文章编号：1003－1251(2024)05－0069－08

光催化和 Fe_2O_3 修饰对 $CdSnO_3$ 基传感器性能的影响

梅馨跃，蒙欣然，孟凡利，任梦洋，曹 楚，张仁泽

（东北大学 信息科学与工程学院，沈阳 110819）

摘 要：用于有害气体丙酮检测的传统传感器具有一定程度不足，以锡酸镉（$CdSnO_3$）为基底的传感器对现有传感器缺点均有不同程度的弥补。采用水热法合成纯 $CdSnO_3$ 纳米颗粒和 Fe_2O_3 纳米颗粒，通过研磨法制备 Fe_2O_3 修饰的 $CdSnO_3$ 材料，由此制备传感器并进行气敏测试。实验结果表明：纯 $CdSnO_3$ 基传感器在最适温度（340 ℃）下对 100 ppm 丙酮响应值为 19.71，响应时间为 98 s，恢复时间为 51 s；掺杂 3% Fe_2O_3 的 $CdSnO_3$ 基传感器最适温度降低至 320 ℃，且响应值显著提高，最高响应值是纯 $CdSnO_3$ 基传感器的 1.564 倍，同时响应时间降低至 49 s，恢复时间降低至 30 s；在 365 nm 紫外光照射条件下，最适温度也降低至 320 ℃，对 100 ppm丙酮的响应值为 23.5，是纯 $CdSnO_3$ 基传感器的 1.36 倍。3% Fe_2O_3 掺杂的 $CdSnO_3$ 传感器用于丙酮检测具有较好的性能优势。

关 键 词：传感器；锡酸镉；丙酮检测；光催化；Fe_2O_3 修饰

中图分类号：TP 212.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003－1251.2024.05.011

Effect of Photocatalysis and Fe_2O_3 Doping on the Performance of $CdSnO_3$-based Sensor

MEI Xinyue，MENG Xinran，MENG Fanli，REN Mengyang，CAO Chu，ZHANG Renze

（College of Information Science and Engineer，Northeastern University，Shenyang 110819，China）

Abstract：In the detection of harmful gas acetone，the traditional sensors have defects in some form or other，but the sensors based on $CdSnO_3$ can make up for the existing shortcomings in different degrees. Pure $CdSnO_3$ nanoparticles and Fe_2O_3 nanoparticles were synthesized by hydrothermal method to prepare the sensor，and the gas sensitivity test was carried out. Through experimental testing and data analysis，it is found that the response value of pure $CdSnO_3$-based sensor to 100 ppm acetone is 19.71，the response time is 98 s，and the recovery time is 51 s at the optimal temperature（340 ℃）. The optimum temperature of the $CdSnO_3$-based sensor doped with 3% Fe_2O_3 is reduced to 320 ℃，and the response value is significantly improved，showing that the highest response value is 1.564 times that of pure $CdSnO_3$，and the response time is reduced to 49 s and the recovery time is reduced to 30 s. Under the irradiation condition of 365 nm ultraviolet light，the optimal temperature is also reduced by 320 ℃，and the response value to 100 ppm acetone is 23.5，which is 1.36 times that of pure $CdSnO_3$-based sensor. In conclusion，the research of 3% Fe_2O_3 doped $CdSnO_3$ sensor is better performance advantage for acetone detection.

收稿日期：2024－02－14

基金项目：国家自然科学基金项目（62071112，62033002）；国家级大学生创新创业训练计划项目（S202310145142）

作者简介：梅馨跃（2003—），女，本科生；孟凡利（1980—），通信作者，男，教授，博士，研究方向为智能半导体气体传感器。

Key words: sensor; $CdSnO_3$; acetone detection; photocatalysis; Fe_2O_3 doping

近年来,对于丙酮这类易挥发且对人体有害的有机物检测需求日益增加。国外研究表明[1-2],锡酸镉($CdSnO_3$)基传感器对丙酮具备优异的化学稳定性、高灵敏度和良好的选择性,这些优势使 $CdSnO_3$ 基传感器在丙酮检测领域备受瞩目。因此,进一步了解和探索 $CdSnO_3$ 基传感器对丙酮的响应机理至关重要。目前,国内关于 $CdSnO_3$ 基传感器在丙酮检测方面的研究较少,国外关于 $CdSnO_3$ 基传感器的研究主要集中在其制备等方面,关于 $CdSnO_3$ 传感器在丙酮检测方面的优势与应用研究仍有欠缺。丙酮检测的材料大致分三类:第一类是空心 - 壳 SnO_2/α-Fe_2O_3[3]、SnO_2 纳米粒[4]等,这两种材料的响应时间与恢复时间均低于 $CdSnO_3$,但响应值却相差甚远;第二类以 Pt 修饰的 $CuFe_2O_4$ 纳米管[5-6]等为代表,这类材料有较低的工作温度,但响应值仅为 $CdSnO_3$ 的三分之一;第三类材料以 Fe_2O_3 纳米片和 Sn/ZnO 纳米片为代表,这类材料具有前两类材料的优点,但其最低检测限度高于常值[7-8]。本文所选$CdSnO_3$ 材料兼具了以上三类材料的优点,但 $CdSnO_3$ 等钙钛矿材料中的有机成分往往会导致其稳定性不足,影响传感器的性能和使用寿命。

