

## The Research on Gas Sensing Properties of Polyaniline and Its Tin Oxide Composite Material \*

JIANG Juan, XUE Yanbing\*, YU Jingyi

(School of Electrical and Information, Dalian Jiao Tong University, Dalian Liaoning 116028, China)

**Abstract:** SnO<sub>2</sub> nanoparticles were synthesized via sol-gel method. PANI and PANI/SnO<sub>2</sub> composite film were coated on ceramic substrate interdigital gold electrodes by in-situ polymerization deposition method to form gas sensors. The gas sensing properties of sensors to ammonia and fruit releasing gases were tested at room temperature. The results show that two gas sensors both have good selectivity and linearity on ammonia, and PANI has higher sensitivity than PANI/SnO<sub>2</sub>, so PANI is more suitable for testing ammonia in a wide range of concentrations; In addition, two sensors both have good response on gases released by the stored fruits (bananas, apples) with short response and recovery time, good repeatability and other characteristics. PANI/SnO<sub>2</sub> composite membrane has higher sensitivity than PANI, which expected to be applied in fruit storage and transport.

**Key words:** gas sensors; polyaniline composite materials; in-situ polymerization; ammonia; fruit releasing gases

EEACC:7230L

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2013.12.006

## 聚苯胺及其氧化锡复合材料的气敏特性研究 \*

蒋娟, 薛严冰\*, 于婧怡

(大连交通大学电气信息学院, 辽宁大连 116028)

**摘要:**以溶胶-凝胶法制备了 SnO<sub>2</sub> 纳米粒子,以原位聚合沉积法在陶瓷基底叉指金电极上制备了 PANI 及 PANI/SnO<sub>2</sub> 复合薄膜,形成气敏元件。室温下测试了元件对氨气及水果释放气体的敏感特性。结果表明,PANI 和 PANI/SnO<sub>2</sub> 复合膜对氨气具有选择性好,线性度好的特点,PANI 比 PANI/SnO<sub>2</sub> 复合膜的灵敏度高,更适合在较宽浓度范围内测试氨气;另外,这两种传感器对存放的水果(香蕉、苹果)释放气体具有响应恢复快,重复性好等特性,PANI/SnO<sub>2</sub> 复合膜对水果释放的气体比 PANI 具备更高的灵敏度,有望在水果仓储运输方面得以应用。

**关键词:**气体传感器;聚苯胺复合材料;原位聚合法;氨气;水果释放气体

中图分类号:TP212.2

文献标识码:A

文章编号:1004-1699(2013)12-1655-06

随着生活水平的提高、安全意识的增强,人们对气体传感器性能要求越来越高。目前,商业化的气体传感器主要采用无机金属氧化物半导体材料,存在制备工艺复杂、需高温检测、能耗大、成本高等缺点,制约了其在无线传感网等多个领域的应用,因此常温气敏元件已经成为气体传感器领域研究的热点。

以聚苯胺(PANI)为代表的导电高分子聚合物能够实现常温下对特定气体的检测。余晓静等<sup>[1]</sup>采用阴离子表面活性剂诱导原位化学聚合法,制得了一种珊瑚状分级结构 PANI 微纳米材料,较纯盐酸环境中制得的 PANI 微纳米球,该材料在室温下对 NH<sub>3</sub> 具有更高的灵敏度,更短的响应时间以及更好的稳定性。运用电化学<sup>[2]</sup>、表面活性剂诱导<sup>[3]</sup>、界面聚合<sup>[4]</sup>、硬模板法<sup>[5]</sup>等方法合成的一维纳米结

构聚苯胺,分别用于检测 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、三乙胺/三甲胺、NO<sub>2</sub>、三乙胺等气体,均具有灵敏度高,响应快速的特点。但由于聚苯胺在一般溶剂中溶解度低,制约了微纳加工的手段和传感器性能的提升<sup>[6]</sup>。将聚苯胺与广泛应用在商业气体传感器中的金属氧化物 SnO<sub>2</sub> 材料复合,既能发挥 SnO<sub>2</sub> 纳米粒子自身的敏感效应,又兼具有聚合物良好的化学稳定性和常温气体检测性能,有望获得性能不同于单一材料的复合气敏材料。这一复合材料已引起了一些研究者的关注,并有少量研究成果发表。耿丽娜<sup>[7]</sup>等采用水热法、原位聚合法制备了 PANI/SnO<sub>2</sub> 杂化材料,该复合材料在较低温度下对乙醇气体具有选择性好、响应恢复时间短、重复性好等特点。Deshpande N G 等<sup>[8]</sup>用溶液混合法,谢英男等<sup>[9]</sup>用原位聚合法分别

