

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0161

# 基于无芯片 RFID 的低成本湿度传感器设计

王博\*, 李有为, 王柯

(西安邮电大学 自动化学院, 西安 710121)

**摘 要:** 设计一款低成本无芯片射频识别 (RFID) 传感器用于环境湿度监测具有重要意义。为此, 将聚乙烯醇 (PVA) 薄膜用作湿度敏感材料, 矩形基板的整体尺寸为  $18\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ , 通过感湿原理和仿真分析, 环境湿度的变化引起湿度敏感材料 PVA 介电常数的变化, 进而影响整个传感器谐振频率偏移。仿真结果表明: 所设计的湿度传感器相对湿度工作范围为  $21.9\% \sim 52.5\%$ , 对应传感器谐振频率范围为  $2.76 \sim 2.51\text{ GHz}$ , 偏移总量达到  $250\text{ MHz}$ , 最大相对湿度下平均灵敏度为  $23.08\text{ MHz}/\%$ 。所设计的湿度传感器具有小型化、结构简易和低成本等优点, 可应用于各种目标环境的湿度监测。

**关键词:** 低成本; 无芯片射频识别湿度传感器; 聚乙烯醇; 湿度监测; 湿度敏感材料

**中图分类号:** TN98

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2024)03-1047-06

射频识别 (radio frequency identification, RFID) 是一种相当便捷的技术, 其促进了非视距通信技术的发展, 一方面能实现双向的无线通信, 另一方面能提高标签的读取效率, 增加标签的读取距离。RFID 技术在湿度传感器领域应用广泛, 如物流监测、温室大棚、食品保障和冷链运输等方面<sup>[1]</sup>。传统的湿度传感器按照测量原理和方法区分, 可分为电容式、电阻式、重力测量式和微波式<sup>[2]</sup>。无芯片 RFID 湿度传感器由于其整体结构简单, 制作成本低廉, 同时还能实现对湿度变化的实时监测, 广受市场的青睐。

目前, 已研究和提出了一些新型湿度敏感材料和湿度传感器结构。文献 [3] 成功在射频芯片中集成湿度传感功能, 该传感器具有稳定性好、功耗低的特点, 但生产制作成本较高, 制造工艺复杂, 制约着大批量推广应用。文献 [4] 在 FR4 衬底上开槽蚀刻出散射体结构, 用于感知湿度变化的传感单元由沉积在狭缝表面的硅纳米线组成。文献 [5] 提出一

种尺寸大小为  $20\text{ mm} \times 17.6\text{ mm}$  的弯折式湿度传感结构, 同时使用聚酰亚胺薄材料作为敏感材料, RFID 标签在 Taconic TLX-0 上实现, 工作带宽为  $2.62\text{ GHz}$ 。文献 [6] 设计了一种基于环形缝隙天线单元的双极化传感标签, 该天线在 2 个紧密间隔的谐振频率下工作, 同时使用聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 进行湿度传感, 可用于密封包装食品中相对湿度的监测。

伴随着技术的发展, 更多的柔性聚合物基底和刚性聚合物基底开始进入人们的视野。文献 [7-8] 采用纸作为基板, 借助纸基的吸水性, 但在纸张处于较高湿度的情况下, 这种关系是非线性的, 影响雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 曲线中的吸收峰值。文献 [9] 的基板采用 Rogers TMM 4 板材, 整个叉指电容的长度为  $23\text{ mm}$ , 宽度为  $13.2\text{ mm}$ , 工作频率为  $29\text{ MHz}$ , 相对湿度平均灵敏度仅为  $0.03\text{ MHz}/\%$ 。文献 [10] 提出的湿度传感器采用 MEGTRON6 基板, 用于监测建筑物结构年龄老化

收稿日期: 2023-04-04; 录用日期: 2023-09-23; 网络出版时间: 2023-10-13 10:39

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20231011.1308.002

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (12204373); 陕西省教育厅专项科研计划 (17JK0691)

\*通信作者. E-mail: wangbo\_chen@126.com

**引用格式:** 王博, 李有为, 王柯. 基于无芯片 RFID 的低成本湿度传感器设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50 (3): 1047-1052.

WANG B., LI Y W., WANG K. Design of a low cost chipless RFID humidity sensor [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50 (3): 1047-1052 (in Chinese).

