

# 单根 Sb 掺杂 ZnO 微米线非平衡电桥式气敏传感器的制作与性能\*

冯秋菊<sup>1)†</sup> 石博<sup>1)</sup> 李昀铨<sup>1)</sup> 王德煜<sup>1)</sup> 高冲<sup>1)</sup>  
董增杰<sup>1)</sup> 解金珠<sup>1)</sup> 梁红伟<sup>2)</sup>

1) (辽宁师范大学物理与电子技术学院, 大连 116029)

2) (大连理工大学微电子学院, 大连 116024)

(2019 年 10 月 9 日收到; 2019 年 11 月 6 日收到修改稿)

通过使用化学气相沉积法, 成功制备出超长、大尺寸的 Sb 掺杂 ZnO 微米线. 基于非平衡电桥原理, 利用单根 Sb 掺杂 ZnO 微米线作为非平衡电桥的一个桥臂, 制作出了可以在室温环境下工作的气敏传感器原型器件. 结果表明: 室温下测得该传感器对 20, 50, 100 和 200 ppm ( $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$ ) 不同浓度的丙酮及乙醇气体的响应-恢复曲线均呈现为矩形形状, 在空气及被测气体中均有稳定的电流值, 并随着探测气体浓度的增大, 器件的响应值也在逐渐增加. 此外, 还发现器件对丙酮气体具有更好的选择性, 当丙酮气体浓度为 200 ppm 时, 该传感器的响应时间为 0.2 s, 恢复时间为 0.3 s, 响应度高达 243%. 通过与普通电导式气敏传感器对比发现, 采用这种非平衡电桥结构传感器可以明显地提高响应度, 使响应和恢复时间更快. 此外, 还研究了器件的气体探测机理.

**关键词:** 化学气相沉积, Sb 掺杂 ZnO 微米线, 非平衡电桥, 气敏传感器

**PACS:** 81.15.Gh, 81.05.Dz, 85.60.Bt

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191530

## 1 引言

ZnO 为宽带隙半导体材料, 室温下禁带宽度为 3.37 eV, 激子束缚能高达 60 meV, 具有较高的电子迁移率, 且无毒, 成本低廉, 原料充足, 已被广泛应用于光电器件、染料电池和压敏电阻等多个领域<sup>[1-5]</sup>. 由于 ZnO 对气体敏感性较高, 它还是一种优秀的气敏材料, 特别是对于一维 ZnO 纳/微米结构, 凭借其比表面积大、电子传导性好、形貌可控, 特别是大尺寸的 ZnO 微米线在肉眼下可见、便于操作等诸多优点, 日益成为制备 ZnO 基纳/微米气

体传感器的首选材料之一<sup>[6,7]</sup>. 目前从文献报道的 ZnO 气敏传感器研究结果来看, 器件的工作温度普遍较高<sup>[8,9]</sup>, 大约在 300 °C, 器件在较高温度下工作, 除了功耗高外, 高温运行还会导致易燃易爆气体着火. 另外, 还会大大缩短传感器的寿命并增加设备的不稳定性. 由于本征缺陷的存在使得未掺杂的 ZnO 呈现 n 型导电特性, 所以目前 ZnO 基气体探测器大多使用 n 型 ZnO 材料作为器件的探测材料, 而针对 p 型 ZnO 气体探测器的研究和报道却非常少, 但已有文献证实, 采用 p 型 ZnO 材料制备的气体探测器在对气体的选择性、恢复速度以及湿度依赖方面得到了很好的改善<sup>[10]</sup>. 本课题组最

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61574026, 11405017)、辽宁省自然科学基金 (批准号: 2017540572) 和大连市科技创新基金项目 (批准号: 2018J12GX060, 2019 J12GX036) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qjfeng@dlut.edu.cn

近几年在 p 型 ZnO 微米线的制备方面, 特别是在 Sb 掺杂 p 型 ZnO 微米线方面已经取得了一些较好的研究结果<sup>[1]</sup>. 本文采用化学气相沉积 (CVD) 方法生长出大尺寸的 Sb 掺杂 ZnO 微米线, 并利用单根 Sb 掺杂 ZnO 微米线制作出基于非平衡电桥结构的丙酮和乙醇气敏传感器, 该器件在室温下获得了很好的气敏特性.

## 2 实验

采用 CVD 法, 以 Ar 为载气, 以 O<sub>2</sub> 为反应气体在 1000 °C 生长温度下, 成功制备出 Sb 掺杂 ZnO 微米线. 首先将 ZnO 粉末 (2 g)、碳粉 (1 g) 以及 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末 (0.5 g) 作为反应源材料, 把它们混合并进行充分研磨, 将研磨后的粉末平铺在石英舟内, 把清洗干净的 Si 衬底放在反应源下方 15 cm 处. 然后将石英舟放置在水平管式炉内, 再通入 Ar (200 sccm, 1 sccm = 1 mL/min). 将管式炉加热至 1000 °C, 通入 O<sub>2</sub> (25 sccm), 保持此温度生长 20 min. 生长结束后, 关上氧气, 继续通入氩气直到冷却到室温后拿出样品. 可以观察到在 Si 衬底上有大量白色、透明且肉眼可见的微米线制备出来.

