

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.017

基于阻抗匹配的电子标签式香蕉气体传感器*

宋智 孟影 张静 薛严冰

(大连交通大学 电气信息学院 大连 116028)

摘要:为监测香蕉在仓储运输过程中的新鲜程度,研制了一款电子标签式香蕉气体传感器。该传感器由标签天线和气敏薄膜两部分构成。利用电磁仿真软件,设计了谐振频率为915 MHz的领结型标签天线。通过多种气敏材料的复阻抗对比,选取多壁碳纳米管(MWNTs)为气敏材料,并掺杂少量导电碳浆对其进行降阻,解决了传感器气敏薄膜同标签天线之间的阻抗匹配问题。搭建气敏测试平台,测试了传感器对不同时期香蕉释放气体的响应特性。实验结果表明,标签气体传感器对香蕉释放气体具有良好的响应和恢复特性;当香蕉分别处于新鲜期、成熟期和腐烂期时,对应的传感器谐振频率变化 Δf_0 分别为9、36和18 MHz,可实现香蕉新鲜程度的定性识别。

关键词: 气体传感器;阻抗匹配;电子标签;回波损耗

中图分类号: TP212.2;TN385 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Electronic tag type banana releasing gas sensor based on impedance matching

Song Zhi Meng Ying Zhang Jing Xue Yanbing

(College of Electrical and Information, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: In order to monitor the freshness of banana in the process of storage and transportation, an electronic tag type banana releasing gas sensor which includes tag antenna and gas sensitive film is designed. At resonance frequency of 915 MHz, a bow-tie tag antenna is designed with electromagnetic simulation software. The multi-walled carbon nanotube is selected as the gas sensitive material by comparing the complex impedance of five kinds films. With the incorporation of a small amount of conductive carbon paste, the impedance regulation of the gas-sensitive film is successfully resolved, and the impedance matching between the antenna and the gas sensor is achieved. The gas sensitive testing platform is established to test the response characteristic of the sensor for banana releasing gas at different maturity. The experimental results indicate that the tag gas sensor has a good response and recovery characteristic for banana releasing gas. The resonant frequency change of sensor is 9, 36, 18 MHz when banana is in fresh, ripe, and rotten period respectively. Therefore, the freshness of banana can be qualitatively identified.

Keywords: gas sensor; impedance matching; electronic tag; return loss

1 引言

气体传感器已在工业生产和环境保护等领域得到广泛应用。目前气体传感器研究多集中在新型气敏材料^[1]和新型器件结构^[2]等方面。将传统的气体敏感技术同射频识别(RFID)技术结合,研究以无线方式检测气体信息

的低成本电子标签式气体传感器,已成为一个新的研究方向^[3]。

国外已针对电子标签气体传感器展开研究,并已取得少量研究成果。已报道的标签传感器结构大致有两类:一类是半主动式,另一类是被动式。半主动式采用超低功耗的微热板,通过特定工艺将标签天线和控制电路等集成在柔性基底上,片上安装薄膜电池为传感部分提

收稿日期:2016-09 Received Date: 2016-09

* 基金项目:国家自然科学基金(61201092,61471080)、辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2013047)、辽宁省博士启动基金(201601258)资助项目

供电源^[4-5]。这类传感器制作工艺复杂,成本高。被动式结构根据标签同阅读器之间的信号传输方式,又分为感应耦合方式和反向散射耦合方式。感应耦合方式适合于近距离无线检测,工作频率通常在 13.56 MHz^[6]。反向散射耦合方式工作于 UHF 频段,具有读取距离远的优势,更具有应用价值。其中,Yang 研究组^[7-11]用喷墨印刷技术将碳纳米管气敏薄膜打印在天线的馈电端口制作气体传感器,利用气体浓度影响天线与气敏材料之间阻抗匹配程度,通过检测氨气引起的天线反射信号的功率变化,在工作频率 886 MHz 上实现了 4% 浓度的氨气检测;Balachandran 等人^[12]和 Shrestha 等人^[13]研究了集成在微带贴片天线上的电容式气体传感器,以二氧化锡纳米粒子作为敏感材料,通过检测天线谐振频率的变化,实现了乙烯气体浓度的无线检测。目前国内已展开对标签式温度、湿度传感器的研究^[14-15],但在气体传感器方面还鲜有相关报导。

我国每年有 8 000 万吨水果腐烂,损失总价值近 800 亿元,造成水果腐烂的最重要原因就是保鲜不当^[16]。传统的 RFID 技术已实现水果在仓储、运输过程中位置的跟踪,但无法实时获取水果新鲜程度信息。因此,研制低成本电子标签式水果气体传感器具有重要的应用价值。

