

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.004

开槽无芯片 RFID 湿度传感器设计研究^{*}

宋 洋¹ 何怡刚¹ 邓芳明^{1,2} 罗旗舞¹ 孙占峰¹

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009; 2. 华东交通大学电气与电子工程学院 南昌 330013)

摘 要:提出了一种基于 RFID 技术的无芯片湿度传感器标签。通过开槽蚀刻技术在覆铜 FR4 材料上制作缝隙散射体结构。标签结构分为两个单元:编码单元借助不同长度的缝隙组合存储 ID 信息;通过在缝隙表面覆盖硅纳米线沉淀层构成传感单元,用来感知湿度的变化。该方案结构简单、成本低,无任何后处理工艺。测试系统利用交叉极化的两台喇叭天线作为发射和接收天线,依据雷达电磁反向散射原理测量传输系数曲线进而获取标签的 ID 信息和外界湿度信息。实验测试表明在 25 ℃ 温度及 30% ~ 90% 的相对湿度范围内,该无芯片湿度传感器标签在 215 MHz 的频带范围内中心谐振频率与相对湿度呈现稳定的近似线性关系,其灵敏度超过 2.9 MHz/% RH。

关键词: 射频识别;湿度传感器;无芯片

中图分类号: TP212; TN911.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Design of slotted chipless RFID humidity sensor

Song Yang¹ He Yigang¹ Deng Fangming^{1,2} Luo Qiwu¹ Sun Zhanfeng²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 33013, China)

Abstract: A chipless humidity sensor integrated with RFID is presented in the paper. The slot scatterer structure is fabricated on the copper-clad FR4 by grooving etching. The encoding unit stores the ID information by the combination of the different length slots. To make a scatterer sensitive to the humidity on the premise of low cost, the silicon nanowires are deposited on the surface of sensing unit without any post-treatment process. Based on the principle of radar electromagnetic backscattering, two horn antennas with cross polarization are utilized as the transmitting and receiving antennas so that to measure the transmission coefficient curve. The experiment results show that a stable linear relationship between the center resonant frequency and the relative humidity in the frequency band of 215 MHz is appeared at the temperature of 25 ℃ and the range of 30% ~ 90% RH, the sensitivity of the sensor exceeds 2.9 MHz/% RH.

Keywords: RFID; humidity sensor; chipless

1 引 言

相对湿度(relative humidity, RH)是指在一定压力和温度下,空气中水汽压与饱和水汽压的百分比,湿度传感器通常检测相对湿度而不是绝对湿度。在很多情况下(如医药生产、现代物流监测,食品安全监测以及建筑结

构保护等)相对湿度需要被实时的测量,以提醒人们注意到一些环境中的异常状态。随着物联网技术的发展,基于无线传感器的在线监控技术正成为研究热点^[1]。借助包括低功耗局域网(ZigBee)技术^[2]、蓝牙(Bluetooth)技术、无线传感器网络(WSN)技术^[3]可以同步的获得传感器采集到的外界环境信息,从而对相对湿度进行实时的无线监控。但由于上述技术本身的工作机理原因,具有

收稿日期:2017-01 Received Date: 2017-01

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51577046)、国家自然科学基金重点项目(51637004)、国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”项目(2016YFF0102200)、安徽省科技计划重点项目(1301022036)、江西省重点研发计划(20161BBE50076)、江西省教育厅科学技术项目(GJJ160491)资助

较高的功耗,传感器模块一般采用电源供电或内置电池,因此增加了产品的使用和维护成本。

射频识别(radio frequency identiftion, RFID)技术是一种非接触式的自动识别技术,通过反向散射信号自动识别目标对象获取数据。基于 RFID 技术的传感器标签虽然工作距离短,但得益于反向散射调制技术的采用^[4],电路结构简单,功耗低,可以工作在无源状态^[5]。为了在传统的 RFID 标签基础上融合传感功能,文献[6-8]提出了基于 RFID 的自供电的无线传感器模块,电路包括自供电模块、外部传感器模块、射频模块和处理器模块,可以在同一电路板上根据需求融合多种传感器,但增加了电路的体积和成本。文献[9-11]将传感器功能融入射频芯片中,电路仅包含天线和射频芯片,大大减小了电路的规模,但这种射频芯片的工艺复杂,设计周期较长。以上的方案均基于有芯片的 RFID 技术,具有传感精度高,功耗低的优点,但对于低成本为首要目标的场景如物流监测领域,芯片本身的成本问题限制了这些方案的大规模使用。

