

基于 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 的气体传感器及其 室温下高性能 NO_2 检测*

陈进龙 陶然[†] 李冲 张健磊 付琛 罗景庭[‡]

(深圳大学物理与光电工程学院, 深圳市先进薄膜与应用重点实验室, 深圳 518060)

(2023年9月23日收到; 2024年3月24日收到修改稿)

NO_2 是一种有毒气体, 能与空气中的其他有机化合物发生反应, 造成空气污染并对人体有很大的危害. 因此, 需要一种气体传感器来检测 NO_2 . 然而, 传统的 NO_2 传感器很难在室温 (25 °C) 下工作. 本研究报告了 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 的室温 (25 °C) NO_2 气体传感, 采用热注入法和水热法制备了 In_2O_3 量子点和 SnS_2 纳米片. 凭借 SnS_2 独特的二维结构, 在其上装饰 In_2O_3 , 复合增强了其传感性能, 产品采用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM)、高分辨率透射电子显微镜 (HR-TEM) 和 X 射线光电子能谱仪 (XPS) 进行表征. 结果表明, $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 传感器对体积分数为 1×10^{-6} NO_2 的响应为 26.6, 响应和恢复时间分别为 146 s 和 243 s. 由于异质结构增加了活性位点的数量, 加速了气体的传输, 促进了电荷转移和气体解吸, 提高了 NO_2 气体传感性能. 这种优异的传感性能在 NO_2 检测中具有广阔的应用前景.

关键词: 气体传感, $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$, NO_2 , 室温

PACS: 68.43.-h, 07.07.Df, 06.60.Ei

DOI: 10.7498/aps.73.20231554

1 引言

空气污染被认为是许多疾病和过早死亡的主要原因^[1]. NO_2 主要来自化石燃料的燃烧和汽车尾气的排放, 这对人类健康构成巨大威胁^[2]. 如今, 大多数 NO_2 传感器需要较低的工作温度和快速的响应和恢复时间. 因此, 有必要开发能在室温 (25 °C) 下工作的 NO_2 传感器.

通常化学气体传感器广泛用于实时检测对健康有害的气体, 这在工业生产中发挥着重要作用^[3,4]. 为了解决传感性能不理想的问题, 异质结构的形成

是制造气体传感器最广泛研究和使用的. 电阻式气体传感器由于其结构简单、制造方便、成本低, 已应用于各种气体的检测^[5-7]. 为了提高气体传感器的响应, 金属半导体由于其相对便宜的成本和高稳定性, 已经成为气体传感器领域有前途的候选材料. 金属半导体材料主要包括 In_2O_3 ^[8], WO_3 ^[9] 和 SnO_2 ^[10]. 例如, 基于 In_2O_3 纳米片的传感器可以检测 NO_2 , 对体积分数为 4×10^{-5} NO_2 的响应达到了 78, 但只能实现 10^{-6} 级的检测^[11]. Gu 等^[12] 报道了基于 SnS_2 的 $\text{SnO}_2/\text{SnS}_2$ 异质结在 80 °C 时对体积分数为 8×10^{-6} NO_2 表现出 5.3 的响应. 除了复合和掺杂外, 修饰量子点的方法由于其独特的化学性质

* 国家自然科学基金 (批准号: 12104320)、国家重点研发计划 (批准号: 2021YFF0603704)、广东省基础与应用领域研究项目 (批准号: 2020A1515110561, 2019A1515111199)、广东省研发项目 (批准号: 2020B0101040002)、广东省教育厅重点研究项目 (批准号: 2020ZDZX2007)、深圳市科技项目 (批准号: RCBS20200714114918249, GJHZ20200731095803010, JCYJ20220818095611025, JSGG20201103090801005) 和深圳大学创业研究基金 (批准号: QNJS0352) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ran.tao@szu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: luojt@szu.edu.cn

和量子效应, 还可以降低传感材料的检测极限^[13,14]. 在经过量子点修饰后, 可以将检测限降低到 10^{-9} .