本文以极易腐烂的香蕉为测试对象,设计制作了基于天线和气敏薄膜之间阻抗匹配的被动式电子标签香蕉气体传感器,信号传输采用反向散射耦合方式,实现了对香蕉新鲜期、成熟期和腐烂期的定性识别。

2 气体传感器设计

2.1 检测原理

基于天线与气敏薄膜的阻抗匹配,通过检测反射电磁波参数研制了一款基于射频识别技术的电子标签式香蕉气体传感器,其气敏检测原理如图 1(a) 所示。

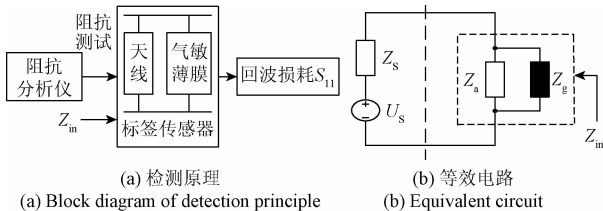


图 1 电子标签式香蕉气体传感器检测原理

Fig. 1 Electronic tag type banana releasing gases sensor

标签传感器由天线和气敏薄膜两部分组成,其阻抗为 Z_m 。通过对应的等效电路(图 1(b))可知,传感器阻抗 Z_m 包括天线阻抗 Z_a 和气敏膜阻抗 Z_g 两部分,图中 Z_s 和 U_s 分别为阻抗分析仪的信号源阻抗和电压。当传感

器暴露于待测气体中时,气敏薄膜会吸附气体使其阻抗 Z_g 发生变化,从而影响天线与气敏薄膜之间的阻抗匹配程度,使传感器阻抗 Z_m 发生改变,进而影响传感器的反射系数 Γ :

$$\Gamma = \frac{Z_m - Z_s}{Z_m + Z_s} \quad (1)$$

反射系数 Γ 与回波损耗 S_{11} 满足如下关系:

$$S_{11} = -20\lg(\Gamma) \quad (2)$$

因此通过阻抗分析仪测得标签传感器阻抗 Z_m ,用式(1)和(2)计算出 S_{11} ,以谐振频率 f_c 的偏移量为敏感参数,可实现对目标气体的检测。

2.2 天线设计

标签传感器中的天线选用领结型弯折偶极子天线,它的优点是体积小,工作频带宽^[17-18]。通过电磁仿真法设计了一款基于 FR4 介质基板(介电常数为 4.4,厚度为 1.6 mm),中心频率为 915 MHz 的领结型天线,其输入阻抗 Z_a 按照 50 Ω 标准匹配设计,仿真模型如图 2 所示。天线设计参数见表 1,单位均为 mm。

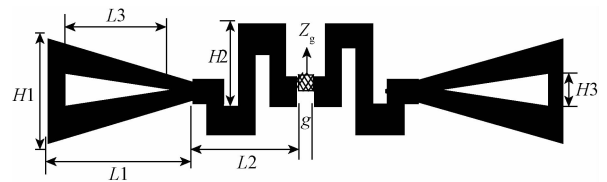


图 2 仿真模型

Fig. 2 Simulation model

表 1 天线设计参数

Table 1 Design parameters of the antenna

参数	L1	L2	L3	H1	H2	H3	g
尺寸	34	24	24	12	12	4	2

2.3 气敏机理仿真

通过将阻抗值为 Z_g 的气敏材料加载在天线馈电端口,设计气体传感器,对其气敏机理进行仿真,气敏膜涂覆位置如图 2 所示。

在 800 ~ 1 100 MHz 频率范围内,仿真研究了 Z_g 在 10 ~ 910 Ω 范围变化时对回波损耗 S_{11} 的影响,结果如图 3 所示。由图可知,传感器回波损耗 S_{11} 随着 Z_g 的改变而发生变化。无负载 Z_g 时,谐振频率 915 MHz 处的 S_{11} 值最小,天线谐振特性最好;当 Z_g 为 82 Ω 时, S_{11} 曲线在 -10 dB 处近似于一条直线,此时天线不发生谐振;当 Z_g 为 100 Ω 时,天线开始谐振;当 Z_g 从 100 Ω 逐渐增大到 810 Ω 时, S_{11} 曲线逐渐左移,谐振频率逐渐减小,谐振特性越来越好;当 Z_g 为 910 Ω 时,其 S_{11} 基本与 810 Ω 时的

S_{11} 重合。因此,为了获得 S_{11} 的明显变化,可确定 Z_g 有效变化范围为 $100 \sim 810 \Omega$ 。综上可知,为使标签传感器有较高灵敏度, Z_g 初始阻抗值必须落在 $100 \sim 810 \Omega$ 有效范围内。