近年来,基于无芯片的 RFID 技术因为其结构简单成本低廉正引起人们的关注。无芯片 RFID 标签不包含硅芯片,具有较强的抗干扰能力,同时在相同工作范围内标签所需功率远小于传统无源 RFID 标签。无芯片 RFID

技术通过采用不同的散射体结构产生具有不同时域特征^[12]或频谱特征^[13]的反向散射信号来编码。本文提出了一种使用硅纳米线^[14-15]传感的无芯片 RFID 频域传感器标签,标签分为编码单元和传感单元。标签的唯一标识(ID)取决于编码单元 I 型开槽的槽数与长度。通过在 I 型散射体结构表面覆盖硅纳米线沉淀层,可以使普通的散射体具有传感功能。当相对湿度发生变化时,硅纳米线捕获或释放空气中的水分子后,其电性质(如介电常数、电导率)发生改变,进而转化为传感单元的传输系数 S_{21} 曲线的频率和幅值的变化。

2 系统概述

文献[16-17]已经验证了利用雷达散射截面进行标签信息传输的可行性。电磁散射模型在频域里划分为三个区:瑞利区、谐振区以及光学区。由于谐振区包含了目标物体的形状、尺寸等物理信息,表现出可用作目标识别的电磁特性。本文的无芯片 RFID 标签正是工作在谐振区的散射体。雷达散射截面测试系统如图 1 所示,测试原理如图 2 所示,其中 $P_t(P_r)$ 是天线发射(接收)功率, $G_t(G_r)$ 是发射(接收)天线增益, R 为标签与天线距离, λ 为信号波长。这里雷达散射截面可以通过式(1)表示。

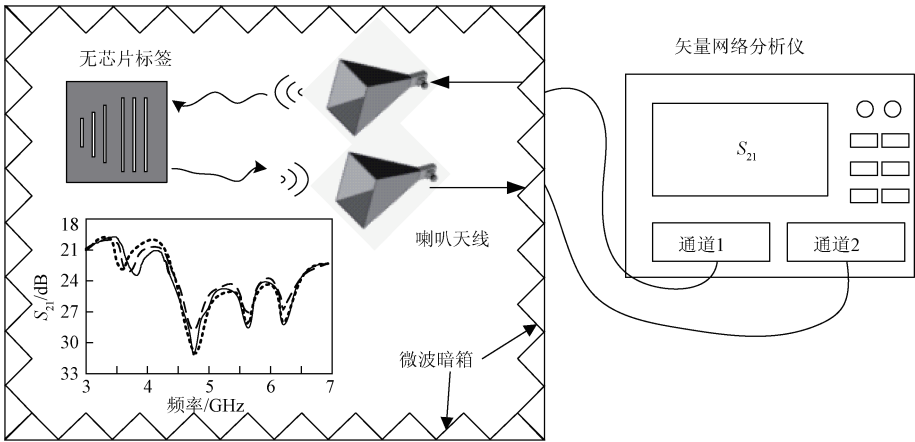


图 1 测试系统
Fig. 1 Test system

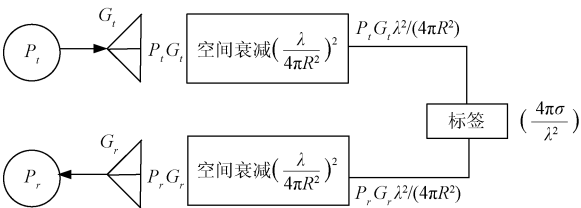


图 2 测试系统原理
Fig. 2 Schematic diagram of test system

$$\sigma = \frac{p_r}{p_t} \left[\frac{(4\pi)^3 \times R^4}{G_t \times G_r \times \lambda^2} \right] = k \frac{p_r}{p_t}$$

(1)

测量时保持天线的发射功率、增益、标签天线距离等条件不变,因此 k 为常数,只要测得 p_r/p_t 即可推导出目标雷达散射截面 σ 。将发射天线和接收天线分别接在矢量网络分析仪的 1 端口和 2 端口,此时 p_r/p_t 的测量等效为传输系数 S_{21} 参数的测量。因此在实际测量时,可以利用 S_{21} 参数及其变化来反映标签的 ID 信息和湿度信息。

3 无芯片标签设计

本文使用的 I 型缝隙无芯无芯片标签的编码信息存在于标签的图形结构中,不同的散射体结构反向散射信号具有不同频谱特征。采用开槽的方法可以使多个缝隙谐振器集成在同一贴片上有利于标签的小型化。I 型缝隙无芯片标签结构如图 3 所示,在介质基板上刻蚀并排的一系列缝隙,不同的长度产生不同的谐振频率,根据缝隙的存在和缺失就可以形成有效的编码。 a 、 b 、 c 三条开槽作为编码单元,存储标签 ID 信息。标号为 d 的 3 条缝隙作为传感单元,其长度相等且固定不变,通过覆盖湿敏材料感知湿度变化。对于物理长度为 l_s 的缝隙谐振器,其谐振频率可由式(2)得到。

$$f = \frac{c}{2l_s} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}}$$

(2)

