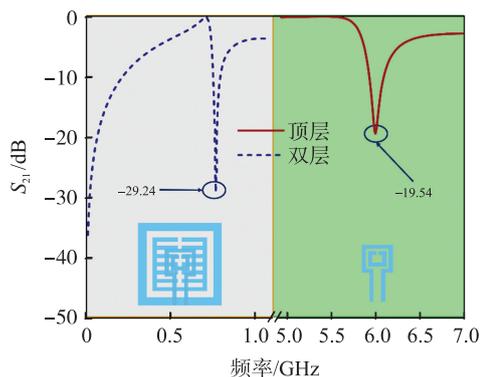


图 4 双层与顶层谐振器的 S_{11} 仿真

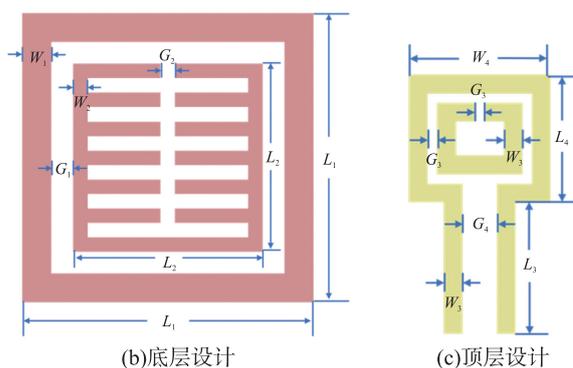
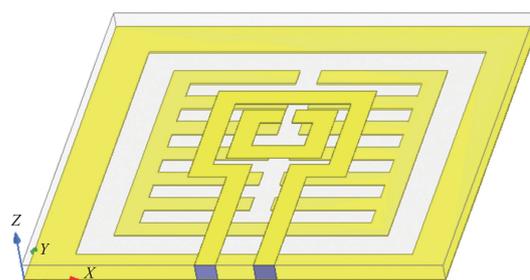


图 5 双层传感器结构设计

达 5000 V/m , 此处适合作为敏感区域用于湿度检测。

表 1 双层传感器设计尺寸参数

参数	数值/mm	参数	数值/mm
L_1	40	L_3	14
L_2	26	L_4	13.6
W_1	4	W_3	2
W_2	2	W_4	15
G_1	3	G_3	1
G_2	2	G_4	3.6

整个器件和 Z 轴负方向截面的电场线分布如图 6(b) 和 6(c) 所示,场强高的电场矢量聚集在 Z 轴,最高值为 25000 V/m 。在 Z 轴负方向的 10000 V/m 电场辐射高度为 2 mm , 大于 PAN 湿敏薄膜厚度,因此强电场可穿透湿敏薄膜,表现为微波参量更大的变化值,有利于提高湿度检测灵敏度。

