

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0609

Pt 原子修饰棒状二氧化锡的制备及其氢气敏感性能

徐甲强^{1,2}, 贾欣^{1,2}, 张子旋^{1,2}

(1.上海大学 理学院, 上海 200444; 2.上海大学 新能源与传感技术实验室, 上海 200444)

摘要: 采用一步水热法合成了纳米棒组成的 SnO₂ 纳米花, 并用高温还原法合成了不同分散状态的 Pt-SnO₂ 复合材料。采用 XRD、HRTEM 和 XPS 等表征技术对 Pt 原子在复合材料表面的分散状态进行了解析。将复合材料构建为 MEMS 气体传感器并评估了其氢敏性能, 结果显示原子级分散的 Pt atm-SnO₂ 材料氢敏性能最佳, 其最佳工作温度为 250 °C, 从纯相 SnO₂ 的 310 °C 降低了 60 °C, 在最佳工作温度下对氢气的检测限低达 5×10^{-6} , 对 200×10^{-6} 体积分数氢气的响应值为 3.81, 且响应时间为 7.2 s, 恢复时间为 4.8 s。相比于纯相的 SnO₂ 和 Pt NPs (纳米颗粒)-SnO₂, 该复合材料在检测限、氢气响应值、响应时间和恢复时间等方面均有显著的改善。

关键词: 棒状 SnO₂; 贵金属修饰; 氢气传感器; Pt 单原子

中图分类号: X834

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 06-0022-09

氢能作为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源, 其全球市场规模预计将在 2030 年突破千亿美元^[1]。然而, 氢气具有较低的爆炸限 (体积分数 4%) 和 -253 °C 液化储存特性, 在新能源电池、航天燃料加注及化工生产等场景中极易因微量泄漏引发重大安全事故^[2-3]。美国能源部统计显示, 氢气相关事故中 80% 源于早期浓度检测失效^[4]。因此开发高性能氢气传感器对保障氢能产业链安全具有关键作用, 已成为国际能源安全领域的重要研究方向。

目前氢气检测的主要方法有气相色谱法、光谱法、电化学法和催化燃烧传感法等, 这些方法往往存在成本高、功耗大和响应时间长等缺点^[5-6]。以金属氧化物半导体 (MOS) 为基础的半导体式气体传感器因成本低、体积小、测试时间短等优势已得到广泛研究^[7-9]。二氧化锡 (SnO₂) 作为 n 型宽禁带半导体 ($E_g=3.6$ eV) 的代表之一, 其氧空位和表面酸性位点为氢气氧化反应提供了理想载体^[10]。然而, 纯相 SnO₂ 材料的本征特性存在两大缺陷, 即表面羟基化导致载流子迁移率下降以及因室温电阻率较大和氢气吸附能垒大而需要对反应活性

位点进行高温激发。近年来, 贵金属修饰/掺杂已被证明是提升气敏性能的有效措施之一。Liu 等^[11]通过静电纺丝构建了 Co-SnO₂ 纳米纤维, 在 330 °C 下对 100×10^{-6} 体积分数氢气的响应值为 24。而贵金属 (Pt、Pd、Au) 纳米颗粒的表面等离子体共振效应与催化溢流作用大大改进了半导体气敏材料的性能^[12-15]。相较于易硫化的 Pd (中毒体积分数 $< 50 \times 10^{-6}$) 和 CO 吸附强的 Au, Pt 原子在氢气解离中表现出独特优势: (1) 功函数差 (Pt 5.65 eV, SnO₂ 4.50 eV) 促进界面肖特基势垒形成与调控, 使电子转移效率提升 3 倍; (2) Pt 纳米颗粒的 (111) 晶面暴露可以使氢气解离活化能降低至 0.35 eV。

综上所述, 本文通过水热法合成了由纳米棒组装的 SnO₂ 纳米花, 并用一步高温还原法在 SnO₂ 的表面修饰了不同原子分散状态的 Pt, 探究了不同分散状态的 Pt 对载体 SnO₂ 气敏性能的影响, 最终分析了其气敏机理。结果表明, 原子级分散 Pt 修饰的 SnO₂ 通过构建肖特基势垒和增加活性位点, 在提升氢气响应值的同时, 显著降低了工作温度, 是一种非常有应用前景的氢气传感材料。

收稿日期: 2025-06-08

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金 (62401349, 62271299)

第一作者: 徐甲强, 博士/教授, 主要研究方向为纳米材料化学与智能传感器。E-mail: xujiaqiang@shu.edu.cn

1 实验部分

1.1 棒状 SnO₂ 的制备

首先,将 0.5259 g 五水氯化锡 (SnCl₄·5H₂O) 加入 20 mL 0.81 mol/L 的氢氧化钠 (NaOH) 溶液中,磁力搅拌 10 min 将白色晶体完全溶解。随后,将 20 mL 的乙醇加入混合溶液中,继续搅拌 15 min 后得到白色浑浊液。随后将白色浑浊溶液放入高压反应釜 (100 mL) 中,在 200 °C 的温度下保温 48 h。反应结束后,自然冷却至室温,将反应釜中的白色沉淀物通过离心收集,并用去离子水和乙醇多次清洗干净,然后在 60 °C 下干燥,得到白色粉末。

1.2 Pt 修饰棒状 SnO₂ 的制备

为制备 Pt 修饰的 SnO₂,将上述制备的 100 mg 花状 SnO₂ 纳米棒超声分散到 20 mL 乙醇和 20 mL 去离子水混合溶液中,超声分散 10 min 形成悬浮液。随后,用微量进样器以 0.1 mL/h 的速度将 1 mL 乙酰丙酮铂溶液 (1 mg/L) 均匀注入分散液中。在室温下将混合溶液磁力搅拌 24 h 后,通过离心收集沉淀物。干燥后,将固体粉末均匀地放置在瓷舟中,在管式炉中以 2 °C/min 的速率加热,在 300 °C 下保温 2 h,等样品自然冷却至室温。所得材料标记为 Pt atm-SnO₂。