问题, L 型谐振单元结构简易, 但尺寸较大, 不利于大规模使用。传统的湿度传感器结构采用 LC 谐振, 但当传感器贴敷在金属物体表面时, 产生的涡流会严重影响测量结果。2012 年, Vena 等<sup>[11]</sup>提出环形结构, 并应用于无芯片 RFID 传感器的谐振单元, 这种结构的基板面积能得到最大程度的利用, 而且环形结构也使得谐振器紧凑。

综上所述, 将圆环形谐振结构应用于环境湿度的监测, 解决了目前湿度传感器灵敏度低、尺寸大及谐振特性差的问题。本文提出的湿度传感器尺寸仅为 18 mm×18 mm×0.5 mm, 相对湿度检测范围为 21.9%~52.5%, 具有小型化、低剖面、结构简易的特点, 其相对湿度平均灵敏度最大可达 23.08 MHz/%, 对目标环境有着较好的湿度检测能力。

1 传感器设计

图 1 为湿度传感器工作原理, 无芯片 RFID 传感器的工作原理是基于后向散射技术。该监测系统一般包含 3 个部分: 传感器、RFID 阅读器及计算机处理系统。RFID 阅读器发射电磁波入射到传感器表面, 在传感器金属导体表面产生感应电流, 感应电流产生感应电磁波, 湿度信息加载在电磁波中反射回阅读器接收端。传感器表面覆盖的 PVA 具有感知环境湿度的特性, 其介电常数随湿度的变化而改变, 进而引起传感器反射电磁波的谐振频率偏移。因此, 通过监测反射电磁波的谐振频率可识别湿度变化。

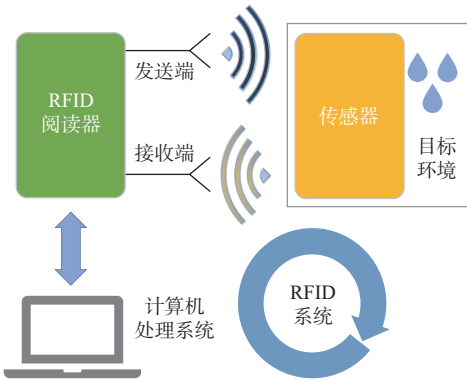


图 1 湿度传感器工作原理  
Fig. 1 Working principle of humidity sensor

1.1 湿度传感器结构

本文提出了一种基于圆环形谐振结构的无芯片 RFID 湿度传感器, 圆环形谐振结构分布在 Rogers RO4003 介质基板上, 并在基板表面覆盖湿度敏感材料 PVA 薄膜, 来实现湿度检测的功能。图 2 为湿度传感器的剖面结构。其为 3 层结构, 最上面白色层由 PVA 薄膜构成, 厚度为  $h_1$ ; 中间层选

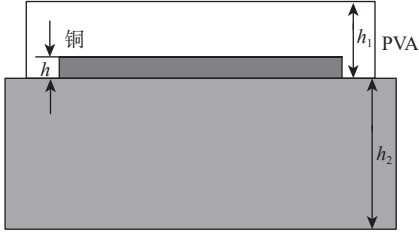


图 2 湿度传感器结构剖面图  
Fig. 2 Sectional view of humidity sensor structure

用价廉且易于加工的铜作为谐振器材料, 厚度为  $h$ ; 最下面一层选用常见的 Rogers RO4003 作为基底, 其介电常数为 3.38, 厚度为  $h_2$ 。

1.2 圆环形谐振器

湿度传感器的标签天线采用圆环形谐振结构, 主要有 2 个优点: ①结构方面, 圆环形谐振器结构简单且对称, 易于加工, 可最大限度地利用基板面积, 同时调整圆环形结构的线宽和半径, 可轻易改变其谐振值。②性能方面, 圆环形谐振器电流分布集中, 具有良好的谐振特性<sup>[12]</sup>, 能满足湿度传感器对性能的要求。图 3 为湿度传感器侧视图, 其基板高度  $H=18\text{ mm}$ , 线宽  $W=1.5\text{ mm}$ , 圆环外半径  $R=4\text{ mm}$ 。