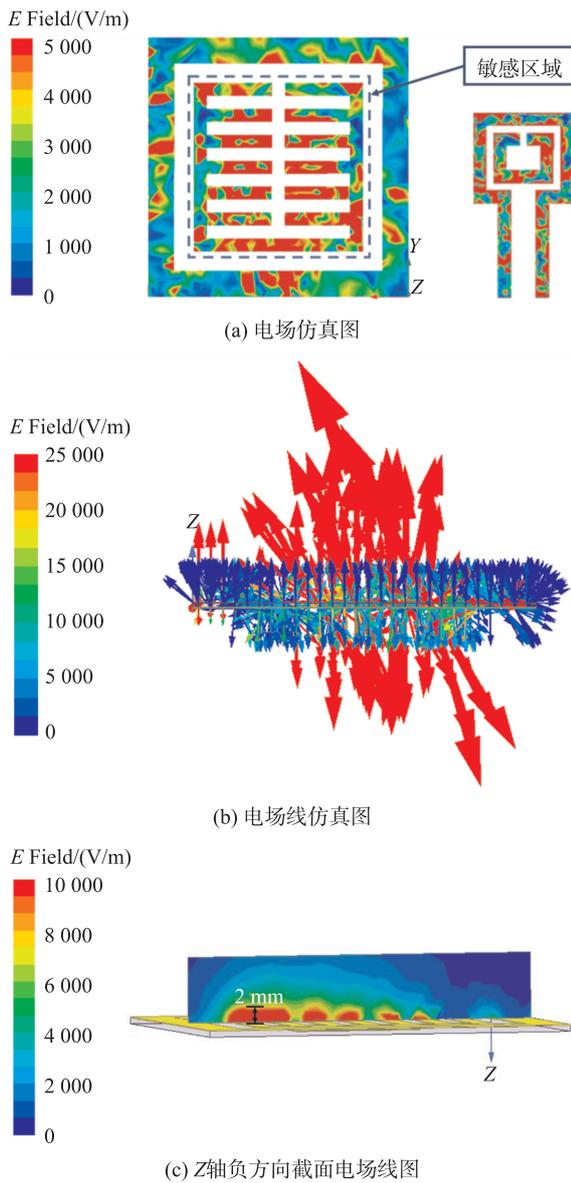


图 6 电场三维分布仿真

1.3 DNSRR 微波传感器的原理

本文设计的双层微波传感器结构的等效电路如图 7 所示,其工作原理可总结为电容电感的谐振,由电容和电感组成的 LC 振荡回路,通过电场能和磁场能的相互转换产生振荡。DNSRR 的谐振频率 f 则可以表示为:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

式中:电感 L 主要来自于金属环的固有电感,包括顶层金属馈电环电感 ($L_{i1} \sim L_{i3}$)、SRR 结构电感 (L_{i4}) 和底层 NSRR 结构电感 ($L_{j1} \sim L_{j8}$)、接地金属环电感 ($L_{j9} \sim L_{j10}$)。电容主要来自金属线间隙之间的电容、指间电容和上下基板之间的电容,包括顶层金属馈电环与 SRR 结构之间的电容 ($C_{g1} \sim C_{g2}$)、SRR 结构间隙电容 (C_{g3}) 和底层 NSRR 结构间隙电容 ($C_{g4} \sim$

C_{g5})、NSRR 指间电容 ($C_{f1} \sim C_{f2}$)、接地金属环与 NSRR 结构之间的电容 ($C_{g6} \sim C_{g7}$) 还有上下基板电容 ($C_{s1} \sim C_{s2}$)。

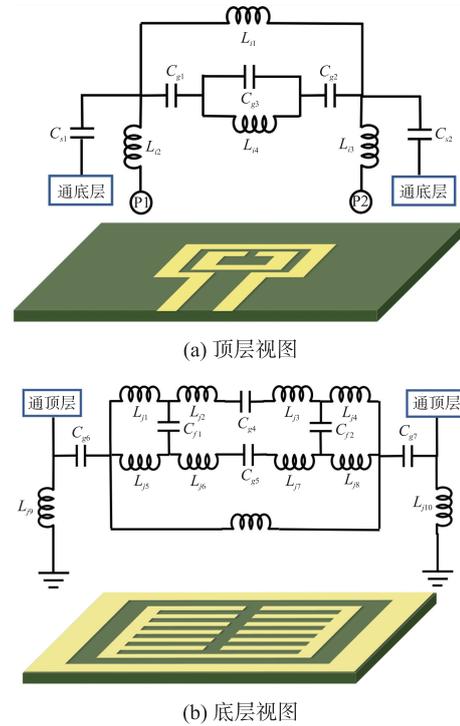


图 7 双层传感器等效电路图

2 结果与讨论

2.1 DNSRR 微波传感器的加工

本文在厚度为 0.54 mm 的聚四氟乙烯高频介质基板(介电常数 $\epsilon_r = 2.54$,损耗正切角 $\tan\delta = 0.002$)上加工制备双层微波湿度传感器。器件的顶层和底层实物如图 8(a) 和 (b) 所示。将特性阻抗为 50 Ω 的 SMA 射频连接器焊接于双层传感器的馈电环上,并将 PAN 湿敏薄膜置于底层的 NSRR 敏感区域中(图 8(c))。

使用矢量网络分析仪(VNA, N9923A, 安捷伦公司)对加工的双层微波传感器进行测试,仿真和实测结果对比如图 9 所示,从图中可知,实测频率减小了 16.83 MHz,插入损耗的幅值增大了 0.66 dB,结果的偏差可归因于加工误差,其偏移量较小可忽略。

2.2 湿度检测性能测试

在如图 10 所示的湿度测试箱体中对双层微波传感器进行测试,商用的温湿度计(SHT31, SENSI-RION 公司)用作湿度参考,VNA 用于实时记录微波器件 S 参数。在 25 $^{\circ}\text{C}$ 的室温下,通过控制干空气和湿空气在 10%RH~90%RH 范围内调节湿度测试箱体内部的环境湿度值。