通过改进制备工艺、引入无机纳米颗粒等方法可提高材料的稳定性。本文通过引入质量分数分别为 1%、3%、7% 的 Fe_2O_3 提高 $CdSnO_3$ 基传感器的性能,同时考察了光催化作用对传感器检测灵敏度的影响。本文的研究结果对提高传感器的性能和应用价值具有重要指导意义,也可为环境监测和安全领域的丙酮检测提供新思路和技术支持。

1 实验部分

1.1 实验试剂

氯化镉($CdCl_2$)、脲(H_2NCONH_2),西亚试剂公司;锡酸钠三水合物($Na_2SnO_3\cdot 3H_2O$)、硝酸铁九水合物($Fe(NO_3)_3\cdot 9H_2O$)、三乙胺($C_6H_{15}N$),MACKLIN 公司。以上试剂均为分析纯。

1.2 $CdSnO_3$ 纳米材料合成

称取 1 mmol 的 $CdCl_2$ 溶于 20 mL 蒸馏水中,得澄清溶液;然后称取 10 mmol 脲,加入上述溶液中,搅拌 1 h;最后称取 1 mmol 的$Na_2SnO_3\cdot 3H_2O$ 溶于 10 mL 蒸馏水中,将该溶液逐滴加入到上述盐溶液中,继续搅拌 0.5 h。将得到的混合物转移至 50 mL 水热反应釜中,200 ℃加热 24 h;自然冷却至室温,用无水乙醇和蒸馏水反复冲洗过滤;之后在 80 ℃的烘箱中干燥 12 h,获得纯 $CdSnO_3$ 块状纳米颗粒。

1.3 Fe_2O_3 纳米材料合成

将 0.404 g 硝酸铁和 3mL 三乙胺溶解在 10 mL去离子水中,用磁力搅拌器搅拌 10 min,然后将所得溶液倒入 50 mL 聚四氟乙烯内衬不锈钢高压釜中,160 ℃烘箱中放置 12 h,将获得的红棕色粉末用蒸馏水洗涤,50 ℃下干燥 5 h。

1.4 修饰 Fe_2O_3 的 $CdSnO_3$ 材料合成

将质量分数为 1%、3%、7% 的 Fe_2O_3 分别混合到 $CdSnO_3$ 材料中,手动研磨 5 min,得到 Fe_2O_3 修饰的 $CdSnO_3$ 材料。

1.5 材料表征

使用 X 射线衍射仪(XRD-7000 型,日本岛津公司)对 $CdSnO_3$、Fe_2O_3 及 Fe_2O_3 修饰的 $CdSnO_3$ 进行成分检测,扫描角度为 10°~80°,扫描速率为 5(°)/min。使用扫描电子显微镜(NANOSEM 430 型,美国 FEI 公司)观察 $CdSnO_3$、Fe_2O_3 及 Fe_2O_3 修饰的 $CdSnO_3$ 微观形貌。

1.6 传感器的制备及测试过程

将加热电阻线穿在陶瓷管中间,并焊接到六脚传感器基座上。将纳米颗粒加入到一定量的乙醇中,制成糊状均匀的粘性溶液,用移液枪将溶液均匀涂抹在陶瓷管表面,然后在 180 ℃的空气中老化 24 h。陶瓷基气体传感器结构及气体测试平台如图 1 所示。传感器共有 6 个电极,其中 2 个为加热电极,提供必要的工作温度,其余 4 个为信号电极。当传感器工作时,将稳压电源的输出端接在两个加热电极上,提供工作温度,将数字源表接在信号电极上,提供工作电压,并测量传感器输出的电流信号。

测试平台有五个硬件模块:一个封闭的气体室;一种气体吹扫装置;DP832A 可编程线性直流电源,为加热电阻线提供电源;B2902A 精密电压测量电源;数字源计,对气体传感器施加电压,测量电流,得出敏感元件的电流变化;上位机控制数字源仪表,采集气体传感器信号并对数据进行初步处理,采用静态气体分布法测试气体传感器的灵敏度。使用微型注射器取待测气体,并将气体注入气室。利用外加光源照射在传感器上以提供

365 nm 的光照。用静态液气分布法确定待测气体的浓度 C,其计算式为[9]

$$C = 1\ 000 \times (22.4 \times \Phi \times \rho \times V_1)/(M \times V_2) \quad (1)$$

式中:ρ 为密度;M 为液体分子的相对分子质量;Φ 为挥发性有机化合物(VOC)溶液的体积分数;V_1 为液体的体积;V_2 为气室的体积。

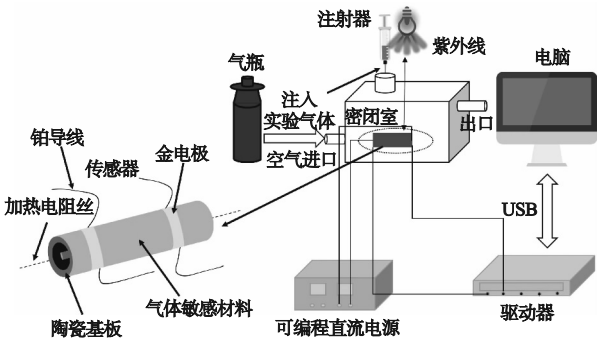


图 1　陶瓷基气体传感器结构及气体测试平台

Fig. 1　Structure of ceramic based gas sensor and schematic diagram of gas testing platform