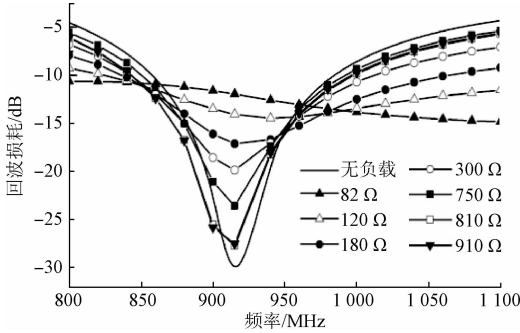


图 3 传感器回波损耗随 Z_g 变化的曲线

Fig.3 Curves of the changes of return loss of sensor with Z_g

3 实验

3.1 气敏薄膜阻抗调节

前期研究发现对甲苯磺酸 (TSA) 掺杂聚苯胺 (PANI) 材料对水果释放气有较高灵敏度^[19], 同时文献^[20]表明多壁碳纳米管 (MWNTs) 作为新一代气敏材料, 具有优良的气敏性能, 因此本文选择上述两种材料作为基础气敏材料。聚苯胺采用一步原位氧化聚合法自行制备, 具体制备过程可参考前期相关工作^[21], 多壁碳纳米管采用商用产品 (深圳纳米港)。

由 2.3 节仿真结果可知, 传感器对气敏薄膜阻抗 Z_g 的要求是在测试频率范围内尽量保持稳定, 且其阻抗变化只有在 $100 \sim 810 \Omega$ 左右时才能和天线阻抗匹配, 因此实验中必须对气敏材料进行阻抗调节。本文实验了两种调节方法: 1) 增加涂膜次数, 随涂膜次数增加, 阻抗虽会有一定程度的下降, 但难以降至数百欧姆, 且膜过厚时, 会出现裂纹, 造成阻抗不连续; 2) 进行材料复合, 选择低成本的导电碳浆作为降阻材料, 设计了 5 种不同组分的敏感材料, 其材料配比如表 2 所示。其中前 3 种气敏材料以 PANI 为基础材料, 后两种以 MWNTs 为基础材料,

表 2 五种不同成分的气敏材料

Table 2 Gas sensitive materials of 5 different compositions

序号	材料成分	质量比
①	PANI; 吡络烷酮	30 mg: 1 ml
②	PANI; 导电碳浆; 油墨稀释剂	20 mg: 20 mg: 1 ml
③	PANI; MWNTs; 吡络烷酮	20 mg: 10 mg: 1 ml
④	MWNTs; 吡络烷酮	20 mg: 20 mg: 1 ml
⑤	MWNTs; 导电碳浆; 油墨稀释剂	20 mg: 20 mg: 1 ml

下文分别记为①~⑤号材料。将 5 种材料制成浆料, 涂覆在金平行电极结构上, 用阻抗分析仪 (安捷伦 E4991A) 测试了其复阻抗初始值, 确定其是否符合传感器要求。

3.2 传感器制作

标签天线制作在 FR4 覆铜板上, 通过湿法蚀刻形成。使用滴涂法制备敏感膜, 将选定的经过阻抗调节后的材料溶于适量溶剂, 超声振荡 2 h 形成悬浊液。用微量进样器采集上述悬浊液 $0.4 \mu\text{l}$, 均匀涂覆在天线馈电端口; 将涂膜的天线放入恒温干燥箱中 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 干燥 30 min, 使溶剂完全挥发。制作的标签气体传感器如图 4 所示。

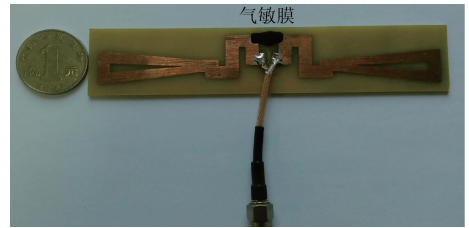


图 4 电子标签传感器

Fig.4 The electronic tag sensor

3.3 气敏测试系统

测试系统如图 5 所示, 以安捷伦 E4991A 阻抗/材料分析仪为核心。测试接头选择 7 mm 平头转换为 3.5 mm SMA 头的射频转换头。标签传感器接在 SMA 转接头上, 置于封闭的气室中。测试前先对仪器进行校准 (开路-短路- 50Ω 负载), 然后对 SMA 头进行接头补偿。记录通气前后标签传感器的阻抗变化, 得到回波损耗 S_{11} 。响应曲线为通香蕉释放气 1 min 后的曲线, 恢复曲线为恢复空气气氛 1 min 后的曲线。

