

文章编号 1004-924X(2014)06-1555-07

## 电纺氧化锌纳米纤维乙醇、丙酮气敏传感器

郑高峰<sup>1</sup>, 何广奇<sup>1</sup>, 刘海燕<sup>1</sup>, 郑建毅<sup>1\*</sup>, 李文望<sup>1,2</sup>, 孙道恒<sup>1</sup>

(1. 厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005; 2. 厦门理工学院 机电工程系, 福建 厦门 361024)

**摘要:**研究了用静电纺丝技术制造微纳气体传感器的方法。采用 PVP (Polyvinyl Pyrrolidone)/Zn(Ac)<sub>2</sub> 和 PEO (Polyoxyethylene)/Zn(Ac)<sub>2</sub> 两种混合溶液作为原料, 通过电纺喷射获得了复合前驱体纳米纤维; 在空气中加热至 500°C 去除聚合物, 并使 Zn(Ac)<sub>2</sub> 受热分解、氧化获得 ZnO 纳米纤维; 利用 X 射线衍射术(XRD)对 ZnO 纳米纤维进行成分表征; 最后实验检测了 ZnO 纳米纤维气敏传感器对乙醇和丙酮气体的传感特性。结果显示: 以 PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub>、PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 复合纳米纤维为前驱体制得的 ZnO 纳米纤维平均直径分别为 308 nm、184 nm; 这种纳米纤维经加热氧化可获得高纯度 ZnO 纳米纤维; 在室温条件 ZnO 纳米纤维气敏传感器对目标气体传感响应时间小于 1 s, 其传感灵敏值随着气体浓度的增大而升高。另外, 以 PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 为前驱体制得的 ZnO 纳米纤维表面粗糙、比表面积大, 具有较高的传感灵敏值, 对于乙醇、丙酮两种目标气体的最高灵敏值分别为 215.69 和 118.13。得到的结果表明: 静电纺丝技术的引入为半导体微纳气敏传感器的集成制造提供了有效的方法。

**关键词:**静电纺丝; 纳米纤维; 氧化锌; 气体传感器; 高温氧化

**中图分类号:** TS104.7; TP212.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142206.1555

## Electrospun zinc oxide nanofibrous gas sensors for alcohol and acetone

ZHENG Gao-feng<sup>1</sup>, HE Guang-qi<sup>1</sup>, LIU Hai-yan<sup>1</sup>, ZHENG Jian-yi<sup>1\*</sup>,  
LI Wen-wang<sup>1,2</sup>, SUN Dao-heng<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;  
2. Department of Mechanical and Electrical Engineering,  
Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)  
\* Corresponding author, E-mail: zjy@xmu.edu.cn

**Abstract:** The application of electrospinning fabrication technology in micro/nano sensor production was investigated. Mixed solutions of precursor bodies PVP(Polyvinyl Pyrrolidone)/Zn(Ac)<sub>2</sub> and PEO (Polyoxyethylene)/Zn(Ac)<sub>2</sub> were used as the electrospinning materials to make a precursor nanofiber. The precursor nanofiber was calcined at 500 °C in the air to remove polymers and the Zn(Ac)<sub>2</sub> was thermally decomposed and oxidized into ZnO. X-ray diffraction (XRD) was used to characterize the components of a ZnO nanofiber. The sensing response of a ZnO nanofibrous gas sensor on the ethanol and acetone vapors were tested. The test results indicate that the average diameters of ZnO nanofiber made from PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub>, PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> precursor are 308 nm and 184 nm, respectively. XRD spectrograms show that the ZnO nanofiber with high purity can be obtained from a blended precursor

收稿日期: 2013-12-05; 修订日期: 2014-01-19.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 51035002); 教育部博士点基金资助项目(No. 20120121120035); 福建省自然科学基金资助项目(No. 2013J05083); 福建省教育厅 Jk 项目(No. JK2011047)

nanofiber through thermal oxidation. The response time of the ZnO nanofibrous sensor on the objective gas is less than 1 s at room temperature and its sensitivity increases with the increment of gas concentration. Furthermore, the ZnO nanofiber made from PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> precursor shows a roughness surface, a larger specific surface area and higher sensing sensitivity, and the maximal sensitivity of ZnO nanofibrous gas sensor on ethanol and acetone vapor have been up to 215.69 and 118.13, respectively. This work presents a novel method for the integration fabrication of semiconductor micro/nano gas sensors.