2　实验结果分析

2.1　X 射线衍射分析

对 $CdSnO_3$、Fe_2O_3 及质量分数分别为 1%、3%、7% 的 Fe_2O_3 修饰 $CdSnO_3$ 进行 X 射线衍射(XRD)分析,XRD 图谱如图 2 所示。图中 CSOF1、CSOF3、CSOF7 分别表示质量分数为 1%、3%、7% 的 Fe_2O_3 修饰 $CdSnO_3$ 基传感器。

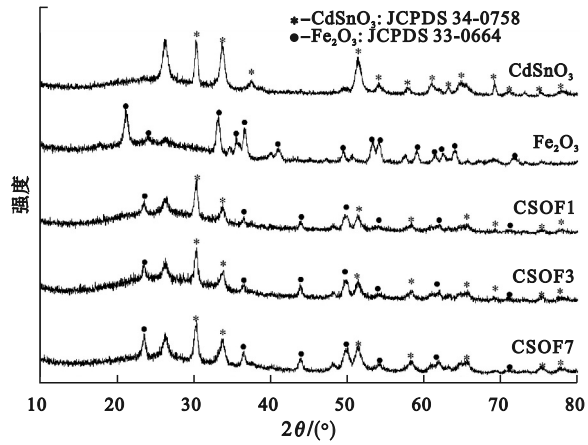


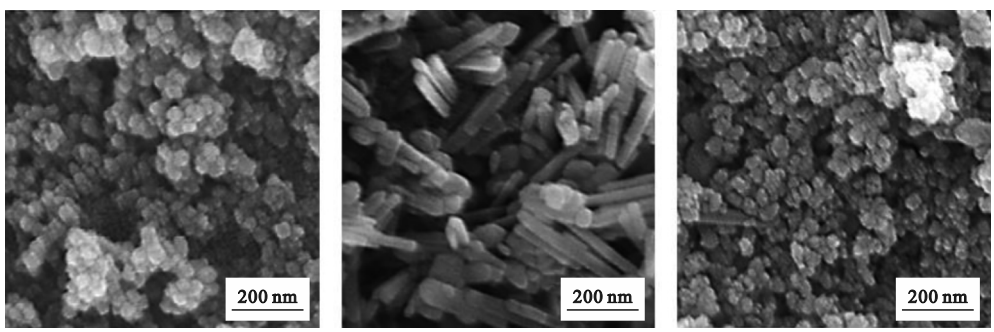
图 2　XRD 图谱

Fig. 2　XRD patterns

由图 2 可知,通过水热反应得到了良好的 $CdSnO_3$ 结构样品(样品中含有少量的 SnO_2 和 Cd_2SnO_4)和纯度较高的 Fe_2O_3 样品。不同质量分数 Fe_2O_3 修饰的 $CdSnO_3$ 材料 XRD 图谱均与 $CdSnO_3$、Fe_2O_3 的衍射峰高度匹配,且其衍射峰均随 Fe_2O_3 含量的增加而增强。

2.2　扫描电子显微镜分析

图 3 为 $CdSnO_3$、Fe_2O_3 及质量分数为 3% Fe_2O_3 修饰 $CdSnO_3$ 的扫描电子显微镜(SEM)图。



(a) $CdSnO_3$　(b) Fe_2O_3　(c) 3%Fe_2O_3修饰的$CdSnO_3$

图 3　SEM 图

Fig. 3　SEM images

由图 3(a)可见,$CdSnO_3$ 为 40 nm 左右的块状纳米粒子,且有所团聚。由图 3(b)可见,Fe_2O_3 颗粒呈棱柱结构,平均长度约为 260 nm。由图 3(c)可见,Fe_2O_3 颗粒均匀修饰进 $CdSnO_3$ 颗粒中,两者界面紧密接触。

2.3　$CdSnO_3$ 基传感器气体测试

$CdSnO_3$ 具有较宽的紫外吸收范围[10],可以提高紫外光的利用效率,产生更多的光激发电子,本文采用 365 nm 的紫外光进行光催化实验。丙酮检测浓度设为 100 ppm,以确保安全。

本实验中响应值(灵敏度)R 定义为

$$R = I_g/I_a \quad (2)$$

式中:I_a 表示空气中的电流值;I_g 表示待测气体的电流值。

2.3.1　最佳工作温度测试

分别测试 $CdSnO_3$ 基传感器、365 nm 光照条

件下 $CdSnO_3$ 基传感器及不同质量分数(1%、3%、7%)Fe_2O_3 修饰 $CdSnO_3$ 基传感器对丙酮气体检测的最佳工作温度,结果如图 4 所示。

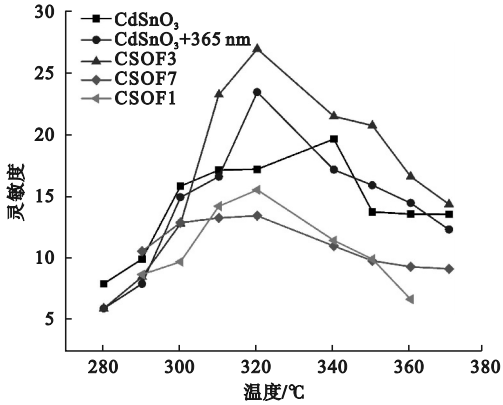


图 4 不同传感器的最佳工作温度

Fig. 4 Optimum operating temperatures of different sensors

由图 4 可知:$CdSnO_3$ 基传感器的最佳工作温度为 340 ℃,此时对丙酮的灵敏度为 19.71;365 nm光照条件下,最佳工作温度为 320 ℃,对丙酮的响应值为 23.5,为纯 $CdSnO_3$ 的 1.36 倍,由此可得,光照可降低最佳工作温度;CSOF1、CSOF3、CSOF7 最佳工作温度也降低至 320 ℃。320 ℃时 CSOF3 传感器表现出最高灵敏度,是纯 $CdSnO_3$ 的 1.564 倍,而 CSOF1、CSOF7 传感器响应值较小。