本文采用热注入法和水热法合成了 In_2O_3 量子点和 SnS_2 纳米片, 通过旋涂法制备了 NO_2 气体传感器, 并检测了它们对 NO_2 的气敏性能. 该传感器在室温 (25 °C) 下对体积分数为 1×10^{-6} NO_2 的响应为 26.6, 响应/恢复时间为 146 s/243 s. 此外, 提出了一种基于 In_2O_3 量子点修饰 SnS_2 的传感机制. 通过量子点修饰提高气敏性能的方法将为开发基于量子点的高性能气敏传感器提供新的途径.

2 实验方法

2.1 In_2O_3 量子点的合成

In_2O_3 量子点通过热注入法合成, 将 0.146 g 醋酸铟 ($\text{In}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_3$)、12.5 mL 油胺和 5 mL 油酸混合在 50 mL 三颈烧瓶中, 在真空环境中磁力搅拌至 90 °C 溶解. 然后将温度升至 240 °C, 在氮气环境中搅拌 30 min, 自然冷却至室温. 经离心即得白色产物, 用乙醇洗涤数次, 最后分散在甲苯中.

2.2 SnS_2 纳米片的合成和 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 复合

采用传统水热法合成 SnS_2 纳米片, 将 0.35 g $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 0.4 g 硫脲 ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$) 加入到 30 mL 去离子水中, 磁力搅拌 30 min 溶解. 之后将混合溶液转移到高压釜中, 在 180 °C 下反应 24 h, 自然冷却至室温, 离心收集沉淀, 用去离子水和乙醇交替洗涤数次, 最后分散在乙醇中.

取一定量的 In_2O_3 和 SnS_2 溶液搅拌混合, In_2O_3 所占的体积比例分别为 41%, 47%, 52% 和 57%.

2.3 气体传感器的制备和测试方法

通常, 将 80 μL $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 溶液以 1000 r/min 的速度旋涂到传感器上, 形成传感膜, 传感器以 Al_2O_3 陶瓷为底, 规格尺寸为 13.4 mm \times 7 mm \times 0.635 mm, 基底为 Al_2O_3 陶瓷片, 电极为银电极, 共有 8 对叉指电极, 电极间距为 0.2 mm, 电极宽度为 0.2 mm, 工作温度可在 -65—500 °C 之间. 传感性能通过数据采集系统进行测试, 传感器的电阻由 Keithley 2400 (Keithley Instrument, USA) 测定, 将传感器放入 18 L 腔室进行测试, 并通过控制 NO_2 气体的体积来改变腔室中 NO_2 的浓度, 分别获得体积分数为 2×10^{-7} , 4×10^{-7} , 6×10^{-7} ,

8×10^{-7} , 1×10^{-6} 的理想浓度. 传感器响应定义为 $S = R_g/R_a$, 其中 R_a 和 R_g 分别是空气和目标气体中的传感器电阻. 响应时间定义为达到其稳定值的 90% 所需的时间. 恢复时间是目标气体释放后电阻下降到空气中初始值的 10% 的时间.

2.4 表征手段

用扫描电子显微镜 (SEM, Supra 55 Sapphire, Zeiss) 和高分辨率透射电子显微镜 (HRTEM, FEI TalosF200 s) 表征样品的形貌和微观结构. 样品的晶体结构通过 X 射线衍射 (XRD, X'pert pro, PANalytical) 和 $\text{Cu K}\alpha$ 辐射源进行分析. 用 X 射线光电子能谱仪 (XPS, Escalab 250Xi, Thermo Fisher, 英国) 表征样品的化学状态.

