

Yb-In₂O₃ 纳米管的制备及其对甲醛的优异气敏性能

王雪松 王国光 李海英 王连元 刘丽 郭雪馨 王晗 廉红伟

Fabrication and excellent formaldehyde Gas sensing properties of Yb-doped In₂O₃ nanotubes

Wang Xue-Song Wang Guo-Guang Li Hai-Ying Wang Lian-Yuan Liu Li Guo Xue-Xin Wang Han Lian Hong-Wei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 036802 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.036802

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.036802>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高能电子辐照绝缘厚样品的表面电位动态特性

Surface potential dynamic characteristics of the insulating sample under high-energy electron irradiation

物理学报.2015, 64(8): 086801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.086801>

多孔 ZnO 微米球的制备及其优异的丙酮敏感特性

Synthesis of porous micro-sphere ZnO and its excellent sensing properties to acetone

物理学报.2014, 63(17): 176803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.176803>

化学气相沉积法制备石墨烯的铜衬底预处理研究

The pre-treatment of copper for graphene synthesis

物理学报.2014, 63(17): 176801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.176801>

多台阶器件结构深层表面光刻工艺优化

The optimization of lithography process on the deep multi-stepped surface

物理学报.2012, 61(20): 206801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.206801>

Yb-In₂O₃ 纳米管的制备及其对甲醛的优异气敏性能*

王雪松 王国光 李海英 王连元 刘丽† 郭雪馨 王晗 廉红伟

(超硬材料国家重点实验室, 吉林大学物理学院, 长春 130012)

(2015年7月4日收到; 2015年10月22日收到修改稿)

采用单管静电纺丝的方法成功制备了纯的与 Yb 掺杂的 In₂O₃ 纳米管 (Yb-In₂O₃). 利用扫描电子显微镜和 X 射线衍射对样品的结构和形貌进行了表征, 制作了基于纯 In₂O₃ 和 Yb-In₂O₃ 纳米管的气敏元件. 研究表明, Yb-In₂O₃ 纳米管气敏元件在 230 °C 下对 100 ppm 甲醛的灵敏度为 69.8, 是纯 In₂O₃ 纳米管气敏元件对同浓度甲醛灵敏度 (18.4) 的 3.8 倍, 其对 100 ppm 甲醛的响应恢复时间分别为 4 s 和 84 s. 并且, 基于 Yb-In₂O₃ 纳米管的气敏元件对 100 ppb 甲醛的灵敏度达到 2.5. 此外, 该气敏元件还具有出色的选择性及稳定性, 具备良好的实际应用前景.

关键词: Yb-In₂O₃ 纳米管, 甲醛, 气敏元件

PACS: 68.37.Hk, 82.47.Rs, 81.16.Pr, 81.16.-c

DOI: 10.7498/aps.65.036802

1 引言

甲醛是最主要的室内污染物之一, 室内装饰材料、家具以及一些化工产品均可在室温下释放出甲醛^[1]. 已有研究证明甲醛是一种致癌物, 长期接触或吸入少量甲醛都会严重危害人类健康^[2], 因此对于低浓度甲醛的检测显得尤为重要. 在众多检测方法中, 包括比色法、色谱法和气体传感器检测等^[3], 金属氧化物半导体气体传感器应用最为广泛^[4], 但其仍存在着灵敏度低、选择性差等缺点. 研究者们尝试各种方法来提升金属氧化物传感器的气敏性能, 例如使金属氧化物低维化、多孔化以及掺杂等方法, 而向金属氧化物半导体材料中掺入少量杂质是最有效的方法之一. 最近, Li 等^[5]证明 Pr 掺杂的 SnO₂ 纳米纤维对乙醇具有很高的灵敏度. Xu 等^[6]称 ZnO 纳米线在掺入 La 之后对丙酮的灵

敏度大幅提升.