项目来源:国家自然科学基金项目(61201092);辽宁省自然科学基金项目(201202015)

收稿日期:2013-07-08 修改日期:2013-11-14

制备了 PANI 及 PANI/SnO<sub>2</sub> 复合膜材料,发现同单一 PANI 膜相比,复合膜材料在室温下对氨气的响应特性明显提升。Tai H L 等<sup>[10]</sup>用原位自组装方法制备了 PANI/TiO<sub>2</sub>、PANI/SnO<sub>2</sub> 和 PANI/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3 种复合薄膜,比较了它们对氨气响应的灵敏度、响应恢复时间、长期稳定性和环境湿度稳定性等主要指标的差异。杜海英等<sup>[11]</sup>制备了聚苯胺及其无机金属氧化物 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、SnO<sub>2</sub> 掺杂的聚苯胺氨敏元件,室温下检测氨气的结果表明灵敏度由小到大的气敏材料分别是 PANI/SnO<sub>2</sub>、PANI/TiO<sub>2</sub>、PANI、PANI/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。上述研究结果表明,通过 SnO<sub>2</sub> 纳米粒子的引入,可改善聚苯胺类气敏材料的可加工性,同时还可以改变材料对于特定气体的响应性能。

聚苯胺类材料检测的气体主要有氨气、乙醇、二氧化氮等,但未见有检测水果释放气体的报道。我国每年有 8×10<sup>7</sup> t(8 千万吨)的蔬菜水果腐烂,损失总价值近 8×10<sup>10</sup> 元。造成水果腐烂损失的最重要原因就是保鲜不当<sup>[12]</sup>。因此,研制低成本的水果释放气体检测传感器具有重要的应用价值。本文采用原位聚合沉积法制作了 PANI 及 PANI/SnO<sub>2</sub> 复合材料气敏元件,并测试了这两种气敏元件对氨气及水果(香蕉、苹果)释放气体的敏感特性。

## 1 实验

### 1.1 气敏元件制作

实验中敏感元件采用陶瓷基底上微加工的叉指金电极平面结构,叉指的线条宽度和叉指间距均为 0.25 mm,共 8 对电极。实验采用对甲苯磺酸(TSA)为掺杂剂,过硫酸铵(APS)为氧化剂,原位聚合沉积法在叉指金电极上沉积 PANI 敏感薄膜<sup>[13]</sup>,形成气敏元件。称取 9.51 g TSA 溶于 100 mL 去离子水中,2.8 g 苯胺溶于配好的 TSA 溶液中,磁力搅拌 0.5 h,将制作电极的基片表面预处理后,放入苯胺混合溶液中,称取 6.864 g APS 溶于 50 mL 水中,搅拌状态下将其缓慢滴加到混合溶液中(滴加时间约 30 min,整个实验均在室温下的水浴中进行),使聚苯胺在基片表面发生聚合沉积。随着 APS 的滴加,反应体系由透明无色慢慢变为浅蓝,继而颜色加深至墨绿色;同时在叉指金电极上沉积了墨绿色的 PANI 敏感膜。最后将覆膜后的电极放入 80 °C 干燥箱中干燥 2 h 后取出,放置空气中老化 5 d 后,形成 PANI 气敏薄膜。

为制备 PANI/SnO<sub>2</sub> 复合材料气敏元件,首先以溶胶-凝胶法制备 SnO<sub>2</sub> 纳米粒子:将盛有 0.2 mol/L SnCl<sub>4</sub> 水溶液的烧杯放在磁力搅拌器上,边搅拌边向其中逐滴滴加氨水至溶液的 PH 值为 5.5,得白色

Sn(OH)<sub>4</sub> 胶体。陈化后用去离子水抽滤洗涤,在 120 °C 下干燥后研磨,放入马弗炉中 600 °C 下煅烧 3 h,即得到黄色 SnO<sub>2</sub> 粉末。称取一定量的 SnO<sub>2</sub>(n(SnO<sub>2</sub>)/n(PANI)=0.1)粉末溶入去离子水中,超声振荡 1 h 后,将苯胺酸溶液同 SnO<sub>2</sub> 悬浮液混合,磁力搅拌 0.5 h。将制作电极的基片表面预处理后,放入苯胺/SnO<sub>2</sub> 混合溶液中,采用如上所述聚合方法,形成 PANI/SnO<sub>2</sub> 复合材料气敏薄膜。

