

基于 Pt 修饰 SnO₂ 纳米粒子的高选择性 CO 气体传感器

霍炼灿, 李国梁, 伍灿锋, 姚英邦*

(广东工业大学集成电路学院, 广东 广州 510006)

摘要: 随着科技的进步和经济的快速发展, 能源需求不断增长, 传统的化石能源仍然是最主要的能源来源。然而, 在实际应用中难免会出现能源不完全燃烧的现象, 这种现象会导致有害气体 CO 的产生。CO 作为一种无色、无味的有毒气体, 不仅在汽车排放、天然气生产、工业活动等领域中存在, 而且还与众多火灾事故密切相关, 已成为主要的气体污染物之一。因此, 开发具有高灵敏度和高选择性的 CO 传感器, 以实现 CO 气体的实时监测, 对于环境保护、公共安全和工业生产至关重要。采用浸渍法将铂 (Pt) 负载到二氧化锡 (SnO₂) 纳米颗粒表面, 利用控制变量法优化制备过程中的还原烧结温度、还原烧结时间和负载量等关键参数。结果表明, 当还原烧结温度为 550 °C、还原烧结时间为 30 min、Pt 负载量 (质量分数) 为 0.6 % 时, Pt-SnO₂ 复合材料表现出最佳的传感性能。将该材料制成浆料, 并通过丝网印刷法制造了 Pt-SnO₂ 传感器。该传感器在 250 °C 的工作温度下, 对浓度 0.1 % CO 气体的响应 (R_a/R_g , 其中 R_a 为在空气中的电阻、 R_g 为在 CO 气体中的电阻) 达到了 81.3, 约为纯 SnO₂ 传感器响应 (2.38) 的 40 倍。此外, Pt-SnO₂ 传感器在 CO 浓度 0.01 %—0.1 % 范围内呈现出良好的线性度响应, 并且在对其他常见气体 (如 H₂、CO₂、CH₄ 和 SO₂) 的测试中展现出良好的 CO 选择性。表明, Pt 负载的 SnO₂ 复合材料对 CO 气体具有显著的传感增效作用。通过对反应机理的分析发现, Pt 的负载是通过化学增敏 (溢出机制) 和电子增敏 (肖特基势垒) 的协同作用, 显著提高了传感器的性能。将 Pt-SnO₂ 复合材料应用于高性能 CO 气体传感器中, 为 CO 气体传感器的设计和优化提供了理论依据和实验支持。

关键词: 浸渍法; 丝网印刷法; Pt-SnO₂ 复合材料; CO 传感器; CO 选择性; 线性度响应; CO 检测; 传感器性能

中图分类号: TB333

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2025)02-0348-09

引文格式: 霍炼灿, 李国梁, 伍灿锋, 等. 基于 Pt 修饰 SnO₂ 纳米粒子的高选择性 CO 气体传感器[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(2): 348-356.

HUO Liancan, LI Guoliang, WU Canfeng, et al. Highly Selective CO Gas Sensor Based on Pt Modified SnO₂ Nanoparticles [J]. Materials Research and Application, 2025, 19(2): 348-356.

0 引言

CO 是一种无色无味的有毒气体, 会对人体造成严重的危害。对于人来说, CO 的阈值限制值约为 $3 \times 10^{-4} \%$ — $5 \times 10^{-4} \%$ 。当 CO 的浓度高于 $1.5 \times 10^{-3} \%$ 时, 会对人体造成严重的后果。因此, 为了环境安全和工业控制, 需要在宽温度范围内具有高灵敏度和高选择性及低能耗的可靠、低成本的 CO 传感器^[1]。在过去的几十年里, 有许多基于半导体金属氧化物的新型 CO 气体传感器的研究^[2-7]。基

于氧化物的半导体气体传感器的电阻变化被广泛运用于还原性气体的检测, 如 CO、碳氢化合物和氢气等。N 型半导体传感器中电阻变化的基本原理设计还原性气体 (如 CO、H₂ 和碳氢化合物) 与化学吸附的氧的反应, 导致电阻降低^[8]。SnO₂ 是一种具有宽带隙 (3.6 eV) 的 n 型半导体, 已经广泛用于 CO 传感器的制造^[9]。通常, SnO₂ 气体传感器的最佳工作温度在 350—400 °C^[10]。但在如今看来, 该温度会导致传感材料的功耗高, 存在安全隐患和器件稳定性差

收稿日期: 2024-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51772054)

作者简介: 霍炼灿, 硕士研究生, 研究方向为材料工程及半导体气体传感器。E-mail: 1366842533@qq.com。

通信作者: 姚英邦, 博士, 教授, 研究方向为铁电压电及半导体敏感材料、智能传感器。E-mail: ybyao@gdut.edu.cn。

的缺点。因此,SnO₂气体传感器的小型化、低功耗及气敏响应和气体选择性等性能的优化会更具有研究意义^[11]。Yamazoe^[12]发现,通过对金属半导体材料表面负载贵金属的方法可以有效的解决上述的问题。Yamaura^[13]发现,在In₂O₃上负载Au可以提高材料对CO的敏感性和选择性,且工作温度可以降到250℃。Wang^[9]则在SnO₂的多孔纳米固体负载Pt,制备了具有高灵敏度且能够在室温下工作的CO传感器。室温下对浓度0.01% CO的最高响应达到64.5。Henshaw^[14]也报道了一种Pt修饰SnO₂的室温下工作的气敏传感器,对浓度0.1% CO的响应达到8。Choi^[15]在网格化的ZnO纳米线中,通过用Pd对其表面进行修饰,Pd修饰后的ZnO纳米线气体传感器能够在室温下对浓度 $0.1 \times 10^{-4}\%$ CO表现出1.02的响应。Lai^[16]制备了Pt和Pd纳米颗粒修饰的In₂O₃花状纳米束,用于在室温下检测浓度0.005%—0.02%的CO。这些研究的结果表明,用贵金属修饰氧化物半导体表面是优化CO传感器最有效的方法。