如图 4 所示, 当圆环形谐振结构被电磁波激励时, 圆环金属表面产生谐振电流且分布对称, 电流方向是自上而下流动。参考文献 [13] 可知, 此时环上的 2 个开路点形成驻波形式, 类似于并列弯曲的

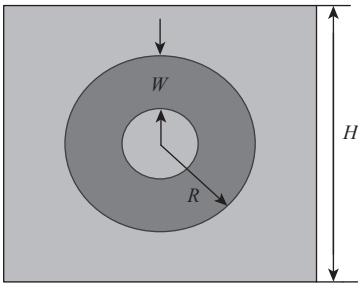


图 3 湿度传感器侧视图  
Fig. 3 Side view of humidity sensor

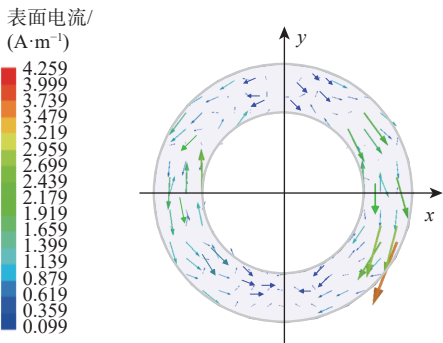


图 4 圆环形谐振器电流分布  
Fig. 4 Current distribution of circular ring resonator

2 个半波偶极子。文献 [14] 研究了影响圆环形谐振器的一个重要因素, 即圆环形结构的线宽  $W$ 。一方面, 选择合适线宽  $W$  以获得最佳谐振, 另一方面, 探究圆环内部空间的合理布局。使用式 (1) 来计算圆环谐振器的谐振频率<sup>[15]</sup> 为

$$f_r = \frac{c}{2\pi R} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

(1)

式中:  $f_r$  为传感器的谐振频率;  $c$  为真空中光速;  $R$  为圆环的外半径;  $\epsilon_r$  为基板的相对介电常数。

1.3 感湿机理

无芯片 RFID 湿度传感器由 RFID 标签和覆盖其表面的湿敏材料构成。湿度传感器的工作原理为: 环境中相对湿度发生变化时, 覆盖在基板表面的湿敏材料介电常数会发生相应改变, 使用 RFID 阅读器的发送天线发射电磁波到传感器的表面, 与此同时, 接收天线会收到传感器表面反射的特定谐振频率的电磁波, 此时观察到谐振频率发生规律性偏移, 最终可以在环境相对湿度与传感器谐振频率之间建立起一一对应的关系, 通过监测传感器的谐振频率, 就可以监测目标环境的相对湿度。

选用 PVA 作为无芯片 RFID 湿度传感器的湿度敏感材料, 水分子通过吸附和吸收快速扩散到聚合物基质中, 与聚酰亚胺等疏水聚合物相比, 基于 PVA 的湿度传感器具有更高的灵敏度和更快的响应时间<sup>[16]</sup>。文献 [17] 指出, 在较小湿度环境中, PVA 介电常数约为 1.6, 但在较大湿度环境中, 其介电常数可迅速增至约 80。文献 [18] 计算出 1~10 GHz 频段内 PVA 在不同相对湿度中的介电常数, 其中, 2 GHz、3 GHz 中 PVA 介电常数如表 1 所示。

由表 1 可知, 当环境相对湿度较低时, PVA 的介电常数波动程度较小。随着相对湿度增加至 94%, PVA 介电常数激增至 41, 与相对湿度为 21.9%

的 PVA 介电常数的数值相差较大。根据相对湿度选择对应的介电常数, 为仿真实验做准备。

2 仿真分析

使用 HFSS 射频仿真软件进行湿度传感器建模, 并对湿度敏感材料层的感湿机理进行仿真验证。在介质基板上覆盖厚度为 0.2 mm 的薄层来近似模拟 PVA 感湿过程, 改变敏感材料层介电常数的数值来代替环境中相对湿度的变化过程, 最终构建的湿度传感器仿真模型如图 5 所示。介电常数参数大小设置为 5.06、5.08、5.18、5.38、6.2。