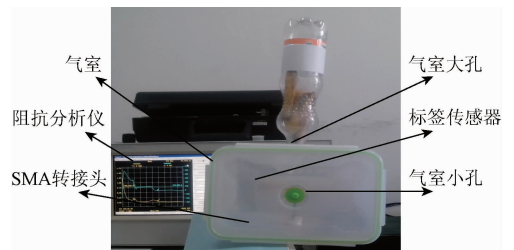


图 5 测试系统

Fig.5 Testing system

由于香蕉释放气体是成分复杂的混合气, 包括酯类、内酯类、醛类、羰基化合物和一些含硫化合物大约 2 000 种^[22], 无法用单一标准气作为目标气。因此, 本文将自行制备香蕉释放气体。用电子天平分别称取 35 g 的新鲜香蕉各 3 份, 分别放于 500 ml 瓶内, 常温下密封保存,

使其释放气体。定义密封保存 1 d 的气体为新鲜期香蕉释放气, 3 d 的气体为成熟期香蕉释放气, 密封保存 7 d 的气体为腐烂香蕉释放气。

4 结果与讨论

4.1 天线性能

制作的领结型偶极子天线性能参数如图 6 所示。从

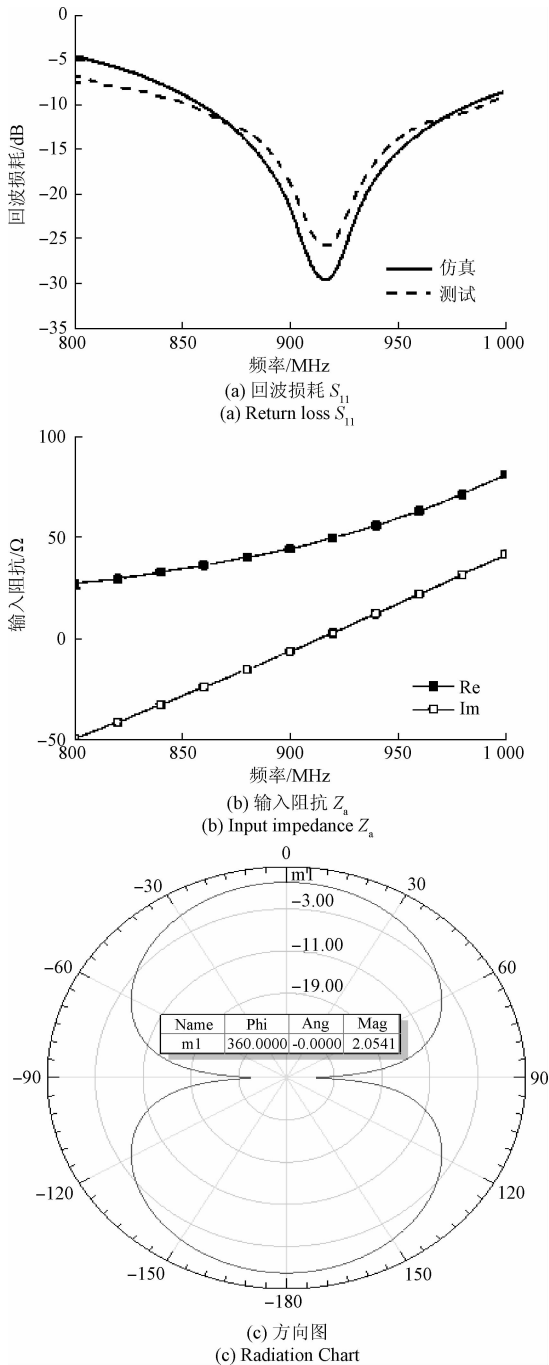


图6 标签天线性能参数

Fig. 6 Performance parameter of tag antenna

图 6(a)可以看出, 天线谐振频率为 915 MHz, 回波损耗 S_{11} 为 -35.06 dB, -10 dB 带宽 120 MHz (860 ~ 980 MHz), 相对带宽 13%, 实现了较宽的工作带宽; 由图 6(b)可以看出, 在中心频率 915 MHz 处, 天线输入阻抗 Z_a 为 $48.36 + j0.57 \Omega$, 归一化阻抗约为 1, 说明天线的端口阻抗匹配良好; 由图 6(c)可以看出, 天线的最大增益达到了 2.05 dB, 并表现出很好的全向性。测试结果表明制作的天线可用作标签气体传感器天线。