式中: c 表示光速, ε_r 表示介质基板的相对介电常数。基板采用厚度为 1.6 mm,介电常数为 4.5 的 FR4 材料,基板长宽均为 40 mm。缝隙宽度为 0.5 mm,为了防止不同缝隙间的寄生干扰,缝隙间距 d_1 设为 2 mm。 d_2 为 4 mm 以减小编码单元对传感单元的影响。通过 HFSS 软件仿真,表 1 给出了不同长度缝隙对应的频带以及编码数据。

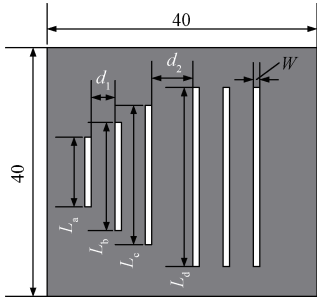


图 3 无芯片标签设计

Fig. 3 Design of chipless RFID tag

表 1 标签频移编码技术

Table 1 Frequency shifting technique for data encoding				
开槽 编号	长度 编号	长度/ mm	仿真频率/ GHz	对应 编码
a	L_a	14	6.256 ± 0.1	11
		15	6.011 ± 0.1	10
		16.5	5.766 ± 0.1	01
		18	5.518 ± 0.1	11
b	l_b	20	5.231 ± 0.1	10
		22	4.956 ± 0.1	01
		24	4.711 ± 0.1	11
		26	4.375 ± 0.1	10
c	l_c	29	4.136 ± 0.1	01

处于中心频率为 5.766、6.011 和 6.256 GHz 的 3 个 200 MHz 频带中的任意一个之内。在这些频带内存在谐振可分别表示数据位的 00、10、11。当此 3 个频带内均检测不到谐振,即缝隙 a 缺失,此时对应数据位 00。由于编码单元采用 3 条不同的缝隙同时进行编码,因此标签完整的 ID 信息可用 6 位二进制代码表示。

4 融合感知的无芯片标签

4.1 硅纳米线材料

无芯片标签和无芯片传感器之间的主要区别在于传感器的传感单元谐振频率可随敏感材料的电参数变化而发生改变,而无芯片标签仅有编码单元,谐振频率几乎不会变化。对于湿度传感单元,所选用的敏感材料其电气性能应随外界湿度的变化而改变。文献[14-15]提出了理想的材料硅纳米线,可以采用催化式化学沉淀法制备^[18]。硅纳米线的扫描电子显微镜扫描照片如图 4 所示。将聚酯胶带粘贴在标签无需涂覆处,并将 2 mL 硅纳米线乙醇溶液滴于高速旋转的标签传感单元中心,旋转涂覆 30 s(转速为 2 000 r/min)可以在不同标签表明得到厚度相同且均匀分布的旋转涂布层。由于乙醇挥发,实际得到的硅纳米线沉淀层不需进行后处理。

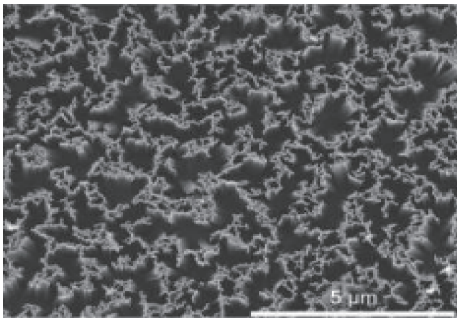


图 4 硅纳米线沉淀层显微照

Fig. 4 Microscopic image of SiNWs deposited layer

当环境湿度改变,硅纳米线的电气性能发生相应变化(硅纳米线捕获水分子,使得局部有效介电常数和电导率改变^[15]),使得电场线在谐振散射体周围重新分布,从而产生明显的频谱特征改变。

文献[14]给出了测量硅纳米线介电常数的方法,利用蚀刻法在与上文中相同的覆铜 FR4 基板上得到叉指电极,并用旋涂法得到均匀的旋转涂布层。图 5 所示为测试系统示意图,该系统由 3 部分组成:数据记录系统用于实时收集多谐振振荡器电路的输出频率,基于 555 芯片的电容-频率转换电路将叉指结构的电容变化改变为频移,标准湿度产生容器使用不同的饱和水溶液在封闭的玻璃容器中分别在 15 ℃、25 ℃、35 ℃ 条件下实现受控湿