3 结果和讨论

采用扫描电子显微镜和高分辨率透射电子显微镜对样品的形貌进行表征. 图 1(a) 展示了 SnS_2 的 SEM 图像, 产物由纳米片组成. 图 1(b) 是 In_2O_3 量子点, 量子点是球形的, 直径约为 5 nm. $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 复合材料如图 1(c) 所示, 可以观察到 In_2O_3 量子点成功地修饰在 SnS_2 表面. 图 1(d) 和图 1(g) 展示 SnS_2 的 HR-TEM 图像, 其中 0.311 nm 的晶格间距对应于 (100) 晶面. 如图 1(e) 和图 1(h) 所示, HR-TEM 图像展示 0.292 nm 的晶格间距对应于 In_2O_3 的 (222) 晶面. 如图 1(f), (i) 所示, HR-TEM 图像展示 0.311 nm 的晶格间距对应于 SnS_2 的 (100) 晶面, 0.292 nm 的晶格间距对应于 In_2O_3 的 (222) 晶面, 这表明 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 复合成功. 插图中 SnS_2 , In_2O_3 , $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 的选区电子衍射 (SAED) 图谱中分析的晶面结构与 TEM 图像的晶面结构相互对应, 表明了制备样品的高质量结构.

通过 X 射线衍射观察了 SnS_2 , In_2O_3 和 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 的晶体结构和组成. SnS_2 , In_2O_3 和 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 的 XRD 图谱如图 2 所示. 样品 In_2O_3 的衍射图与标准峰 PDF#65-3170 完全一致, 在 $2\theta = 30.51^\circ$, 35.38° , 50.90° 和 60.52° 处检测到特征峰, 对应于 (222), (400), (440) 和 (622) 峰. 样品 SnS_2 的衍射图与标准峰 PDF#89-2028 完全一致, 在 $2\theta = 15.02^\circ$, 28.25° , 32.14° , 41.92° 和 50.00° 处检测到特征峰, 对应于 (001), (100), (011), (102) 和 (110) 峰. 未观察到与任何其他杂质相关的衍射峰,

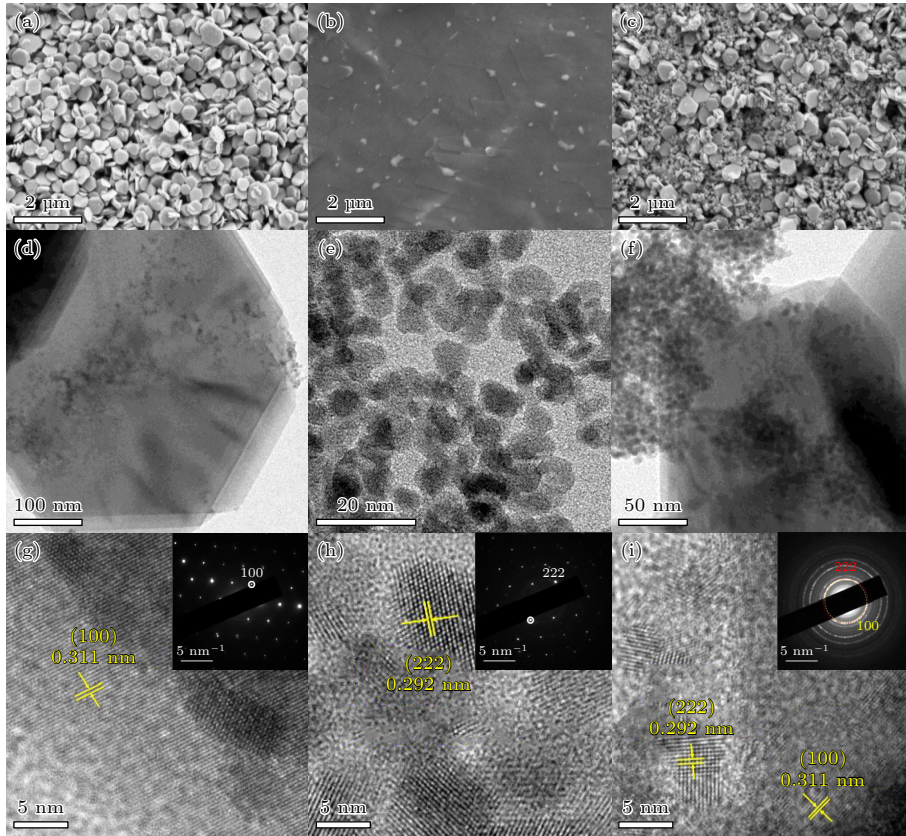


图 1 (a) SnS₂, (b) In₂O₃ 量子点, (c) SnS₂/In₂O₃ 的 SEM 图. (d), (g) SnS₂, (e), (h) In₂O₃, (f), (i) SnS₂/In₂O₃ 的 HR-TEM 图和 SAED 图