### 1.2 材料表征

采用 NICOLET 380 型傅里叶变换红外光谱仪对材料进行红外光谱(FT-IR)测定。使用场发射扫描电子显微镜(SEM、JSM-6360LV)观测淀积在叉指电极上的薄膜形态。通过连接到 SEM 上的射线谱仪测定薄膜的化学成分。

### 1.3 气敏响应测试系统

定义传感器灵敏度为  $S=R_g/R_a-1$ ,其中  $R_a$ 、 $R_g$  分别为传感器在空气中和在被测气氛中的稳态阻值。定义响应时间为传感器达到稳态响应值 90% 所需的时间。配气方法采用静态配气法,测试系统如图 1 所示。将液态有机溶液通过微量进样器注入测试腔中的加热板上,用时间继电器控制加热板加热数秒,使得液体完全挥发成气体,通过精确控制注入液体的体积可方便地获得所需浓度的有机气体。通过采样电路将气敏膜的电阻变化转变成电压变化,用数据采集卡(北京启创莫非电子科技有限公司, MPS-010602)进行电压采集,一次可同时采集 16 路信号,测试数据通过软件实时显示和保存,整个测试过程均在室温下进行。

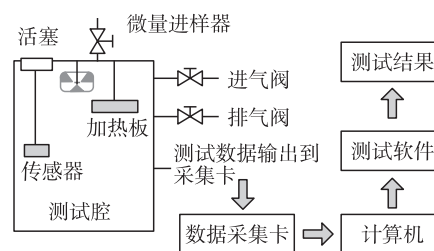


图1 气体传感器测试系统示意图

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料特性

图 2 为两种气敏材料的 FT-IR 谱图。图 2(a) 中各吸收峰所代表的官能团结构如下: 1 563.6 cm<sup>-1</sup>、1 481.9 cm<sup>-1</sup> (峰①、峰②) 分别为醌式结构(-N=(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)=N-)和苯式结构(-N-(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)-N-)伸缩振动特征吸收峰; 1 291.8 cm<sup>-1</sup> 的峰(峰③)是由芳香胺(-C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-N-)的吸收所致; 1 133.9 cm<sup>-1</sup> (峰④)和 794.5 cm<sup>-1</sup> (峰⑤)分别是 C-H 的平面内和

平面外弯曲振动特征吸收峰。除与 PANI 相关的吸收峰外, 在  $1\ 029.1\text{ cm}^{-1}$  (峰⑥) 还存在掺杂磺酸根离子的  $\text{O}=\text{S}=\text{O}$  伸缩振动峰。将图 2(b) 与图 2(a) 对比, 可发现复合材料的峰形与 PANI 基本一致, 这表明复合材料中确有 PANI 结构, 但峰值发生了轻微的移动, 分别为:  $1\ 562.1\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 482.5\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 294.4\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 116.6\text{ cm}^{-1}$  和  $800.3\text{ cm}^{-1}$ 。说明  $\text{SnO}_2$  的掺入改变了聚合物分子链上的电子云密度, 使各官能团的伸缩振动频率发生变化, 导致吸收峰偏移。由于掺入  $\text{SnO}_2$  比例小, 在  $615\text{ cm}^{-1}$  处未观察到有明显的  $\text{O}-\text{Sn}-\text{O}$  吸收峰<sup>[8]</sup>。

图 3 为制备的两种气敏膜的 SEM 图像。两种

膜均表现出一种无规则的复合纳米结构。较 PANI/ $\text{SnO}_2$  复合膜来说, PANI 膜更致密一些, 材料形貌更多表现为纳米颗粒的堆积。而 PANI/ $\text{SnO}_2$  膜则形成了絮状的纳米纤维, 直径在  $100\text{ nm}$  左右。纤维状结构表面有较大的空洞, 更利于气体的吸附。可能的原因是在苯胺发生氧化聚合前, 基底上已沉积了一些  $\text{SnO}_2$  纳米粒子, 对苯胺聚合过程中的团聚起到了一定的抑制作用, 阻碍了聚苯胺结晶度的增大, 使聚苯胺向松散结构发展。在  $5\ 000$  倍放大倍数下通过面扫方式获得敏感膜材料的 EDS 能谱图, 通过对比可发现, 复合材料膜中存在明显的 Sn 元素峰, 可定性说明材料确为 PANI 与  $\text{SnO}_2$  的复合材料。