**Key words:** electrospinning; nanofiber; zinc oxide; gas sensor; high temperature oxidation

## 1 引言

由于半导体金属氧化物具有优异的传感检测性能,将其应用于气敏传感器的研究已有几十年的历史<sup>[1]</sup>。其中,ZnO 是一种宽禁带金属氧化物半导体材料,室温下禁带宽度为 3.37 eV,具有良好的化学性能和热稳定性,且生产成本低、无污染、对人体无伤害。ZnO 是半导体金属氧化物应用研究的热点<sup>[2]</sup>,在传感器<sup>[3]</sup>、场效应管<sup>[4]</sup>、纳米发电机<sup>[5]</sup>、太阳能电池<sup>[6]</sup>等领域获得了广泛的应用。同时,ZnO 具有良好的气敏特性,已经被用于乙醇<sup>[7,8]</sup>、丙酮<sup>[7]</sup>、氢气<sup>[9]</sup>、一氧化碳<sup>[10]</sup>、二氧化氮<sup>[11]</sup>、二氧化碳与氧气<sup>[12]</sup>等多种气体的传感检测。ZnO 电阻率随检测气体浓度的改变发生变化,提高比表面积、增加灵敏材料与检测气体的接触是提高其检测灵敏度的重要方式<sup>[13]</sup>。由丽梅<sup>[7]</sup>等采用溶剂热法合成了纺锤状氧化锌,其在 220 °C 条件下对 50 μL/L 乙醇和丙酮气体的灵敏度分别为 28.5 和 36,响应时间大于 1 min;Jae-seok 等<sup>[8]</sup>利用 MOCVD 方法在柔性基底上沉积制得了 ZnO 纳米棒构成的气体传感器,在 300 °C 条件对浓度为  $10 \times 10^{-6}$  的乙醇气体的检测灵敏度为 10,响应时间大于 5 min。实现常温应用传感器的低成本和快速集成制造,已成为微纳传感器研究的重要发展方向<sup>[14,15]</sup>。

一维纳米材料在提高比表面积、增加敏感材料有效接触、增强稳定性、改善传感检测性能等方面都有很好的促进作用,引入一维 ZnO 纳米材料是开发高灵敏 ZnO 传感器微纳系统的有效方法<sup>[16]</sup>。静电纺丝装置操作简单,利用静电场力拉伸黏性溶液变形可产生射流实现纳米纤维的快速喷射<sup>[17]</sup>。静电纺丝属于纯物理法自上而下的微

纳喷印制造技术,可在目标基底上直接集成,满足了微纳系统快速集成制造的发展需求<sup>[18]</sup>。静电纺丝纳米纤维易于进行形貌控制和材料改性,且直径小、比表面积大、孔隙率高、吸附性好,在高灵敏气体、化学、湿度、光学等多个传感检测领域表现出了巨大的应用潜力<sup>[19-21]</sup>。相比于沉淀法<sup>[22]</sup>、水热法<sup>[12]</sup>、溶胶-凝胶法<sup>[23]</sup>等 ZnO 微纳结构制造方法,静电纺丝技术在简化工艺、降低成本、防止纳米颗粒团聚、提高稳定性、延长使用寿命、减小传感材料尺度、提高传感灵敏性等方面都有着很好的促进作用,有利于推进高灵敏微纳传感系统快速、低成本制造技术的快速发展。

本文以 PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> 和 PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 复合静电纺丝纳米纤维为前驱体,经加热氧化去除复合纤维中的聚合物,使 Zn(Ac)<sub>2</sub> 受热分解并氧化获取 ZnO 纳米纤维;利用 XRD 检测分析了所制得 ZnO 纳米纤维的物质成分;并搭建气敏检测系统,最后实验测试了 ZnO 纳米纤维气敏传感器对乙醇和丙酮两种气体的传感检测特性。

## 2 实验设计

### 2.1 电纺溶液的配制

分别采用醋酸锌(Zn(Ac)<sub>2</sub>)与聚乙烯吡咯烷酮(Polyvinyl Pyrrolidone (PVP),  $M_w = 1\,300\,000$ )、聚氧化乙烯(Polyethylene Oxide, PEO),  $M_w = 300\,000$ )的混合溶液作为静电纺丝实验原料,溶剂为去离子水与乙醇的混合液,两者体积比为 1:1。