基于 S 参数的测试结果如图 11(a) 所示,随着

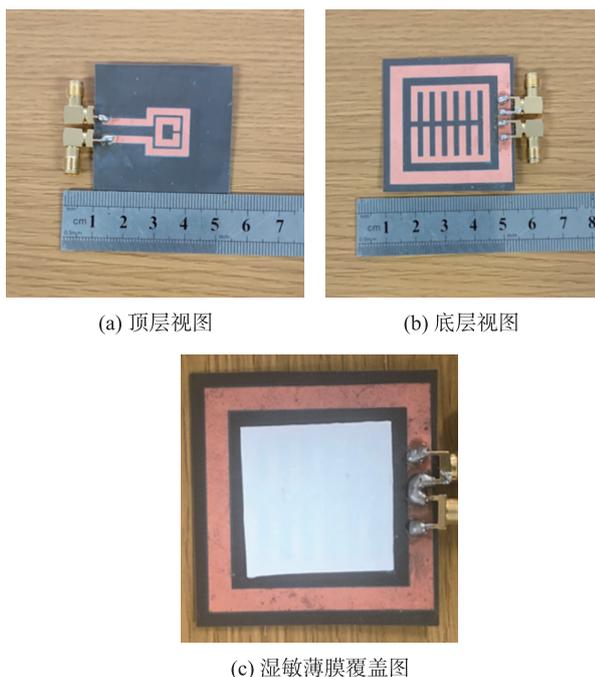


图 8 双层传感器的实物加工图

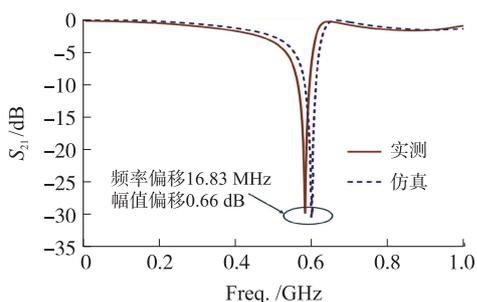


图 9 传感器仿真与实测图

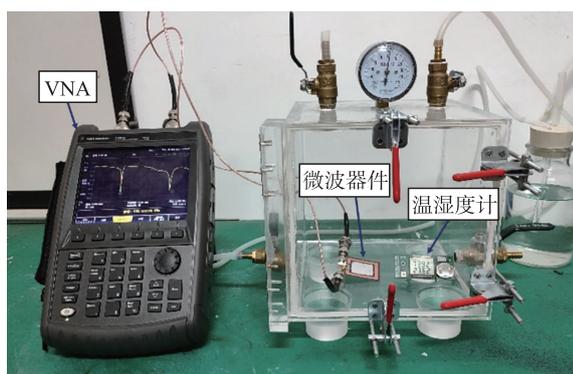
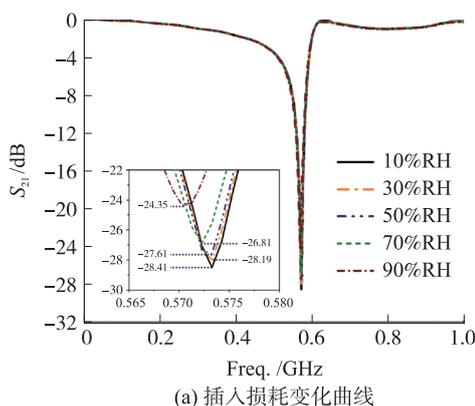


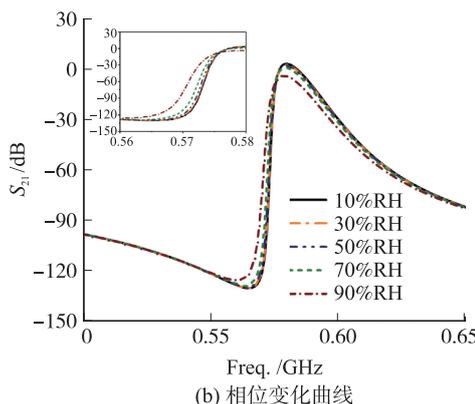
图 10 传感器测试环境

湿度值的增大,传输零点处的频率从 0.573 3 GHz 降低至 0.570 3 GHz,其向低频移动的幅度在 10% RH~90% RH 的湿度范围内较小,仅为 2.97 MHz。插入损耗的变化量更为显著,10% RH~90% RH 湿度范围内 S_{21} 增加了 4.06 dB。随着湿度的增加,水分子的团簇导致湿敏薄膜吸水膨胀,由于水分子的介电常数远大于 PAN 材料,水分子在 PAN 湿敏薄