1.3 Pt 纳米颗粒修饰棒状 SnO₂ 的制备

前部分实验过程与 1.2 节相同。为制备 Pt 纳米颗粒修饰的 SnO₂,将离心收集的固体沉淀物干燥后转移到瓷舟中,在管式炉中通空气并以 2 °C/min 的加热速率升温至 800 °C 后保温 2 h,随后样品自然冷却至室温。所得材料标记为 Pt NPs-SnO₂。

1.4 表征与分析

利用扫描电子显微镜 (SEM, Zeiss Gemini Sigma 300)、透射电子显微镜 (TEM, JEM-2100F) 对 SnO₂、Pt atm-SnO₂ 和 Pt NPs-SnO₂ 样品的微观形貌结构进行观察与分析。利用 X 射线衍射仪 (XRD, Rigaku D/MAX-2500) 分析 3 种样品的晶体结构,与标准的 PDF 卡片进行对照确定样品的物相。通过能量色散 X 射线谱仪 (EDS, Oxford Xplore 30) 确定样品的元素组成与分布状态。利用 X 射线光电子能谱 (XPS, ESCALAB 250Xi) 对 Pt atm-SnO₂ 样品表面元素的化学状态进行分析,进一步确定样品的元素组成与价态。利用球差校正

电镜 (HAADF-STEM, JEM-ARM300F) 对 Pt atm-SnO₂ 样品表面 Pt 原子的分布状态进行分析。

1.5 气敏器件的制备及性能测试

对样品的气敏性能测试采用 MEMS 芯片,其制备过程如下:称取 5 mg 样品并放入玛瑙研钵中,加入 1 mL 的乙醇和 1 mL 的去离子水,混合研磨至乳浊液状态;然后将研磨好的浆料用毛笔均匀地刷涂到叉指电极上,在真空干燥箱中 70 °C 下干燥 24 h,以保证其在电极表面形成均匀的气敏薄膜;接着将覆有敏感材料的 MEMS 器件放置于老化台上,在 300 °C 下老化 12 h。采用便携式 MEMS 智能气敏测试仪 (LP-002A, 上海灵磐电子科技有限公司) 在恒温恒湿测试室中完成对样品的所有测试。在气敏测试中,样品的气敏响应定义为 $S=R_a/R_g$ (其中, R_a 为样品在空气中的电阻, R_g 为样品在测试气氛中的电阻)。目标气体的体积分数采用静态配气法计算而成,当材料的基线电阻保持稳定后,将已知体积分数的气体注入到固定体积 (200 mL) 的测试仪腔体当中,测试腔内气体的体积分数为 $C_x=C \cdot V_x/200$,其中, C 为标准气袋中气体的体积分数, V_x 为微量注射器从气袋中抽取的气体体积。样品的响应/恢复时间是指 MEMS 传感器在目标气体注入/离开测试腔的过程中,响应值达到最终平衡值 90% 时所用的时间。

2 结果与分析

2.1 样品的物相分析

图 1 (a) ~ (c) 为 Pt/SnO₂ 的形貌结构演变示意图。在 SnCl₄·5H₂O 与 NaOH 的混合过程中,澄清的溶液逐渐变浑浊,推测是小颗粒的 SnO₂·xH₂O 逐渐生成。接着在 200 °C 水热条件下,由于 SnO₂ 纳米棒在乙醇与水的混合溶剂中表面电荷分布不均,静电作用促使它们通过吸引/排斥进行自组装,因此 SnO₂ 晶体以径向聚集生长模式形成特殊的棒状纳米花结构。吸附在 SnO₂ 表面的乙酰丙酮铂在不同的煅烧温度下,分别以原子分散 Pt 修饰 SnO₂ 材料 (Pt atm-SnO₂) 和 Pt 纳米颗粒修饰 SnO₂ 材料 (Pt NPs-SnO₂) 的形式生成。图 1 (d) 为所制备 SnO₂ 材料的 SEM 图像,由图像可见,SnO₂ 形成了径向聚集的棒状纳米花结构,单根纳米棒的长度为 400~800 nm,直径为 100~150 nm。从图 1 (e) ~

(f) 可见, Pt atm-SnO₂ 和 Pt NPs-SnO₂ 材料的形貌均为纳米棒组成的纳米花, 与纯相 SnO₂ 的 SEM 图像并无明显差别, 可知 Pt 修饰对材料的形貌并没有影响。所制备材料的 XRD 图谱如图 1 (g)~(i) 所示, 可以看出所有 SnO₂ 材料的衍射峰均可归属为四方金红石结构, 与标准卡片 JCPDS#41-1445

完全一致。其晶格常数为 $a=b=0.474$ nm, $c=0.319$ nm。图 1 (h)~(i) 的图谱中并没有明显出现 Pt(111) 的晶面, 可能是 Pt 的负载量较少所致, Pt 的成功修饰可从后续的 XPS 图谱与 Mapping 图像中进一步确认。