以槽 a 为例, l_a 的的长度变化,使得槽 a 的谐振频率

度环境^[14]。频率和电容之间的关系可以表示为以下等式：

$$f = (\ln 2 \times (RC))^{-1}$$

(3)

式中： R 是 555 振荡电路的等效电阻， C 是叉指结构的电容。

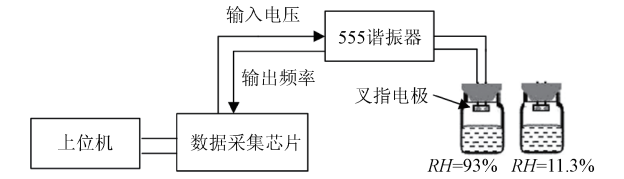


图5 电容测试系统

Fig. 5 Test system of capacitance

图6所示为所用叉指结构,根据 Gerwen 的电容模型,叉指电极电容可以表示为:

$$C = \frac{N\epsilon l h}{W} + \frac{N\epsilon l}{2}$$

(4)

式中: N 为叉指电极的数量, ϵ 为感湿层吸水后的复合介电常数, l 为叉指电极的长度 h 为叉指电极的厚度, W 为叉指电极的间距。各参数选择为 $N = 40, l = 15 \text{ mm}, W = 2 \text{ mm}, h = 20 \text{ }\mu\text{m}$,由图7测量结果并结合利用式(3)、(4)可以得到硅纳米线介电常数的变化范围为 $3.5 \sim 15$ 。

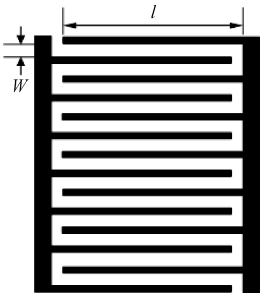


图6 叉指电极设计

Fig. 6 Design of interdigital electrode

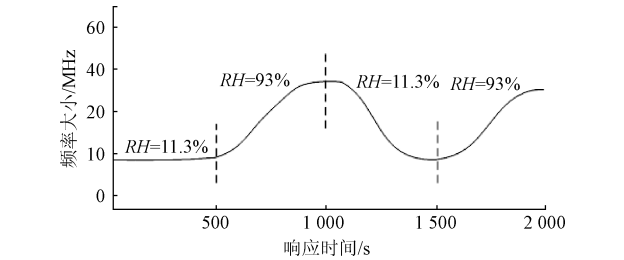


图7 电极的电容-湿度响应曲线

Fig. 7 The capacitance-RH response curve of electrode

取出叉指电容基板,并利用四探针法可测得基板上硅纳米线层电导率在相对湿度为 11.3% 和 93% 时分别为 1.6 和 3.1。

4.2 传感单元设计

对于射频传感单元,应设计具有高品质因数(Q 值)的散射体,以增加其对材料的介电常数变化的灵敏度。与一般结构的散射体相比,I 型结构具有更大的 Q 值,因此感湿材料的介电常数变化会更容易产生频谱特征的改变。采用 3 个平行的谐振缝隙同时作为传感单元,有助于增加反向散射信号的幅值,更有利于标签信息的读取。将硅纳米材料覆盖在缝隙表面,此时缝隙处的介电常数变为基板与硅纳米沉淀层的复合介电常数。

借助高频仿真软件 HFSS 对沉淀薄层建模,我们可以改变沉淀层的介电常数 ϵ_r 和电导率 $cond$ 。沉淀层的厚度取决于硅纳米线粒子的尺寸。其直径为 $10 \sim 100 \text{ ns}$,长度可达到几微米。为了节省模拟时间,仿真时使用具有等于铜($20 \text{ }\mu\text{m}$)厚的薄层来近似该沉积层。为了模拟相对湿度对传感单元频谱特性的影响,敏感材料的 ϵ_r 和 $cond$ 同时变化。从表 2 中可以观察到长度 $l_s = 32 \text{ mm}$ 并在缝隙表面沉淀硅纳米线的传感单元的模拟谐振频率。由于当湿度增大时,水分子和硅纳米材料的混合介电常数电导率均上升。因此敏感沉淀层具有 $\epsilon_r = 2$ 和 $cond = 0.2 \text{ S/m}$ 的低介电常数和电导率时对应相对湿度 RH 较低时的情况,此时谐振峰值为 3.5 GHz 。为了模拟当 RH 增大时的情况,介电常数和电导率均增加,直至达到 $\epsilon_r = 20$ 和 $cond = 3 \text{ S/m}$,最终获得的雷达反向散射曲线其谐振峰值向较低频率移动同时在幅值上有几个分贝的衰减。这些数据将在下一节的实测环节与测试结果进行比较。