2.3.2 不同浓度气体的测试

固定工作温度为 320 ℃,测试不同丙酮浓度时 $CdSnO_3$ 基丙酮传感器、365 nm 光照条件下 $CdSnO_3$ 基传感器、CSOF3 传感器的响应曲线及其对应的拟合曲线。

$CdSnO_3$ 基传感器在气体浓度为 5 ~ 100 ppm 下的响应拟合曲线为

$$y_1 = 2.307\ 25 + 0.282\ 56x, 5 < x \leqslant 40 \quad (3)$$

$$y_2 = -0.011\ 43 + 0.313\ 07x, 40 < x < 100 \quad (4)$$

式中 x 为丙酮浓度。

$CdSnO_3$ 基传感器在 365 nm 光照和 5 ~ 100 ppm气体浓度下的响应拟合曲线为

$$y_3 = 4.101\ 45 + 0.200\ 95x, 5 < x \leqslant 40 \quad (5)$$

$$y_4 = -2.126\ 43 + 0.346\ 4x, 40 < x < 100 \quad (6)$$

CSOF3 传感器在气体浓度为 5 ~ 100 ppm 下的响应拟合曲线为

$$y = 0.742\ 7 + 0.412\ 13x \quad (7)$$

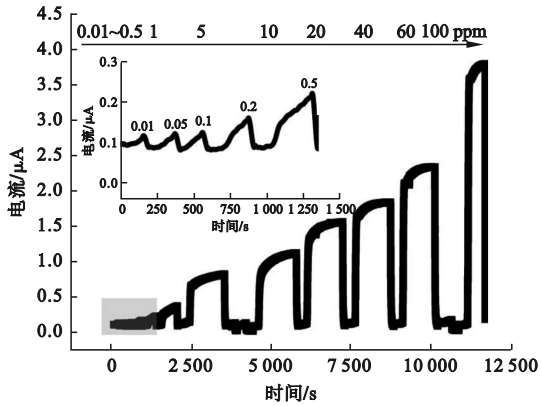
图 5 为不同丙酮浓度时 $CdSnO_3$ 基传感器的响应曲线。

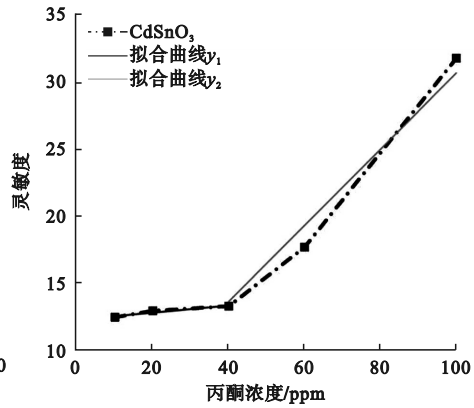
由图 5(a)可知,$CdSnO_3$ 传感器响应随气体浓度的增加而增加,即使在丙酮浓度为 5 ppm 的情况下传感器也显示出明显响应,表明该传感器可用于检测低浓度的丙酮。由图 5(b)可见,拟合曲线呈明显的线性趋势,表明低丙酮浓度下,$CdSnO_3$ 传感器在 365 nm 光照条件下,具有浓度提升量小而响应变化大的优越性。由图 5(c)可知,丙酮浓度为 0.003 ppm 时,传感器也显示出明显响应,表明该传感器可用于检测低浓度的丙酮。

2.3.3 响应恢复测试

响应时间为目标气体均匀扩散后气敏元件达到其稳定电流值90% 所需的时间。恢复时间是指气敏元件从被测气体中取出后,其电流变化 90% 所需的时间。图 6 为纯 $CdSnO_3$ 传感器、在 365 nm 光照条件下 $CdSnO_3$ 基传感器、CSOF3 传感器在最佳工作温度下对 100 ppm 丙酮响应恢复曲线的放大图。

由图 6 可知:纯 $CdSnO_3$ 传感器响应时间为 98 s,恢复时间为 51 s;365 nm 光照下的 $CdSnO_3$ 传感器响应时间为 67 s,相较于纯 $CdSnO_3$ 传感器减少了 31 s,其恢复时间为 64 s;CSOF3 传感器响应时间为 49 s,相较于纯 $CdSnO_3$ 传感器增加了 49 s,恢复时间为 30 s,相较于纯 $CdSnO_3$ 传感器增加了 21 s。