首先,分别将 0.71 g 的 PVP、PEO 粉末溶解于 5 ml 的去离子水与乙醇的混合液中,获得聚合物溶液。其次,向两种聚合物溶液各加入 0.71 g 的 Zn(Ac)<sub>2</sub> 粉末获得混合溶液。利用磁力搅拌

器对混合溶液进行搅拌以促进溶质均匀溶解,获得 PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub>、PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 两种均匀、黏稠的前驱体混合溶液。混合溶液在室温下静置 5 h 备用。

## 2.2 前驱体纳米纤维电纺制造

静电纺丝装置如图 1 所示,由纺丝液供给系统、喷头、高压直流电源和收集板等构成。

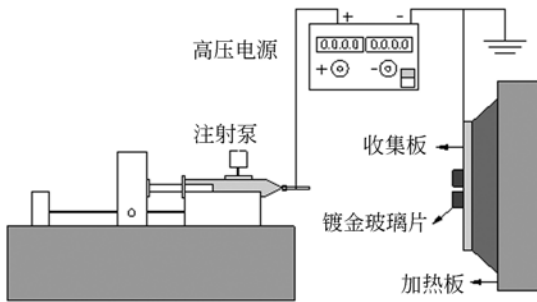


图 1 静电纺丝装置原理图

Fig. 1 Schematic of electrospinning setup

收集板放置于加热板表面,可调节收集板表面的温度,对前驱体电纺纳米纤维加热处理来获得金属氧化物纳米纤维。使用内径为 0.21 mm 的不锈钢空心喷头作为纺丝喷嘴。高压直流电源(DW-SA403-1ACE5,东文高压电源(天津)有限公司)正、负极分别与喷嘴和收集板相连。方形玻璃片(10 mm×10 mm×1 mm)作为静电纺丝纳米纤维收集板,玻璃片表面溅射有平行金电极(金属层厚 100 nm),如图 2 所示。收集板上两平行金属电极的间距为 1 mm,分别焊有引出导线以方便 ZnO 纳米纤维电阻的测试。收集板距纺丝喷嘴 15 cm。

静电纺丝的喷射过程是由纺丝液供给系统(Harvard 11Pico Plus 精密注射泵,美国)将前驱体混合溶液输送至喷嘴处,溶液供给速度为 50  $\mu$ l/h(静电纺丝喷射实验前,供液装置先进行 20 min 的供液以保证喷嘴处溶液流速的均匀、稳定)。高压直流电源输出电压为 8 kV,喷嘴与收集板之间的高压静电场将拉伸悬挂于喷嘴处的溶液液滴。在静电场力的作用下,溶液被拉伸成泰勒锥,当静电场力克服溶液表面张力时从泰勒锥尖产生射流喷射;经溶剂挥发、射流拉伸固化,溶液射流最终形成前驱体纳米纤维沉积于带有平行电极的玻璃收集板上。电纺前驱体纳米纤维沉积于收集板,如图 2 所示。

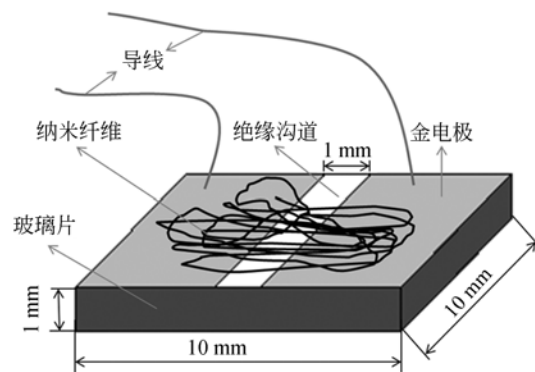


图 2 ZnO 纳米纤维气敏传感器原理图

Fig. 2 Schematic of ZnO nanofibrous gas sensor device

## 2.3 纳米纤维加热氧化

将收集有前驱体电纺纳米纤维的玻璃收集板放置在加热板上,在空气中高温加热氧化(温度 500  $^{\circ}$ C 条件下加热 1 h)。高温加热将诱使聚合物 PVP 和 PEO 产生分解被去除;另一方面,Zn(Ac)<sub>2</sub> 受热分解并与空气的氧气发生反应,被氧化成为具有传感特性的 ZnO。