气敏传感器的制作是利用非平衡电桥原理, 将生长出的单根 Sb 掺杂 ZnO 微米线 ( $R_4$ ) 与 3 个已知阻值的定值电阻  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  构成电桥的四个桥臂, 所构造的器件结构示意图如图 1 所示. 图 1 中 AC 两端的外加电压为 5 V. 其中  $R_1$  和  $R_3$  的阻值均为 50 k $\Omega$ ,  $R_2$  的阻值为 100 k $\Omega$ . 首先将所需的单根 Sb 掺杂 ZnO 微米线从样品中挑选出来, 将其放置在清洗后的载玻片上, 并在微米线的两端滴定银胶进行固定并作为电极, 在干燥环境下静置, 待银胶固化. 最后将微米线两端电极分别与电桥中 BC 两点相连接, 作为电阻  $R_4$ . 本实验是通过检测 BD 两点间的电流信号来测试非平衡电桥中 Sb 掺

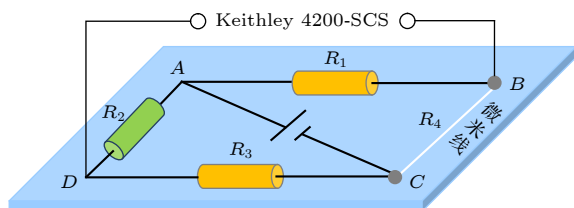


图 1 气体传感器的结构示意图

Fig. 1. Schematic image of gas sensor.

杂 ZnO 微米线的气敏特性. 为了测试该传感器的气敏特性, 自制了一个用于放置微米线 ( $R_4$ ) 的密封容器, 并使 Keithley 4200-SCS 半导体参数测试仪与器件 BD 两点相连, 在室温 (25 °C) 和湿度 23% 的环境下, 对器件的电学和气敏特性进行测试.

## 3 结果与讨论

图 2(a) 是刚生长出来的 Sb 掺杂 ZnO 微米线的实物照片. 由图 2(a) 可知, 具有大尺寸、高密度的 Sb 掺杂 ZnO 微米线阵列被生长出来, 且微米线的长度较长, 其长度约为 1.5—2.5 cm.

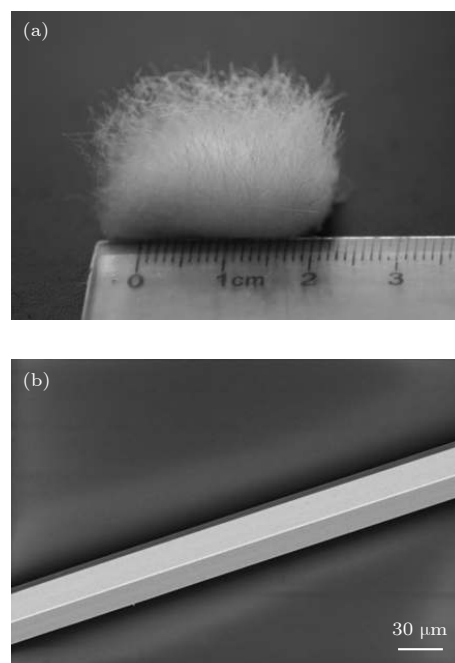


图 2 (a) Sb 掺杂 ZnO 微米线阵列实物照片; (b) 单根 Sb 掺杂 ZnO 微米线的 SEM 图

Fig. 2. (a) Photograph of Sb doped ZnO microwire arrays; (b) SEM image of the single Sb doped ZnO microwire.

为了进一步观察单根 Sb 掺杂 ZnO 微米线的表面形貌, 利用扫描电子显微镜 (SEM) 对单根微米线的表面形貌进行了表征, 结果如图 2(b) 所示. 该测试选用的 Sb 掺杂 ZnO 微米线的长度为 1.5 cm, 从图 2(b) 可以看出单根 Sb 掺杂 ZnO 微米线的表面非常光滑, 没有颗粒或者团簇附着在其表面, 而且微米线的直径比较均匀, 其直径约为 35  $\mu\text{m}$ . 通过多次对不同单根 Sb 掺杂 ZnO 微米线的表面形貌测试后发现, 微米线的表面都十分的光滑.