(a) $CdSnO_3$

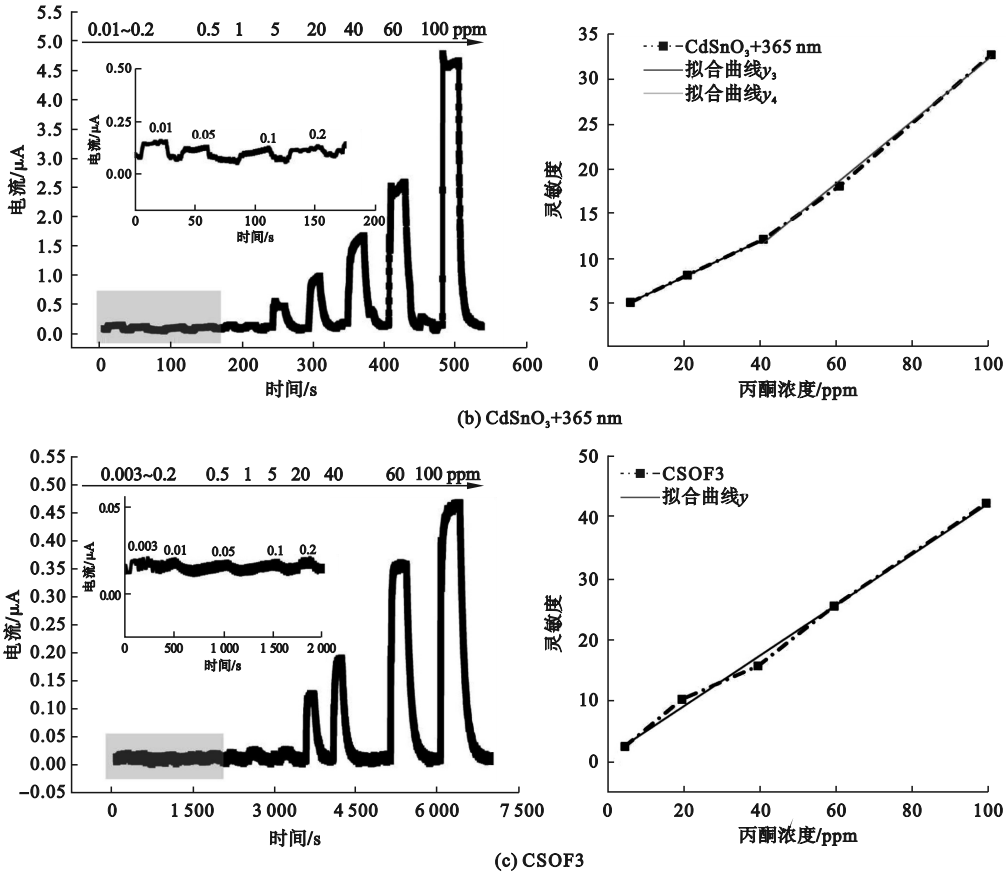


图 5　不同丙酮浓度下 $CdSnO_3$ 基传感器的响应曲线及拟合曲线

Fig. 5　Response curves and fitting curves of $CdSnO_3$-based sensors at different acetone concentrations

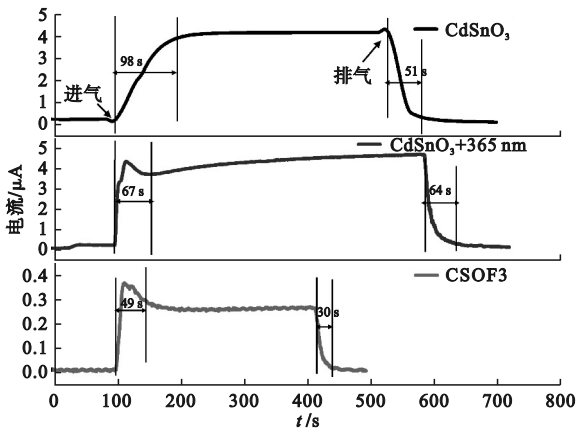


图 6　$CdSnO_3$ 基传感器在最佳工作温度下对 100 ppm 丙酮气体的响应恢复曲线

Fig. 6　Response recovery curve of $CdSnO_3$-based sensor to 100 ppm acetone gas at optimal operating temperature

2.3.4　选择性测试

选择性是气体传感器的基本特性。本文测试了 $CdSnO_3$ 基传感器、365 nm 光照条件下 $CdSnO_3$ 基传感器和 CSOF3 传感器在最佳工作温度条件下,对浓度均为 100 ppm 的不同目标气体(丙酮、二甲苯、甲苯、乙酸乙酯、苯、氨气、甲醛)的响应,结果如图 7 所示。

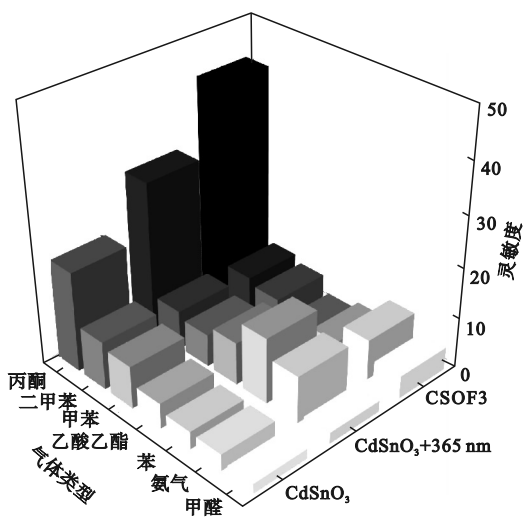


图 7　$CdSnO_3$ 基传感器对不同目标气体的响应值

Fig. 7　The response values of $CdSnO_3$-based sensors to different target gases

由图 7 可知,$CdSnO_3$ 基传感器、365 nm 光照下 $CdSnO_3$ 基传感器、CSOF3 传感器对丙酮均有较高的响应,灵敏度分别为 19.71、30 和 42.27,而