本研究采用SnO₂作为敏感材料,采用浸渍法在金属半导体表面修饰金属Pt来制备气体传感器。并针对浸渍法分别以负载量、还原时间和还原温度进行优化,优化后的复合材料对CO有良好的气敏性。总体而言,Pt-SnO₂是一种优秀的传感材料,可

以为CO的检测提供参考。

1 实验部分

实验所需的纳米SnO₂(粒径约为50—70 nm)、四氯化铂、松油醇、乙二醇丁醚醋酸酯、乙基纤维素、邻苯二甲酸二辛酯(DOP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)和三乙醇胺均为上海麦克林生物科技有限公司生产,铂浆为贵研铂业股份有限公司生产。

针对贵金属负载量、还原时间和还原温度3个条件,采用控制变量法进行逐一优化。图1为气敏复合材料的制备流程。以优化还原温度为例,称取10 g纳米SnO₂颗粒各6组备用,用去离子水配制好质量分数为0.1%的四氯化铂溶液,用滴管将0.1%的PtCl₄溶液逐滴滴加到6组SnO₂颗粒中直至刚好浸润,静置4 h后将浸渍完成的样品放入烘箱,设置80℃烘干12 h。将贵金属置于气氛炉,在7%氢氮混合气和氮气的气氛中进行还原烧结,其中氢气、氮气的流量分别为30和270 cm³·min⁻¹。针对还原温度条件的优化,以2℃·min⁻¹的加热速度和50℃的温度梯度设置6组还原温度从450—700℃的实验组,还原时间均为2 h。将烘干好的6组样品分别放入对应设置好的气氛炉中烧结,烧结完成后过滤洗涤烘干即可得到针对还原温度优化的6组气敏材料样品,后续通过性能测试依次优化还原时间和负载量2个制备条件。

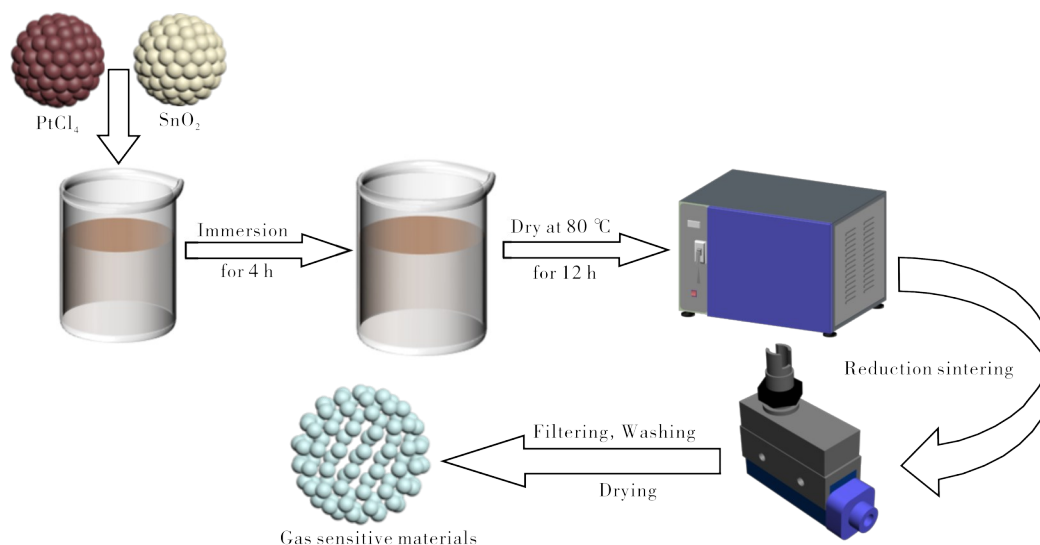


图1 气敏材料制备流程图

Figure 1 Schematic diagram of the gas-sensitive material preparation process

图2为气敏浆料的制备流程图。在烧杯中混合加入35 g松油醇、5.4 g乙基纤维素、15 g乙二醇丁醚醋酸酯、0.6 g邻苯二甲酸二丁酯和1.2 g邻苯二甲酸二辛酯,然后将烧杯放入磁力搅拌油浴锅中