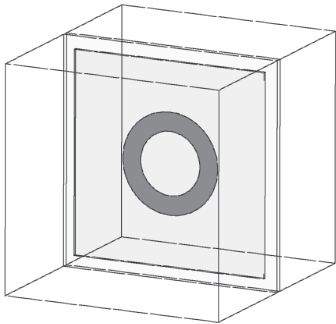


图 5 湿度传感器仿真模型  
Fig. 5 Simulation model of humidity sensor

圆环形谐振结构被电磁波垂直激励时, 金属圆环表面会产生感应电流,  $y$  轴对称分布, 正半轴和负半轴方向形成 2 个开路点, 等效为 2 个平行的弯曲半波偶极子。矩形贴片天线具有 2 个不同频率谐振特性, 即沿其长度方向和宽度方向谐振。圆环贴片可以等效为 2 个平行的矩形贴片, 产生多个频率谐振, 即波峰和波谷。

由于偶极子形成的波峰频率是不变的, 圆环形贴片天线的波峰频率也不变, 优化目标是将其波谷谐振频率改变, 反映出不同介电常数的变化, 进而说明湿度的变化。

由图 6 可知, 传感器谐振频率有波峰和波谷。不同介电常数对应的波峰都在同一个谐振频率点, 无法通过识别反射信号的波峰谐振频率点分辨出介电常数及对应的湿度。然而, 不同介电常数对应的波谷不在同一个谐振频率点, 随着介电常数的增大, 对应的谐振频率点减小。因此, 识别传感器的波谷谐振频率点, 可以分辨不同的介电常数及对应的湿度。湿度敏感材料 PVA 影响波谷的频率, 仿真曲线在 2.76~2.51 GHz 频率范围内发生规律性偏移。当 PVA 介电常数为 5.06 时, 谐振频率为 2.76 GHz; 当 PVA 介电常数为 6.2 时, 谐振频率为 2.51 GHz。仿真结果表明, PVA 介电常数增加, 谐振频率出现向左的规律性偏移, 偏移总量达到了

表 1 PVA 在不同相对湿度中介电常数变化

Table 1 Electrical constant of PVA varies with different relative humidities

| 相对湿度/% | 介电常数  |       |
|--------|-------|-------|
|        | 2 GHz | 3 GHz |
| 21.9   | 5.06  | 5.12  |
| 29.1   | 5.08  | 5.14  |
| 35.6   | 5.18  | 5.21  |
| 44.7   | 5.38  | 5.41  |
| 52.5   | 6.2   | 6.18  |
| 64     | 7.7   | 7.5   |
| 69.5   | 8.6   | 8.4   |
| 80.4   | 15    | 14    |
| 90.9   | 29    | 27    |
| 94     | 41    | 38    |

250 MHz。设计的湿度传感器谐振频率偏移明显且谐振幅值基本相同,有利于识别环境中相对湿度的变化。

图 7(a) 为 PVA 介电常数与传感器谐振频率的关系,将图 6 中谐振频率点与介电常数提取出来,谐振频率与介电常数之间表现出单调递减的关系。由文献 [18] 可知,PVA 介电常数随相对湿度的变化如图 7(b) 所示。将图 7(a) 与图 7(b) 数据关联

起来,提取相对湿度与谐振频率如图 8 所示。为模拟传感器的线性度,在工作频段内对传感器进行线性拟合,最终的拟合公式为

$$f = 1.171\,3 + 0.205\,1u - 9.64 \times 10^{-3}u^2 + 1.961\,7 \times 10^{-4}u^3 - 1.481\,2 \times 10^{-6}u^4$$

(2)