表2 介质电参数对谐振频率影响		
Table 2 Influence of dielectric parameters on resonant frequency		
相对介电常数 ϵ_r	电导率 $cond/(S \cdot m^{-1})$	传感单元谐振频率 f/GHz
2	0.2	3.611
5	0.4	3.575
10	1	3.510
15	2	3.432
20	3	3.397
25	4	3.384

5 测试与分析

5.1 传感单元的误差校正以及一致性实验

本文制作了 4 款不同 ID 编码单元的感知标签,分别记为测试标签样品 1、2、3、4。以图 8 所示样品 1 为例,其 $a、b、c、d$ 缝隙长度分别为 $14、18、24、32 \text{ mm}$,其 ID 编码应为 111111。

由于标签 ID 的编码采用频带编码法,每个频带均有

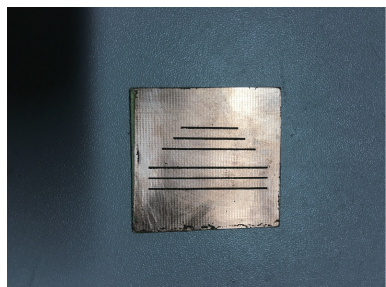


图8 无芯片感知标签实物

Fig. 8 The physical map of chipless RFID tag

200 MHz 的容错空间,因此这里的去除噪声以及重现性实验只针对传感单元。

如图9所示,所有测试环节均在微波暗箱中进行。实验共需两台交叉极化的喇叭天线,一台作为发射天线(图9(b)),一台作为接收天线(图9(a))。所用天线的带宽覆盖3~7 GHz,两台天线之间的距离为35 cm,天线和样品之间的距离设置为50 cm。两台天线分别连接矢量网络分析仪的发射和接收端口。通过这些步骤我们可以获得传输系数 S_{21} 参数。为了去除周围环境的电磁波反射噪声以及传输路径损耗,需要先测量无标签时的 S_{21} 参数,之后所有的标签测试数据均减去噪声数据以去除干扰^[19],噪声干扰如式(5)所示。

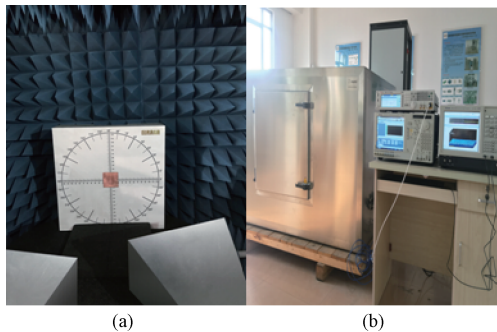


图9 实际测试所用设备

Fig. 9 The equipment of test system

$$|\Delta S_{21}| = \sqrt{(S_{21} - S'_{21}) \times (S_{21} - S'_{21})^*} \quad (5)$$

式中: S_{21} 是标签存在时的测量值,符号‘*’代表取共轭值。通过重复测试某一样品标签10次,发现该测量方法造成的谐振频率误差为1.9%,如图10单标签柱状图所示。通过在FR4基板上采用相同的蚀刻工艺和硅纳米线沉淀工艺,制作了4款具有不同ID编码单元而感湿单元相同的无芯片标签传感器,图10多个标签柱状图给出了4款标签的谐振频率平均值和标准差,其误差为2.4%。测得的谐振频率表现出良好的一致性,说明了不同的ID编码单元对传感单元的影响基本可以忽略。不同标签对于相对湿度变化的测量性能一致性和重现性实验将在之后的章节描述。

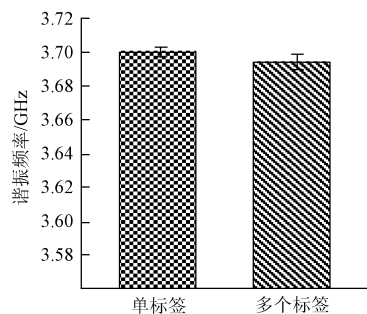


图10 传感单元谐振频率实测值

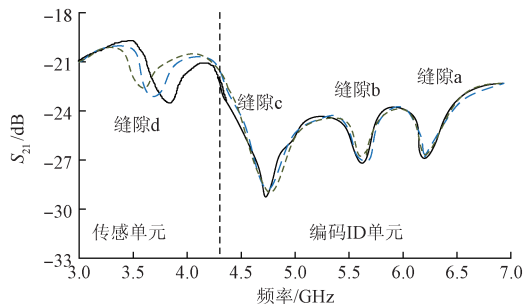
Fig. 10 The measured value of the resonant frequency of the sensing unit