对其他气体的响应较低。表明 $CdSnO_3$ 基传感器对丙酮均具有显著的选择性。

2.3.5 响应恢复循环测试

在最佳工作温度下,重复测试纯 $CdSnO_3$ 传感器、365 nm 光照条件下 $CdSnO_3$ 传感器、CSOF3 传感器对浓度为 100 ppm 丙酮气体的响应,结果如图 8 所示。

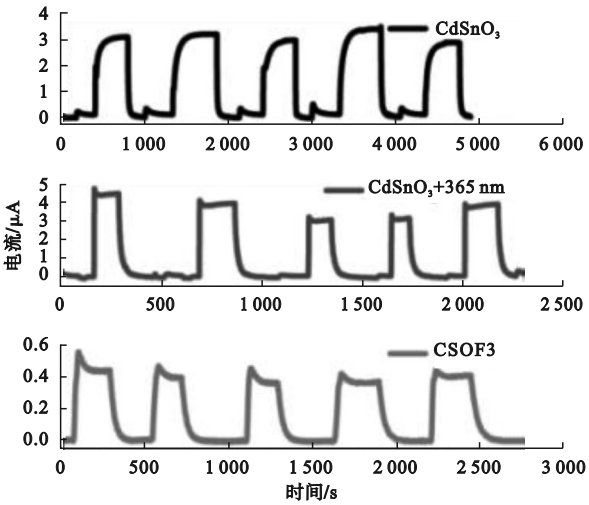


图 8 $CdSnO_3$ 基传感器对丙酮气体 5 次响应 – 恢复全过程曲线

Fig. 8 5 order response recovery curves of $CdSnO_3$-based sensors

由图 8 可知,纯 $CdSnO_3$ 传感器、365 nm 光照条件下 $CdSnO_3$ 传感器、CSOF3 传感器均具有较好的重复性,表明传感器性能较稳定。

3 气敏机理分析

3.1 选择性测试机理

本文制备的 $CdSnO_3$ 材料是一种 n 型半导体,其具有较高的氧空位浓度,表面的金属离子极易吸附大气中的氧气[11]。当氧气被吸附时 $CdSnO_3$ 的价电子转移到被吸附的氧原子或分子上,使氧原子或分子变成氧离子 O^- 或 O^{2-}。随着操作温度的变化,吸附在 $CdSnO_3$ 表面的氧状态发生如下变化[12],其机理如图 9 所示。

$$O_{2(gas)} \Leftrightarrow O_{2(ads)} \tag{8}$$

$$O_{2(ads)} + e^- \Leftrightarrow O^-_{2(ads)} \quad (T \leqslant 150\ ℃) \tag{9}$$

$$O^-_{2(ads)} + e^- \Leftrightarrow 2O^-_{(ads)} \quad (150\ ℃ < T \leqslant 300\ ℃) \tag{10}$$

$$O^-_{(ads)} + e^- \Leftrightarrow O^{2-}_{(ads)} \quad (T > 300\ ℃) \tag{11}$$

氧从材料中捕获电子,使材料表面电子浓度急剧降低,从而形成电子耗尽层,导致材料电阻升高。

丙酮为还原性气体,当传感器置于丙酮气体中时,丙酮能与吸附在传感器表面的氧发生氧化还原反应。为了保持材料呈中性,丙酮中的电子迁移到材料中,导致材料电子浓度增加,电阻降低,微电流增大,表现为材料对丙酮的高响应[13]。

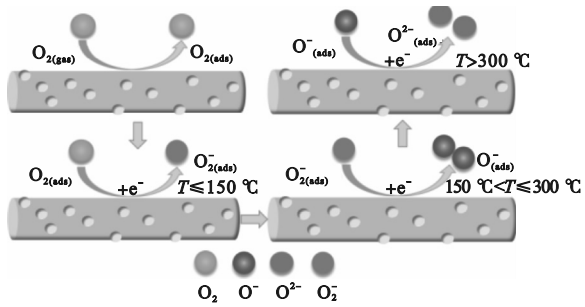


图 9 氧吸附在 $CdSnO_3$ 表面发生反应的机理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the mechanism of oxygen adsorption reaction on the surface of $CdSnO_3$

作用在 $CdSnO_3$ 传感器表面的丙酮气体响应可解释为[14]

$$C_3H_6O_{(gas)} \Leftrightarrow C_3H_6O_{(ads)} \tag{12}$$

$$C_3H_6O_{(ads)} + 8O^{2-}_{(ads)} \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O + 16e^- \tag{13}$$

$CdSnO_3$ 对丙酮表现出高选择性的原因为:丙酮具有两个甲基,有较强的电子给予能力,且在所有测试气体分子的不同键能中,丙酮的 C—C 键和 C—H 键具有较低的键能,故丙酮表现出最强的活跃性[15]。