膜上的吸附,导致敏感层的介电常数增加,微波谐振器的等效电容增加,由式(1)可得谐振频率减小。随着吸附水分子的增多,水分子中的氢离子和氢氧根离子的极化增强,极化损耗也变大,表现为损耗正切角 $\tan\delta$ 增大,品质因数 Q 减小 ($\tan\delta = 1/Q$)。选用响应值更大的插入损耗作为湿度表征参量,得到其随湿度值的变化(图 12(a))。



(a) 插入损耗变化曲线



(b) 相位变化曲线

图 11 微波传感器湿度变化曲线

基于相位的测试结果如图 11(b)所示,相位反射系数可由式(2)得出:

$$\phi = -2 \frac{1}{\tan(\omega Z_0 C)} \quad (2)$$

式中: ω 为电磁信号的频率, Z_0 为 50 Ω 的特征阻抗, C 为开口端的电容值。在 0.56 GHz~0.58 GHz 的频段内,湿度的改变,会引起等效电容值的改变,继而影响相位反射系数,导致相位匹配条件的变化,表现为共振频率的偏移,本质上反映的是相位匹配条件随湿度的变化。通过提取相位峰值与谷值的差值,建立其与湿度值的关系(图 12(b))。

微波湿度传感器的检测灵敏度 S 和湿滞 H 定义为:

$$S_1 = \frac{S_{21}(90) - S_{21}(10)}{90 - 10} \quad (3)$$

$$S_2 = \frac{P(90) - P(10)}{90 - 10} \quad (4)$$

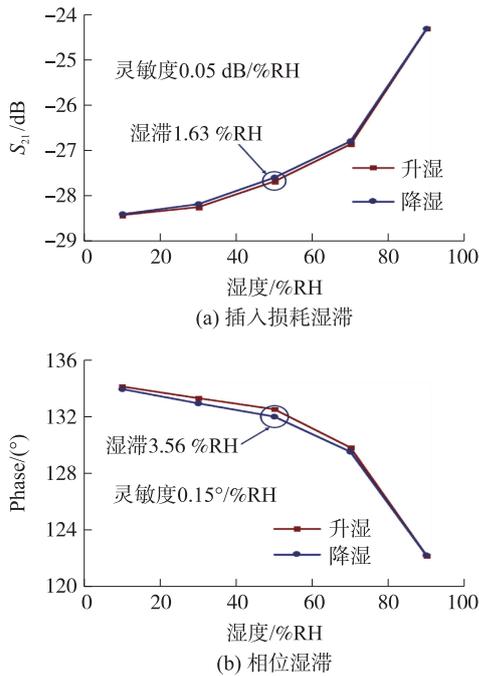


图 12 微波湿度传感器湿度响应与湿滞

$$H_1 = \frac{S_{21}(D50) - S_{21}(A50)}{S_1} \quad (5)$$

$$H_2 = \frac{P(A50) - P(D50)}{S_2} \quad (6)$$

式中: S_1 (dB/%RH)、 S_2 (°/%RH) 分别表示基于插入损耗和相位的灵敏度, H_1 (%RH)、 H_2 (%RH) 分别表示基于插入损耗和相位的湿滞。 $S_{21}(90)$ 、 $S_{21}(10)$ 分别表示在湿度为 90%RH 和 10%RH 时插入损耗的测量值, $P(90)$ 、 $P(10)$ 分别表示在湿度为 90%RH 和 10%RH 时相位的测量值。 $S_{21}(D50)$ 、 $S_{21}(A50)$ 分别表示在湿度为 50%RH 时降湿和升湿过程的插入损耗测量值, $P(A50)$ 、 $P(D50)$ 分别在湿度为 50%RH 时表示升湿和降湿过程的相位测量值。

由式(3)~(6)可知基于插入损耗的灵敏度为 0.05 dB/%RH, 湿滞为 1.63%RH; 基于相位的灵敏度为 0.15 °/%RH, 湿滞为 3.56%RH。这是由于材料的特性导致, 因为湿敏薄膜为多孔材料, 在升湿与降湿过程中, 有利于水分子的吸收和释放, 故湿滞很小。