图 2 所示是 Pt atm-SnO₂ 样品的 XPS 能谱。

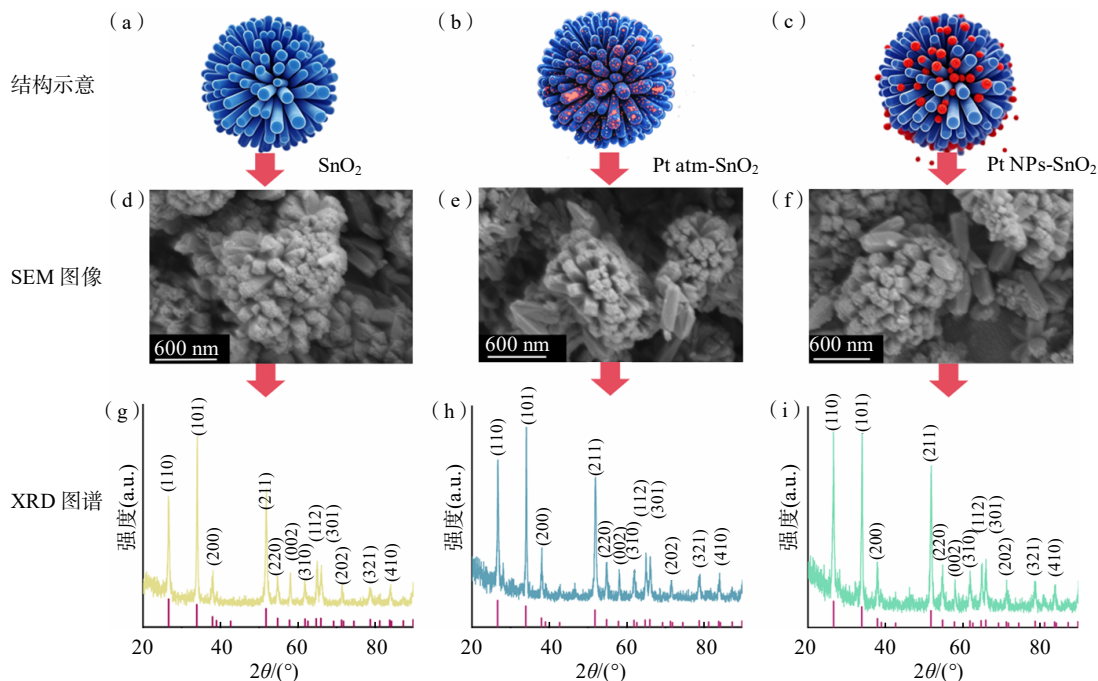


图 1 SnO₂、Pt atm-SnO₂、Pt NPs-SnO₂ 的结构示意图、SEM 图像与 XRD 图谱

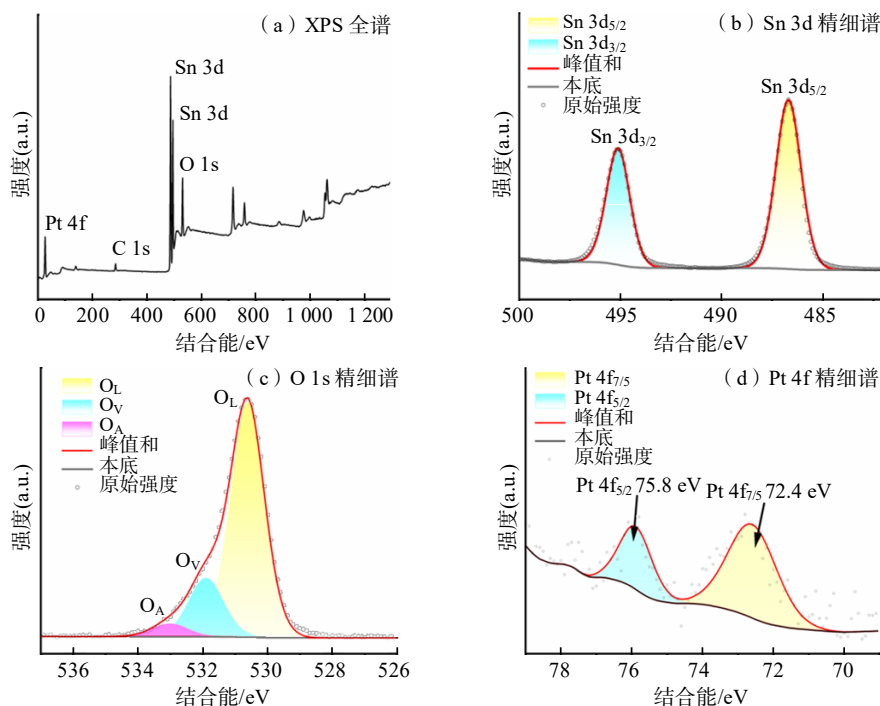


图 2 Pt atm-SnO₂ 的 XPS 全谱和 Sn 3d、O 1s、Pt 4f 精细谱

如图 2 (a) 所示, Pt atm-SnO₂ 样品中存在着锡、氧、铂 3 种元素。图 2 (b) 出现的 495.2 和 486.6 eV 处的尖峰对应于 Sn 的 3d_{3/2} 和 3d_{5/2} 能级。样品的 O 1s 高分辨分峰如图 2 (c) 所示, 530.7 eV 处的峰代表晶格氧, 531.9 eV 处的峰代表空位氧, 而 533.1 eV 处的峰属于化学吸附氧。化学吸附氧的含量可能与该材料优异的气敏性能密切相关。对图 2 (d) 的分析可以得出, Pt 在 75.8 和 72.4 eV 的位置有两个峰, 该峰的价态位于 Pt⁰ 与 Pt⁴⁺ 之间。XPS 的图谱证实 Pt 的成功修饰, 并且 Pt 是以原子态的配位结构修饰在 SnO₂ 材料的表面。

2.2 样品的形貌分析

图 3 (a) 为 Pt atm-SnO₂ 样品的 HAADF-STEM 图像, 从图中可以看出 SnO₂ 载体的表面存在着孤立的亮斑 (圆圈圈出), 从而证实了样品中 Pt 原子的单分散。图 3 (b) 展示了 Pt atm-SnO₂ 样品的 TEM 图像, 从图中可以清晰地观察到, 所获得的 SnO₂ 纳米棒为四方晶相, 自组装形成花状结构, 其长度和直径分别为 400~800 nm 和 100~150 nm (图 3 (a)), 且纳米棒的表面光滑。如图 3 (c) 所示, Pt atm-SnO₂ 纳米棒显示出良好的晶格条纹, 测得晶面间距约为 0.335 nm, 与 SnO₂ 的 (110) 晶面间距完全吻合。这表明样品的主要暴露晶面为 (110), 并且未在 SnO₂ 表面观察到别的相。从 EDS-mapping 图像 (图 3 (d)) 中可以进一步印证 Pt atm-SnO₂ 样品的主要组成元素为 Sn、O、Pt, 推测 Pt 以单原子配位的形式修饰在 SnO₂ 的表面, 因此未观察到 Pt 或 PtO₂ 的单金属相。