4.2 气敏膜阻抗特性

表 2 中 5 种材料气敏元件在 0 ~ 2 000 MHz 频率范围内的复阻抗测试结果如图 7 所示。可以看出, 纯 PANI (①) 气敏材料阻抗特性非常不稳定, 表现为较大的电容性, 随频率增加, 电阻和电抗虽明显减小, 但仍然在千欧的数量级; 掺杂 MWNTs 的 PANI (②) 气敏材料阻抗特性要好于纯 PANI, 但其阻值仍较大, 无法满足实验要求; 通过导电碳浆对 PANI 降阻以后 (③), 其电阻值和电抗值明显减小且较稳定, 但较仿真所得 Z_g 范围仍相差甚远; 纯 MWNTs (④) 气敏材料电抗基本为 0, 表现为纯电阻, 在 0 ~ 1 000 MHz 频率段内, 电阻值大约稳定在 1.1 k Ω 左右, 阻值仍不满足实验要求; 通过导电碳浆对 MWNTs 降阻以后 (⑤), 其阻抗值在整个频段内基本保持稳定,

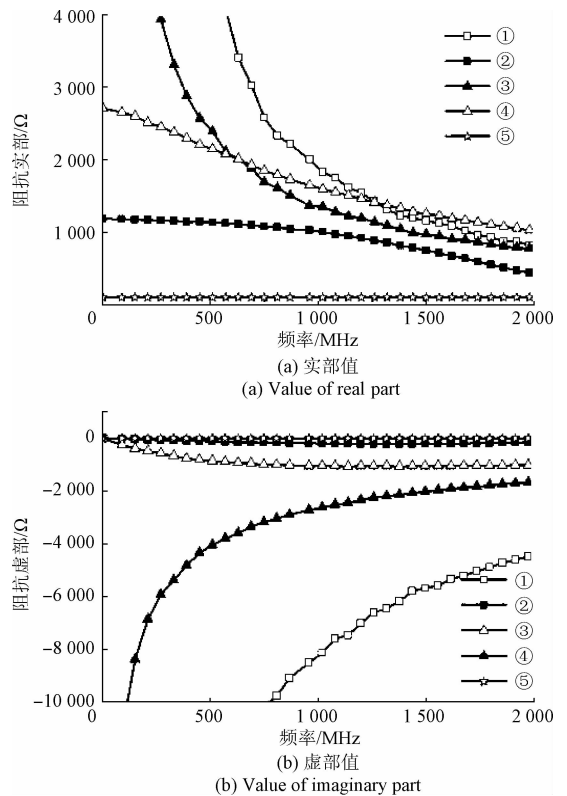


图7 5种敏感材料复阻抗对比

Fig. 7 Comparison of five kinds of sensitive films' complex impedances

呈现出 106Ω 纯电阻的形式,满足前面所给出的 Z_g 范围。综上,从与标签天线阻抗 Z_a 匹配的角度出发,⑤号材料可满足对敏感元件阻抗 Z_g 的要求。

为探究材料微观形貌同其阻抗特性的关系,对 5 种材料进行了扫描电子显微镜 (SEM) 分析,图 8 所示为材料的 20 000 倍 SEM 图。如图可知,纯 PANI 气敏材料(图 8(a))由纳米晶颗粒状结构堆积而成,其表面连续性较差,这也是其复阻抗较大的原因;掺杂 MWNTs 的 PANI (②)气敏材料(图 8(b))由纳米晶颗粒状结构和纤维状结构物理混合堆积而成,其表面连续性要比纯 PANI 好;经导电碳浆降阻的 PANI (③)气敏材料(图 8(c))由小颗粒状的导电碳浆沉积在纳米晶颗粒状结构表面形成,这种物理混合有效地减小了纯 PANI 表面缝隙,表面连续性进一步改善;纯 MWNTs (④)气敏材料(图 8(d))由纤维状结构嵌套而成,其表面连续性较前三种基于 PANI 气敏材料要好,这也是其复阻抗相对较小的根本原因;经导电碳浆降阻的 MWNTs (⑤)气敏材料(图 8(e))由小颗粒状的导电碳浆沉积在纤维状结构表面形成,使得表面连续性明显的好于纯 MWNTs,复阻抗也因此显著地减小,满足实验所需。