5.2 湿度传感实验

无芯片标签湿度传感器性能的测量采用德国富奇VCL4003温湿度测试箱,实验所处环境室温为25℃。将测试样品标签1置于温湿度测试箱中,设定温度为25℃,箱内相对湿度从30%~90%,按5%的步长增加,每种湿度环境下标签均被放置10 min以使硅纳米材料充分吸收或释放水分子,随后取出标签并快速置于微波暗箱环境下,测试其反向散射参数。整个测量环节室温变化不超过1℃,标签和天线位置均保持不变,因此,传输系数曲线的所有变化可以认为是对湿度敏感的硅纳米线沉淀层电参数改变所导致。由于每次在微波暗箱测试时间不超过20 s。由图7电容变化曲线可知在此时间内硅纳米线层电参数可认为不变。

图11(a)为不同湿度条件下样品标签1的传输系数 S_{21} 在3G~7G频段内的曲线图,可以观察到编码单元即缝隙a、b、c的谐振频率几乎不随湿度变化,通过实测数据可以验证标签ID为111111与仿真结果相符。由于标签ID采用200 MHz的频带编码,因此在不同湿度下可以均可精确地得到标签的ID信息。

图11(b)为传感单元的传输系数 S_{21} 在3G~4G频段内曲线,结果表明湿度越高感知单元的谐振频率会不断向低频方向移动。当湿度为30%,对应谐振频率为3.725 GHz,而当湿度变化至90%,谐振频率为3.512 GHz,谐振频移达到了215 MHz。



(a) 标签传输系数

(a) Transmission coefficient of the tag

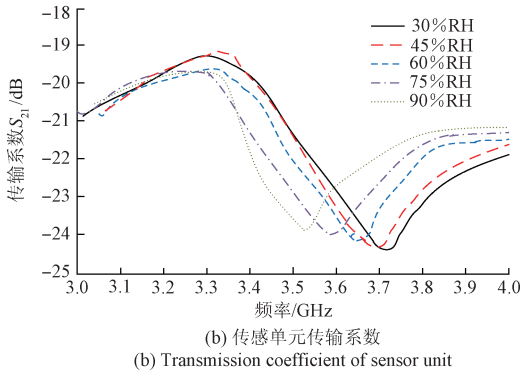


图11 样品标签1不同湿度下传输系数

Fig. 11 Transmission coefficient in the different humidity of the sample tag 1

如图12所示,实线部分绘制了感湿单元谐振频移随湿度变化曲线图, $RH = 30\%$ 对应谐振频率 f_0 , $RH = 35\%$ 对应 f_1 以此类推。以 $f_0 = 3.725$ GHz作为参考频率, Δf 表示在不同湿度情况下谐振频率相对参考频率的变化值, $\Delta f_i = f_i(f_{i+1})$ 即相邻步长对应谐振频移。传感器的灵敏度 S 由以下表达式计算得到:

$$S_i = \frac{\Delta f_i}{f_0} \frac{1}{\Delta RH} \quad (6)$$

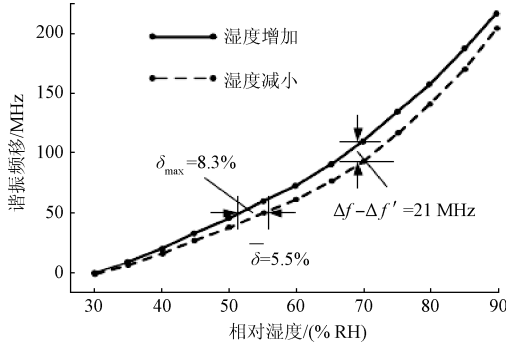


图12 回滞特性

Fig. 12 Hysteresis of tag

可以观察到在低湿度情况下($30\% \sim 70\%$),谐振频移随相对湿度变化基本呈线性变化,通过计算可得1%的相对湿度变化对应2.9 MHz的频移即 $S = 2.9 \text{ MHz}/(\% \text{ RH})$ 。而在较高湿度的范围($70\% \sim 90\%$)谐振频移明显增加, $S = 4.8 \text{ MHz}/(\% \text{ RH})$ 。高湿度情况下灵敏度几乎是低湿度情况下的2倍,这种变化是由于硅纳米材料在高湿度环境下具有更好的水分子捕获能力。