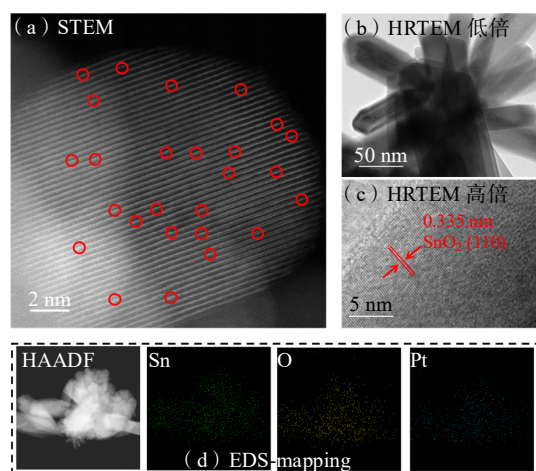


图 3 Pt atm-SnO₂ 的 STEM、HRTEM 和 EDS-mapping 图像

图 4 为 Pt NPs-SnO₂ 材料的透射电子显微镜图像。从图 4 (a) 可以看出, Pt NPs-SnO₂ 的 SnO₂ 主体结构 with Pt atm-SnO₂ 相似, 均为棒状纳米花结构, 但是表面要比 Pt-SnO₂ 材料更为粗糙。从图 4 (b) 可以看出, Pt NPs-SnO₂ 材料除具有 0.335 nm 的 SnO₂ (110) 晶面间距外, 还出现了晶面间距为 0.226 nm 的 Pt 金属相。0.226 nm 与 Pt 金属的 (111) 晶面间距相吻合, 说明 Pt 金属以颗粒的形式修饰在 SnO₂ 纳米棒的表面 (白色线圈内)。通过 EDS-mapping 分析 (图 4 (c)) 可以进一步确认 Sn、O 和 Pt 元素在 Pt NPs-SnO₂ 材料上的分布。

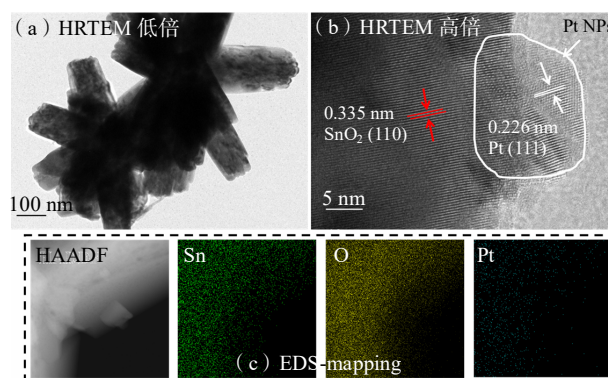


图 4 Pt NPs-SnO₂ 的 HRTEM 和 EDS-mapping 图像

2.3 样品的气敏性能测试

对不同样品进行气敏性能测试, 相关器件与材料的制备过程如图 5 (a) 所示, 具体的性能测试均在上海灵磐电子科技有限公司研发的便携式 MEMS 气体测试仪上完成 (图 5 (b) ~ (e))。为获得样品的最佳工作温度, 在 200~350 °C 范围内测试了纯 SnO₂、Pt atm-SnO₂ 与 Pt NPs-SnO₂ 对 200×10⁻⁶ 体积分数 H₂ 的气敏性能, 结果如图 6 (a) 所示。3 种样品均表现出气敏响应随着工作温度先增大后减小的山峰状曲线, 这是由于在低温下材料表面对气体的吸附和活化不足, 随着温度的升高, 气体吸附逐渐达到饱和且反应活性增大, 因此响应值逐渐增大; 而到达最佳工作温度后, 气体吸附与反应的速率达到动态平衡, 再升高温度吸附的气体分子因热运动的加剧而脱附, 因此响应值下降。Pt atm-SnO₂ 的最佳工作温度远低于其他两种传感器, 为 250 °C, 而纯相 SnO₂ 的最佳工作温度为 310 °C, Pt NPs-SnO₂ 的最佳工作温度为 290 °C。由此可见, Pt atm 的修饰能够显著降低传感器的工作温度, 这

是因为 Pt atm 的修饰可有效降低气敏反应所需的活化能。Pt atm-SnO₂ 材料具有最低的最佳工作温度, 且对 200×10^{-6} 体积分数 H₂ 也有最高的响应值 ($R_a/R_g=3.81$), 比 Pt NPs-SnO₂ ($R_a/R_g=1.63$) 和 SnO₂ ($R_a/R_g=1.41$) 高出 1 倍以上。图 6 (b) 所示为 3 种样品在不同温度下的电阻。从图中可以看出, 与纯相 SnO₂ 相比, Pt 的加入使得材料的电阻大幅增

加, 且 Pt NPs-SnO₂ 的电阻增加最大。因为 Pt 原子可以与 SnO₂ 表面形成肖特基势垒, 电子从 SnO₂ 转移至 Pt 金属上, 使得吸附氧增多, 电子耗尽层范围变大, 进而导致基线电阻上升。而 Pt NPs-SnO₂ 材料中的 Pt 在经过 800 °C 高温下煅烧后, Pt 原子聚集成为较大的纳米颗粒, 成为电子散射中心, 降低了 SnO₂ 载流子的迁移率, 使得电阻进一步增大。