此外, 还对 Sb 掺杂 ZnO 微米线进行了元素成分的分析, 其能量色散 X 射线光谱 (EDS) 结果如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 该微米线是由 Zn, O 以及 Sb 元素所组成, 且 Sb 掺杂 ZnO 微米线中 Zn, O 以及 Sb 元素的摩尔百分含量分别约为 51%, 46% 和 3%.

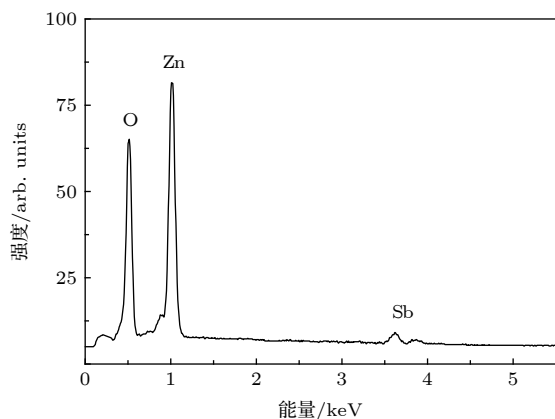


图 3 单根 Sb 掺杂 ZnO 微米线的 EDS

Fig. 3. EDS for the single Sb doped ZnO microwire.

为了制作气体探测器件, 从 Sb 掺杂 ZnO 微米线阵列中挑选出长度为 1.5 cm, 两个电极之间微米线的长度约为 1 cm, 直径约为 35  $\mu\text{m}$  的微米线作为非平衡电桥的桥臂电阻  $R_4$ . 图 4 给出了室温下单根 ZnO 微米线分别在空气和浓度为 200 ppm (1 ppm =  $10^{-6}$ ) 丙酮及乙醇气体中的  $I$ - $V$  特性曲线, 电压的测量范围从 -10—10 V. 由图 4 可以看出这 3 条  $I$ - $V$  特性曲线随着电压的增加, 电流也随之增加且基本呈线性变化, 这说明导电银胶与

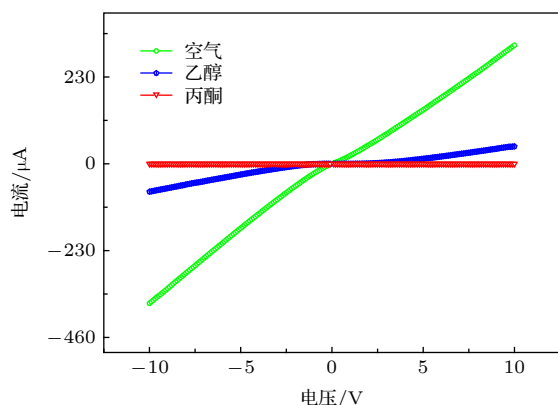


图 4 室温下单根 Sb 掺杂 ZnO 微米线分别在空气和浓度为 200 ppm 丙酮及乙醇气体中的  $I$ - $V$  特性曲线

Fig. 4. The  $I$ - $V$  characteristic curves of the single ZnO microwire for air, acetone (200 ppm) and ethanol (200 ppm) at room temperature.

Sb 掺杂 ZnO 微米线之间形成了良好的欧姆接触. 此外, 还发现当微米线分别放置于空气和不同的测试气体 (丙酮和乙醇) 中时, 3 条曲线的斜率出现了明显的不同, 这表明当 Sb 掺杂 ZnO 微米线放在丙酮和乙醇气体中时, 电阻会比在空气中时明显增大, 且在丙酮中的电阻要大于在乙醇气体中的数值. 此外, 单根微米线在空气中的电阻率约为  $0.3 \Omega \cdot \text{cm}$ .

为了测试器件在室温下的气体探测性能, 对器件在 20—200 ppm 不同浓度丙酮和乙醇气体下的气敏特性进行了研究, 结果如图 5 所示. 图 5(a) 和图 5(b) 分别为室温下, 器件在不同浓度丙酮和乙醇气体中的响应-恢复曲线. 从图 5(a) 和图 5(b) 可以看出, 传感器在不同浓度丙酮和乙醇气体中的响应-恢复曲线的形状, 都接近于矩形, 这表明室温下该器件对两种气体都有着快速的响应和恢复时间. 另外, 还发现每次测量器件在空气中的初始电流值  $I_a$  基本不变, 但随着丙酮和乙醇气体浓度的变大, 传感器在待测气体中的稳态电流值  $I_g$  却不断地增大, 即电流的变化量 ( $I_g - I_a$ ) 值在逐渐变大. 图 5(c) 和图 5(d) 为室温条件下器件分别对 20, 50, 100 和 200 ppm 的丙酮与乙醇气体浓度的响应对比. 从图 5(c) 和图 5(d) 可以清晰地看出, 随着被测丙酮与乙醇气体浓度的增加, 器件的响应值也在逐渐增加. 当乙醇和丙酮气体的浓度为 200 ppm 时, 室温下探测器对乙醇的响应度可以达到 185%, 其响应时间为 0.3 s, 恢复时间为 0.6 s, 对丙酮的响应度为 243%, 其响应时间和恢复时间分别为 0.2 s 和 0.3 s. 在相同气体浓度下, 器件对丙酮气体显示出相对较大的响应度, 这表明该器件对丙酮气体具有更好的选择性.