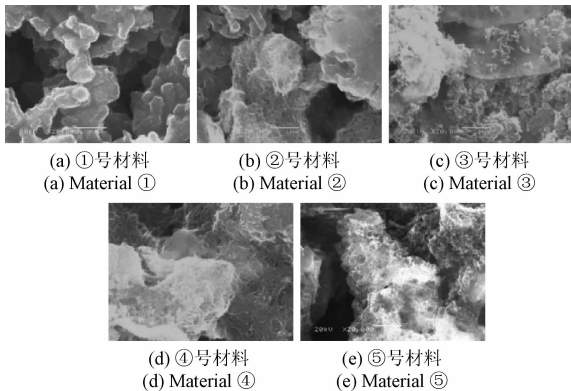


图 8 5 种敏感材料的 20 000 倍 SEM 图

Fig. 8 SEM in 20 000 times of five sensitive materials

4.3 香蕉释放气敏感性测试

选用⑤号材料,在天线馈电端口涂覆敏感薄膜制作标签气体传感器。用图 5 所示的测试系统对传感器敏感特性进行气敏测试。

4.3.1 响应曲线

图 9 所示为传感器分别对制备的新鲜期、成熟期和腐烂期的香蕉释放气体的响应特性。可以看出,通入不同时期香蕉释放气体后,标签传感器的回波损耗曲线发生不同程度的变化,说明该传感器对香蕉释放气体敏感。当撤掉气体后,回波损耗曲线基本同空气中曲线重合,说明传感器恢复特性良好。

4.3.2 灵敏度分析

本文选用谐振频率 f_c 的偏移量作为香蕉不同成熟期

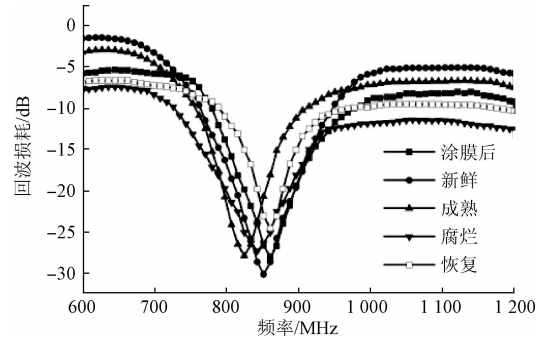


图 9 标签传感器对香蕉释放气体的响应曲线

Fig. 9 The response curve of tag sensor for banana releasing gas

释放气体的敏感参数。定义谐振频率变化灵敏度为 $\Delta f_c = f_{c,air} - f_{c,gas}$,其中 $f_{c,air}$ 和 $f_{c,gas}$ 分别为传感器在空气中和被测气体中的谐振频率;图 10 所示为传感器的 Δf_c 与不同阶段香蕉释放气体之间的关系曲线。图中数据点采用的是同一时间段 3 次测量的平均值。

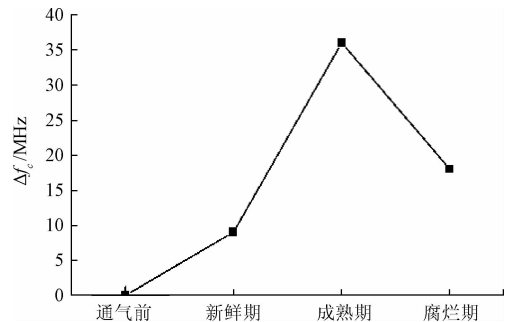


图 10 传感器对香蕉气体的灵敏度

Fig. 10 The sensitivity of sensor on banana releasing gas

从图 10 中可以看出,随香蕉新鲜程度的加深, Δf_c 并非线性增加。新鲜香蕉气的 Δf_c 为 9 MHz,当香蕉成熟后,频率变化量继续增加, Δf_c 达到 36 MHz,腐烂期香蕉气的 Δf_c 又下降为 18 MHz。因此利用 Δf_c 灵敏度可识别香蕉的 3 个成长时期。

图 11 所示是由 Hiden HPR20 QIC 质谱仪获得的香蕉 3 个不同成长期的质谱图。从图中可以得到在质荷比为 16、18、28 以及 44 处三者均出现明显的波峰,但峰强度不同,表明 3 种不同生长期的香蕉释放气体成分基本一样,但浓度不同。出现波峰的质荷比处气体成分分析如下:质荷比 16 处可能出现的气体是甲烷 (CH_4), 18 处可能对应气体为水蒸气 (H_2O), 28 处对应气体可能为乙烯 (C_2H_4)、 N_2 或是 CO , 而 44 处可能出现的气体为 CO_2 、硫化碳 (CS)、丙烷 (C_3H_8) 或是氧化乙烯/乙醛 ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$)。在质荷比 16 和 18 处波峰均相当小,28 处三者均有明显波峰,但差别不大,44 处 3 个时期波峰均较大,且峰值差别较明显。由此分析可知质荷比 44 处所对

应的香蕉释放气体是该传感器检测香蕉新鲜程度的主要气体成分。文献[23]表明多壁碳纳米管对烷类复合气体有一定的敏感特性,可见质荷比44处肯定存在丙烷(C_3H_8)或是氧化乙烯/乙醛(C_2H_4O),这也是该传感器对香蕉释放气体敏感的原因所在。