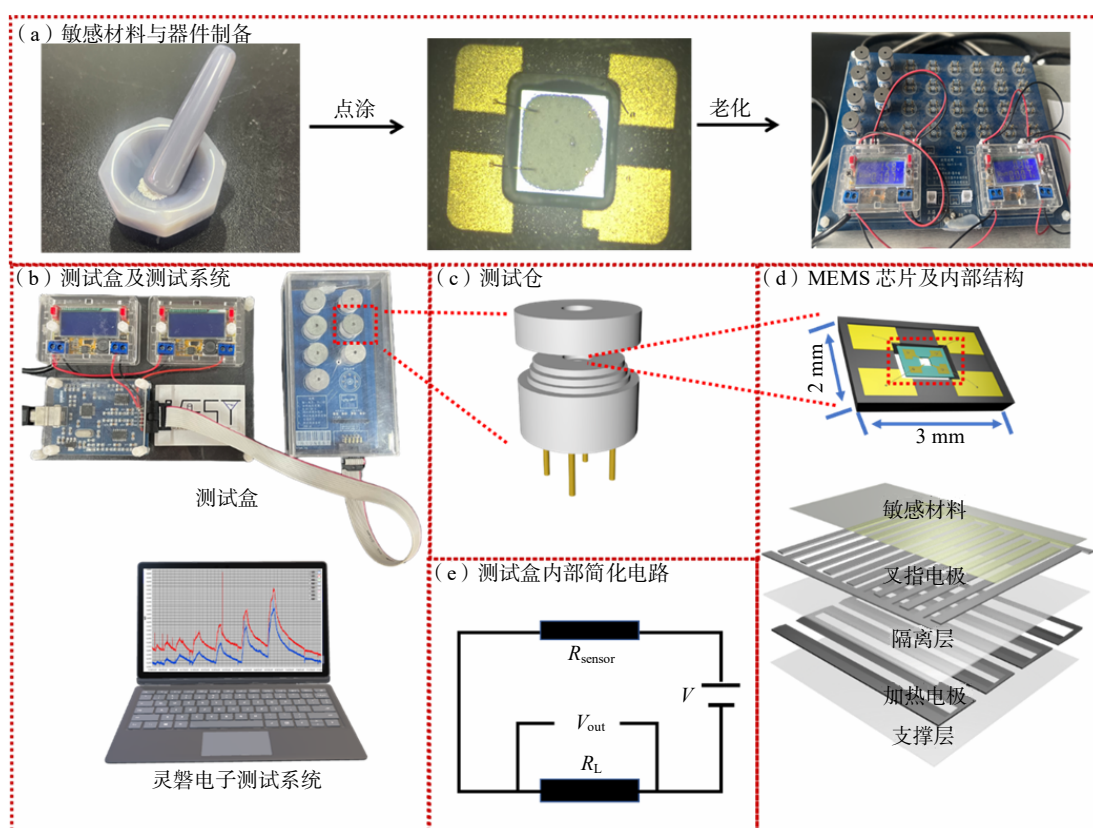


图 5 敏感材料与器件制备及便携式 MEMS 气体测试仪

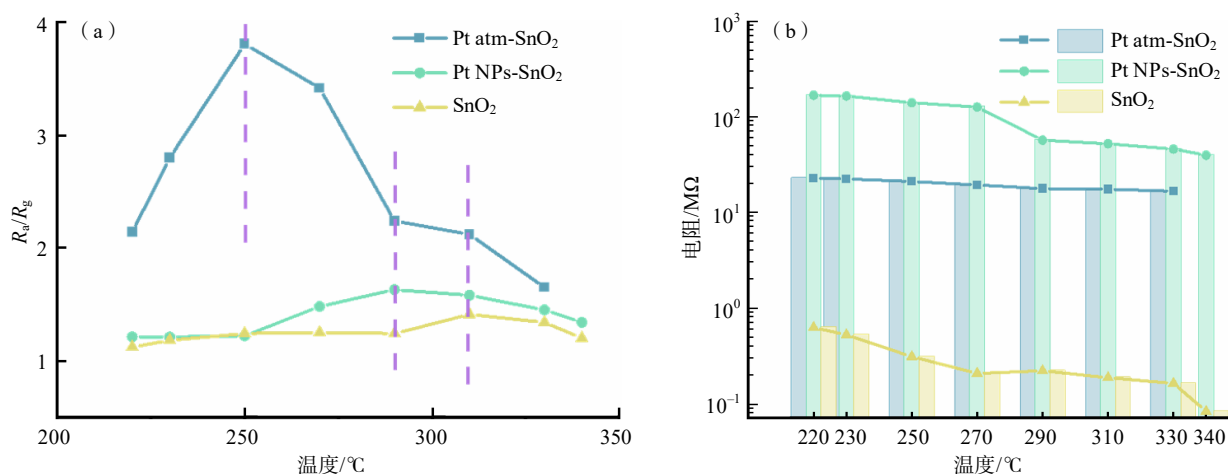


图 6 3 种样品在不同温度下对 200×10^{-6} 体积分数氢气的响应和电阻

为进一步研究 Pt 对 SnO_2 材料气敏性能的影响, 3 种材料分别在各自的最佳工作温度下进行了气体体积分数梯度测试。连续对 200×10^{-6} 、 400×10^{-6} 、 600×10^{-6} 、 800×10^{-6} 、 1000×10^{-6} 体积分数梯度的 H_2 进行测量, 得到的曲线如图 7 所示。Pt atm- SnO_2 、Pt NPs- SnO_2 、 SnO_2 传感器对 1000×10^{-6} 氢气的响应值分别为 12.4、3.1 和 2.7, 可见 Pt atm- SnO_2 材料对氢气的气敏性能相较于其他两种材料有显著的提高。从图 7 (b、d、f) 的对比可以看出, 3 种材料在最佳工作温度下对 200×10^{-6} 体积分数氢气的恢复时间中, Pt atm- SnO_2 的恢复时间最短, 体现出其优越的传感性能。图 8 为 3 种材料的氢气响应随不同体积分数氢气变化的线性拟合曲线, 从图中可以分析出, Pt atm- SnO_2 材料的灵敏度最高, 约为 0.01187, 是 Pt NPs- SnO_2 材料的 5 倍, 是纯相 SnO_2 传感器的 10 倍, 进一步体现了 Pt atm- SnO_2 传感器性能的优越。

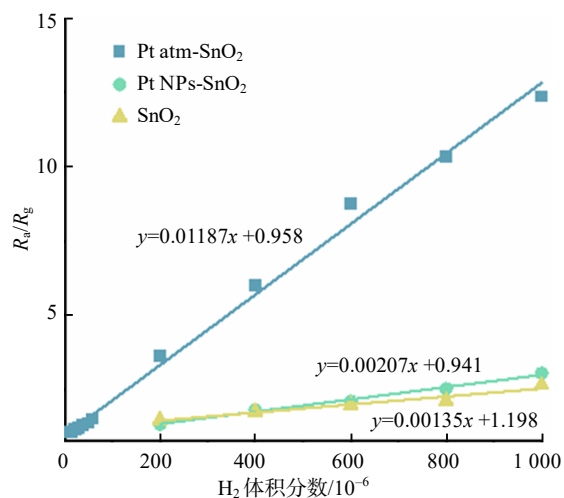


图 8 样品对不同体积分数氢气响应的线性拟合

图 9 (a) 是对 Pt atm- SnO_2 在 5×10^{-6} ~ 60×10^{-6} 范围内进行的低体积分数 H_2 梯度测试, 可见材料对低体积分数的氢气也有良好的响应, 并且实验室的检测限低至 5×10^{-6} 。从图 9 (b) 的拟合曲线可