对于气敏传感器的实际应用而言, 器件的可重复性和稳定性都是非常重要的参数. 图 6 为室温下气体传感器对 200 ppm 浓度丙酮和乙醇气体的响应和恢复曲线 (4 个循环). 由图 6 可知, 当器件放置在空气中时, 测得器件  $BD$  两端的电流值  $I_a$  基本稳定在  $10.9 \mu\text{A}$ ; 而当器件分别插入丙酮和乙醇气体中时, 电流则迅速增加, 而后其电流值又逐渐趋于平稳, 达到另一个稳定值  $I_g$ , 当丙酮和乙醇气体浓度分别为 200 ppm 时,  $BD$  两端的电流值基本稳定在  $37.4$  和  $31.1 \mu\text{A}$ . 随后将器件再次暴露于空气中时, 器件产生的电流均恢复到初始电流值  $I_a$ , 即完成了一个循环操作. 由此可以得出该器件在丙

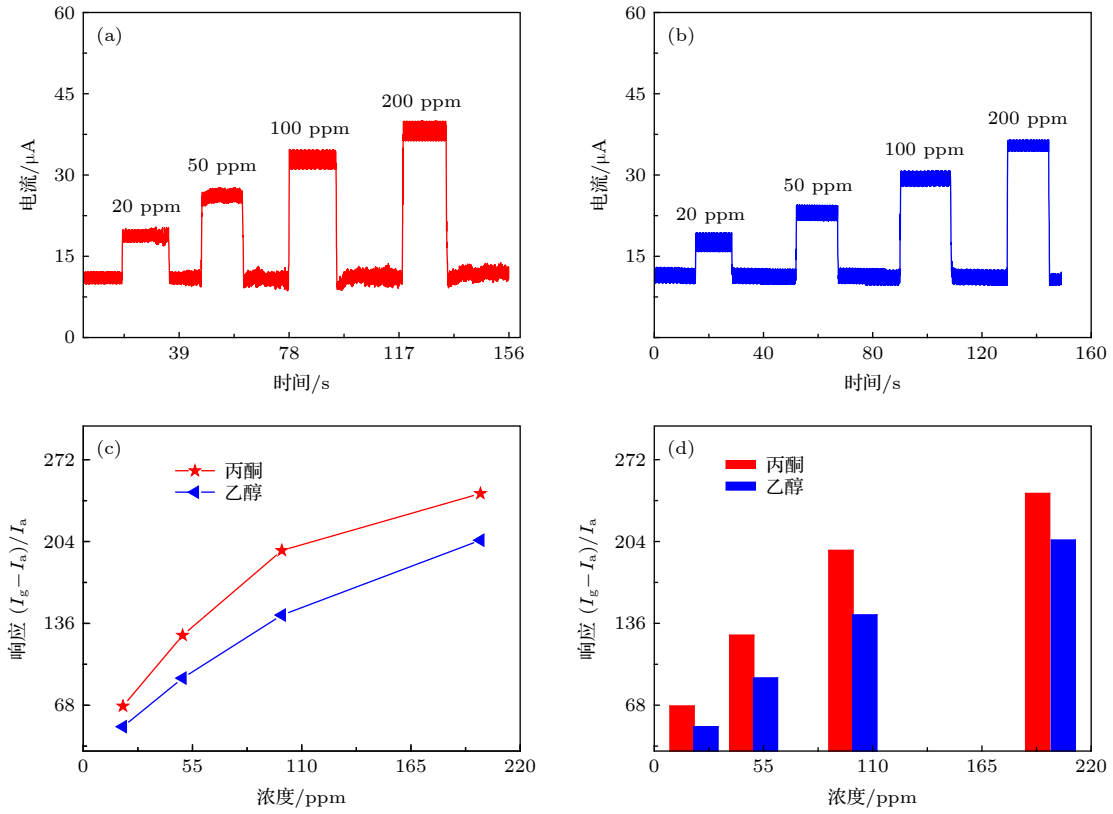


图 5 室温条件下传感器在不同浓度丙酮和乙醇气体中的响应和恢复曲线 (a) 丙酮; (b) 乙醇; (c), (d) 室温下传感器对不同浓度丙酮及乙醇气体的响应度曲线

Fig. 5. Response and recovery curves of the gas sensor to different concentrations of acetone (a) and (b) ethanol at room temperature; (c), (d) the response of the gas sensor to different concentrations of acetone and ethanol at room temperature.