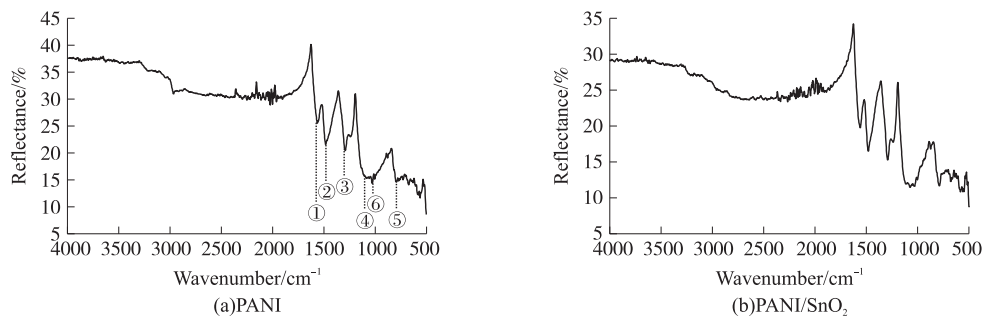


图 2 敏感膜的 FT-IR 谱图

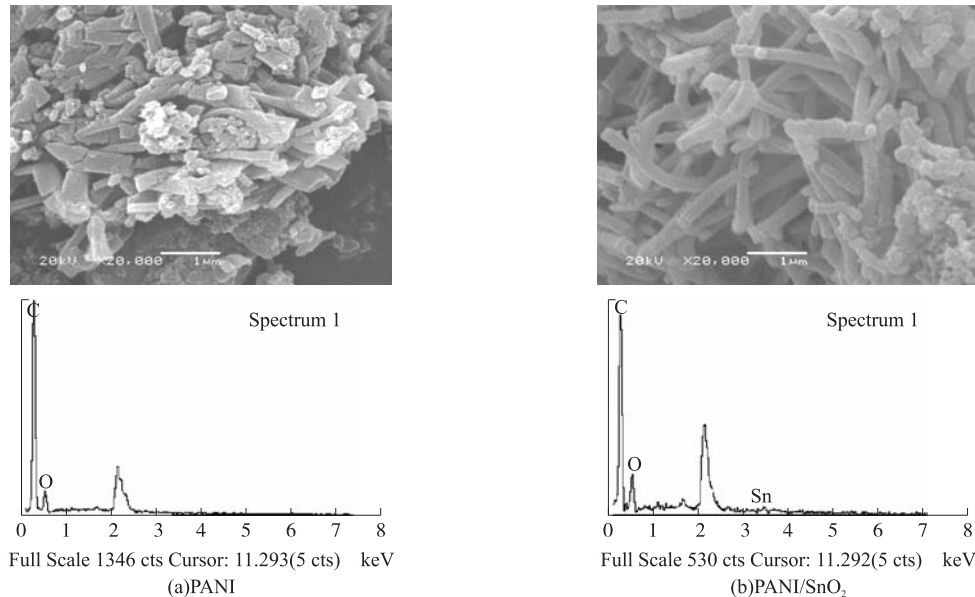
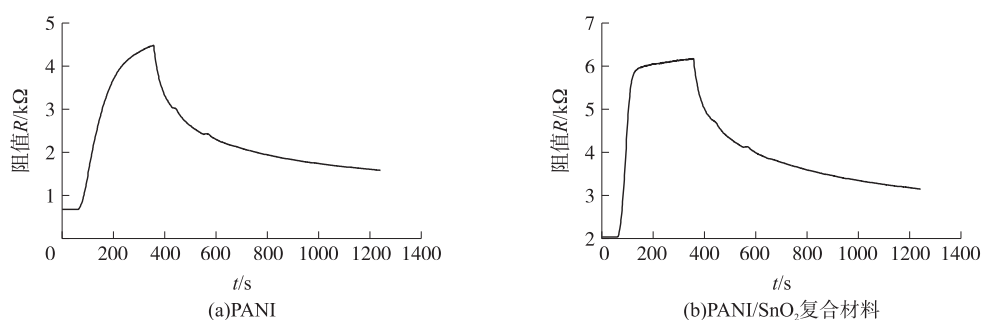