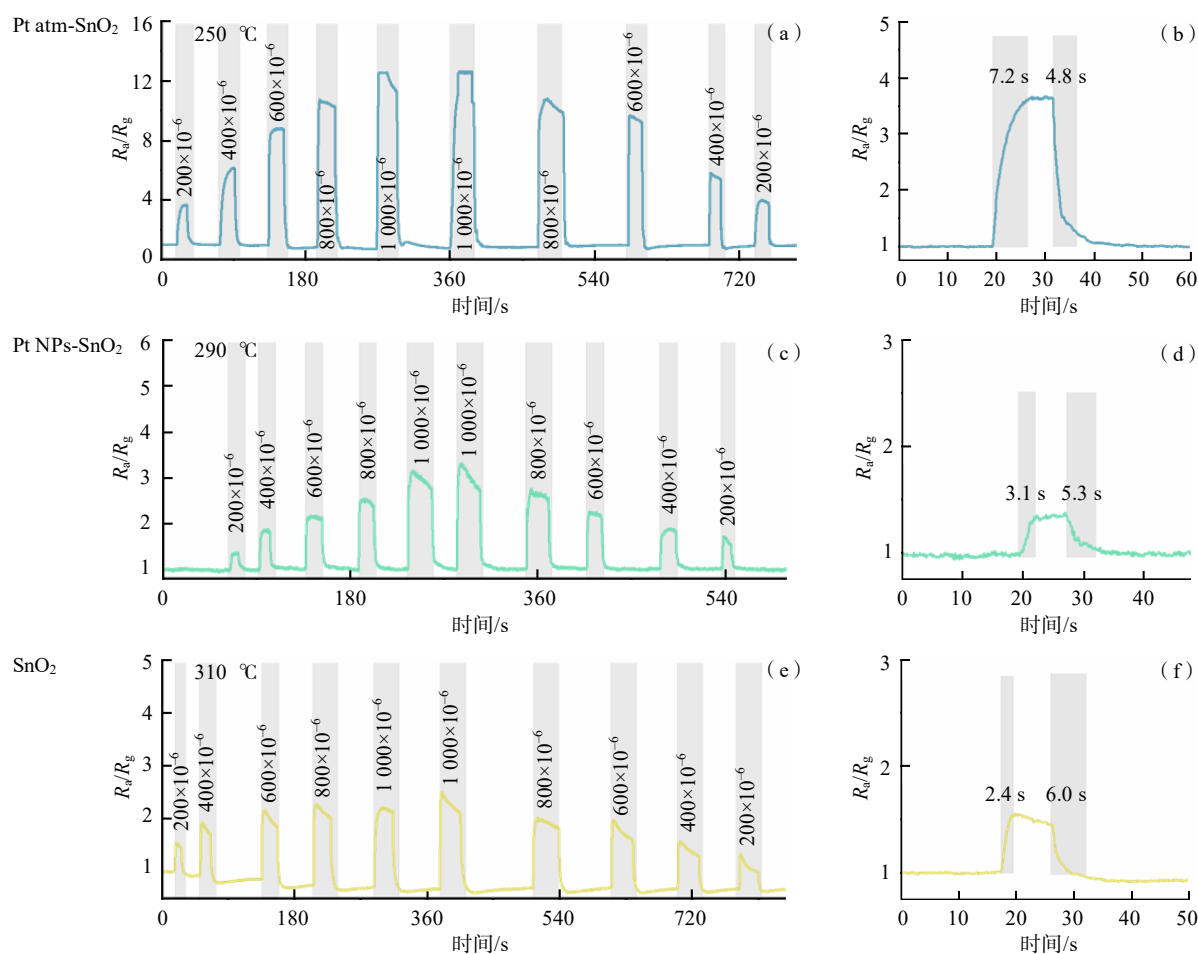


图 7 Pt atm- SnO_2 、Pt NPs- SnO_2 、 SnO_2 对不同体积分数 H_2 的动态响应曲线

看出, Pt-SnO₂ 材料在低体积分数 H₂ 下的响应值和气体体积分数依然保持良好的线性关系, 更加展现了 Pt atm-SnO₂ 传感器优越的氢气传感性能。图 9 (c) 是 Pt atm-SnO₂ 对 800×10⁻⁶ 体积分数氢气的短期重复性测试, 从图中 8 个循环可以看出传感器对同体积分数氢气具有良好的重复性。图 9 (d) 是 30 d 内 Pt atm-SnO₂ 传感器的长期稳定性测试结果, 体现了传感器优异的稳定性及良好的应用前景。