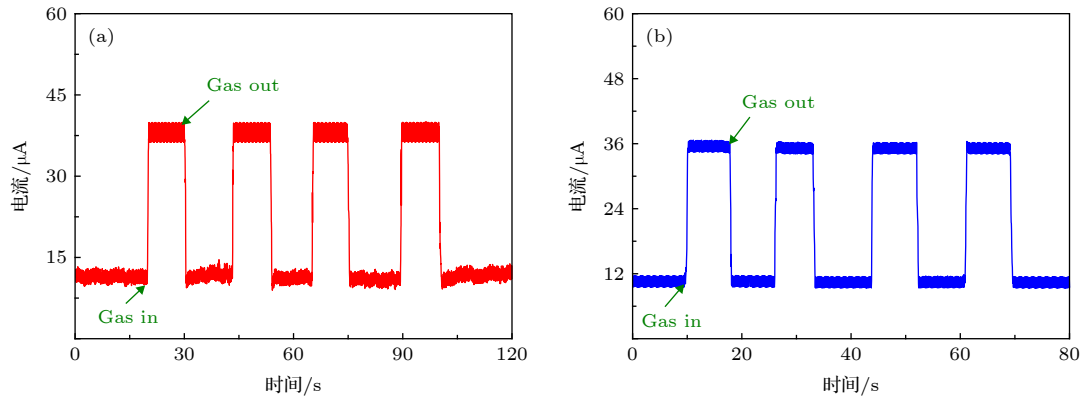


图 6 室温下气体传感器对 200 ppm 被测气体的响应恢复曲线 (a) 丙酮; (b) 乙醇

Fig. 6. Response and recovery curves of gas sensor to 200 ppm acetone (a) and ethanol (b) at room temperature.

酮和乙醇气体中的响应和恢复特性都能够重复再现, 这说明器件具有非常好的稳定性, 可以重复使用.

为了对非平衡电桥结构气敏传感器和传统电导式气敏传感器, 在检测气体方面进行比较. 将微米线  $R_4$  从电桥中拿出来, 两侧分别接电源的正负极 (组成传统电导式气敏传感器), 在相同温度、相

同直流电压 (5 V) 和相同测试气体浓度下 (200 ppm 的丙酮和乙醇气体), 测试两种类型传感器的响应-恢复曲线, 结果如图 7 所示. 由图 7 可以看出, 非平衡电桥结构传感器对 200 ppm 丙酮气体的响应时间为 0.2 s, 恢复时间为 0.3 s, 响应度为 243%; 对相同浓度的乙醇气体的响应时间为 0.3 s, 恢复时间为 0.6 s, 响应度为 185%; 而单根 ZnO 微米线



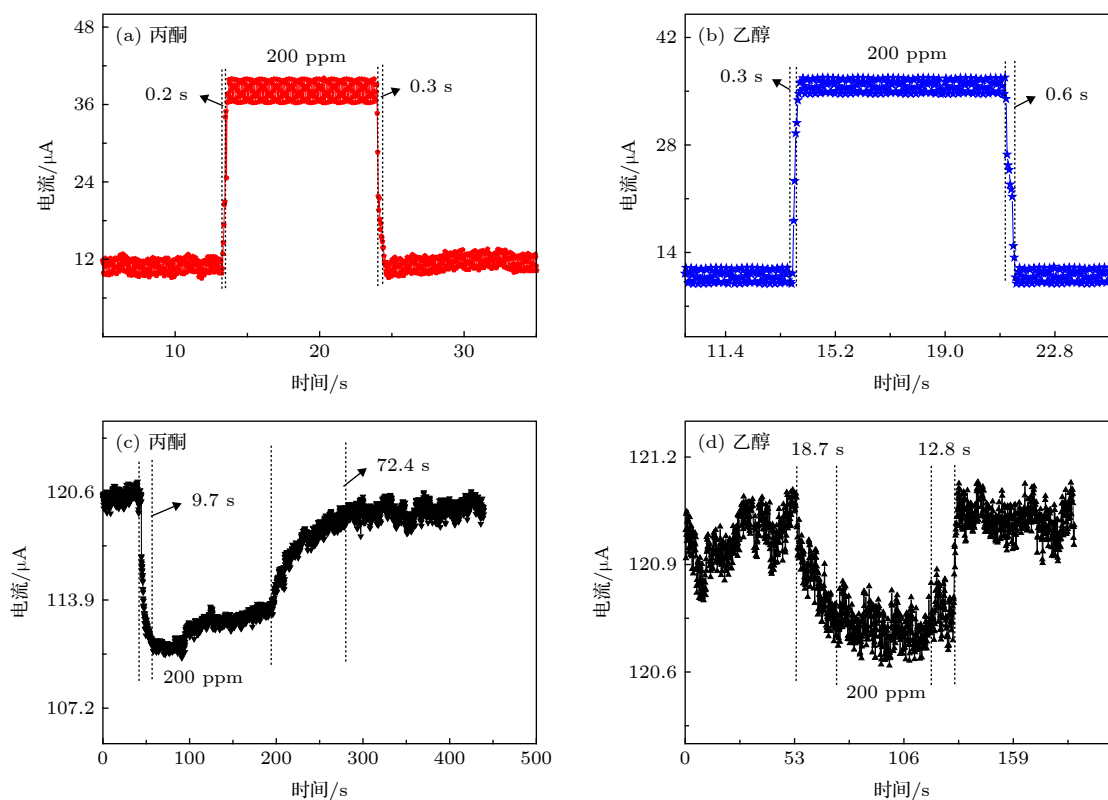
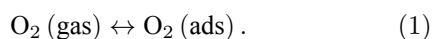