以80℃搅拌反应2 h得到有机载体。将三乙醇胺、制备的对应气敏材料和有机载体以质量比0.6:7:10的混合并球磨20 h,即可得到气敏浆料。

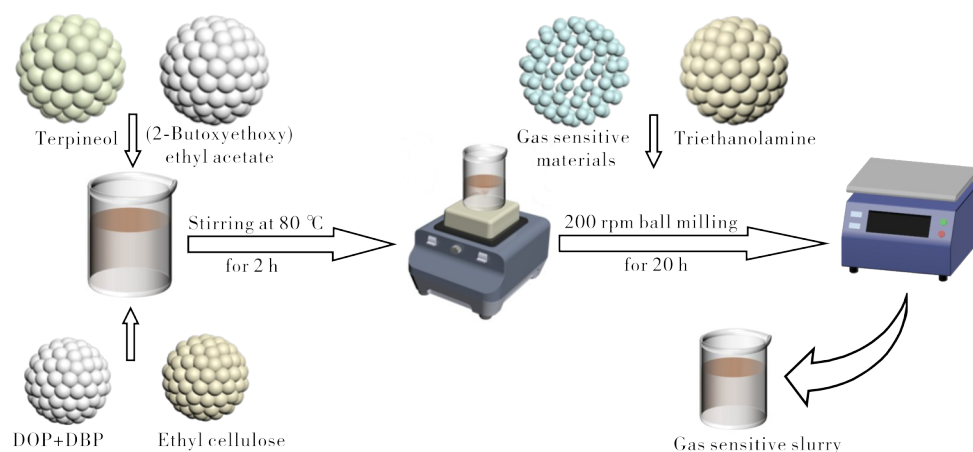


图2 气敏浆料制备流程图

Figure 2 Schematic diagram of the gas-sensitive slurry preparation process

图3为传感器测试单元的制备流程图。在3 mm×3 mm氧化铝陶瓷基板的背面通过丝网印刷方法印刷加热Pt加热电极,然后在基板的正面依次印刷Pt叉指电极和气敏层。印刷后均需要在80 °C下流平2 h后再进行烧结,其中Pt加热电极、Pt叉指电极的烧结温度和时间分别为850 °C和10 min。气敏层的烧结温度和烧结时间为550 °C和2 h,烧结完成后即可得到传感器测试单元。

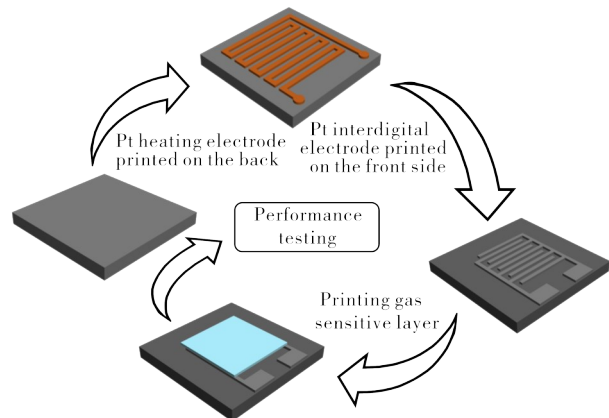
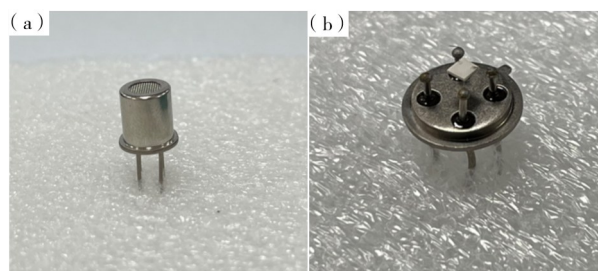


图3 传感器测试单元制备流程

Figure 3 Schematic diagram of the sensor testing unit preparation process

图4为组装完成的传感器器件实物图。气体传感性能测试在密闭的测气室中进行,测气室中有两路测试通道,每个测试通道配备有四个针脚。传感器器件放置在在测气室内,将传感器器件四个针脚接入测气室系统。测试进行时通过输入电压控制传感器的工作温度,测试气体(CO)混合到指定浓度后通过进入测气室,系统记录其传感器的电阻变化。关闭测试气体(CO)通道,将空气通入测气室中,传

感器电阻将会恢复。在本研究中定义传感器响应为 R_a/R_g ,其中 R_a 是通入CO之前的电阻、 R_g 是通入CO后的电阻。



(a)—传感器示意图;(b)—内部结构图。

(a)—sensor diagram; (b)—internal structure diagram.