式中: $f$  为传感器当前的谐振频率; $u$  为对应频率下的相对湿度。

可知,在频段内,相对湿度与传感器谐振频率之间表示出近似单调递减关系,说明无芯片 RFID 湿度传感器工作原理的可行性,同时证明了监测传感器谐振频率可以实现监测环境湿度。

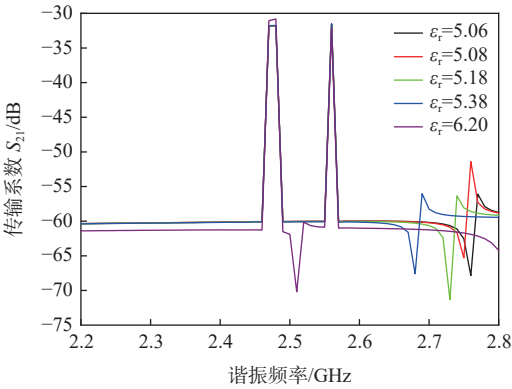
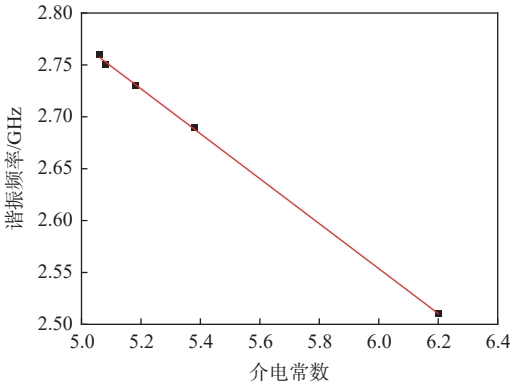
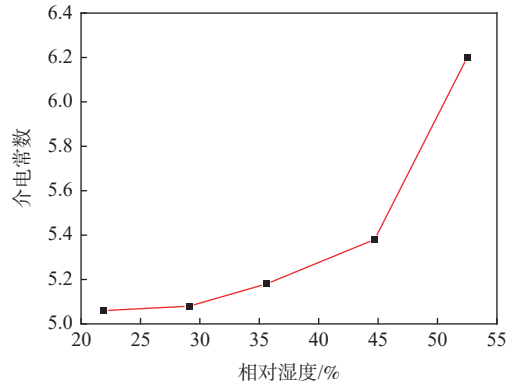


图 6 不同介电常数下传感器谐振频率变化

Fig. 6 Variation of sensor resonant frequency under different dielectric constants



(a) 谐振频率与介电常数变化关系



(b) 介电常数与相对湿度变化关系

图 7 介电常数与谐振频率、相对湿度关系

Fig. 7 Relationship between dielectric constant and resonant frequency, relative humidity

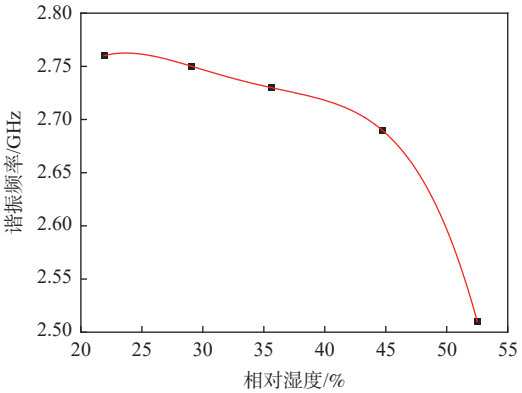


图 8 相对湿度与谐振频率变化关系

Fig. 8 Relation between relative humidity and resonant frequency

为表征湿度传感器性能状况,引入平均灵敏度 $\eta$ <sup>[18]</sup>这一概念,平均灵敏度的含义为谐振频率变化与相对湿度变化比值的绝对值,如下:

$$\eta = \frac{|f_1 - f_2|}{|u_1 - u_2|}$$

(3)