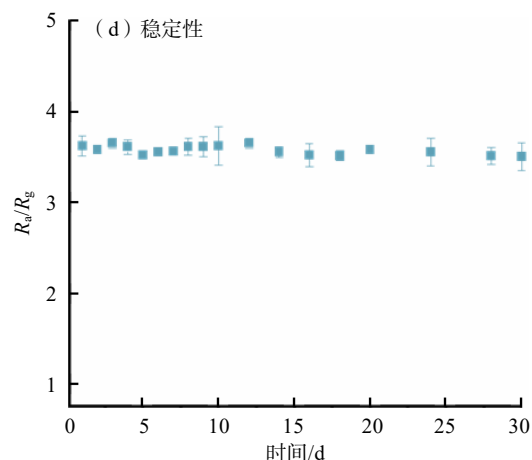
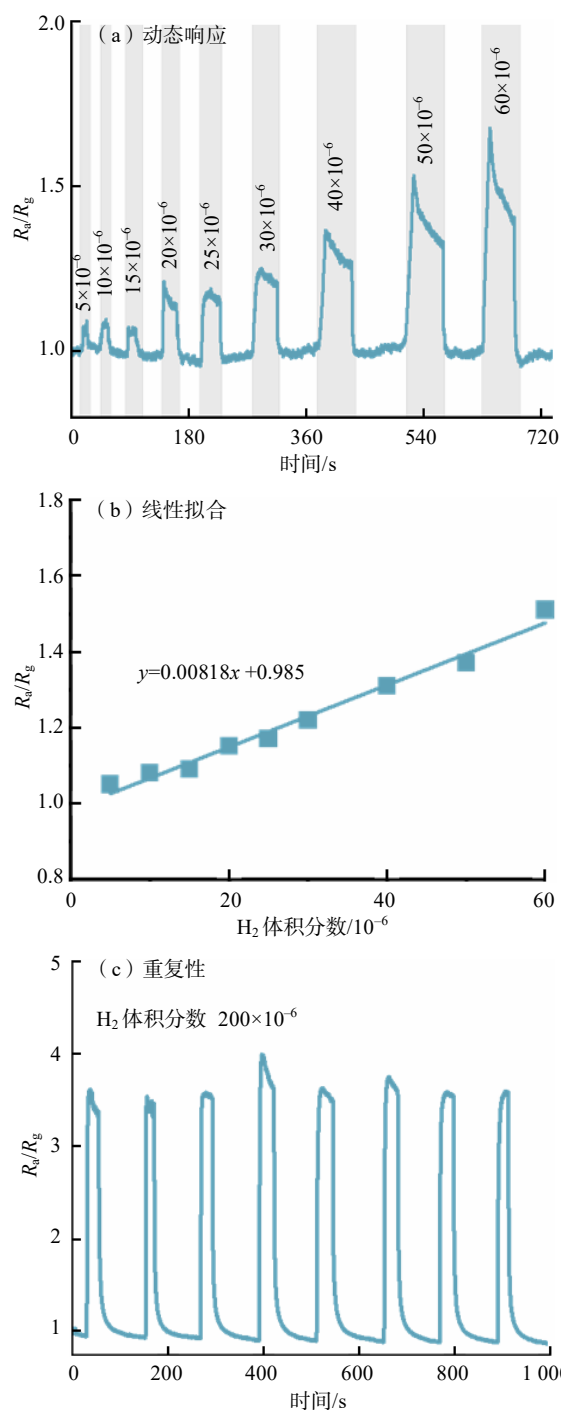


图 9 Pt atm-SnO₂ 在低 H₂ 体积分数下的动态响应、线性拟合及短期重复性和 30 d 稳定性测试结果

2.4 气敏机理分析

金属氧化物半导体气体传感器气敏过程主要分为表面吸附、表面反应和脱附。SnO₂ 为 n 型半导体, 其载流子为电子。如图 10 所示, 当 SnO₂ 暴露在空气中时会吸附空气中的氧气, 被吸附在材料表面的氧气在一定温度下会夺取 SnO₂ 导带的电子, 形成不同种类的氧负离子 (O₂⁻、O²⁻、O⁻ 等), 氧负离子的种类取决于工作温度, 当 Pt-SnO₂ 复合材料处于最佳工作温度 (250 ℃) 时, 吸附氧的种类为 O_{2ads}⁻, 不同温度下的吸氧反应为

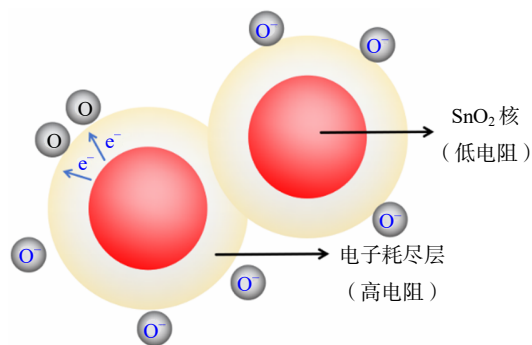
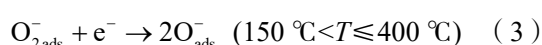
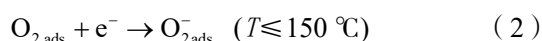
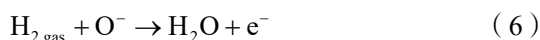


图 10 SnO₂ 吸附氧机理示意图

当 SnO₂ 与 H₂ 接触时, 电离氧阴离子参与氧化还原反应, 剩余电子注入半导体核心, 导致传感器电阻随氢气体积分数的增加而降低。而 H₂ 则与氧阴离子反应生成水。此时发生的反应为



当 Pt 原子负载到 SnO_2 表面时, Pt 和 SnO_2 在界面处将形成肖特基接触, 电子从 SnO_2 的导带向 Pt 原子移动, 以均衡费米能级。在这一过程中, 电子耗尽层增大, 且体系中的电子向 Pt 原子聚集, 促进氧气分子解离为氧阴离子, 进而提升氧阴离子与 H_2 的反应速率, 并提升响应强度。

遵循阿伦尼乌斯公式, 根据样品在不同温度下的响应恢复曲线, 分别计算了 SnO_2 、Pt atm- SnO_2 和 Pt NPs- SnO_2 的活化能,

$$k_{\text{des}} = A \cdot e^{-E_a/(RT)} \quad (7)$$

式中: k_{des} 为恢复常数速率 ($1/t_{\text{des}}$); E_a 为活化能; $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 为气体常数; T 为绝对温度, K; A 为指前因子。结果如图 11 所示, 未修饰的 SnO_2 的活化能最高为 21.2 kJ/mol , 而 Pt atm- SnO_2 的活化能为 14.8 kJ/mol , 与 SnO_2 和 Pt NPs- SnO_2 相比有所降低。因此证明 Pt 单原子的修饰可以降低气敏反应的活化能, 可以将传感器的最佳工作温度从 310°C 降低到 250°C 。