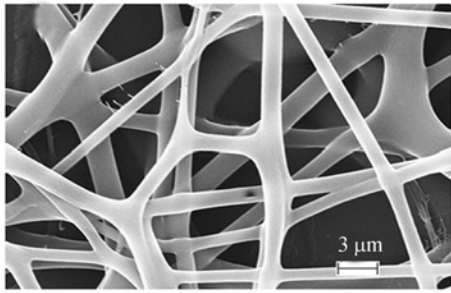
## 3 结果讨论

### 3.1 纤维形态分析

使用 SEM 对静电纺丝前驱体纳米纤维和金属氧化物纳米纤维进行观测分析。前驱体和金属氧化物纳米纤维表面形貌分别如图 3、4 所示。

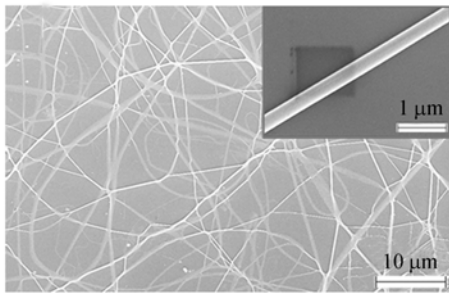
图 3(a)所示为 PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> 复合前驱体纳米纤维,纤维表面光滑均匀,平均直径为 427 nm。PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> 复合前驱体纳米纤维经加热分解氧化获得的 ZnO 纳米纤维,如图 3(b)所示。经过残余溶剂的挥发、物质分解、加热氧化后纳米纤维平均直径减小了 119 nm,仅为 308 nm。加热处理前后纤维直径收缩率为 27.9%。PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> 前驱体制得的 ZnO 纳米纤维表面光滑且较为均匀。

图 4 显示了 PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 复合前驱体纳米纤维。PEO 具有良好的延伸特性,有利于纺丝射流的拉伸和直径的减小。相同实验条件下,PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 复合纳米纤维平均直径较小,仅为 193 nm,如图 4(a)所示,加热处理后所制得的金属氧化物纳米纤维平均直径为 184 nm,直径收缩率为 4.7%,远小于 PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> 复合前驱体纳米纤维经高温处理后的直径收缩率。PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 复



(a) PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> 前驱体纳米纤维的 SEM 图

(a) SEM picture of PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> precursor nanofiber



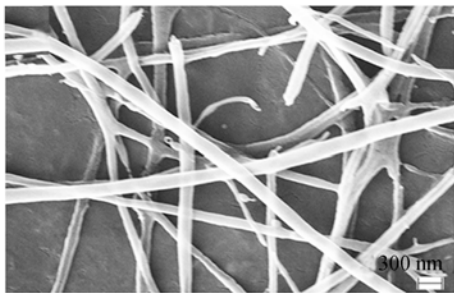
(b) PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> 为前驱体纳米纤维制得的 ZnO 纳米纤维

(b) ZnO nanofiber from PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> precursor nanofiber

图 3 PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> 前驱体纳米纤维及所制得的 ZnO 纳米纤维

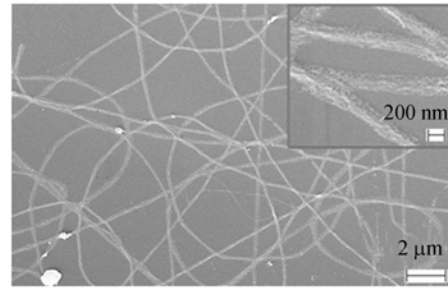
Fig. 3 PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> precursor nanofiber and the ZnO nanofiber

合纳米纤维加热处理所获得的金属氧化物纳米纤维表面粗糙布满微孔,如图 4(b)所示。这主要是由于 PEO 的熔点 (~65 °C) 低于 PVP 的熔点 (110~180 °C),加热处理过程中 PEO 更易于分解气化,从复合纤维内部逸出而在纤维表面形成粗糙的多孔结构,并且纤维得不到充分收缩。因此,由 PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 前驱纤维加热处理后直径收缩率较小,所制得的 ZnO 纳米纤维表面粗糙且具有微孔结构,有利于气敏传感器灵敏性的提高。