图 7 两种气敏传感器室温下对 200 ppm 丙酮和乙醇气体的响应和恢复曲线 (a), (b) 非平衡电桥式; (c), (d) 传统电导式  
 Fig. 7. Response and recovery curves of two gas sensors to 200 ppm acetone and ethanol gases at room temperature: (a), (b) Non-balance electric bridge type; (c), (d) conventional conductance type.

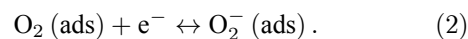
传统电导式气敏探测器对 200 ppm 丙酮气体的响应和恢复时间分别为 9.7 s 和 72.4 s, 响应度为 9%; 对相同浓度的乙醇气体的响应时间为 18.7 s, 恢复时间为 12.8 s, 响应度为 0.6%。由此可见, 通过对两种不同结构器件的对比, 发现非平衡电桥结构的器件有着较好的气敏探测特性, 即对乙醇和丙酮气体有着更大的响应度和更短的响应和恢复时间。

气敏材料能够探测气体主要是利用当材料表面吸附气体后, 材料的电阻值会发生变化的原理来实现的. 当氧化性气体 (如  $O_2$  和  $NO_x$  等) 吸附到 n 型半导体上, 或者还原性气体 (如  $H_2$ ,  $CO$ , 碳氢化合物和醇类等) 吸附到 p 型半导体上时, 都将使载流子减少, 而使半导体材料电阻增大. 由于氧的电子亲和能较大, 易从 ZnO 导带获得电子, 形成  $O_2^-$ ,  $O^-$ ,  $O^{2-}$ , 在 ZnO 材料的表面形成空间电荷耗尽层, 使材料导带中电子减少, 表面势垒升高, 器件电阻增大. 研究表明氧气被吸附的过程是一个放热的过程, 其反应式如下 [12]:



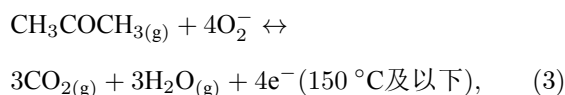
根据文献 [13] 报道当测试温度在 150 °C 以下

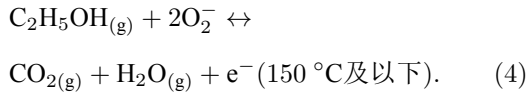
时, 吸附氧分子在获得一个电子后, 化学吸附形成  $O_2^-$ ,



由于通过热电效应测试, 发现生长的 Sb 掺杂 ZnO 微米线为 p 型, 所以将微米线放置于空气中时, 由于  $O_2$  分子吸附在 Sb 掺杂 ZnO 微米线的表面, 并从微米线中夺取电子生成  $O_2^-$ , 从而导致微米线中的空穴浓度增加, 即微米线中的载流子浓度增加, 所以引起电阻减小, 电导率变大. 当化学吸附与解吸附过程达到一个动态平衡时, ZnO 微米线会表现出一个稳定的低阻状态.

丙酮和乙醇均为还原性气体 [14,15]. 室温下当 Sb 掺杂 ZnO 微米线放置于丙酮或乙醇气体中时, 吸附在 ZnO 微米线表面的  $O_2^-$  会与丙酮或乙醇反应, 形成  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $e^-$  等. 其化学反应方程式分别如下所示 [16-18]:





由 (3) 和 (4) 式可知, 在室温情况下, 将传感器暴露于丙酮或乙醇气体中时, 被测气体与吸附在微米线表面的  $\text{O}_2^-$  粒子发生反应, 产生  $e^-$ , 进而将被捕获的电子重新释放到 ZnO 中, 导致微米线中空穴浓度降低, 电阻增加.

通过前面的分析和实验结果可以得出, 室温下将 Sb 掺杂 ZnO 微米线由空气放入到丙酮或乙醇气体中时, 微米线的电阻值将变大, 即在非平衡电桥中  $R_4$  的阻值会增大, 所以  $BD$  两点间的电流值也会增加.