In₂O₃ 是一类 III-V 族半导体氧化物, 由于其无毒、价格低廉, 同时具有良好的化学稳定性并可作为掺杂的优良载体而备受关注^[7]. 一维结构的 In₂O₃ 已广泛应用于传感器领域, 例如纳米线^[8]、纳米带^[9]、纳米棒^[10]和纳米管^[11]等. 而纳米管结构因其具有大比表面积, 可增加气体吸附、释放的有效面积, 从而表现出优良的气敏性能. 然而, 纯的 In₂O₃ 纳米管气敏性较差, 研究者们通过掺入其他元素来提高其气敏性能^[12], Yb 掺入 In₂O₃ 纳米管的气敏性方面少有研究, 而对甲醛的气敏性能的研究至今未见报道. 本文利用单管静电纺丝技术成功制备了纯的 In₂O₃ 和 Yb-In₂O₃ 纳米管, 并制作了基于它们的气敏元件, 对其气敏特性进行了研究. 结果表明, 通过掺入少量稀土元素 Yb 后, In₂O₃ 纳米管对甲醛的灵敏度显著提升, 同时兼具出色的选择性、稳定性及重复性, 具备良好的实际应用前景.

* 吉林省科技厅重点科技攻关项目 (批准号: 20140204027GX) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liul99@jlu.edu.cn

2 实验

2.1 Yb-In₂O₃ 纳米管的制备

采用静电纺丝法制备 In₂O₃ 纳米管. In(NO₃)₃, Yb(NO₃)₃·5H₂O, PVP (Polyvinyl pyrrolidone), DMF (N, N-Dimethylformamide) 以及无水乙醇均为分析纯. 实验过程: 0.4 g In(NO₃)₃, 2.4 g 乙醇, 2.2 g DMF 与适量 Yb(NO₃)₃·5H₂O 混合搅拌均匀, 加入 0.6 g PVP, 继续搅拌 12 h. 将得到的均匀混合物放入不锈钢针管中, 加电压 13 kV, 针管与接收屏的距离为 25 cm. 将静电纺丝得到的无纺纤维放入马弗炉中在 600 °C 下煅烧 4 h, 最后制得 Yb-In₂O₃ 纳米管.

2.2 样品表征与气敏元件制作

采用 JSM-6700F 扫描电子显微镜 (SEM) 对形貌进行分析; 采用 D/max-Ra X 射线衍射仪 (XRD) 对晶体进行表征, 表征条件为 Cu K_α, λ = 1.5418 nm. 将 Yb-In₂O₃ 纳米管与去离子水以 100 : 20 的质量比混合并搅拌均匀, 将其均匀涂于带有一对电极的陶瓷管表面, 待其干燥后, 将一个弹簧状镍铬合金丝插入陶瓷管中以提供加热温度, 将其焊接在底座上并在其上添加金属保护罩. 在加热温度为 200 °C 下于老化台上老化 5d^[9]. 定义灵敏度 $S = R_a/R_g$, 其中 R_a 和 R_g 分别表示元件在空气中和被测气体中的电阻值. 定义响应时间 t_1 为元件接触被测气体后电阻由 R_a 变化到 $R_a - 90\%(R_a - R_g)$ 所需时间; 恢复时间 t_2 为元件脱离被测气体后, 电阻由 R_g 恢复到 $R_g + 90\%(R_a - R_g)$ 所用时间.

3 结果与讨论

3.1 纳米材料结构与形态分析

图 1 所示为 In₂O₃ 与 Yb-In₂O₃ 纳米管的扫描电子显微镜图. 由图 1 可知, 这些随机排列的纳米管长而连续, 分布较均匀, In₂O₃ 纳米管的平均直径约为 200 nm.

图 2 所示为 In₂O₃ 与 Yb-In₂O₃ 纳米管的 XRD 图谱. 图中的主峰参数与 JCPDS 卡片 No.71-2195 符合, 表明所得 In₂O₃ 纳米管为立方晶, 其晶格参数为 $a = 10.1174 \text{ \AA}$. 由图 2 可知, 所有的样品均结