图 3 敏感膜的 SEM 照片

## 2.2 氨敏特性

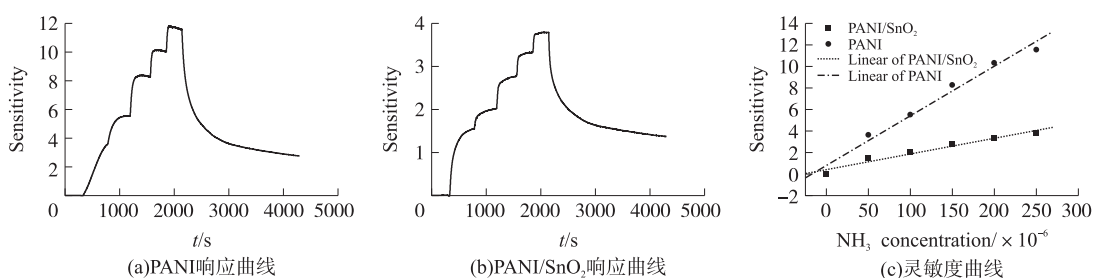
### 2.2.1 对 $100 \times 10^{-6}$ 氨气的响应

图 4 为 PANI 及 PANI/ $\text{SnO}_2$  传感器暴露于  $100 \times 10^{-6}$  氨气时的时间—电阻值曲线。当待测气体注入后, 两种传感器的阻值迅速上升到某一值并保持稳定,  $300\text{ s} \sim 400\text{ s}$  后将传感器置于空气中, 氨气分子从敏感膜表面脱附, 两传感器阻值逐渐减小。由传感器响应定义计算出两传感器的响应时间分别为  $170\text{ s}$  和  $52\text{ s}$ , PANI/ $\text{SnO}_2$  复合膜传感器的响应时间明显优于 PANI。同目前多数聚苯胺基氨气传感器的特性类似, 两种传感器均具有恢复特性差的缺点,  $800\text{ s}$  后电阻均很难恢复到初始值。原因是部分  $\text{NH}_3$  分子扩散进入膜内部发生反应, 造成脱附时间滞后, 在测试时间内敏感膜内部  $\text{NH}_3$  分子不能完全脱附。

图4 两种传感器暴露于 $100 \times 10^{-6}$ 氨气中的时间-电阻值曲线

### 2.2.2 对不同浓度氨气的响应

通过微量进样器分别向气室中依次注入 $50 \times 10^{-6}$ 、 $100 \times 10^{-6}$ 、 $150 \times 10^{-6}$ 、 $200 \times 10^{-6}$ 、 $250 \times 10^{-6}$ 几个浓度的 $\text{NH}_3$ ，两种传感器的响应曲线分别如图5(a)、5(b)所示。随 $\text{NH}_3$ 的注入，两种敏感膜均迅速响应，并达到稳定值。随注入气体浓度增加，响应灵敏度增加。对于5个不同浓度的 $\text{NH}_3$ ，PANI传感器的灵敏度分别为：3.67、5.53、8.26、10.35、11.58，PANI/ $\text{SnO}_2$ 传感器的灵敏度分别为：1.54、2.02、2.78、3.34、3.80。图5(c)为两种传感器在测试浓度范围内的氨气灵敏度曲线。对测试数据进行了线性拟合，相关度分别为0.99和0.976，表明两种传感器对 $\text{NH}_3$ 均呈线性响应。相对于PANI/ $\text{SnO}_2$ 复合膜，PANI膜对氨气具有更高的灵敏度。

图5 传感器对不同浓度氨气( $50 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$ )的响应灵敏度

为获得传感器的选择性，测试了两种传感器对 $100 \times 10^{-6}$ 的氨气、 $1000 \times 10^{-6}$ 的乙醇、 $1000 \times 10^{-6}$ 水蒸气的灵敏度，结果如图6所示。发现相对于氨气，两种传感器对乙醇、水蒸气的响应均很小，表明两种传感器均对氨气具有良好选择性。