(a) PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 前驱体纳米纤维的 SEM 图

(a) SEM picture of PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> precursor nanofiber



(b) PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 为前驱体纳米纤维制得的 ZnO 纳米纤维

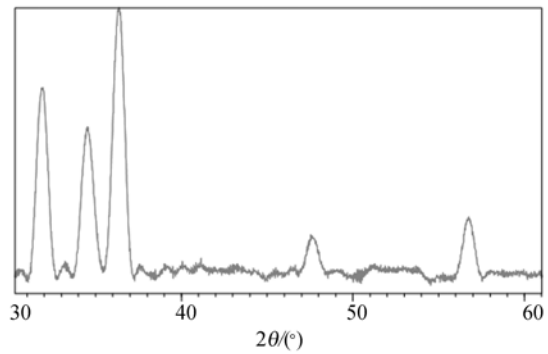
(b) ZnO nanofiber from PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> precursor nanofiber

图 4 PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 前驱体纳米纤维及所制得的 ZnO 纳米纤维

Fig. 4 PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> precursor nanofiber and the ZnO nanofiber

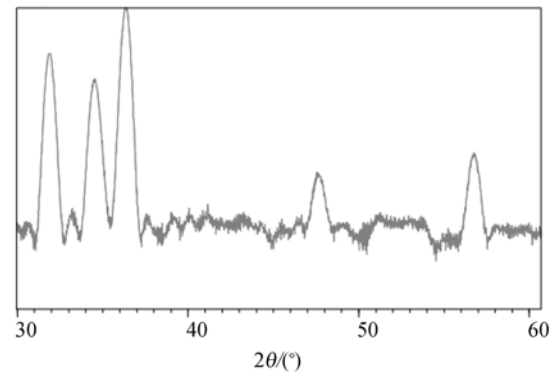
### 3.2 ZnO 纳米纤维 XRD 检测

为验证加热处理后纳米纤维的成分,对其进行了 XRD 检测分析。由 PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub>、PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 复合纳米纤维加热制得的 ZnO 纳米纤维 XRD 谱图如图 5 所示。



(a) PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> 为前驱体所制得的 ZnO 纳米纤维

(a) ZnO nanofiber from PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> precursor nanofiber



(b) PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 为前驱体制得的 ZnO 纳米纤维

(b) ZnO nanofiber from PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> precursor nanofiber

图 5 加热后 ZnO 纳米纤维的 XRD 谱图

Fig. 5 XRD diffraction patterns of heated ZnO nanofiber

ZnO 纳米纤维 XRD 谱图在  $2\theta=31.8, 34.5, 36.4, 47.5$  和  $56.6^\circ$  处具有尖锐的衍射峰。各衍射峰的位置与 JCPDS 标准卡 NO. 891397 的衍射峰值位置一致;且 XRD 谱图上没有其它明显杂峰。证明复合前驱体纳米纤维经  $500^\circ\text{C}$  加热处理,聚合物已经分解去除,  $\text{Zn}(\text{Ac})_2$  也被分解氧化成为高纯度的 ZnO 纳米纤维。

图 5(a)和图 5(b)谱峰图中的衍射峰位置一致,表明由 PVP/ $\text{Zn}(\text{Ac})_2$ 、PEO/ $\text{Zn}(\text{Ac})_2$  两种前驱体纳米纤维加热氧化所制得的 ZnO 纳米纤维的物质组成相同。

### 3.3 ZnO 纳米纤维的气敏性测试

前驱体纤维沉积、加热处理后可制得如图 2 所示的 ZnO 纳米纤维气敏传感器。搭建了如图 6 所示的气敏特性检测装置,对所制得的 ZnO 纳米纤维气敏传感器进行检测,并分析其响应特性。