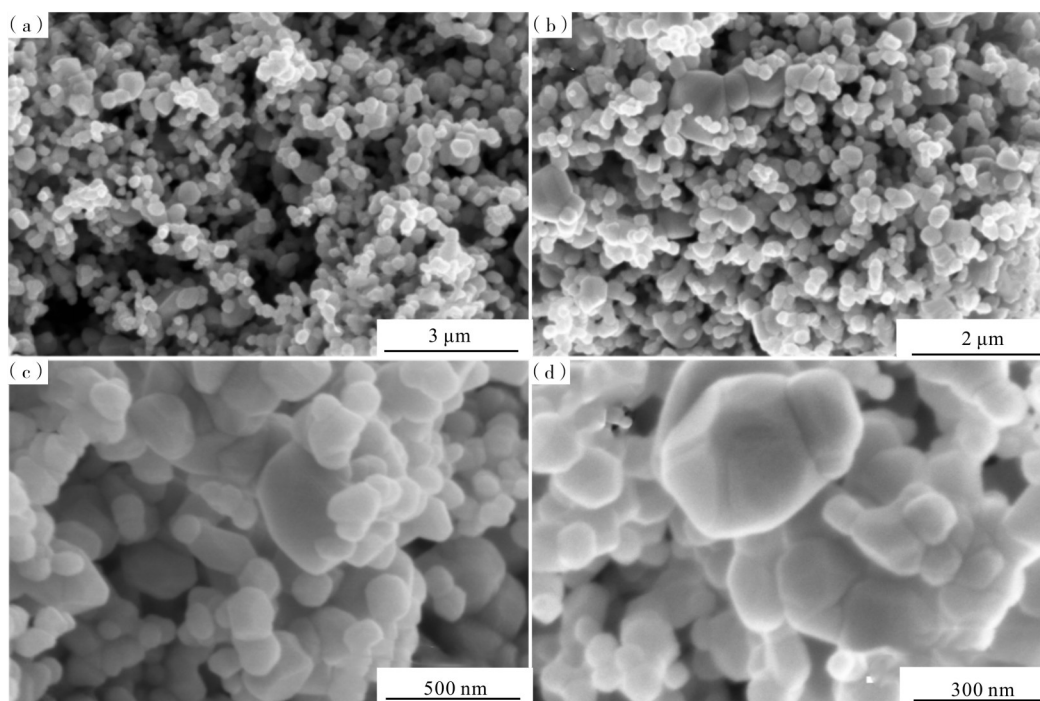
图4 传感器器件实物图

Figure 4 Physical image of the sensor components

2 结果与讨论

2.1 复合材料的表面形貌

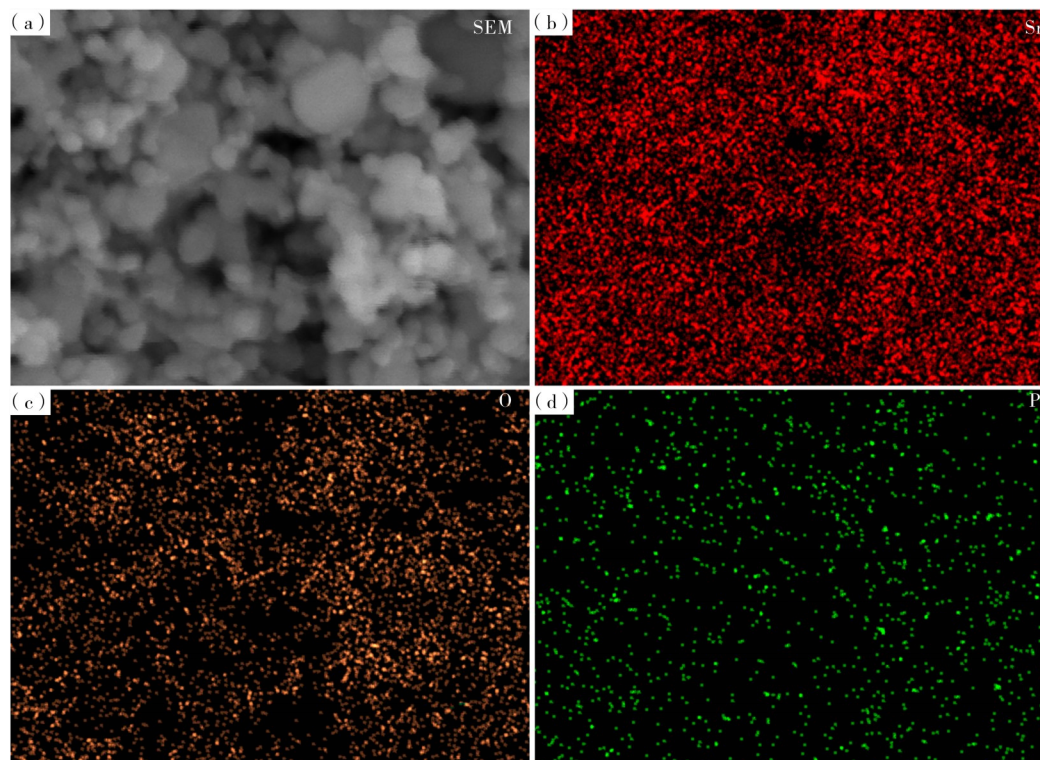
使用 Hitachi SU8000 扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)观察了复合材料的形态和组成,结果如图5和图6所示。从图5的Pt-SnO₂复合材料SEM图可见,SnO₂纳米颗粒表现出分散的粒度(50—200 nm)分布。由于这些颗粒的形态是不规则的颗粒,因此实验中负载的金属铂的量相对较少,在SEM图片上较难找出金属铂。从图6的Pt-SnO₂样品EDS可见,Sn、O和Pt元素在整个样品中均匀分布。结果表明,通过浸渍法可成功在SnO₂纳米颗粒的表面负载金属铂。图7为材料的比表面积测试图。从图7可以看到,复合材料相较于纯的二氧化锡材料具有更大的比表面积(9.816 1 m²·g⁻¹)和平均孔径(16.66 nm)。因此,复合材料更易于吸附气体。



(a)— 5×10^4 倍 SEM 图; (b)— 8×10^4 倍 SEM 图; (c)— 1.2×10^5 倍 SEM 图; (d)— 1.5×10^5 倍 SEM 图。
(a)—SEM image at 5×10^4 times magnification; (b)—SEM image at 8×10^4 times magnification; (c)—SEM image at 1.2×10^5 times magnification; (d)—SEM image at 1.5×10^5 times magnification.

图5 Pt-SnO₂复合材料的SEM图

Figure 5 SEM images of the Pt-SnO₂ composite materials



(a)—复合材料的SEM图像; (b)—Sn元素的EDS图; (c)—O元素的EDS图; (d)—Pt元素的EDS图。
(a)—SEM images of composite materials; (b)—EDS image of Sn element; (c)—EDS image of O element; (d)—EDS image of Pt element.