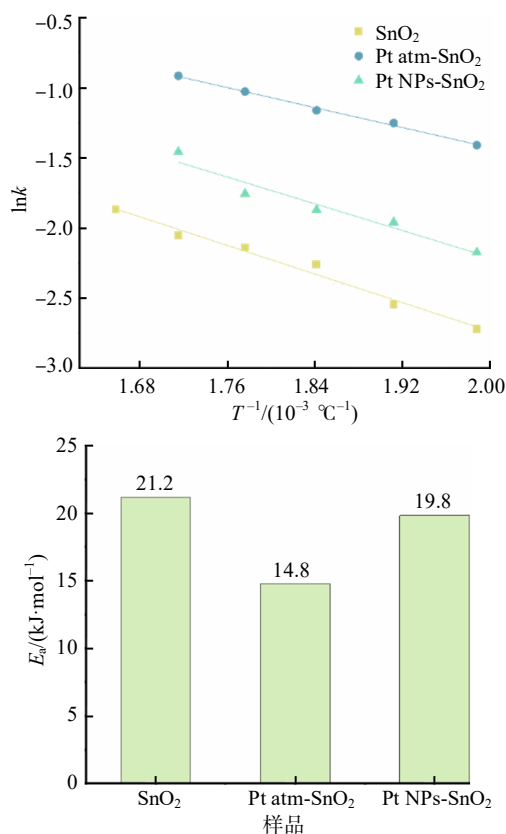


图 11 3 种样品的活化能计算曲线及活化能

3 结论

通过水热法制备了纳米棒组装的 SnO_2 纳米花, 根据煅烧温度的不同分别制备了 Pt 单原子修饰的 Pt atm- SnO_2 复合材料和 Pt 纳米颗粒修饰的 Pt NPs- SnO_2 复合材料, 并探究了它们对 H_2 的气敏响应。其中 Pt atm- SnO_2 复合材料的气敏性能相比于 Pt NPs- SnO_2 和 SnO_2 有显著的提升, 其最佳工作温度为 250°C , 对 200×10^{-6} 体积分数 H_2 响应为 3.81, 对 1000×10^{-6} 体积分数 H_2 响应可达 13.8, 是 Pt NPs- SnO_2 的 4 倍, 是纯 SnO_2 的 6 倍; 在体积分数梯度测试中线性良好, 对 $5 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$ 的低体积分数 H_2 也有稳定线性响应。与纯相 SnO_2 相比, Pt 单原子的加入可对 SnO_2 材料起到电子/化学敏化作用, 加快氧气分子吸附成为氧阴离子的过程。此外, Pt 原子与 SnO_2 之间会形成肖特基势垒, 提高复合材料的电阻变化幅度, 从而提高传感器的气体响应。

参考文献:

- [1] TURNER J A. Sustainable hydrogen production[J]. Science, 2004, 305(5686):972-974.
- [2] WINSCH E, HOFFMAN K C, SALZANO F J. Hydrogen: its future role in the nation's energy economy [J]. Science, 1973, 180(4093):1325-1332.
- [3] 孙淑华, 张国瑞, 陈修强, 等. 氢气传感器技术现状与发展[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(4):177-188.
- [4] KANG Z Y, WANG H, LIU Y R, et al. Exploring and understanding the internal voltage losses through catalyst layers in proton exchange membrane water electrolysis devices[J]. Applied energy, 2022, 317:119213.
- [5] LEE H S, KIM J, MOON H, et al. Hydrogen gas sensors using palladium nanogaps on an elastomeric substrate[J]. Advanced materials, 2021, 33(47):2005929.
- [6] 晏萌, 杨勇. 氢气传感器的研究及应用进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2025, 44(1):75-91.
- [7] CHOI K, KOO R H, PARK J, et al. Novel gas sensor signal acquisition method: amplifying sensor signals and enabling efficient gas identification[J]. Advanced science, 2025, 12(21):2415104.
- [8] HASHTROUDI H, ATKIN P, MACKINNON I D R, et al. Low-operating temperature resistive nanostructured hydrogen sensors[J]. International journal of hydrogen energy, 2019, 44(48):26646-26664.
- [9] BULEMO P M, KIM D H, SHIN H, et al. Selectivity in

- chemiresistive gas sensors: strategies and challenges[J]. Chemical reviews, 2025, 125(8):4111-4183.
- [10] LI J Y, SI W Z, SHI L, et al. Essential role of lattice oxygen in hydrogen sensing reaction[J]. Nature communications, 2024, 15(1):2998.
- [11] LIU L, GUO C C, LI S C, et al. Improved H₂ sensing properties of Co-doped SnO₂ nanofibers[J]. Sensors and actuators B: chemical, 2010, 150(2):806-810.
- [12] WEI Z X, SONG M, WANG H X, et al. Rare earth single atoms steering hydrogen spillover over Pd/WO₃ toward high-efficiency H₂ sensor at near room temperature[J]. Advanced energy materials, 2025, 15(29):2501365.
- [13] KIM J H, JEON J G, OVALLE-ROBLES R, et al. Aerogel sheet of carbon nanotubes decorated with palladium nanoparticles for hydrogen gas sensing[J]. International journal of hydrogen energy, 2018, 43(12): 6456-6461.
- [14] 王星佳, 卞正兰. Pt-WO₃ 纳米氢敏薄膜的制备及传感特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(7):419-424.
- [15] DHALL S, JAGGI N. Room temperature hydrogen gas sensing properties of Pt sputtered F-MWCNTs/SnO₂ network[J]. Sensors and actuators B: chemical, 2015, 210: 742-747.

Synthesis and hydrogen-sensing performance of Pt-modified SnO₂ nanorods

XU Jiaqiang^{1,2}, JIA Xin^{1,2}, ZHANG Zixuan^{1,2}

(1.College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2.NEST Lab, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: SnO₂ nanoflowers composed of nanorods were synthesized via a one-step hydrothermal method. Pt-SnO₂ composites were subsequently prepared through a high-temperature reduction process at varying temperatures. The surface dispersion states of Pt atoms in the composites were systematically characterized using X-ray diffraction (XRD), high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The characterized materials were subsequently integrated into MEMS-based gas sensors. Gas-sensing performance evaluation demonstrated that the Pt-SnO₂ composite exhibited optimal operation at 250 °C, representing a 60 °C reduction compared to that of pristine SnO₂ (310 °C). At this optimized temperature, the composite achieved a hydrogen detection limit of 5×10^{-6} with a response value of 3.81 to 200×10^{-6} H₂. The sensor demonstrated rapid response/recovery kinetics, with the characteristic times being 7.2 s and 4.8 s respectively. Comparative analysis revealed significant improvements in the Pt-SnO₂ composite over both pristine SnO₂ and Pt NPs-SnO₂ counterparts across critical performance metrics such as detection limit, hydrogen response magnitude, response time, and recovery time.

Keywords: SnO₂ nanorods; precious metal modification; H₂ sensor; single Pt atom

(责任编辑 韩 超)