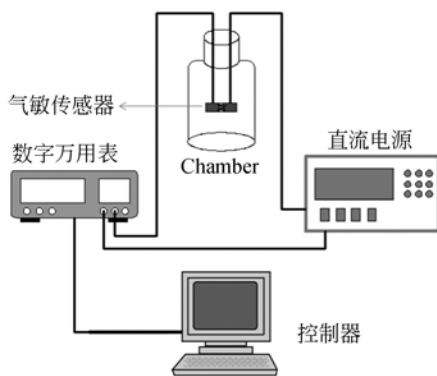


图 6 ZnO 纳米纤维气敏传感器测试系统示意图

Fig. 6 Schematic of ZnO nanofibrous gas sensor testing system

气敏特性检测装置包括控制器、直流电源、数字万用表和密封玻璃气室等。选取了乙醇、丙酮气体作为目标检测气体。直流电源 (Agilent 33522A, 美国)输出端与图 2 所示气敏传感器的引出导线相连接,并提供  $20\text{ V}$  的直流电压。数字万用表 (DF1731SL3A, 宁波中策电子有限公司) 串联于直流电源和气敏传感器组成的检测回路中,用于记录流经传感器的电流,监测传感器中 ZnO 纳米纤维导电率的变化。

检测过程中,将 ZnO 纳米纤维气敏传感器置于密封玻璃气室中,注入浓度为  $50\sim 150\times 10^{-6}$  的目标检测气体。随着敏感材料与目标检测气体的结合反应,ZnO 纳米纤维的电阻将随之减小,通过半导体传感器的电流也将随之增加。所有气

体传感检测实验均在室温、常压条件进行。

为方便分析,记直流电源所提供的电压为  $U$ ,流经 ZnO 气敏传感器的电流记为  $I$ ,可得气敏传感器电阻  $R=U/I$ 。为更好地分析气敏传感器对目标气体传感的灵敏性,克服传感器个体及不同敏感材料间的差距的影响,采用灵敏值来分析气敏传感器的传感响应特性。ZnO 纳米纤维气敏传感器灵敏值记为  $R_a/R_g$ <sup>[7, 8]</sup>。其中,  $R_a$  为 ZnO 纳米纤维气敏传感器在空气中所检测的电阻值;  $R_g$  为 ZnO 纳米纤维气敏传感器在目标气体中所检测的电阻值。

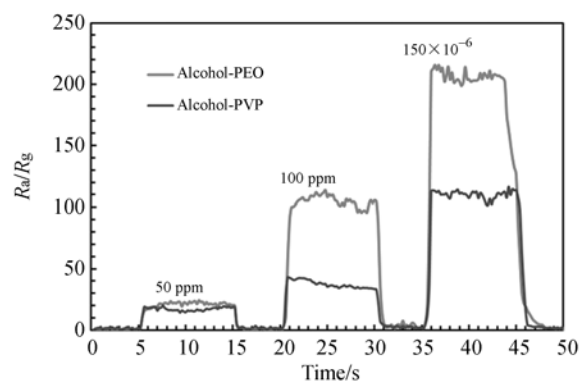


图 7 乙醇气体传感响应曲线

Fig. 7 Sensing response curves for alcohol gas

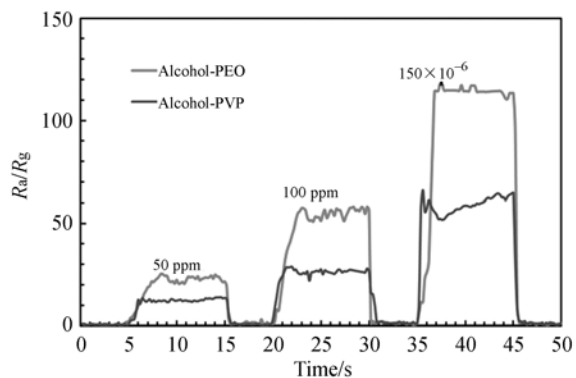


图 8 丙酮气体传感响应曲线

Fig. 8 Sensing response curves for acetone gas

得到如图 7、图 8 所示的 ZnO 纳米纤维气敏传感器时间响应曲线。由时间响应曲线可知 PEO/ $\text{Zn}(\text{Ac})_2$ 、PVP/ $\text{Zn}(\text{Ac})_2$  前驱体纳米纤维所制得的 ZnO 纳米纤维气敏传感器对丙酮和乙醇气体的响应速度相当,传感响应时间小于  $1\text{ s}$ ; 并且传感灵敏值也都将随着气体浓度的增大而升高。PEO/ $\text{Zn}(\text{Ac})_2$ 、PVP/ $\text{Zn}(\text{Ac})_2$  前驱体纳米纤维制得的 ZnO 纳米纤维气敏传感器对乙醇气