晶度良好且无杂峰存在, 说明此纳米材料的纯度很高. 由 Scherrer 公式

$$D = K\lambda/\beta \cos(\theta), \quad (1)$$

其中 K 为 Scherrer 常数 (0.89), β 为衍射峰的半高宽度, D 为晶粒垂直于晶面方向的平均厚度, λ 为 X 射线波长 (0.15406 nm). 经过计算 (211), (222), (400) 三个峰所得到的平均值可知, In₂O₃ 与 Yb-In₂O₃ 纳米管平均的晶粒大小分别为 12.9 nm 和 15.2 nm. 值得一提的是, 当 In₂O₃ 晶格中原有的 In 离子被掺入的较大半径的离子替换时, 晶格尺寸也会随之变大. 尽管 Yb 原子具有 6 层电子, 比 In 原子的 5 层电子多了一层, 但是 Yb 离子半径 (0.87 Å) 却与 In 离子半径 (0.80 Å) 几乎相同, 这一现象被称为“镧系收缩”, 是指镧系元素随着原子序数的增加, 其对应离子半径反而逐渐减小. 因此, 正如通过 XRD 图像观察到的那样, 在掺入 Yb 后 In₂O₃ 纳米管的晶格尺寸改变很小.

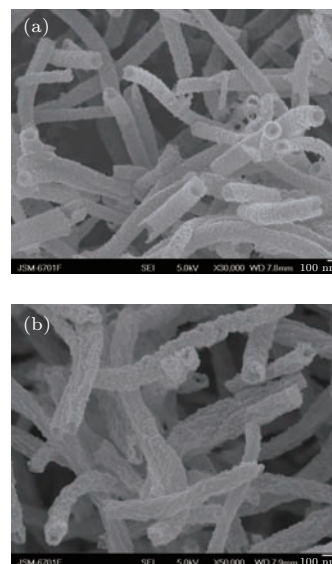


图 1 (a) In₂O₃ 和 (b) Yb-In₂O₃ 纳米管 SEM 图片
Fig. 1. SEM images of (a) pure and (b) Yb-doped In₂O₃ nanotubes.

表 1 Yb-In₂O₃ 与其他气敏材料对甲醛灵敏度的比较

Table 1. Comparison between sensors based on Yb-doped In₂O₃ nanotubes and other semiconducting materials.

气敏元件材料	灵敏度定义形式	最佳工作温度/°C	甲醛气体浓度/ppm	灵敏度值	文献
Yb-In ₂ O ₃	R_a/R_g	230	100	69.8	—
NiO	R_a/R_g	300	100	11	[13]
Fe ₂ O ₃ -In ₂ O ₃	R_a/R_g	250	100	33	[14]
SnO ₂ /Graphene	R_a/R_g	260	100	35	[15]

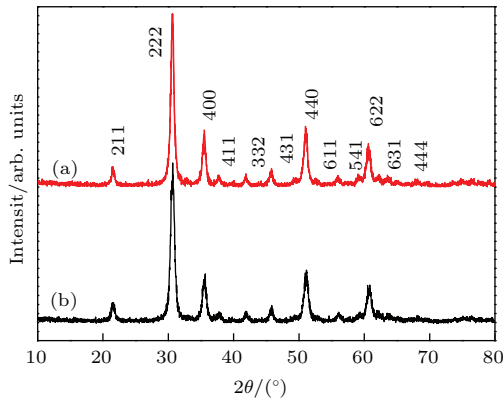


图2 (网刊彩色) (a) In_2O_3 和 (b) $\text{Yb-In}_2\text{O}_3$ 纳米管 XRD 图谱

Fig. 2. (color online) XRD patterns of (a) In_2O_3 and (b) Yb-doped In_2O_3 nanotubes.

3.2 $\text{Yb-In}_2\text{O}_3$ 纳米管的气敏性能研究

众所周知, 气敏传感器的灵敏度与工作温度关系密切. 因此, 我们对气敏元件在不同工作温度下的灵敏度进行了测试以找出最佳的工作温度. 图3所示为不同温度下 0 wt%, 4 wt%, 6 wt%, 8 wt% Yb 掺杂的 In_2O_3 纳米管对 100 ppm 甲醛的灵敏度. 从图3可知, 所有样品的灵敏度都随着温度的升高而增大, 当温度升高至 230 °C 时灵敏度达到峰值, 随着温度继续上升元件灵敏度急剧下降. 在最佳工作温度 230 °C 下, 6 wt% $\text{Yb-In}_2\text{O}_3$ 气敏元件对 100 ppm 甲醛的灵敏度最高, 其值为 69.8, 是纯的 In_2O_3 对 100 ppm 甲醛的灵敏度 (18.4) 的 3.8 倍. 本实验的物性测试和表征以及气敏性能测试中的气敏元件 Yb 掺杂量均为 6 wt%. 由表 1 中 $\text{Yb-In}_2\text{O}_3$ 与其他一些气敏材料对甲醛灵敏度的比较可以看出, $\text{Yb-In}_2\text{O}_3$ 对甲醛具有良好的气敏性.