下面将通过公式推导给出图 1 非平衡电桥中  $BD$  两点间电流  $I_g$  的表达式. 应用基尔霍夫定律可给出如下方程组 [19].

在  $ABD$  回路中存在

$$I_1 R_1 + I_g R_g - I_2 R_2 = 0. \quad (5)$$

在  $BCD$  回路中存在

$$I_4 R_4 - I_3 R_3 - I_g R_g = 0. \quad (6)$$

在  $ABCE$  回路中存在

$$V = I_1 R_1 + I_4 R_4, \quad (7)$$

$$I_4 = I_1 - I_g, \quad (8)$$

$$I_3 = I_2 + I_g. \quad (9)$$

根据 (5)—(9) 式可以得到, 流经  $BD$  的电流为

$$I_g = \frac{V(R_2 R_4 - R_1 R_3)}{R_1 R_2 R_4 + R_1 R_2 R_3 + R_2 R_3 R_4 + R_1 R_3 R_4}. \quad (10)$$

在本文中, 3 个定值电阻分别为:  $R_1 = 50\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 100\text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 50\text{ k}\Omega$ , 其中  $V$  为加在  $AC$  间的外加电压, 其数值为  $5\text{ V}$ , 为了计算方便, 令  $R_4$  以  $\text{k}\Omega$  为单位,  $I_g$  以  $\text{mA}$  为单位, 则可将 (10) 式简化为

$$I_g = \frac{R_4 - 25}{25R_4 + 500}. \quad (11)$$

根据 (11) 式中电流  $I_g$  随电阻  $R_4$  的变化关系可知, 通过检测  $BD$  间的非平衡电流  $I_g$ , 即可反映出桥臂电阻  $R_4$  的变化. 由上面的分析可知 ZnO 微米线电阻  $R_4$  是随着检测气体浓度的变化而发生改, 当把 ZnO 微米线放入丙酮或乙醇气体中时, 其电阻值  $R_4$  将增大 (见图 6), 这和 (11) 式中电流值的变大相吻合. 通过文献 [20] 可知, 采用非平衡电

桥结构可以显著地将较小的桥臂电阻变化量进行放大, 所以本文提出的这种采用非平衡电桥结构的气敏传感器, 可以明显地改善器件的响应度及响应和恢复时间, 为 ZnO 基气体探测器的研制提供了一种好的途径和方法.

## 4 结 论

采用 CVD 法生长了大尺寸 Sb 掺杂的 ZnO 微米线, 并利用该微米线制作出了单根 Sb 掺杂 ZnO 微米线非平衡电桥结构的气敏传感器. 在室温情况下, 应用该传感器分别对丙酮及乙醇气体进行了测试. 研究表明, 在室温 ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) 条件下, 通过器件对丙酮和乙醇气体的探测, 发现器件对丙酮气体具有更好的选择性, 当丙酮气体浓度为  $200\text{ ppm}$  时, 器件的响应时间为  $0.2\text{ s}$ , 恢复时间为  $0.3\text{ s}$ , 响应度高达  $243\%$ . 此外, 通过与传统电阻式气体传感器相比, 采用这种非平衡电桥式气体传感器, 具有更高的响应速度, 更快的响应和恢复时间.

## 参 考 文 献

- [1] Li Y, Li J, Chen L L, Lian X X, Zhu J W 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 140701 (in Chinese) [李骅, 李娇, 陈丽丽, 连晓雪, 朱俊武 2018 *物理学报* **67** 140701]
- [2] Yang X, Dong L, Shan C X, Sun J L, Zhang N, Wang S P, Jiang M M, Li B H, Xie X H, Shen D Z 2017 *Adv. Mater.* **29** 1602832
- [3] Feng Q J, Xu R Z, Guo H Y, X K, Li R, Tao P C T, Liang H W, Liu J Y, Mei Y Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 168101 (in Chinese) [冯秋菊, 许瑞卓, 郭慧颖, 徐坤, 李荣, 陶鹏程, 梁红伟, 刘佳媛, 梅艺赢 2014 *物理学报* **63** 168101]
- [4] Mourad S, Ghoul J E, Omri K, Khirouni K 2019 *Chin. Phys. B* **28** 047701
- [5] Liu Z, Zhang H, Wu H, Liu C 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 107301 (in Chinese) [刘姿, 张恒, 吴昊, 刘昌 2019 *物理学报* **68** 107301]
- [6] Wei A, Wang Z, Pan L H, Li W W, Xiong L, Dong X C, Huang W 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 080702
- [7] Hu J, Deng X, Sang S B, Li P W, Li G, Zhang W D 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 207102 (in Chinese) [胡杰, 邓霄, 桑胜波, 李朋伟, 李刚, 张文栋 2014 *物理学报* **63** 207102]
- [8] Liang J, Yang R, Zhu K, Hu M 2018 *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **29** 3780
- [9] Shao C, Chang Y, Long Y 2014 *Sens. Actuators B* **204** 666
- [10] Kim H J, Lee J H 2014 *Sens. Actuators B* **192** 607
- [11] Feng Q J, Shi X C, Xing Y, Li T T, Li F, Pan D Z, Liang H W 2018 *J. Alloys Compd.* **739** 298
- [12] Gu F B, You D, Wang Z H, Han D M, Guo G S 2014 *Sens. Actuators B* **204** 342
- [13] Zhang P S, Pan G F, Zhang B Q, Zhen J L, Sun Y C 2014 *Mater. Res.* **17** 817
- [14] Tian S, Yang F, Zeng D, Xie C 2012 *J. Phys. Chem. C* **116** 10586