体的最高灵敏值分别为 215.69 和 113.04;对丙酮气体的最高灵敏值分别为 118.13 和 52.25。

由图 3、图 4 的 SEM 图可知,由 PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 前驱体纳米纤维制得到的 ZnO 纳米纤维表面粗糙,且具有微孔结构,提高了纳米纤维的比表面积,增加目标气体与灵敏材料的接触,提高了传感器的检测灵敏性。

#### 4 结 论

采用静电纺丝 PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> 和 PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 纳米纤维作为前驱体,制得了高纯度 ZnO 半导体传感纳米纤维,检测了其对于丙酮、乙醇两种气体的传感响应特性。PVP/Zn(Ac)<sub>2</sub> 为前驱体

所制得的 ZnO 纳米纤维平均直径为 308 nm;PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 为前驱体所制得的 ZnO 纳米纤维平均直径为 184 nm。

在室温、常压条件下测得 ZnO 纳米纤维气敏传感器对丙酮和乙醇气体的传感响应时间小于 1 s,传感灵敏值也都将随着目标气体浓度的增大而升高。以 PEO/Zn(Ac)<sub>2</sub> 为前驱体制得到的 ZnO 纳米纤维表面粗糙,气敏传感灵敏值较高;对于乙醇、丙酮两种目标气体的最高传感灵敏值分别为 215.69 和 118.13。本文工作为半导体微纳传感器的快速、低成本集成制造应用提供了一种新的方法。

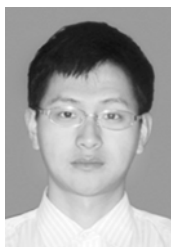
致谢:感谢厦门大学分析测试中心在纳米纤维 SEM、XRD 的检测分析上的帮助,谨以致谢。

#### 参考文献:

- [1] ARAFAT M M, DINAN B, AKBAR S A, *et al.*. Gas sensors based on one dimensional nanostructured metal-oxides: a review [J]. *Sensors*, 2012, 12(6): 7207-7258.
- [2] KIM M G, KANATZIDIS M G, FACCHETTI A, *et al.*. Low-temperature fabrication of high-performance metal oxide thin-film electronics via combustion processing [J]. *Nat. Mater.*, 2011, 10(5): 382-388.
- [3] JAGTAP S, PRIOLKAR K R. Evaluation of ZnO nanoparticles and study of ZnO-TiO<sub>2</sub> composites for lead free humidity sensors [J]. *Sensor Actuat B-Chem*, 2013, 183: 411-418.
- [4] NASR B, WANG D, KRUK R, *et al.*. High-Speed, low-voltage, and environmentally stable operation of electrochemically gated zinc oxide nanowire field-effect transistors [J]. *Adv Funct Mater*, 2013, 23(14): 1750-1758.
- [5] XUE X, NIE Y, HE B, *et al.*. Surface free-carrier screening effect on the output of a ZnO nanowire nanogenerator and its potential as a self-powered active gas sensor [J]. *Nanotechnology*, 2013, 24(22): 225501.
- [6] KO S H, LEE D, KANG H W, *et al.*. Nanoforest of hydrothermally grown hierarchical ZnO nanowires for a high efficiency dye-sensitized solar cell [J]. *Nano Lett.*, 2011, 11(2): 666-671.
- [7] 由丽梅, 霍丽华, 程晓丽, 等. 纺锤状氧化锌的制备及气敏性能研究[J]. *化学传感器*, 2013, 33(1): 60-63.
- [8] YOU L M, HUO L H, CHENG X L, *et al.*. Study on preparation and gas-sensing properties of spindle shaped ZnO powders [J]. *Chem. Sen.*, 2013, 33(1):60-63. (in Chinese)
- [9] YI J, LEE J M, PARK W I. Vertically aligned ZnO nanorods and graphene hybrid architectures for high-sensitive flexible gas sensors [J]. *Sensor Actuat. B-Chem.*, 2011, 155(1): 264-269.
- [10] LIM Y T, SON J Y, RHEE J S. Vertical ZnO nanorod array as an effective hydrogen gas sensor [J]. *Ceram. Int.*, 2013, 39(1): 887-890.
- [11] RAI P, SONG H M, KIM Y S, *et al.*. Microwave assisted hydrothermal synthesis of single crystalline ZnO nanorods for gas sensor application [J]. *Mater. Lett.*, 2012, 68: 90-93.
- [12] BAI S, LIU X, LI D, *et al.*. Synthesis of ZnO nanorods and its application in NO<sub>2</sub> sensors [J]. *Sensor Actuat. B-Chem.*, 2011, 153(1): 110-116.
- [13] HASSAN H S, KASHYOUT A, SOLIMAN H, *et al.*. Effect of reaction time and Sb doping ratios on the architecturing of ZnO nanomaterials for gas sensor applications [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2013, 277(15): 73-82.
- [14] PATI S, MAITY A, BANERJI P, *et al.*. Temperature dependent donor-acceptor transition of ZnO thin film gas sensor during butane detection [J]. *Sensor Actuat. B-Chem.*, 2013, 183: 172-178.