虚线部分为标签在相对湿度趋势相反下的回滞特性曲线,即设定温湿度箱内温度为 25°C ,相对湿度从 $90\% \sim 30\%$ 按5%的步长减小,重复测量操作。由于硅纳米材料对水分子捕获和释放能力的差异,吸湿和除湿

特性曲线有一定偏差,在 $RH = 70\%$ 时两条曲线谐振频移偏差达到最大值21 MHz。在由谐振频移反推相对湿度过程中,对于某一谐振频移 Δf 在吸湿和除湿过程对应两个相对湿度值 RH 和 RH' ,若规定相对湿度偏差为 δ 则:

$$\delta = \frac{(RH - RH')}{2(RH + RH')} \quad (7)$$

当两曲线 Δf 均为63 MHz时所表示的相对湿度分别为 $RH = 56\%$, $RH' = 61\%$,此时 δ 达到约为8.3%的最大偏差,记为 $\delta_{\max} = 8.3\%$,平均偏差 $\bar{\delta}$ 为5.5%。

样品标签1,2,3的感湿单元频移特性如图13(a)所示,可以看到不同标签的频移特性基本吻合,计算得 $\delta_{\max} = 7.6\%$, $\bar{\delta} = 4.9\%$ 。

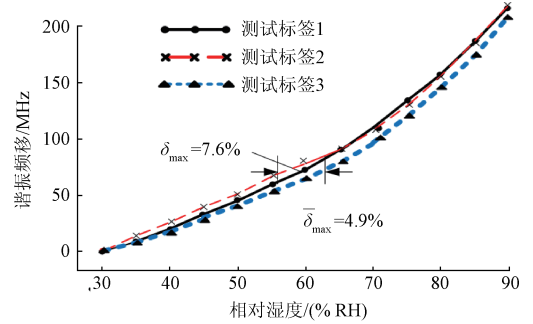
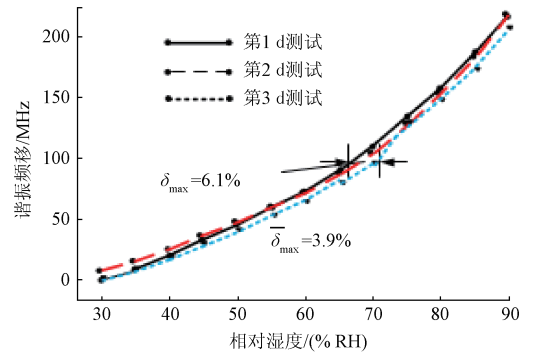
(a) 不同样品标签湿度测试一致性实验
(a) Consistency test of humidity of different sample tags(b) 样品标签1湿度测试重现性实验
(b) Reproducibility test of humidity of one sample tags

图13 样品标签的一致性和重现性测试

Fig. 13 Consistency and reproducibility test of the sample tag

样品标签1在3 d之内采用相同测试方法的频移特性重现性曲线如图13(b)所示,计算得 $\delta_{\max} = 6.1\%$, $\bar{\delta} = 3.9\%$ 。

最终结合多个传感单元的频移数据得到的相对湿度拟合公式为:

$$RH = -8.1623 \times 10^{-4} \Delta f^2 + 0.4434 \Delta f + 31.18 \quad (8)$$

通过测量谐振频率相对参考频率 f_0 ($RH = 30\%$ 处)的频移量可以得到此时空气的相对湿度。与真实值进行比较,通过拟合公式得到标签测量相对湿度的最大误差和平均误差分别为 $\delta_{\max} = 7.5\%$ 和 $\bar{\delta} = 4.2\%$ 。

6 结 论

湿度监测是工业生产和物流监控中的重要环节,因此本文提出一种基于反向散射频谱信息测量的超宽带无芯片无线传感器标签,标签本身无需任何电源供电。旋涂硅纳米线沉淀层的叉指电极在不同湿度下的实验证明了感湿层的有效性。由于无芯片标签没有通信协议,因此本文设计的标签分为编码 ID 和湿度传感两个单元,并重点研究了散射体结构电参数变化对电磁波传输系数 S_{21} 的影响。湿度传感单元采用 I 型缝隙结构,并利用硅纳米线沉淀层做为感湿材料,无任何后处理工艺,制造成本低。测试表明该无芯片标签传感器能有效感知湿度的变化,其回滞特性、重现性、一致性误差均小于 10%,为相对湿度的低成本无源无线监测提供了有效的方法。