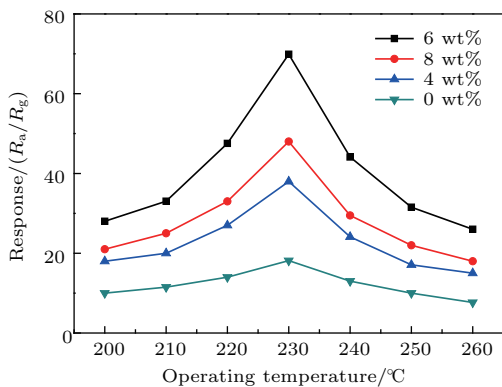


图3 (网刊彩色) In_2O_3 与 $\text{Yb-In}_2\text{O}_3$ 纳米管气敏元件对 100 ppm 甲醛的灵敏度与工作温度的关系

Fig. 3. (color online) Sensitivities of In_2O_3 and Yb-doped In_2O_3 nanotube gas sensors to 100 ppm formaldehyde at different operating temperatures.

图4所示为 $\text{Yb-In}_2\text{O}_3$ 纳米管在 230 °C 时对不同浓度甲醛的灵敏度, 可明显看到即使在较低的浓度, $\text{Yb-In}_2\text{O}_3$ 纳米管气敏元件依然具有良好的灵敏度, 在甲醛浓度为 100 ppb 时其灵敏度为 2.5, 这表明 $\text{Yb-In}_2\text{O}_3$ 纳米管是可以作为制备检测低浓度甲醛传感器的优良的纳米材料.

在实际应用中, 气敏传感器的响应-恢复速度同样非常重要. 图5所示为在 230 °C 时 $\text{Yb-In}_2\text{O}_3$ 纳米管气敏元件对 100 ppm 甲醛的响应-恢复曲线, 其响应-恢复时间分别是 4 s 和 84 s.

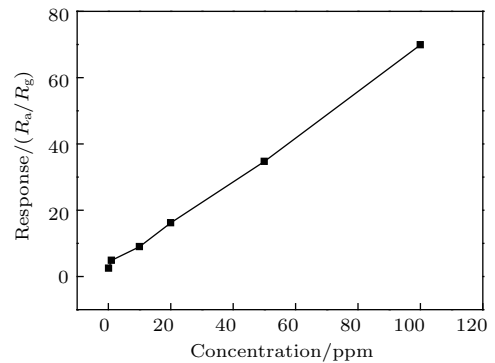


图4 $\text{Yb-In}_2\text{O}_3$ 纳米管气敏元件在 230 °C 下灵敏度与甲醛浓度 (0.1—100 ppm) 的关系

Fig. 4. Yb-doped In_2O_3 nanotube gas sensor response curve to different formaldehyde concentrations (0.1—100 ppm) at 230 °C.