- [14] 陈涛,李正炜,王建立,等. 应用压缩传感理论的单像素相机成像系统[J]. 光学精密工程,2012,20(11): 2523-2530.  
CHEN T, LI ZH W, WANG J L, *et al.*. Imaging system of single pixel camera based on compressed sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2523-2530. (in Chinese)
- [15] 俞文凯,姚旭日,刘雪峰,等. 压缩传感用于极弱光计数成像[J]. 光学精密工程,2012,20(10): 2283-2292.  
YU W K, YAO X R, LIU X F, *et al.*. Compressed sensing for ultra-weak light counting imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2283-2292. (in Chinese)
- [16] KATOCH A, SUN G J, CHOI S W, *et al.*. Competitive influence of grain size and crystallinity on gas sensing performances of ZnO nanofiber [J]. *Sensor Actuat. B-Chem.*, 2013, 185(8): 411-416.
- [17] ZHENG Y, XIE S, ZENG Y. Electric field distribution and jet motion in electrospinning process: from needle to hole [J]. *J. Mater. Sci.*, 2013, 48(19): 6647-6655.
- [18] 李文望,郑高峰,王翔,等. 电纺直写纳米纤维在图案化基底的定位沉积[J]. 光学精密工程,2010,18(10): 2231-2238.  
LI W W, ZHENG G F, WANG X, *et al.*. Position deposition of electrospinning direct-writing nanofiber on pattern substrate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2231-2238. (in Chinese)
- [19] HAN L, ANDRADY A A, ENSOR D S. Chemical sensing using electrospun polymer/carbon nanotube composite nanofiber with printed-on electrodes [J]. *Sensor Actuat. B-Chem.*, 2013, 168(1): 52-55.
- [20] 赵思铭,雒莘梓,李乐,等. 电纺氧化硅凝胶亚微米光波导[J]. 光学精密工程,2012,20(6): 1282-1287.  
ZHAO E M, LUO X Z, LI L, *et al.*. Electrospun silicon gel submicrometer optical waveguides [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1282-1287. (in Chinese)
- [21] ZAMPETTI E, MACAGNANO A, BEARZOTTI A. Gas sensor based on photoconductive electrospun titania nanofibres operating at room temperature [J]. *J. Nanopart. Res.*, 2013, 15(4): 1-8.
- [22] 徐韵,李云鹏,金璐,等. 脉冲激光沉积法制备的ZnO薄膜的低阈值电抽运紫外随机激射[J]. 物理学报,2013,62(8): 084207.  
XU Y, LI Y P, JIN L, *et al.*. Low-threshold electrically pumped ultraviolet random lasing from ZnO film prepared by pulsed laser deposition [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2013, 62(8): 084207. (in Chinese)
- [23] HSU H C, HUANG H Y, ERIKSSON M O, *et al.*. Surface related and intrinsic exciton recombination dynamics in ZnO nanoparticles synthesized by a sol-gel method [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(1): 013109.

## 作者简介:



郑高峰(1984—),男,福建泉州人,博士,助理教授,2006年于武汉科技大学获学士学位;2011年于厦门大学获博士学位。主要从事静电纺丝技术和有机微纳米系统制造领域的研究。E-mail: zheng\_gf@xmu.edu.cn



何广奇(1990—),男,湖北鄂州人,硕士研究生,2011年于武汉轻工大学获得学士学位,主要从事电纺直写纤维可控沉积方面的研究。E-mail: heguangqi45@sina.com