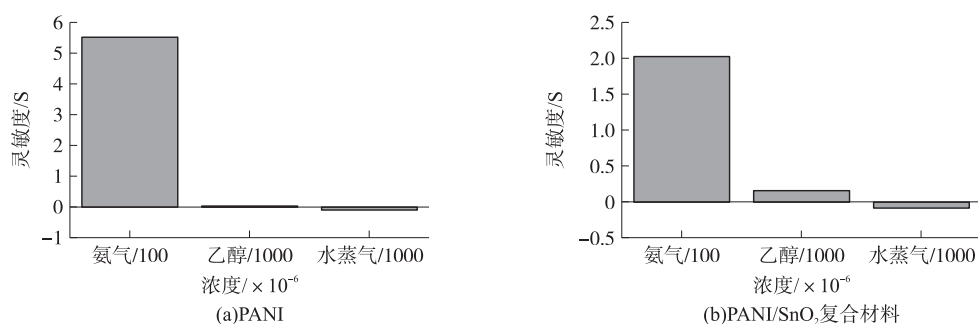


图6 两种传感器对氨气的选择性

## 2.3 传感器对存放香蕉、苹果释放气体的敏感特性

### 2.3.1 对香蕉释放气的敏感特性

图7(a)为两种传感器对存放于测试腔内3 d的5个新鲜香蕉的重复性曲线。传感器放入测试腔后，两传感器出现完全不同的响应，PANI/ $\text{SnO}_2$ 传感器的阻值迅速上升，而PANI传感器的阻值则迅速下降。与传感器与氨气的响应曲线对比，发现两传感器对香蕉释放气具有更快速的响应，响应时间分别为23 s和90 s；最明显的改善是恢复特性，置于空气中数十秒后，传感器阻值基本恢复到初始值，两传感器恢复时间分别为81 s和32 s。计算出PANI和PANI/ $\text{SnO}_2$ 传感器的灵敏度分别为-0.2和1.4，说明后者比前者更适合应用于香蕉释放气的检测。

图 7(b) 为两种传感器对存放于测试腔内 3 d 的 5 个新鲜香蕉的重复性曲线, 由于传感器具有较好的恢复特性, 大大减小了重复测试过程中的基线漂移现象, 表现出对香蕉释放气体具备良好的重复性。

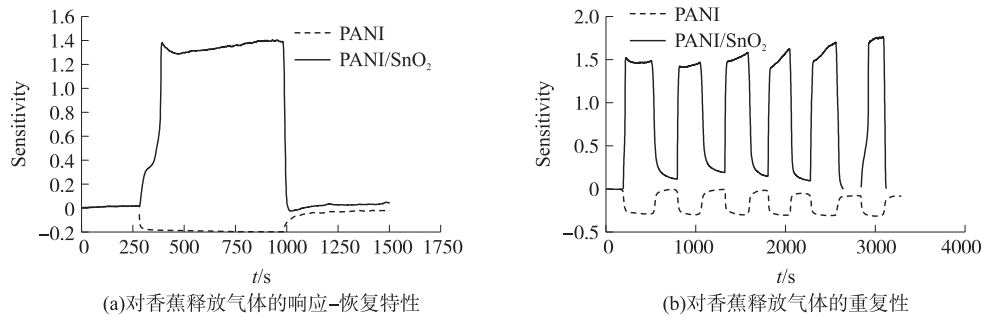


图 7 两种传感器对香蕉释放气体的敏感特性

### 2.3.2 对苹果释放气的敏感特性

图 8(a) 为两种传感器对存放于测试腔内 3 d 的 5 个新鲜苹果的重复性曲线。与对香蕉释放气的响应相似, PANI 和 PANI/SnO<sub>2</sub> 复合膜的阻值分别下降和上升, 很快达到稳态值, 响应时间分别为 64 s 和 31 s。将传感器置于空气中, 经过 100 s 和 150 s, 两传感器阻值均恢复初始值。PANI 膜传感器对苹果释放气的灵敏度和对香蕉的基本一致, 为 -0.24, 而 PANI/SnO<sub>2</sub> 的灵敏度则明显下降, 为 0.8。图 8(b) 为两种传感器对苹果释放气体的重复性曲线, 其特性与对香蕉释放气一致, 同样具备响应恢复快、重复性好等优点。