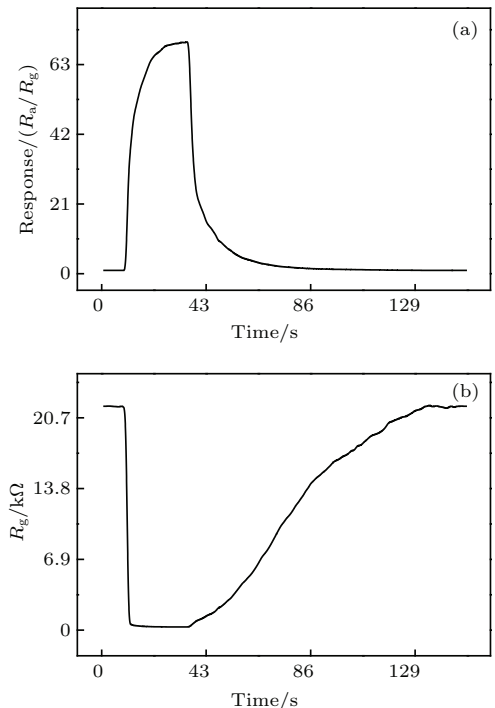


图5 $\text{Yb-In}_2\text{O}_3$ 纳米管气敏元件在 230 °C 下对 100 ppm 甲醛的响应恢复特性曲线及电阻变化曲线

Fig. 5. Response and recovery characteristic and resistance curves of Yb-doped In_2O_3 nanotube gas sensor to 100 ppm formaldehyde at 230 °C.

图6所示为In₂O₃与Yb-In₂O₃纳米管在230 °C时分别对100 ppm的甲醛、丙酮、甲苯、氢气、丁烷、一氧化碳和氨气等几种常见干扰气体以及家庭常用的天然气的灵敏度. 从图6可见Yb-In₂O₃纳米管气敏元件对除甲醛以外其他气体基本不敏感, 这表明此种纳米材料对甲醛具有极佳的选择性, 具有良好的应用前景.

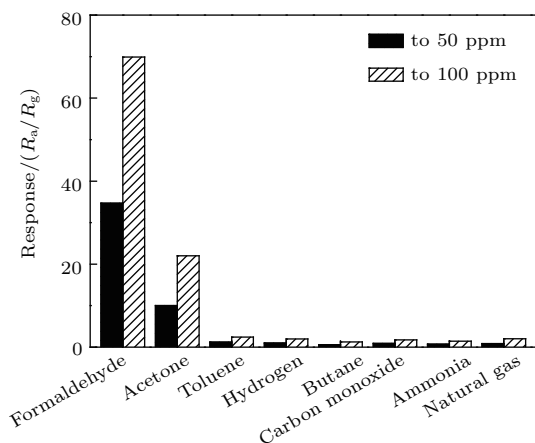


图6 Yb-In₂O₃纳米管传感器在230 °C下对100 ppm不同气体的灵敏度

Fig. 6. Sensitivities of Yb-doped In₂O₃ nanotube gas sensors to 100 ppm of different gases at 230 °C.

图7所示为Yb-In₂O₃纳米管气敏传感器对甲醛的稳定性. 从图7可以看到此气敏元件在测试过程中(50 d)对20 ppm, 50 ppm以及100 ppm甲醛的灵敏度值几乎不变, 表明Yb-In₂O₃气敏元件具有优异的稳定性及重复性, 具有良好的实际应用前景.

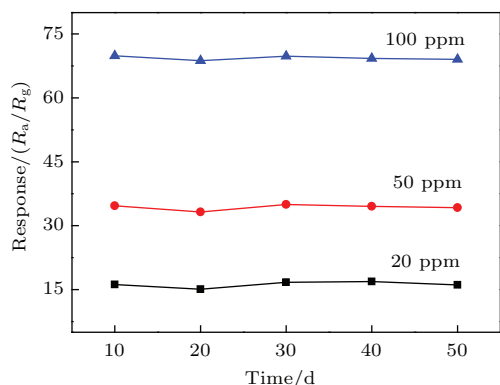


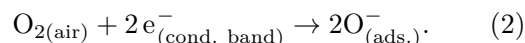
图7 Yb-In₂O₃纳米管传感器在230 °C下对甲醛的稳定性

Fig. 7. Long-term stability of Yb-In₂O₃ nanotube gas sensors to formaldehyde at 230 °C.

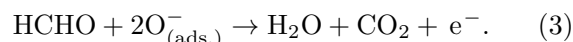
3.3 气敏机理探讨

对于甲醛的气敏原理, 最广为人知的原理是在

气敏材料表面发生的气体分子吸附-释放反应所导致的传感器在空气中与甲醛中的电阻值发生变化. 简而言之, 当气敏传感器暴露于空气中时, 氧气分子会在气敏材料表面发生化学吸附与其导带电子反应, 如下式所示:



而当气敏材料暴露于甲醛中时, 甲醛分子会与材料表面吸附的氧发生反应并释放出电子, 从而导致电阻的降低, 如下式所示:



Yb-In₂O₃纳米管的快速响应以及其较高的灵敏度应主要归因于其特殊的纳米管结构所具有的较大表面积-体积比, 相比于纳米颗粒、纳米纤维等形貌, 纳米管的中空结构提升了与气体的有效接触面积, 从而可以吸附更多的氧分子^[16]. 另外, 掺入Yb杂质对In₂O₃纳米管的气敏性能也具有相当大的影响. 众所周知, 半导体材料中异质结的形成会显著降低气敏元件的导电性, 从而提升传感器的灵敏度^[17]. In₂O₃为n型半导体氧化物, Adachi和Imanaka^[18]证明Yb的氧化物Yb₂O₃为p型半导体氧化物. 已有大量研究表明, 当具有不同费米能级的两种金属半导体氧化物相互接触时, 在二者交界面处便会形成异质结^[19,20]. 如图8所示, 电子由n型In₂O₃转移至p型Yb₂O₃中, 与此同时空穴由p型Yb₂O₃转移至n型In₂O₃中, 二者最终达到费米能级相等的状态, 同时在交界面处形成阻碍电子传输的耗尽层, 导致材料在空气中的电阻(*R_a*)增大. 当引入还原性气体甲醛后, Yb-In₂O₃纳米管表面吸附的氧会与甲醛发生反应并向材料中释放电子, 导致耗尽层收缩, 因此材料的导电性明显提升, 即在甲醛中的电阻值(*R_g*)降低. 因此, Yb-In₂O₃纳米管气敏元件的灵敏度(*R_a*/*R_g*)随之明显提高. 本实验中, 相同条件下空气中In₂O₃和Yb-In₂O₃纳米管的电阻(*R_a*)分别为1.66 kΩ和21.64 kΩ, 即Yb-In₂O₃的电阻是In₂O₃的13.04倍; 在100 ppm甲醛气体中, In₂O₃和Yb-In₂O₃纳米管的电阻(*R_g*)分别是0.09 kΩ和0.31 kΩ, 即Yb-In₂O₃的电阻是In₂O₃的3.44倍. 因此, 掺入Yb后In₂O₃纳米管的灵敏度(*R_a*/*R_g*)是纯In₂O₃纳米管的3.8倍. 这也验证了在Yb-In₂O₃纳米管中异质结的存在. 然而, 过量的Yb杂质会导致In₂O₃纳米管与气体的有效接触面积降低, 从而导致其气敏性的降低^[4]. 由本实验的气敏测试结果可见, 尽管掺入

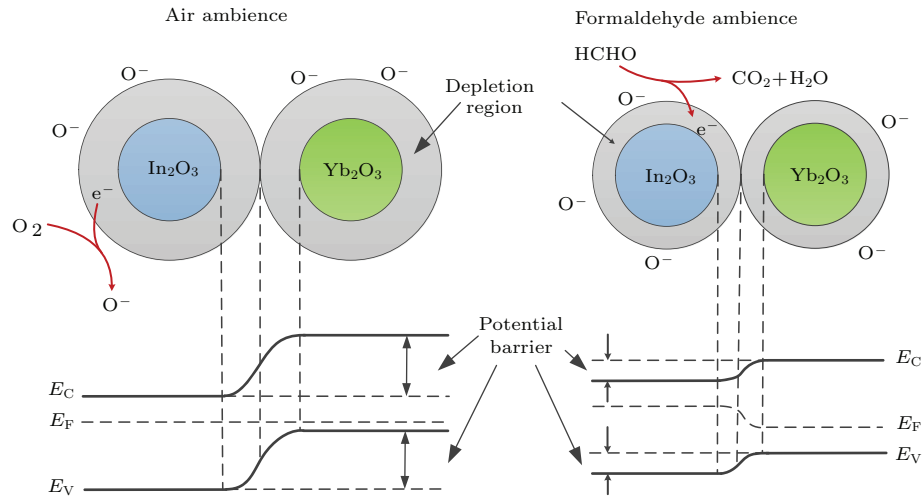


图8 Yb-In₂O₃ 的甲醛气敏性原理及异质结示意图 E_C , 导带底; E_V , 价带顶; E_F , 费米能级

Fig. 8. Schematic diagram of the formaldehyde sensitive mechanism of Yb-In₂O₃ and the heterojunction at the interface. E_C , conduction band edge energy; E_V , valence band edge energy; E_F , Fermi energy