3.2 光催化条件下 $CdSnO_3$ 传感器灵敏度提高的机理分析

光催化条件下 $CdSnO_3$ 传感器灵敏度提高机理可以解释为:吸附的氧负离子 $O^{2-}_{(ads)}$ 将转化为光致性氧离子 $O^{2-}_{(hv)}$,而 $O^{2-}_{(hv)}$ 为 VOCs(挥发性有机物)的一种氧化剂,通常认为 $O^{2-}_{(hv)}$ 比 $O^-_{2\ (ads)}$ 更富活性[16],其反应可以描述如下(见图 10(a))。

$$O^{2-}_{(ads)} + hv = O^{2-}_{(hv)} \tag{14}$$

同时,更多的光生载流子在 $CdSnO_3$ 材料表面被激发,耗尽层空穴浓度比黑暗中空穴浓度高,并且空穴累积层宽度增加,这个过程可以描述为[17]

$$O_2 \rightarrow 2O^{2-}_{(hv)} + 4h^+ \tag{15}$$

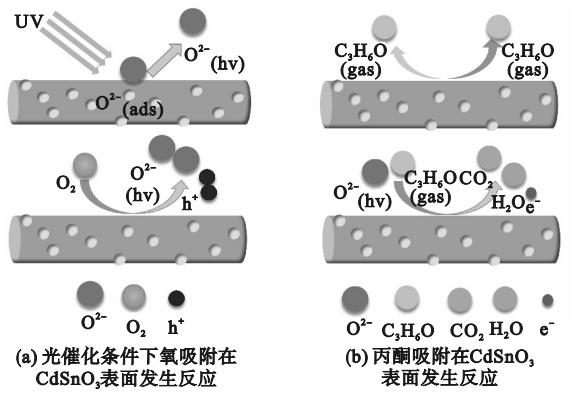
光照下更多的丙酮分子与 $O^{2-}_{(hv)}$ 反应,与室光相比,光催化下释放的电子更多,空穴累积层宽度

变窄的程度更大,从而降低传感器的最佳工作温度,其反应过程可描述如下[18](见图 10(b))。

$$C_3H_6O_{(gas)} \Leftrightarrow C_3H_6O_{(ads)} \quad (16)$$

$$C_3H_6O_{(ads)} + 8O^{2-}_{(ads)} \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O + 16e^- \quad (17)$$

此外,光子提供的能量使离子运动速率加快,也使丙酮在传感器材料表面的氧化还原反应速度加快,使响应显著增强[19]。



(a) 光催化条件下氧吸附在 $CdSnO_3$ 表面发生反应　　(b) 丙酮吸附在 $CdSnO_3$ 表面发生反应

图 10　光催化条件下氧吸附在 $CdSnO_3$ 表面发生反应及丙酮吸附在 $CdSnO_3$ 表面发生反应的机理示意图

Fig. 10　Schematic diagram of the reaction mechanism of oxygen adsorption on the surface of $CdSnO_3$ and acetone adsorption on the surface of $CdSnO_3$ under photocatalysis condition

3.3　CSOF3 传感器灵敏度提高的机理分析

Fe_2O_3 修饰可提高 $CdSnO_3$ 传感器灵敏度的机理为:Fe_2O_3 和 $CdSnO_3$ 均为 n 型半导体,主要载流子是自由电子,在空气中时,吸附在材料表面的 O_2 分子捕获自由电子,转化为吸附的氧负离子,从而降低导电电子的浓度并呈现高阻态。当传感器暴露在丙酮气氛中时,吸附的丙酮气体分子与吸附的氧离子反应。在这个过程中,氧分子捕获的自由电子被释放,导致电子耗尽层变窄,从而降低传感器的电阻[20]。CSOF3 样品在整个丙酮浓度范围内响应最高,这归功于异质结的形成。Fe_2O_3 的费米能级低于 $CdSnO_3$ 的费米能级[21-22],电子会从 $CdSnO_3$ 到 Fe_2O_3 定向转移,直到实现能级对准。因此,在两种半导体的边界处形成电子耗尽层,导致显著的化学和电子敏化。

4　结论

本文采用水热法制备了 $CdSnO_3$ 纳米颗粒,通过研磨法制备了 Fe_2O_3 修饰的 $CdSnO_3$ 材料。分别对纯 $CdSnO_3$ 传感器、光催化下 $CdSnO_3$ 传感器和 Fe_2O_3 修饰的 $CdSnO_3$ 传感器进行气敏测试,得到如下结论。

1)纯 $CdSnO_3$ 传感器在 340 ℃的条件下对 100 ppm 丙酮的灵敏度为 19.71,响应时间为 98 s,检测下限为 10 ppb,且在较宽的检测范围内线性度良好。

2)在 365 nm 紫外线光催化下,纯 $CdSnO_3$ 气体传感器最佳工作温度为 320 ℃,该温度下对 100 ppm 丙酮的响应值为 23.5,响应时间缩短了 31 s。由机理分析可知,光催化引起了 $CdSnO_3$ 中的电子结构调整,增强了传感器对丙酮的吸附能力,提高了 $CdSnO_3$ 传感器的灵敏度。

3)CSOF3 传感器对丙酮气体表现出最优性能。研究表明,适度的 Fe_2O_3 修饰不仅为反应提供了更多位点,而且在两种半导体的边界处形成电子耗尽层,显著优化了传感器的性能。

参考文献(References):

[1] SUN J B, ZHANG H X. Porous $CdSnO_3$ nanocubics synthesized under suitable pH value for targeted H_2S detection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 336: 113408.

[2] LIU Y L, YANG H F, LIU Z M, et al. Ethanol gas sensing properties of nano-crystalline cadmium stannate thick films doped with Pt[J]. Analytica Chimica Acta, 2004, 527(1): 21-26.

[3] WANG B B, FU X X, LIU F, et al. Fabrication and gas sensing properties of hollow core-shell SnO_2/α-Fe_2O_3 heterogeneous structures[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 587: 82-89.