响应时间和恢复时间定义为从 10%RH 升湿至 90%RH、90%RH 降湿到 10%RH 时, 微波表征参量相应变化所需的时间。本文制备的双层微波湿度传感器的响应恢复时间, 如图 13 所示, 传感器响应时间约为 16 s, 恢复时间约为 20 s。响应时间小于恢复时间, 因为湿敏薄膜是亲水性材料, 吸水能力大于脱水能力。当湿度从高湿降为低湿时, 湿敏薄膜中的水分会缓慢逸出, 故降湿的时间会更长。

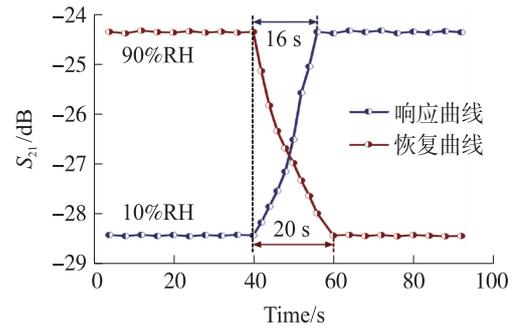


图 13 湿度传感器响应恢复时间

将此微波湿度传感器分别置于湿度为 30%RH、50%RH 和 70%RH 的室温环境下 24 h, 对其稳定性进行测试(图 14), 误差 E 定义为:

$$E = \frac{1}{S} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (7)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N, S$ 为传感器灵敏度。由此可计算得到最大误差为 0.21%RH, 最小误差为 0.09%RH, 稳定性良好。

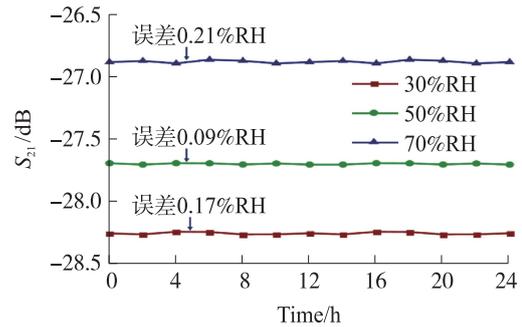


图 14 微波湿度传感器稳定性测试

表 2 引入基于沉积^[17]及热处理工艺^[18]制备的微波湿度传感器, 并将其性能指标与本文提出的静电纺丝工艺进行对比。不考虑微波检测电极结构的前提下, 本文提出的静电纺丝工艺灵敏度(0.0510 dB/%RH)是沉积工艺检测灵敏度的 21 倍, 是热处理技术检测灵敏度的 2 倍。对文献[17]中提到的沉积工艺而言, 湿敏材料的附着力低, 因此薄膜厚度仅为 10.7 nm, 推测是该方案灵敏度显著低于本方案例(膜厚 80 μm)的关键原因; 文献[18]采用热处理方式制备的湿敏薄膜, 是基于高分子材料在热固化下的交联反应形成致密稳定的薄膜材料。该类材料孔隙率低、比表面积小, 限制了对外界水蒸气的吸收和释放能力。本文提出的静电纺丝湿敏材料, 属于一维纳米材料, 在结构上具备较高的孔隙比例和比表面积, 可以通过纺丝时间来控制薄膜厚度, 且强度高, 有利于水分的吸收和释放。因此, 静电纺丝工艺制作的 PAN 湿敏薄膜具有更高的基于插入损耗的灵敏度。

表 2 静电纺丝工艺与其他工艺的比较

参考文献	湿敏材料	制备工艺	检测范围/%RH	灵敏度/(dB/%RH)
[17]	PEDOT:PSs	沉积	5~80	0.002 4
[18]	TOCN/PPy	热处理	22.8~75.3	0.024 2
本文	PAN	静电纺丝	10~90	0.051 0

3 结论

本文基于静电纺丝技术,制备了直径在 100 nm 左右的聚丙烯腈纳米湿敏材料。设计并制备了一款双层嵌套分裂环谐振器,利用仿真确定高电场强度分布的敏感区域,并在此区域放置敏感材料。测试结果表明,该传感器具有较高的检测灵敏度(0.05 dB/%RH(基于插入损耗)、0.15 %/%RH(基于相位)的检测灵敏度)、较低的湿滞(1.63%RH(基于插入损耗)、3.56%RH(基于相位))、和较高的稳定性(最大误差 0.21%RH),为微波湿度传感器研发在微波结构的设计与湿敏材料的优化提供了有益的参考。