- [15] Li X W, Wang C, Guo H, Sun P, Liu F, Liang X, Lu G 2015 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7** 17811
- [16] Alexiadou M, Kandyla M, Mousdis G, M. Kompitsas 2017 *Appl. Phys. A* **123** 262
- [17] Hsueh T J, Hsu C L, Chang S J, Chen I C 2007 *Sens. Actuators B* **126** 473
- [18] Wang T, Xu S, Hu N, Hu J, Huang D, Jiang W, Wang S, Wu S, Zhang Y, Yang Z 2018 *Sens. Actuators B* **255** 1006
- [19] Moreau W R 1989 *Eur. J. Phys.* **10** 286
- [20] Castro H F, Correia V, Pereira N, Costab P, Oliveiraa J, Lanceros-Méndez S L 2018 *Addit. Manuf.* **20** 119

## Fabrication and properties of non-balance electric bridge gas sensor based on a single Sb doped ZnO microwire\*

Feng Qiu-Ju<sup>1)†</sup> Shi Bo<sup>1)</sup> Li Yun-Zheng<sup>1)</sup> Wang De-Yu<sup>1)</sup> Gao Chong<sup>1)</sup>  
Dong Zeng-Jie<sup>1)</sup> Xie Jin-Zhu<sup>1)</sup> Liang Hong-Wei<sup>2)</sup>

1) (*School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China*)

2) (*School of Microelectronics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

(Received 9 October 2019; revised manuscript received 6 November 2019)

### Abstract

Zinc oxide (ZnO) is a wide direct band gap (3.37 eV) II-VI semiconductor material with a wide range of applications in light emitting devices, solar cells, field emission devices, gas sensors, etc. Over the past decades, metal oxide semiconductors have been investigated extensively for sensing various types of vapors and toxic gases. Among the various metal oxides for gas sensing applications, ZnO is one of the potential materials for high response, stability and sensitivity to volatile organic gases. At present, the ZnO-based gas sensor has a relatively high operating temperature. However, the stability and lifetime of gas sensors operating under high temperature conditions with a long term will be greatly reduced. In addition, the power consumption of gas sensors is also significantly increased. Furthermore, there can exist the potential of explosion when gas sensors are used to detect the flammable gases at high temperature. Therefore, it is necessary to improve the sensing properties and reduce the operating temperature of gas sensors. In this paper, ultra-long, large-sized Sb doped ZnO microwires are successfully prepared by using chemical vapor deposition. The gas sensor is based on the principle of non-balance electric bridge, and a single Sb doped ZnO microwire is used as a bridge arm  $R_4$  of non-balance electric bridge to produce a gas sensor that can work at room temperature. The results show that the response-recovery curves of sensors at the acetone and ethanol concentrations of 20 ppm, 50 ppm, 100 ppm and 200 ppm (1 ppm =  $10^{-6}$ ) are rectangular at room temperature, and have stable current values in air and measured gas, and the response value of the device gradually increases with gas concentration increasing. Furthermore, the detection of acetone and ethanol gas reveal that the device has better selectivity for acetone gas. The response of the gas sensor to 200 ppm acetone is about 243%, with response and recovery time of 0.2 s and 0.3 s, respectively. Compared with the traditional resistive gas sensor, this non-balanced electric bridge sensor has high response, fast response and recovery time. In addition, the sensing mechanism of the device is also studied.

**Keywords:** chemical vapor deposition, Sb doped ZnO microwires, non-balance electric bridge, gas sensor

**PACS:** 81.15.Gh, 81.05.Dz, 85.60.Bt

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191530

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61574026, 11405017), the Natural Science Foundation of Liaoning Province, China (Grant No. 2017540572), and the Dalian Science and Technology Innovation Fund Project, China (Grant Nos. 2018J12GX060, 2019J12GX036).

† Corresponding author. E-mail: [qjfeng@dlut.edu.cn](mailto:qjfeng@dlut.edu.cn)