少量Yb后In₂O₃的粒径略微增大,但其对甲醛的灵敏度仍有大幅提升,说明在Yb-In₂O₃纳米管中异质结对气敏性的提高起到主导作用.同样的实验现象在其他文献中得到了证实,Badadhe和Mula^[21]证明In掺杂ZnO在掺杂比例为3%时,尽管其粒径大于其他的掺杂比例,但是其对H₂S却具有最优异的气敏性能.

4 结 论

通过单管静电纺丝合成了纯的In₂O₃和Yb-In₂O₃纳米管,并对它们的气敏特性进行了研究.结果显示,Yb-In₂O₃纳米管气敏元件在230 °C时对100 ppm 甲醛的灵敏度为69.8,其灵敏度是In₂O₃纳米管气敏元件对同浓度甲醛灵敏度的3.8倍,其响应-恢复时间分别为4 s和84 s,该元件对100 ppb 甲醛的灵敏度是2.5.此外,Yb-In₂O₃纳米管气敏元件对甲醛具有良好的选择性以及稳定性.这说明Yb-In₂O₃纳米管在实际应用中可作为检测低浓度甲醛的优良气敏材料,具有广阔的发展前景.

参考文献

[1] Liu H X, Li Z L, Li S T, Han J C, Wu C K 1988 *Acta Phys. Sin.* **37** 470 (in Chinese) [刘厚祥,李昭临,李书涛,韩景诚,吴存恺 1988 物理学报 **37** 470]
 [2] Zhang L J, Hu H F, Wang Z Y, Wei Y, Jia J F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 527 (in Chinese) [张丽娟,胡慧芳,王志勇,魏燕,贾金凤 2010 物理学报 **59** 527]
 [3] Wang X, Li Y, Li X, Yu J, Al-Deyab S S, Ding B 2014 *Sensor. Actuat. B: Chem.* **203** 333

[4] Bo X Q, Liu C B, Li H Y, Liu L, Guo X, Liu Z, Liu L L, Su C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 176803 (in Chinese) [薄晓庆,刘唱白,李海英,刘丽,郭欣,刘震,刘丽丽,苏畅 2014 物理学报 **63** 176803]
 [5] Li W, Ma S, Yang G, Mao Y, Luo J, Cheng L, Gengzang D, Xu X, Yan S 2015 *Mater. Lett.* **138** 188
 [6] Xu X L, Chen Y, Ma S Y, Li W Q, Mao Y Z 2015 *Sensor. Actuat. B: Chem.* **213** 222
 [7] Wu H Z, Zhang Y Y, Wang X, Zhu X M, Yuan Z J, Xu T N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5022 (in Chinese) [吴惠祯,张莹莹,王雄,朱夏明,原子健,徐天宁 2010 物理学报 **59** 5022]
 [8] Liang X, Kim T H, Yoon J W, Kwak C H, Lee J H 2015 *Sensor. Actuat. B: Chem.* **209** 934
 [9] Kim H, An S, Jin C, Lee C 2012 *Curr. Appl. Phys.* **12** 1125
 [10] Xing R, Xu L, Song J, Zhou C, Li Q, Liu D, Song H W 2015 *Sci. Rep. UK* **5** 10717
 [11] Zhao C, Huang B, Xie E, Zhou J, Zhang Z 2015 *Sensor. Actuat. B: Chem.* **207** 313
 [12] Gao J, Wang L, Kan K, Xu S, Jing L, Liu S, Shen P, Li L, Shi K 2014 *J. Mater. Chem. A* **2** 949
 [13] Lai X, Shen G, Xue P, Yan B, Wang H, Li P, Xia W, Fang J 2015 *Nanoscale* **7** 400
 [14] Chi X, Liu C, Liu L, Li S, Li H, Zhang X, Bo X, Shan H 2014 *Mat. Sci. Semicon. Proc.* **18** 160
 [15] Cao Y, Li Y, Jia D, Xie J 2014 *RSC Adv.* **4** 46179
 [16] Liu C, Chi X, Liu X, Wang S 2014 *J. Alloy. Compd.* **616** 208
 [17] Miller D R, Akbar S A, Morris P A 2014 *Sensor. Actuat. B: Chem.* **204** 250
 [18] Adachi G, Imanaka N 1998 *Chem. Rev.* **98** 1479
 [19] Tang W, Wang J, Yao P, Li X 2014 *Sensor. Actuat. B: Chem.* **192** 543
 [20] Deng J, Yu B, Lou Z, Wang L, Wang R, Zhang T 2013 *Sensor. Actuat. B: Chem.* **184** 21
 [21] Badadhe S S, Mulla I S 2009 *Sensor. Actuat. B: Chem.* **143** 164