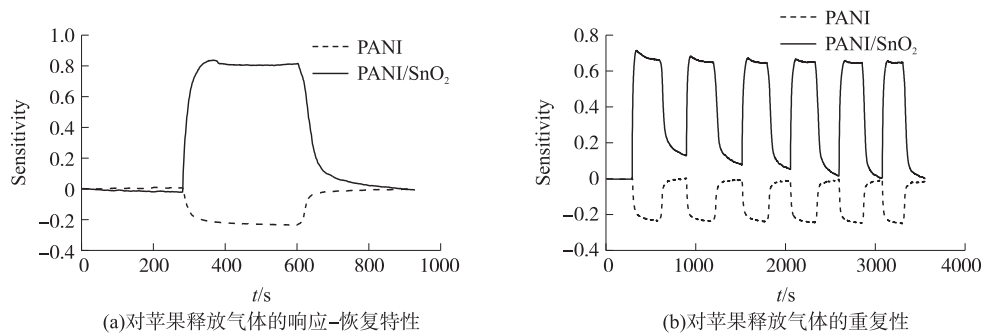


图 8 两种传感器对苹果释放气体的敏感特性

### 2.4 敏感机理

PANI 对氨气的响应可以理解为一个去质子化的过程, 敏感机理如图 9 所示。质子酸掺杂态聚苯胺整个链带正电, 表现为 P 型半导体, 当其暴露于还原性气体 NH<sub>3</sub> 中时, 由于氨气分子中含有孤对电子, 为给电子体, 其与链上的一部分氢质子结合, 导致材料的空穴数减少, 电导下降; 同时链间吸附的 NH<sub>3</sub> 阻挡载流子在链内和链间的跃迁, 也会导致电导下降<sup>[14]</sup>。

聚苯胺经掺杂后, 杂质在一定程度上改变了聚合物链象结构, 导致 PANI 电导发生改变。质子酸掺杂使 PANI 分子链的电子云密度下降, 降低了原子间的力常数, 因此质子酸掺杂态聚苯胺的特征峰向低波数方向移动<sup>[9]</sup>。由图 2 的 FT-IR 谱图分析可

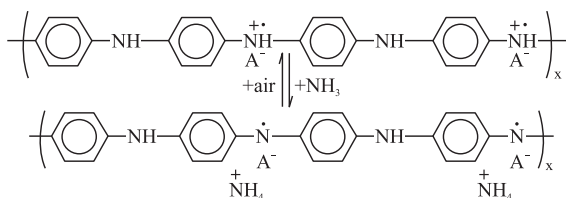


图 9 聚苯胺对 NH<sub>3</sub> 敏感机理的示意图

知, SnO<sub>2</sub> 掺杂造成 PANI 的特征峰移动并无一致规律, 说明 SnO<sub>2</sub> 掺杂的机理远复杂于普通质子酸掺杂。Gutta K 等<sup>[15]</sup> 测试了 PANI/SnO<sub>2</sub> 复合材料的伏安特性, 得到类似 p-n 结伏安特性的非线性曲线, 认为 n 型半导体 SnO<sub>2</sub> 与聚苯胺的 p 型导电通道之间通过耗尽区形成一个异质 p-n 结。

针对本文测试得到的两种传感器对水果释放气的不同响应特性, 主要的原因与被测的气氛有关。农产品在成熟过程中都会释放一定的特征气体, 如: 乙醇、氨气、硫化氢、水蒸气及其他挥发性有机气体<sup>[16]</sup>。本实验中得到的是传感器对多种混合气体的响应, 测试气氛应整体呈现氧化性。对 PANI 材料来说, 遇到氧化性气体时, 链上的空轨道会增加, 即空穴数增加, 使材料电导增大, 因而呈现出负的电阻灵敏度。对于 PANI/SnO<sub>2</sub> 复合材料, 氧化性气体扩散进入复合物薄膜内部以后, 除会改变两种半导体的体电阻, 即: 使 p 型半导体 PANI 电阻减小, n 型半导体 SnO<sub>2</sub> 电阻增大, 还会改变 p-n 结耗尽区的结电阻。多种效应相互竞争, 综合结果使复合材料

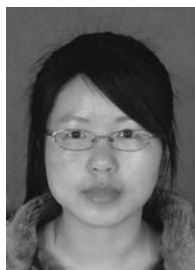
的电阻值增加,呈现出正灵敏度。两种传感器对存放的苹果、香蕉释放气具有良好的响应、恢复特性,猜测可能的原因是气体在膜表面发生的是物理吸附。相关的机理还有待于深入研究。