图6 复合材料的EDS能谱图

Figure 6 EDS energy spectrum of the composite materials

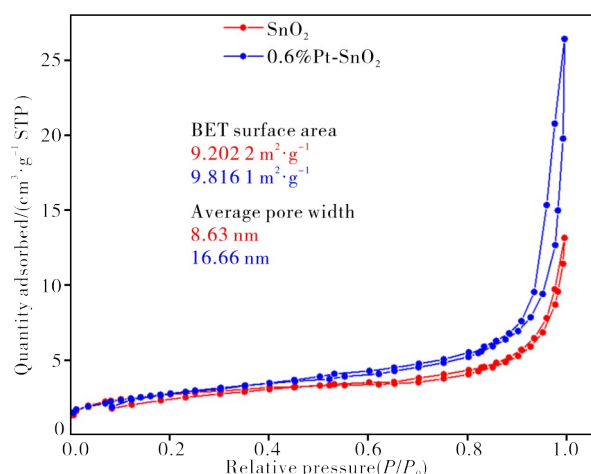


图7 复合材料的BET测试图

Figure 7 BET test chart of the composite materials

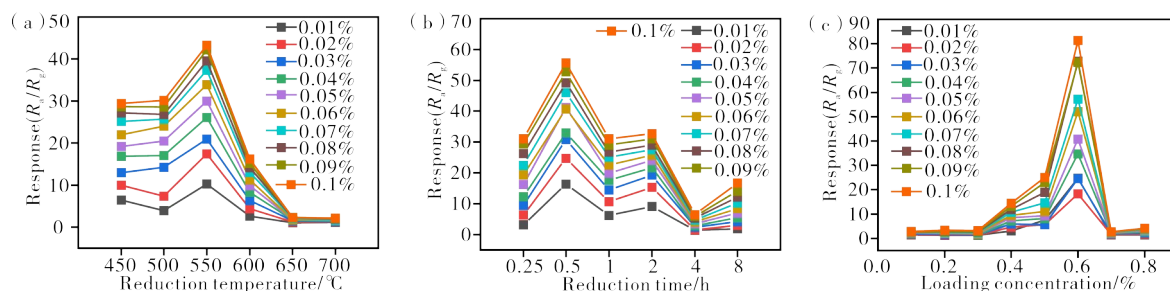
2.2 制备条件的优化对材料性能的影响

针对还原温度进行优化,控制变量负载量(质量分数,下同)、烧结时间分别为0.6%和2 h,还原温度为450—700 °C,每50 °C设置一个实验点。测试250 °C工作温度下对浓度0.01%—0.1%的CO气体响应,对应的气敏响应结果如图8所示。从图8

(a)可以看到,在550 °C实验组的气敏响应明显高于其他实验组,其对浓度0.1% CO响应为42.2,而其他实验组的响应均不超过30。表明,材料的最佳还原温度为550 °C。

针对还原时间进行优化,控制变量负载量为0.6%、还原温度为550 °C,还原时间分别设定为0.25、0.5、1、2、4和8 h。在250 °C工作温度下的气体响应结果如图8(b)所示。从图8(b)可见,还原时间为30 min的实验组的气敏响应最突出,对浓度0.1% CO的响应可达到54.6,明显优于其他实验组的响应。表明,材料最佳还原时间为30 min。

针对负载条件进行优化,控制还原温度、还原时间分别为550 °C和30 min,负载量设定为0.1%—1%,共计10实验组,工作温度为250 °C时气体响应图如图8(c)所示。从图8(c)可以看到,器件的气体响应随着负载量的增加而增加,当负载量达到0.6%时气体响应达到最高,对0.1% CO的响应均达到79.3。随着负载量的增加,器件的灵敏度响应反而下降。考虑到材料的成本问题,可以得出材料最佳的负载量为0.6%。



(a)—还原温度;(b)—还原时间;(c)—负载量。

(a)—reduction temperatures;(b)—reduction times;(c)—load concentrations.

图8 在250 °C下不同还原温度、还原时间和负载量对材料性能的响应图

Figure 8 Response of material properties to different reduction temperatures, reduction times, and load concentrations at 250 °C

2.3 传感器的气敏特性测试

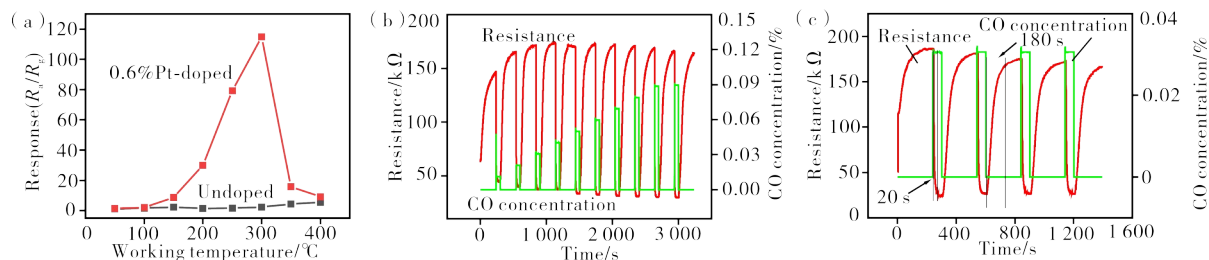
吸附和解吸氧的化学反应在气体传感器中起着重要作用。一方面,传感器在低温下工作导致敏感材料的表面活性低,这将直接削弱敏感材料与气体分子之间的反应。另一方面,当工作温度传感器过高时,解吸速率将快于吸附速率,这将减少吸附的氧的量。因此,传感器响应将随着工作温度的升高先增加后减少^[17]。

图9(a)为纯SnO₂传感器器件和0.6% Pt-SnO₂传感器器件在50—400 °C工作温度下对浓度0.1% CO的气体响应图。从图9(a)可以看出,传感器在300 °C下的气体响应最高。图9(b)为传感器实际测

试时的电阻响应图,在CO浓度为0.01%—0.1%的测试范围内以0.01%为一个梯度设置测试点,且通入目标气体的时间为60 s,通入背景气体的时间为240 s。随着CO气体浓度的增加,暴露在CO环境中传感器的电阻降低,且电阻的降低随着CO浓度的增加而增大。在通入背景气体后,传感器电阻能够完全恢复到初始值。器件的响应时间即为传感器电阻在遇到测试气体时电阻改变至最低值的90%所需时间,器件的恢复时间即为传感器电阻在大气环境下从传感状态的电阻值恢复到正常值的90%所需时间。图9(c)为传感器在CO浓度为0.03%的响应重复性测试。从图9(c)可以看到,器件的气敏响应重