参考文献

- [1] CAIZZONE S, DIGIAMPAOLO E. Wireless passive RFID crack width sensor for structural health monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(12): 1-1.
- [2] YU L, ZHANG Q, MENG X, et al. Design of the granary temperature and humidity measure and control system based on Zigbee wireless sensor network [C]. International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), IEEE, 2011:1055-1058.
- [3] 尹荣荣, 刘浩然, 杨绸绸, 等. 基于 SMP 的无线传感网自适应拓扑容错评估模型[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 404-411.
YIN R R, LIU H R, YANG CH CH. Adaptive topological fault tolerance evaluation model of wireless sensor networks based on semi-Markov process [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 404-411.
- [4] 解小建, 张嶠, 张大伟. 基于 RFID 的测试采集结果信息传输设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 99-104.
XIE X J, ZHANG Q, ZHANG D W. Implement of test acquisition information transmission based on RFID[J]. Electronic Measurement of Technology, 2016, 39(1): 99-104.
- [5] 陈柯, 邵晖, 何婷婷. 射频识别(RFID)系统架构和持续改善[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(4): 5-9.
CHEN K, SHAO H, HE T T. Radio frequency identification system architecture and continuous improvement [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(4): 5-9.
- [6] DE DONNO D, CATARINUCCI L, TARRICONE L. RAMSES: RFID augmented module for smart environmental sensing [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2014, 63(7): 1701-1708.
- [7] COLELLA R, DE DONNO D, TARRICONE L, et al. Advances in the design of smart, multi-function, RFID-enabled devices [C]. International Symposium on Antennas and Propagation & Usnc/ursi National Radio Science Meeting, IEEE, 2014:1678-1679.
- [8] DE DONNO D, CATARINUCCI L, TARRICONE L. Ultralong-range RFID-Based Wake-up radios for wireless sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(11): 4016-4017.
- [9] CIRMIRAKIS D, DEMOSTHENOUS A, SAEIDI N, et al. Humidity-to-frequency sensor in CMOS technology with wireless readout[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(3): 900-908.
- [10] TAN Z, DAAMEN R, HUMBERT, A, et al. A 1.2-V 8.3-nJ CMOS humidity sensor for RFID applications. IEEE Journal of Solid State Circuits 2013, 48(10): 2469-2477.
- [11] 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. Design research on a wireless humidity sensor node integrated with RFID[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(8): 1171-1178.
- [12] GIRBAU D, RAMOS A, LAZARO A, et al. Passive wireless temperature sensor based on time-coded UWB chipless RFID tags[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2012, 60(11): 3623-3632.
- [13] RAMOS A, GIRBAU D, LAZARO A. Influence of materials in time-coded chipless RFID tags characterized using a low-cost UWB reader [C]. Microwave Conference, 2012: 526-529.
- [14] LI H, ZHANG J, TAO B R, et al. Investigation of capacitive humidity sensing behavior of silicon nanowires[J]. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2009, 41(4): 600-604.
- [15] WANG C P, LIU C W, GAU C. Silicon nanowire temperature sensor and its characteristic [C]. International Conference on Nano/micro Engineered and Molecular Systems, IEEE, 2011: 630-633.
- [16] VENA A, PERRET E, TEDJINI S. Chipless RFID tag using hybrid coding technique[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2011, 59(12): 3356-3364.

- [17] VENA A, PERRET E, TEDJINI S. A depolarizing chipless RFID tag for robust detection a its FCC compliant UWB reading system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2013, 61 (8): 2982-2994.
- [18] DHALLUIN F, BARON T, FERRET P, et al. Silicon nanowires: Diameter dependence of growth rate and delay in growth[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(13): 133109-133109-3.
- [19] SHAO B, CHEN Q, LIU R, et al. Design of fully printable and configurable chipless RFID tag on flexible substrate[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2011, 54(54):226-230.

作者简介



宋洋, 1991 年出生, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要从事 RFID 技术及智能电网技术的研究。

E-mail: ysong@mial.hfut.edu.cn

Song Yang was born in 1991. He is currently a M. Sc. candidate in Hefei University of Technology. His research interest includes RFID

technology and smart grid technology.



何怡刚(通讯作者), 1992 年于湖南大学获得硕士学位, 1996 年于西安交通大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授、博士生导师, 合肥工业大学电气与电子工程学院院长, 国家杰出青年科学基金获得者, 主要研究方向为模拟和混合集成电路设计、测试与故障诊断、智能电网技术、射频识别技术、虚拟仪器和智能信号处理。

E-mail: 18655136887@163.com

He Yigang (Corresponding author) received M. Sc. from Hunan University in 1992 and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1996, respectively. He is currently a professor and the dean of School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology. He is one of winners of National Distinguished Young Scientists Foundation. His research interests are in the areas of circuit theory and its applications, testing and fault diagnosis of analog and mixed-signal circuits, smart grid, radio frequency identification technology, and intelligent signal processing.