### 3 结论

在 TSA 酸性条件下采用原位聚合法合成了 PANI 和 PANI/SnO<sub>2</sub> 复合薄膜,制备了两种气敏传感器,室温下测试了两种传感器对 NH<sub>3</sub>、存放数日的香蕉、苹果的响应特性。实验结果表明,PANI 膜对 NH<sub>3</sub> 的灵敏度优于 PANI/SnO<sub>2</sub>,对 100×10<sup>-6</sup> NH<sub>3</sub> 的灵敏度为 5.53;对存放数日的香蕉、苹果,两种传感器表现出截然相反的特性,PANI 传感器呈现出负灵敏度,而 PANI/SnO<sub>2</sub> 传感器呈正灵敏度,后者灵敏度明显优于前者。本文研制的传感器克服了室温传感器恢复特性差的缺点,对水果释放气具有响应恢复快、重复性好的特点,有望应用于实时监测水果在仓储、运输过程中的新鲜程度。

#### 参考文献:

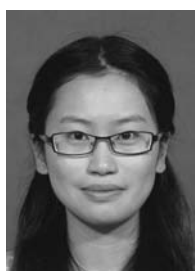
- [1] 余晓静,唐新村,王志敏,等.珊瑚状分级微纳结构聚苯胺的制备、表征及其气敏性能研究[J].传感技术学报,2011,24(12):1663-1667.
- [2] Liu J, Lin Y H, Liang L, et al. Templateless Assembly of Molecularly Aligned Conductive Polymer Nanowires: A New Approach for Oriented Nanostructures[J]. Chemistry-a European Journal,2003,9(3):605-611.
- [3] Ma X F, Li G, Wang M, et al. Preparation of a Nanowire-Structured Polyaniline Composite and Gas Sensitivity Studies[J]. Chemistry-a European Journal,2006,12(12):3254-3260.
- [4] Yan X B, Han Z J, Yan G Y, et al. NO<sub>2</sub> Gas Sensing with Polyaniline Nanofibers Synthesized by a Facile Aqueous/Organic Interfacial Polymerization[J]. Sensors and Actuators B,2007,123(1):107-113.
- [5] Gao Y, Yao S, Gon G J, et al. Preparation of Polyaniline Nanotubes Via "Thin Glass Tubes Template" Approach and Its Gas Response[J]. Macromolecular Rapid Communications,2007,28(3):286-291.
- [6] Prasad G K, Radhakrishnan T P, Kumar D S, et al. Ammonia Sensing Characteristics of Thin Film Based on Polyelectrolyte Templated Polyaniline[J]. Sensors and Actuators B,2005,106(2):626-631.
- [7] 耿丽娜,吴世华.聚苯胺/二氧化锡杂化材料的制备、表征及气敏性测试[J].无机化学学报,2011,27(1):47-52.
- [8] Deshpande N G, Gudage Y G, Sharma R, et al. Studies on Tin Oxide-Intercalated Polyaniline Nanocomposite for Ammonia Gas Sensing Applications[J]. Sensors and Actuators B,2009,138(1):76-84.
- [9] 谢英男.聚苯胺基复合材料的制备及其气敏性能研究[D].2008,郑州大学.
- [10] Tai H L, Jiang Y D, Xie G Z, et al. Preparation, Characterization and Comparative NH<sub>3</sub>-Sensing Characteristic Studies of PANI/Inorganic Oxides Nanocomposite Thin Films[J]. Journal of Materials Sciences and Technology,2010(7):605-613.
- [11] 杜海英,王兢,王娟,等.聚苯胺及其掺杂材料的制备及气敏特性的研究[J].功能材料,2011,42(12):2289-2293.
- [12] 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.
- [13] 陶雪钰,陈骁,熊忠,等.原位聚合沉积透明导电聚苯胺薄膜的研究进展[J].化学推进剂与高分子材料,2005,3(6):23-26.
- [14] 李春香,陈大竞,陈玮,等.氨气检测的聚苯胺碳纳米管复合敏感膜的研究与应用[J].传感技术学报,2012,25(3):302-305.
- [15] Dutta K, De S K. Optical and Nonlinear Electrical Properties of SnO<sub>2</sub>-Polyaniline Nanocomposites[J]. Materials Letters,2007,61(27):4967-4971.
- [16] 李洪涛,陈玮,朱国忠,等.针对香蕉品质检测的专用电子鼻系统[J].传感技术学报,2010,23(11):1541-1545.



蒋娟(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为敏感材料与传感器,814427957@qq.com;



薛严冰(1973-),女,博士,教授,硕士生导师。主要研究方向为传感器、电路设计,已公开发表论文三十余篇,dlxyb@djtu.edu.cn;



于婧怡(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为敏感材料与传感器,yjy19890630@sina.com。