复性良好,传感器响应时间约为20 s左右,响应恢复时间为180 s左右。由于重复性测试中设定通入空气

时间较短,传感器材料表面的CO分子未能完全脱附,所以出现传感器 R_a 有轻微的阻值降低的现象。



(a)—未掺杂的SnO₂和0.6%的Pt-SnO₂材料在不同工作温度下对浓度0.1% CO的响应;(b)—不同CO浓度下的电阻响应图;(c)—浓度0.03% CO的重复性测试图。

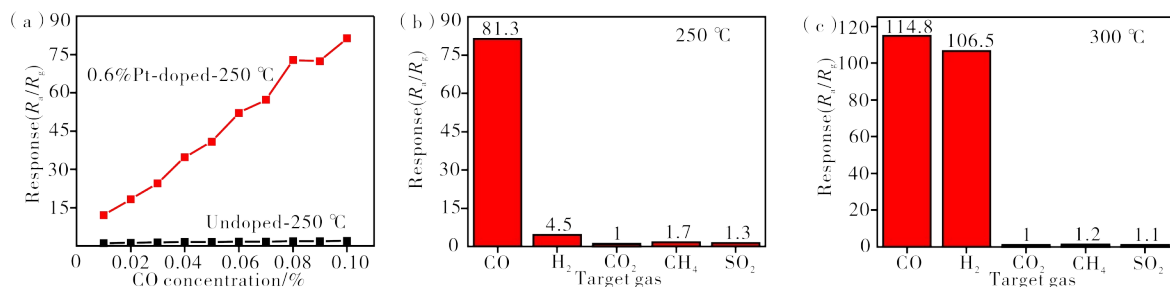
(a)—response of undoped SnO₂ and 0.6wt% Pt-SnO₂ materials to 0.1% carbon monoxide at different operating temperatures; (b)—resistance response curves at different CO concentrations; (c)—repeatability test plots for 0.03% carbon monoxide.

图9 传感器可靠性测试图

Figure 9 Sensor reliability test diagram

图10(a)为0.6%Pt-SnO₂与纯SnO₂制备的传感器在250℃下的CO响应对比图。从图10(a)可以看到,优化后的材料对CO浓度0.01%—0.1%的气体响应呈良好的线性度,当CO浓度为0.1%时最大响应为81.3,是纯SnO₂传感器响应(纯SnO₂传感器在CO浓度为0.1%的响应为2.38)近40倍。选择性性能通常可以定义为对CO和其他测试气体的响应比,高选择性半导体气体传感器要求选择性参数应大于3。图10(b)和(c)为传感器在250和300℃工作温度下对CO、H₂、CO₂和SO₂气体的选择性性能,其中测试气体浓度均为0.1%。从图10(b)和(c)可

见,在300℃下CO传感器器件相对于H₂、CO₂、CH₄、SO₂的选择性参数分别为1.1、107.9、94.5和100.2。说明,在300℃下器件对氢气不具备气体选择性的,而在250℃下CO传感器器件的选择性参数分别为18.0、78.1、47.9和60.5。由于Pt催化剂在高温下表面吸附的氧离子活性更高、同时Pt促进H₂分解为高活性的H原子,从而使氧离子与氢气容易反应,而在250℃下Pt催化活性使得材料只与CO反应^[9,25]。基于这样的标准,制备的CO传感器被证明在250℃下对CO具有高度选择性的。



(a)—纯SnO₂和0.6%Pt-SnO₂材料在250℃下不同CO浓度的响应;(b)—传感器在250℃下对H₂、CO₂、CH₄和SO₂的选择性性能测试;(c)—传感器300℃下对H₂、CO₂、CH₄和SO₂的选择性性能测试。

(a)—response of pure SnO₂ and 0.6% Pt-SnO₂ materials at different CO concentrations at 250℃; (b)—selective performance testing of sensors for H₂, CO₂, CH₄, and SO₂ at 250℃; (c)—selective performance testing of sensors for H₂, CO₂, CH₄, and SO₂ at 300℃.

图10 材料气敏性测试图

Figure 10 Sensor gas sensitivity test diagram

2.4 传感器的工作原理

氧气在大气环境下可吸附在半导体材料的表面,由于其氧化性会捕捉半导体材料内部的电子,成为带负电的O₂⁻, O⁻和O²⁻,从而使半导体材料中的电阻增大。其中,100℃以下多数为O₂⁻,温度升高到100—300℃以上时多数为O⁻,当温度升到350℃

以上则多数为O²⁻。一旦环境中存在还原性气体(如CO)出现,半导体材料与CO接触后,表面氧离子与CO会发生氧化还原反应,氧离子释放电子到半导体材料内部,导致半导体材料中载流子浓度增大,从而使电阻减小,通过对半导体材料电阻变化情况的检测即可实现对该还原性气体的检测^[24]。氧气与材料内部的电子及表面的氧离子发生氧化还原反

应,其反应式如下。图 11 为金属氧化物半导体传感器的工作原理图^[18]。

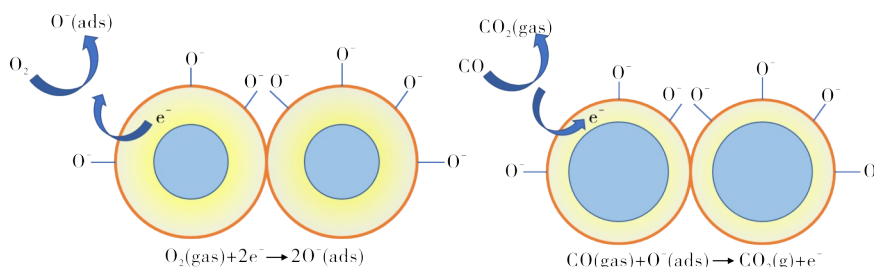
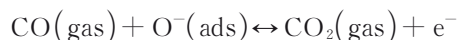
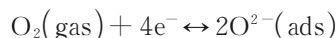
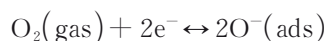
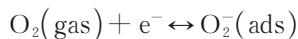