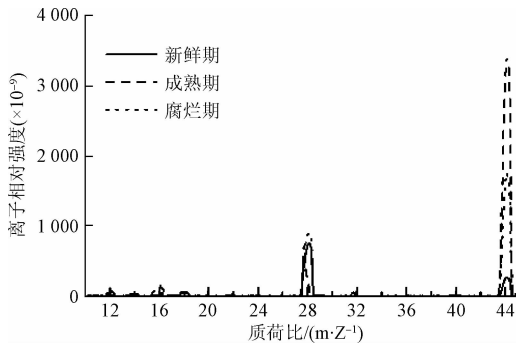


图11 香蕉气体气相色谱图

Fig. 11 The gas-phase spectrum of banana releasing gas

44处波峰随着香蕉新鲜程度的变化先增大后减少,在成熟期出现最大波峰值,表明香蕉在成熟期释放的气体浓度最大。由文献[24]可知,多壁碳纳米管复合薄膜的阻抗随烷类复合气浓度的上升而增加。由于传感器阻抗在香蕉成熟期达到最大值,导致出现图10中传感器对香蕉成熟期具有最大灵敏度的实验结果。

5 结论

设计并制作了一款基于阻抗匹配的电子标签式香蕉气体传感器,由领结型标签天线和气敏薄膜两部分组成。通过对标签传感器的检测原理、阻抗调节技术、香蕉气体敏感特性的研究,得出了如下结论。

1) 理论仿真表明,当 Z_g 在 $100 \sim 810 \Omega$ 变化时,会引起 S_{11} 的明显变化,在该阻抗范围内时,标签传感器可获得较高灵敏度。实验研究表明,纯PANI、PANI/CNT或PANI/导电碳浆/油墨稀释剂复合材料,均无法实现和标签天线之间的阻抗匹配。用导电碳浆对CNT降阻是一种有效的阻抗调节方法,可使材料阻抗值在测试频段内稳定,且初始阻抗值可实现与标签天线匹配。

2) 标签气体传感器对香蕉释放气体具有良好的响应和恢复特性。利用 Δf_c 灵敏度可识别香蕉的新鲜期、成熟期和腐烂期。当 Δf_c 为9 MHz,可判定香蕉处于新鲜期;当 Δf_c 为36 MHz,可判定香蕉处于成熟期;当 Δf_c 为18 MHz,可判定香蕉处于腐烂期。

3) 标签气体传感器通过气敏薄膜吸附香蕉释放气中的丙烷(C_3H_8)或氧化乙烯/乙醛(C_2H_4O)来检测香蕉新鲜度。香蕉成熟期释放气体浓度最大,对应的灵敏度也最大。

参考文献

- [1] 汤思蕊,陈伟根,高拓宇,等. 银掺杂氧化锌基乙炔气体传感器的检测特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1):15-23.
TANG S R, CHEN W G, GAO T Y, et al. Study on C_2H_2 detection characteristics of Ag-doped ZnO nanoparticle gas sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1):15-23.
- [2] 高拓宇,陈伟根,甘洪丽,等. 多种分层纳米 ZnO 传感器 C_2H_2 检测特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3):523-529.
GAO T Y, CHEN W G, GAN H L, et al. Investigation on C_2H_2 detection characteristics of gas sensor with various hierarchical ZnO nanostructures [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3):523-529.
- [3] THAI T T, YANG L, DEJEAN G R, et al. Nanotechnology enables wireless gas sensing[J]. IEEE Microwave Mag, 2011, 12(4):85-95.
- [4] ABAD E, ZAMPOLLI S, MARCO S, et al. Flexible tag microlab development: Gas sensors integration in RFID flexible tags for food logistic[J]. Sensors and Actuators B, 2007, 127(1):2-7.
- [5] ESPINOSA E, IONESCU R, ZAMPOLLI S, et al. Drop-coated sensing layers on ultra low power hotplates for an RFID flexible tag microlab[J]. Sensors and Actuators B, 2010, 144(2):462-466.
- [6] POTYRAILO R A, SURMAN C, STEVEN G, et al. Development of radio-frequency identification sensors based on organic electronicsensing materials for selective detection of toxic vapors[J]. Journal of applied Physics, 2009, 106(12):1-6.
- [7] TENTZERIS M M, NIKOLAOU S. RFID-enabled ultrasensitive wireless sensors utilizing inkjet-printed antennas and carbon nanotubes for gas detection applications [C]. IEEE International Conference on Microwaves, Communications and Electronics Systems, 2009:1-5.
- [8] YANG L, ZHANG R, STAICULESCU D. A novel conformal rfid-enabled module utilizing inkjet-printed antennas and carbon nanotubes for gas-detection applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8(4):653-656.
- [9] YANG L, ORECCHINI G, SHAKER G, et al. Battery-free RFID-enabled wireless sensors [C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2010:1-1.
- [10] LAKAFOSIS V, RIDA A, YANG L, et al. Progress towards the first wireless sensor networks consisting of inkjet-printed, paper-based RFID-enabled sensor