[4] YU Q X, ZHU J H, XU Z Y, et al. Facile synthesis of α-Fe_2O_3 @ SnO_2 core-shell heterostructure nanotubes for high performance gas sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 213: 27-34.

[5] ZHAO C H, LAN W Z, GONG H M, et al. Highly sensitive acetone-sensing properties of Pt-decorated $CuFe_2O_4$ nanotubes prepared by electrospinning[J]. Ceramics International, 2018, 44(3): 2856-2863.

[6] MURADE P A, SANGAWAR V S, CHAUDHARI G N, et al. Acetone gas-sensing performance of Sr-doped nanostructured $LaFeO_3$ semiconductor prepared by citrate sol-gel route [J]. Current Applied Physics, 2011, 11(3): 451-456.

[7] ZHOU X, LIU J Y, WANG C, et al. Highly sensitive acetone gas sensor based on porous $ZnFe_2O_4$ nanospheres[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 206: 577-583.

[8] AL-HADEETHI Y, UMAR A, AL-HENITI S H, et al. 2D Sn-doped ZnO ultrathin nanosheet networks for enhanced acetone gas sensing application[J]. Ceramics International, 2017, 43(2): 2418-2423.

[9] YU Q C, ZHANG Y C, XU Y. Hierarchical hollow $BiFeO_3$ microcubes with enhanced acetone gas sensingperformance [J]. Dalton Transactions, 2021, 50(19): 6702-6709.

[10] WANG X Y, LENG B X, REN Q, et al. Formation and disso-

ciation of excitons in La^{3+}-doped $BaSnO_3$ and improvement of ethanol sensitivity: heating, nano-$CdSnO_3$ decoration and UV illumination[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022,926:166812.

[11] 陆靖元. 基于 $CdSnO_3$ 纳米晶的低阻高性能丙酮传感器的研究[D]. 长春:吉林大学,2022.

[12] QIN W B,ZHANG R Z,YUAN Z Y,et al. Preparation of p-$LaFeO_3$/n-Fe_2O_3 heterojunction comosites by one-step hydrothermal method and gas sensing properties for acetone[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1887,71:1501809.

[13] OCHOA-MUÑOZ Y H, MEJÍA DE GUTIÉRREZ R, RODRÍGUEZ-PÁEZ J E, et al. Gas sensors based on porous ceramic bodies of $MSnO_3$ perovskites(M = Ba,Ca,Zn): formation and sensing properties towards ethanol, acetone, and toluene vapours[J]. Molecules,2022,27(9):2889.

[14] ZHANG H R,LIU L L,HUANG C G,et al. Enhanced acetone gas sensing performance of ZnO polyhedrons decorated with $LaFeO_3$ nanoparticles[J]. Materials Research Express, 2023,10(9):095902.

[15] XU Y S,ZHENG L L,YANG C,et al. Oxygen vacancies enabled porous SnO_2 thin films for highly sensitive detection of triethylamine at room temperature[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2020,12(18):20704 – 20713.

[16] CHENG H, LIU W X, CHEN R Y, et al. WS_2 gas sensor based on photothermocatalytic effect for ammonia detection with high response[J]. IEEE Sensors Journal,2022,22(24): 23610 – 23619.

[17] QOMARUDDIN,CASALS O,WASISTO H S,et al. Visible-light-driven room temperature NO_2 gas sensor based on localized surface plasmon resonance: the case of gold nanoparticle decorated zinc oxide nanorods (ZnO NRs)[J]. Chemosensors,2022,10(1):28.

[18] CAI Z C,PARK S. Fabrication of selective and highly sensitive triethylamine gas sensor using In_2O_3-SnO_2 hollow nanospheres in room temperature activated by UV irradiation[J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,26:6581 – 6596.

[19] TAN B W,CHEN R Y,HE M Y,et al. Multiple photo-excited NH_3 gas sensors based on WS_2/CuO heterostructures with high sensitivity and reliable anti-humidity ability[J]. IEEE Sensors Journal,2023,23(13):13882 – 13890.

[20] QIN Q X,ZHANG X D,ZHANG N. High response and excellent selectivity acetone sensor based on γ-Fe_2O_3 hollow microspheres[J]. Materials Letters,2023,330:133337.

[21] MOKRUSHIN A S,GORBAN Y M,AVERIN A A,et al. Obtaining of ZnO/Fe_2O_3 thin nanostructured films by AACVD for detection of ppb-concentrations of NO_2 as a biomarker of lung infections[J]. Biosensors,2023,13(4):445.

[22] USHA P,RAMESH S,JAYAMURUGAN P,et al. Unveiling the versatile realm of $CdSnO_3$ nanoparticles for advanced sensing applications[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology,2024,13(1):2162 – 8777.

(责任编辑:徐淑姣)

(上接第 68 页)

[13] 王仲军,刘子龙,王茂森,等. 带有不同膛口装置的流场仿真分析[J]. 兵工自动化,2023,42(3):9 – 14.
WANG Z J,LIU Z L,WANG M S,et al. Simulation analysis of flow field with different muzzle device[J]. Ordnance Industry Automation,2023,42(3):9 – 14. (in Chinese)

[14] 张海龙,李忠新,蔡红明,等. 吊舱航炮膛口流场数值分析[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(3):73 – 78.
ZHANG H L,LI Z X,CAI H M,et al. Numerical analysis of flow field in muzzle of a pod aircraft gun[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2022,43(3):73 – 78. (in Chinese)

(责任编辑:宋颖韬)