图 11 金属氧化物半导体 CO 传感器的传感机理

Figure 11 General sensing mechanism of metal oxide semiconductor CO sensors

贵金属的负载对 SnO_2 传感性能的影响通常通过两种机制来描述^[12,19],即电子增感^[20]和化学增感^[21]。图 12 为电子增敏原理和化学增敏原理示意图。关于电子增感,由于 Pt 的功函数大于 n 型 SnO_2 的功函数,电子将从 SnO_2 转移到 Pt 团簇,并且在金属和 SnO_2 的界面处形成肖特基势垒。在空气中,这种效应被吸收的氧放大,使 SnO_2 晶粒高度耗尽。由于 SnO_2 颗粒尺寸较小,并且传导通道的宽度减小,从而阻碍电子的传输,因此载流子浓度和迁移率均下降,材料电阻升高。在 CO 气氛中, SnO_2 -Pt 中的 Pt 团簇将与 CO 相互作用,导致其功函数降低^[14],电子被重新注入到 SnO_2 中并降低肖特基势垒高度,因

此 SnO_2 -Pt 的电阻率降低^[9]。Pt 的负载也会引起溢出效应。贵金属负载的化学增感主要是通过溢出效应发生的,这显著的促进了氧分子的离解,氧分子的原子产物随后会扩散到金属氧化物表面,从而使 SnO_2 材料表面上吸附的氧离子大大增加^[19]。因此,更多的电子从 SnO_2 转移到吸附的氧上,导致 SnO_2 纳米颗粒中的载流子浓度明显降低,导致 SnO_2 纳米颗粒表面耗尽层的有效增大和导电沟道的收缩,载流子迁移率在很大程度上降低。当暴露于 CO 气氛中时,表面 Pt 团簇催化 CO 的氧化^[22-23],导致被表面氧捕获的电子被释放并重新注入 SnO_2 纳米颗粒中,从而使得半导体材料电阻降低。

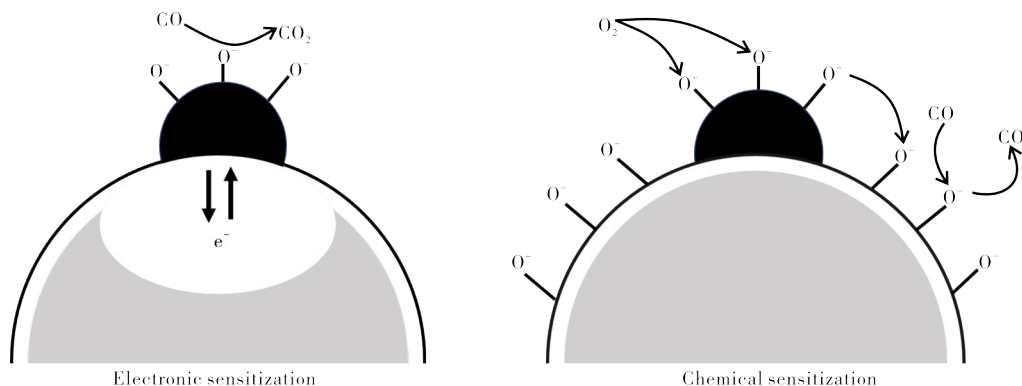


图 12 电子增敏原理和化学增敏原理示意图

Figure 12 Schematic diagram of the electronic sensitization and chemical sensitization principles

本文研制的气体传感器是由 Pt- SnO_2 体系作为 CO 气敏材料,将其制备成浆料后通过丝网印刷的方法制备而成的。其中,贵金属的负载采用浸渍法完成,并在工作中对其负载量、还原时间和还原温度这 3 个制备条件都进行了优化处理。因此,在 Pt 负载后,感测过程气体响应信号被放大,且具有良好的气体选择性。获得了具有高响应高选择性的 Pt- SnO_2 的 CO 传感器。

3 结论

通过将 Pt 负载到 SnO_2 纳米颗粒中,制备了具有高响应和高选择性的 CO 气体传感器。研究中发现,还原温度、还原时间、Pt 负载量对 Pt- SnO_2 传感器的传感性能都有重要的影响。通过浸渍法在 SnO_2 纳米颗粒中负载 0.6% Pt,并在 550 °C 的还原气氛条件下烧结 30 min 后得到复合材料 Pt- SnO_2 ,将该材料制备成传感器后,能够在 250 °C 下对 0.1%

CO的最高响应达到81.3。同时,分析了CO传感的机理,表明Pt-SnO₂复合材料增强的传感响应可以归因于肖特基势垒的形成和Pt的催化能力。Pt-SnO₂材料体系具有成为高响应度和高选择性的CO复合材料的潜力。

参考文献:

- [1] YU M R, WU R J, CHAVALI M. Effect of Pt loading in ZnO-CuO hetero-junction material sensing carbon monoxide at room temperature [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 153(2): 321-328.
- [2] CHOI U S, SAKAI G, SHIMANO K, et al. Sensing properties of SnO₂-Co₃O₄ composites to CO and H₂ [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2004, 98(2-3): 166-173.
- [3] GONG H, HU J Q, WANG J H, et al. Nano-crystalline Cu-doped ZnO thin film gas sensor for CO [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, 115(1): 247-251.
- [4] HÜBNER M, SIMION C E, HAENSCH A, et al. CO sensing mechanism with WO₃ based gas sensors [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 151(1): 103-106.
- [5] LIM S K, HWANG S H, CHANG D, et al. Preparation of mesoporous In₂O₃ nanofibers by electrospinning and their application as a CO gas sensor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 149(1): 28-33.
- [6] SCHWEBEL T, FLEISCHER M, MEIXNER H, et al. CO-sensor for domestic use based on high temperature stable Ga₂O₃ thin films [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1998, 49(1-2): 46-51.
- [7] STARKE T K H, COLES G S V. Laser-ablated nanocrystalline SnO₂ material for low-level CO detection [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2003, 88(3): 227-233.
- [8] YU Y T, DUTTA P. Examination of Au/SnO₂ core-shell architecture nanoparticle for low temperature gas sensing applications [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 157(2): 444-449.
- [9] WANG K, ZHAO T, LIAN G, et al. Room temperature CO sensor fabricated from Pt-loaded SnO₂ porous nanosolid [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 184: 33-39.
- [10] KOROTCENKOV G. The role of morphology and crystallographic structure of metal oxides in response of conductometric-type gas sensors [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2008, 61(1-6): 1-39.
- [11] KANG K S, LEE S P. CO gas sensors operating at room temperature [J]. *Journal of materials science*, 2003, 38: 4319-4323.
- [12] YAMAZOE N, KUROKAWA Y, SEIYAMA T. Effects of additives on semiconductor gas sensors [J]. *Sensors and Actuators*, 1983, 4: 283-289.
- [13] YAMAURA H, TAMAKI J, MORIYA K, et al. Highly selective CO sensor using indium oxide doubly promoted by cobalt oxide and gold [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1997, 144(6): L158.
- [14] HENSHAW G S, RIDLEY R, WILLIAMS D E. Room-temperature response of platinised tin dioxide gas-sensitive resistors [J]. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, 1996, 92(18): 3411-3417.
- [15] CHOI S W, KIM S S. Room temperature CO sensing of selectively grown networked ZnO nanowires by Pd nanodot functionalization [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 168: 8-13.
- [16] LAI H Y, CHEN C H. Highly sensitive room-temperature CO gas sensors: Pt and Pd nanoparticle-decorated In₂O₃ flower-like nanobundles [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(26): 13204-13208.
- [17] GAO, YUAN, SUN, et al. Reduced graphene oxide/alpha-Fe₂O₃ composite nanofibers for application in gas sensors [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2017, 244: 233-242.
- [18] BARSAN N, WEIMAR U. Conduction model of metal oxide gas sensors [J]. *Journal of Electroceramics*, 2001, 7: 143-167.
- [19] YAMAZOE N. New approaches for improving semiconductor gas sensors [J]. *Sensors and actuators B: Chemical*, 1991, 5(1-4): 7-19.
- [20] MCALEER J F, MOSELEY P T, NORRIS J O W, et al. Tin dioxide gas sensors. Part 2—The role of surface additives [J]. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 1988, 84(2): 441-457.
- [21] CONNER JR W C, FALCONER J L. Spillover in heterogeneous catalysis [J]. *Chemical Reviews*, 1995, 95(3): 759-788.
- [22] BOULAHOUACHE A, KONS G, LINTZ H G, et al. Oxidation of carbon monoxide on platinum-tin dioxide catalysts at low temperatures [J]. *Applied Catalysis A: General*, 1992, 91(2): 115-123.
- [23] GRASS K, LINTZ H G. The kinetics of carbon monoxide oxidation on tin (IV) oxide supported platinum catalysts [J]. *Journal of catalysis*, 1997, 172(2): 446-452.
- [24] 陈文, 周鹏, 郭鲤, 等. TiO₂纳米管阵列气敏性能研究进展 [J]. *材料研究与应用*, 2020, 14(1): 7.
- [25] NIE S, LI J, TAO L, et al. Insights into selective mechanism of NiO-TiO₂ heterojunction to H₂ and CO [J]. *ACS Sensors*, 2023, 8(11): 4121-4131.

Highly Selective CO Gas Sensor Based on Pt Modified SnO₂ Nanoparticles

HUO Liancan, LI Guoliang, WU Canfeng, YAO Yingbang*

(School of Integrated Circuits, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This study utilized an impregnation method to load Pt onto the surface of SnO₂ nanoparticles, optimizing process parameters including reduction temperature, reduction time, and loading amount. The results indicated that the Pt-SnO₂ composite material, with a reduction temperature of 550 °C, a reduction time of 30 minutes, and a loading amount of 0.6%, demonstrated the best performance. The CO sensor, prepared by converting the material into a slurry and using screen printing, showed a response (R_a/R_g , where R_a is the resistance in air and R_g is the resistance in CO) of 81.263 to 0.1% carbon monoxide gas at an operating temperature of 250 °C, which is nearly 40 times higher than the response (2.38) of a pure SnO₂ gas sensor. Furthermore, the Pt-SnO₂ sensor exhibited excellent linearity within the 0.01% to 0.1% range of carbon monoxide and demonstrated strong CO selectivity against H₂, CO₂, CH₄, and SO₂. The enhancement in CO sensing performance due to Pt loading can be attributed to the synergistic effects of the overflow mechanism (chemical sensitization) and the Schottky barrier (electronic sensitization). This research confirms the feasibility of using Pt-SnO₂ materials for high-performance CO sensors.

Keywords: immersion method; screen printing method; Pt-SnO₂ composite material; CO sensor; CO selectivity; linearity response; CO detection; sensor performance

(学术编辑:孙文)