Fabrication and excellent formaldehyde Gas sensing properties of Yb-doped In_2O_3 nanotubes*

Wang Xue-Song Wang Guo-Guang Li Hai-Ying Wang Lian-Yuan Liu Li[†] Guo Xue-Xin
Wang Han Lian Hong-Wei

(State Key Laboratory of Superhard Materials, College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

(Received 4 July 2015; revised manuscript received 22 October 2015)

Abstract

Pure and Yb-doped In_2O_3 nanotubes have been successfully fabricated by using the single-capillary electrospinning method, followed by calcination. The morphological and structural characteristics of the as-synthesized nanotubes are investigated by scanning electron microscope (SEM) and X-ray powder diffraction (XRD). The SEM images reveal that all the pure and Yb-doped In_2O_3 nanotubes are distributed evenly, and the average diameter of the as-synthesized nanotubes is about 200 nm. The XRD analysis results show that the as-prepared samples are well-crystallized, and the diffraction peaks can be indexed according to cubic In_2O_3 . Gas sensors based on pure and Yb-doped In_2O_3 nanotubes have been fabricated and investigated for formaldehyde detection in detail. As shown in the experimental results, Yb-doped In_2O_3 nanotubes exhibit enhanced formaldehyde sensing properties compared with pure In_2O_3 nanotubes. At the optimum operating temperature of 230 °C, the response of the gas sensors based on pure In_2O_3 nanotubes to 100 ppm formaldehyde is 18.4, while the response of gas sensors based on Yb-doped In_2O_3 nanotubes is 69.8 in the same working condition, which is 3.8 times larger than that of pure In_2O_3 nanotubes. The improvement of Yb-doped In_2O_3 nanotubes gas-sensing property may be due to the formation of the heterojunction structure at the interface between the two different semiconducting oxides. The response and recovery times of Yb-doped In_2O_3 nanotubes to 100 ppm formaldehyde are about 4 s and 84 s respectively, indicating the fast response speed of Yb-doped In_2O_3 nanotubes. Moreover, even at 100 ppb of formaldehyde a detectable response can be observed and the value is 2.5. The low limit of formaldehyde detection shows that the as-synthesized Yb-doped In_2O_3 nanotube gas sensors can be used for the detection of dilute formaldehyde. Furthermore, the Yb-doped In_2O_3 nanotube gas sensors have excellent selectivity towards formaldehyde. In this experiment, acetone has the highest sensitivity in a variety of common interfering gases and the response value is 22 to 100 ppm at 230 °C, which is less than one-third of the sensitivity of formaldehyde. Carbon monoxide has the lowest response value of 1.7, which is much lower than that of formaldehyde. In addition, the responses of gas sensors to different concentrations of formaldehyde almost unchanged during the test (50 days), indicating that the Yb-doped In_2O_3 nanotubes possess good repeatability and long-term stability. The excellent formaldehyde gas-sensing properties of Yb-doped In_2O_3 nanotubes indicate that the as-synthesized nanomaterials can be used as a promising candidate to detect formaldehyde in practical applications.

Keywords: Yb-doped In_2O_3 nanotubes, formaldehyde, gas sensor

PACS: 68.37.Hk, 82.47.Rs, 81.16.Pr, 81.16.-c

DOI: 10.7498/aps.65.036802

* Project supported by the Jilin Provincial Science and Technology Department, China (Grant No. 20140204027GX).

† Corresponding author. E-mail: liul99@jlu.edu.cn