式中:相对湿度值分别为 $u_1$ 和 $u_2$ ,该湿度对应的谐振频率为 $f_1$ 和 $f_2$ 。

最终 $\eta$ 的计算结果如表 2 所示。分析可知,在相对湿度低于 35.6% 时, $\eta$  较低。随着相对湿度增加, $\eta$  逐渐增大,相对湿度从 44.7% 升至 52.5% 时, $\eta$  达 23.08 MHz/%。

| 表 2 相对湿度为 21.9%~52.5% 时平均灵敏度 $\eta$                          |                                |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Table 2 Average sensitivity at 21.9%~52.5% relative humidity |                                |
| 相对湿度/%                                                       | $\eta$ /(MHz·% <sup>-1</sup> ) |
| 21.9                                                         |                                |
| 29.1                                                         | 1.389                          |
| 35.6                                                         | 3.077                          |
| 44.7                                                         | 4.396                          |
| 52.5                                                         | 23.08                          |

表 3 为不同湿度传感器之间性能参数的对比。本文提出的无源无线湿度传感器的灵敏度表

表 3 不同湿度传感器参数对比

Table 3 Comparison of parameters of different humidity sensors

| 传感器   | 基板材料          | 敏感材料 | 面积/cm <sup>2</sup> | $\eta$ /(MHz·% <sup>-1</sup> ) | 相对湿度/%    |
|-------|---------------|------|--------------------|--------------------------------|-----------|
| 文献[4] | FR4           | 硅纳米线 | 16                 | 3.58                           | 30~90     |
| 文献[5] | Taconic TLX-0 | 聚酰亚胺 | 3.52               | 2.14                           | 30~100    |
| 文献[6] | FR4           | PVA  | 7.55               |                                | 33~85     |
| 本文    | Rogers RO4003 | PVA  | 3.24               | 8.17                           | 21.9~52.5 |

现较好,在整个湿度传感范围内,  $\eta$  为 8.17 MHz/%, 在 44.7%~52.5% 相对湿度范围内,最高可达 23.08 MHz/%;同时,还具有较小的尺寸。与文献 [4-6] 相比,文献 [4] 拥有较好的工作范围和灵敏度,但其整体尺寸最大,文献 [5] 的感湿范围最大,但其灵敏度较小,文献 [6] 的整体尺寸和感湿的工作范围则表现一般。综上所述,本文提出的湿度传感器综合性能表现良好,具有一定环境湿度监测的能力。

3 结 论

- 1) 设计基于圆环形谐振结构的无芯片 RFID 湿度传感器,整体尺寸为 18 mm×18 mm×0.5 mm,圆环形谐振器采用铜作为导体,并在铜表面覆盖 PVA 湿度敏感薄膜,实现了整体的简易制作,利于后期的推广使用。
- 2) 分析了传感器的表面电流分布情况,通过对仿真数据进行拟合,证明了谐振频率与相对湿度存在一一对应关系,即随着环境相对湿度升高,谐振频率下降。
- 3) 相对湿度监测范围为 21.9%~52.5%,对应谐振频率偏移 250 MHz,平均灵敏度最大可达为 23.08 MHz/%,具有良好的湿度监测精度,能实现各种环境的湿度检测。

参考文献 (References)

[ 1 ] FINKENZELLER K. RFID handbook[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2010.

[ 2 ] 孙梦雅, 施斌, 冯晨曦, 等. 微型 FBG 湿度传感器研发与试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 25-33.

SUN M Y, SHI B, FENG C X, et al. Design and experimental research on a miniature FBG humidity sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 25-33(in Chinese).

[ 3 ] 刘茂旭, 何怡刚, 邓芳明, 等. 融合 RFID 的无线湿度传感器节点设计研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1171-1178.

LIU M X, HE Y G, DENG F M, et al. Design research on a wireless humidity sensor node integrated with RFID[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29(8): 1171-1178(in Chinese).

[ 4 ] DENG F, HE Y, LI B, et al. Design of a slotted chipless RFID humidity sensor tag[J]. Sensors and Actuators B:Chemical, 2018, 264: 255-262.

[ 5 ] AMJAD A, JAFRI S I, HABIB A, et al. RFID humidity sensor tag for low-cost applications[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2017, 32(12): 1082-1088.