参考文献:

- [1] Su L J, Huang X, Guo W, et al. A Flexible Microwave Sensor Based on Complementary Spiral Resonator for Material Dielectric Characterization[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(4): 1893-1903.
- [2] Sharma P, Lao L Y, Falcone G. A Microwave Cavity Resonator Sensor for Water-in-Oil Measurements[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 262: 200-210.
- [3] Kozak R, Wiltshire B D, Khandoker M A R, et al. Modified Microwave Sensor with a Patterned Ground Heater for Detection and Prevention of Ice Accumulation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(49): 55483-55492.
- [4] Yang M Z, Dai C L, Lin W Y. Fabrication and Characterization of Polyaniline/PVA Humidity Microsensors[J]. Sensors, 2011, 11(8): 8143-8151.
- [5] Ashok C H, Rao K V. Synthesis of Nanostructured Metal Oxide by Microwave-Assisted Method and Its Humidity Sensor Application[J]. Materials Today Proceedings, 2017, 4(2): 3816-3824.
- [6] Hu Y C, Dai C L, Hsu C C. Titanium Dioxide Nanoparticle Humidity Microsensors Integrated with Circuitry on-a-Chip[J]. Sensors (Switzerland), 2014, 14(3): 4177-4188.
- [7] Yeo J, Kwon Y. Humidity Sensing Performance of Defected Ground Structure-Based Microwave Sensors Coated with PMMA, PHEMA, and PVA[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63(4): 1194-1200.
- [8] Ekmekci E, Kose U, Cinar A, et al. The Use of Metamaterial Type Double-Sided Resonator Structures in Humidity and Concentration Sensing Applications[J]. Sensor and Actuators A: Physical, 2019, 297: 111559.
- [9] 薛严冰, 孟影, 宋智. 基于 ELC 谐振器的湿度传感器[J]. 传感技术学报, 2017, 30(3): 341-347.
- [10] 包楠, 张博, 倪屹. 基于 In₂O₃ 纳米纤维的高响应及快速恢复的室温 NO₂ 气体传感器研究[J]. 传感技术学报, 2021, 34(2): 168-174.
- [11] 侯伟, 王俊和, 程永强, 等. NiO 纳米纤维掺杂 SnO₂ 检测液态甲醛的机理和性能[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(7): 578-583, 645.
- [12] Liu Z L, Wang N, Ma L, et al. Elaboration and Photocatalytic Properties of CoFe₂O₄/TiO₂ Composite Nanowires with the Side-By-Side Structure[J]. Materials Research Bulletin, 2021, 141: 111354.
- [13] 王兴雪, 王海涛, 钟伟, 等. 静电纺丝纳米纤维的方法与应用现状[J]. 非织造布, 2007, 15(2): 14-20.
- [14] Huang Z M, Zhang Y Z, Kotaki M, et al. A Review on Polymer Nanofibers by Electrospinning and Their Applications in Nanocomposites[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63(15): 2223-2253.
- [15] Rianjanu A, Julian T, Hidayat S N, et al. Quartz Crystal Microbalance Humidity Sensors Integrated with Hydrophilic Polyethyleneimine-Grafted Polyacrylonitrile Nanofibers[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 319: 128286.
- [16] 孙倩, 阚燕, 李晓强, 等. 聚丙烯腈/氯化钴纳米纤维比色湿度传感器的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2020, 41(11): 27-33.
- [17] Park J K, Kang T G, Kim B H, et al. Real-Time Humidity Sensor Based on Microwave Resonator Coupled with PEDOT:PSS Conducting Polymer Film[J]. Scientific Reports, 2018, 1(1): 1-8.
- [18] Eyebe G A, Bideau B, Loranger E, et al. Printed Microwave Frequency Humidity Sensor Operating with Phase Shifting Scheme[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(3): 2854-2863.



江世鹏(1995—),男,2019年于东北大学获得学士学位,现为江南大学硕士研究生,主要研究方向为微波测量与传感技术,6201922012@stu.jiangnan.edu.cn;



梁峻阁(1991—),通信作者,男,2018年于韩国光云大学获得博士学位,现为江南大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为传感器研发、射频通信集成无源器件的设计和开发,jgliang@jiangnan.edu.cn。