- tags[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 98(9):1601-1609.
- [11] GUERIN M, LAUQUE P, BERGERE E, et al. A temperature and gas sensor integrated on a 915 MHz RFID UHF tag[C]. 2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS), 2010:1-4.
- [12] BALACHANDRAN M D, SHRESTHA S, AGARWAL M, et al. SnO₂ capacitance sensor integrated with microstrip patch antenna for passive wireless detection of ethylene gas [J]. Electron Letters, 2008, 44(7):464-466.
- [13] SHRESTHA S, AGARWAL M. A chipless RFID sensor system for cyber centric monitoring applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(5):1303-1309.
- [14] 周恩辉,肖谧,毛陆虹,等. 应用于无源 RFID 标签的 BICMOS 温度传感器[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(1):68-71.
ZHOU EN H, XIAO M, MAO L H, et al. A passive RFID tag BICMOS temperature sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(1):68-71.
- [15] 邓芳明,何怡刚,佐磊,等. 基于无源超高频射频识别标签的湿度传感器设计[J]. 物理学报, 2014, 63(18):1-7.
DENG F M, HE Y G, ZUO L, et al. Design of humidity sensor based on passive UHF RFID [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(18):1-7.
- [16] 张海峰,钟铁钢,梁喜双,等. 半导体气敏元件在水果保鲜中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(12):1848-1852.
ZHANG H F, ZHONG T G, LIANG X SH, et al. Application of semiconductor gas sensor in fruit preservation [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(12):1848-1852.
- [17] ORECCHINI G, ALIMENTI F, PALAZZARI V, et al. Design and fabrication of ultra-low cost radio frequency identification antennas and tags exploiting paper substrates and inkjet printing technology [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, IET Microw, 2011, 5(8):993-1001.
- [18] 张静,薛严冰,宋智. 电子标签式气体传感器负载特性的研究[J]. 微波学报, 2015, 31(4):83-88.
ZHANG J, XUE Y B, SONG ZH. Load characteristic of the RFID sensor [J]. Journal of Microwaves, 2015, 31(4):83-88.
- [19] 蒋娟,薛严冰,于婧怡. 聚苯胺及其氧化锡复合材料的气敏特性研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(12):1655-1660.
- JIANG J, XUE Y B, YU J Y. Gas sensing properties of polyaniline and its tin oxide composites [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(12):1665-1660.
- [20] ZHANG T, MUBEEN S, MYUNG N, et al. Recent progress in carbon nanotube-based gas sensors [J]. Nanotechnology, 2008, 19(33):1-14.
- [21] MASANOBU M, TAKUVA A. Properties and stability of polyaniline nanofiber ammonia sensors fabricated by novel on-substrate method [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 160(10):999-1004.
- [22] 贾惠娟. 水果香气物质研究进展[J]. 福建果树, 2008, 141(2):31-34.
JIA H J. Research advances of fruit aroma substances [J]. Fujian Fruit, 2008, 141(2):31-34.
- [23] CASTRO M, KUMAR B, FELLER J F, et al. Novel e-nose for the discrimination of volatile organic biomarkers with an array of carbon nanotubes (CNT) conductive polymer nanocomposites (CPC) sensors [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 159(1):213-219.
- [24] 王珂珂,张示城,史可意,等. 接枝氨基的多壁碳纳米管薄膜传感器的气敏特性研究[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(11):18-24.
WANG K K, ZHANG S C, SHI K Y, et al. Study on gas sensing property of multi-wall carbon nanotubes thin-film sensors with amino grafting [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(11):18-24.

作者简介



宋智, 1978 年出生, 2014 年于大连海事大学获得博士学位, 现为大连交通大学副教授, 主要从事天线设计、传感器设计方面的研究。

E-mail: songzhi@djtu.edu.cn



Song zhi was born in 1978, and received Ph. D. from Dalian Maritime University in 2014. And she is an associate professor in Dalian Jiaotong University now. Her present research interests include antenna design and sensor design.

薛严冰, 1973 年出生, 于 2009 年于大连理工大学获得博士学位, 现为大连交通大学教授, 主要研究方向为半导体气体传感器及电路集成。

E-mail: dlxyb@djtu.edu.cn

Xue Yanbing was born in 1973, and received Ph. D. from Dalian University of Technology in 2009. And she is a professor in Dalian Jiaotong University now. Her present research interests include semiconductor gas sensor and circuit integration.