[ 6 ] RAJU R, BRIDGES G E. Radar cross section-based chipless tag with built-in reference for relative humidity monitoring of packaged food commodities[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 18773-18780.

[ 7 ] 王思睿, 薛严冰, 宋智, 等. 纸基底印刷无芯片 RFID 湿度传感器[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 150-158.

WANG S R, XUE Y B, SONG Z, et al. Inkjet-printed chipless RFID humidity sensor based on paper substrate[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 150-158(in Chinese).

[ 8 ] XIE M Z, WANG L F, DONG L, et al. Low cost paper-based LC wireless humidity sensors and distance-insensitive readout system [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(12): 4717-4725.

[ 9 ] 李小菲. LC 无源湿度传感器研究及实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.

LI X F. LC passive humidity sensor research and implementation [D]. Xi'an: Xidian University, 2014(in Chinese).

[10] NATSUKI K, TAKAO M, MASATOSHI K. Novel sensing techniques of chipless RFID sensor for infrastructure[J]. IEICE Communications Express, 2020, 9(6): 244-249.

[11] VENA A, PERRET E, TEDJINI S. A compact chipless RFID tag using polarization diversity for encoding and sensing[C]//Proceedings of the 6th IEEE International Conference on RFID. Piscataway: IEEE Press, 2012: 191-197.

[12] ATHAUDA T, KARMAKAR N C. The realization of chipless RFID resonator for multiple physical parameter sensing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5387-5396.

[13] 陈玉莹. 具有抗杂波性能的无芯片 RFID 传感器标签的研究与设计[D]. 太原: 山西大学, 2021.

CHEN Y Y. Research and design of chipless RFID sensor tags with anticlutter performance[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021(in Chinese).

[14] VENA A, PERRET E, TEDJINI S. High capacity chipless RFID tag insensitive to the polarization[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(10): 4509-4515.

[15] DISSANAYAKE T, ESSELLE K P. Prediction of the notch frequency of slot loaded printed UWB antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(11): 3320-3325.

[16] PAUL D R. Water vapor sorption and diffusion in glassy polymers [J]. Macromolecular Symposia, 1999, 138(1): 13-20.

[17] SENGWA R J, KAUR K. Dielectric dispersion studies of polyvinyl-alcohol in aqueous solutions[J]. Polymer International, 2000, 49(11): 1314-1320.

[18] LU D, ZHENG Y, PENIRSCHKE A, et al. Humidity dependent permittivity characterization of polyvinyl-alcohol film and its application in relative humidity RF sensor[C]//Proceedings of the 44th European Microwave Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 163-166.

Design of a low cost chipless RFID humidity sensor

WANG Bo<sup>\*</sup>, LI Youwei, WANG Ke

(School of Automation, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** It is of great significance to design a low cost chipless radio frequency identification (RFID) sensor for environmental humidity monitoring. Polyvinyl alcohol (PVA) film is used as a humidity-sensitive material and the overall size of the rectangular substrate is 18 mm×18 mm×0.5 mm. Based on simulation studies and the humidity sensing principle, the permittivity of the humidity-sensitive material PVA changes in response to changes in ambient humidity, which in turn influences the resonant frequency shift of the entire sensor. The simulation results show that the designed humidity sensor operates in the range of 21.9%–52.5% for relative humidity, corresponding to the resonant frequency range of the sensor 2.76–2.51 GHz, the total offset reaches 250 MHz and the maximum relative humidity sensitivity is 23.08 MHz/%. The compact size, straightforward construction, and affordable price of the developed humidity sensor make it suitable for a range of humidity monitoring applications.

**Keywords:** low cost; chipless radio frequency identification humidity sensor; polyvinyl alcohol; humidity monitoring; humidity sensitive material

**Received:** 2023-04-04; **Accepted:** 2023-09-23; **Published Online:** 2023-10-13 10:39  
**URL:** link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20231011.1308.002  
**Foundation items:** Youth Science Foundation of the National Natural Science Foundation of China (12204373); Scientific Research Program by Education Department of Shaanxi Provincial Government (17JK0691)  
**\* Corresponding author.** E-mail: wangbo\_chen@126.com