Fig. 1. SEM images of (a) SnS₂ nanoplates, (b) In₂O₃ QDs and (c) SnS₂/In₂O₃ composites. HR-TEM images and SAED patterns with a 5 nm scale of (d), (g) accordion-like SnS₂ nanoplates, (e), (h) In₂O₃ QDs and (f), (i) SnS₂/In₂O₃ composites.

表明制备的样品纯度高。图 2(a) 为 SnS₂/In₂O₃ 的 XRD 图谱, 随着 In₂O₃ 含量从 42 % 增加到 57%, In₂O₃ 特征峰强度在 30.5° 处逐渐增大, 可以清楚地观察到 30.5° 的特征峰, 表明 SnS₂ 和 In₂O₃ 复合成功。

采用 XPS 分析了 SnS₂/In₂O₃ 的化学组成。图 2(b) 展示了 SnS₂/In₂O₃ 的 XPS 谱图, 它由 Sn, S, In 和 O 组成。图 2(c) 展示了 O 1s 的 XPS 能谱, 可看出有位于 529.8 eV 和 531.1 eV 处的双峰^[15,16]。图 2(d) 展示了 In 3d 的高分辨 XPS 能谱。在 451.9 eV 和 444.3 eV 处表现出强烈的峰值, 分别对应于 In 3d_{3/2} 和 3d_{5/2}^[17]。图 2(e) 是 Sn 3d 的 XPS 谱, 在 494.5 eV 和 486.1 eV 附近的两个强峰分别对应于 Sn 3d_{3/2} 和 3d_{5/2}^[18]。S 2p 的 XPS 能谱如图 2(f) 所示, 在 161.2 eV 和 162.4 eV 处的峰值可分别对应于 S 2p_{3/2} 和 S 2p_{1/2}^[19]。此外, 在 168 和 170 eV 之间没有发现其他峰, 表明样品中没有发生氧化作用。

如图 3(a) 所示, 测试了不同 SnS₂/In₂O₃ 比例的复合材料在室温 (25 °C) 下对体积分数为 1×10⁻⁶

NO₂ 的响应, 与纯 SnS₂ 和 In₂O₃ 相比, 复合比例为 52% 的样品的响应为 26.6。图 3(b) 展示了不同比例的复合材料对体积分数为 1×10⁻⁶ NO₂ 的响应大小的变化情况。在所有传感器中, 比例为 52% 的传感器表现出高响应、短响应时间和短恢复时间。这归因于 SnS₂ 优异的片状结构, 为复合材料提供了丰富的气体吸附位点。图 3(c) 展示了在室温 (25 °C) 下复合比例从 41% 至 57% 的传感器对体积分数为 1×10⁻⁶ NO₂ 的响应时间和恢复时间的变化情况。比例为 52% 的样品的响应时间和恢复时间为 146 s 和 243 s。因此, 在后续研究中选择比例为 52% 的样品作为气体传感器材料。

图 4(a) 展示了复合比例为 52% 的传感器在室温 (25 °C) 下对体积分数为 2×10⁻⁷—1×10⁻⁶ 的 NO₂ 的响应曲线, 响应值的大小随 NO₂ 浓度的增加而增大。当传感器暴露在 NO₂ 气体中时, 电阻变大, 表明传感器具有 n 型半导体特性。如图 4(b) 所示, SnS₂/In₂O₃ 传感器在室温 (25 °C) 下对 2×10⁻⁷, 4×10⁻⁷, 6×10⁻⁷, 8×10⁻⁷ 和 1×10⁻⁶ NO₂ 的响应分别为 4.6, 12.3, 15.4, 19.6 和 26.6。通过拟合上述

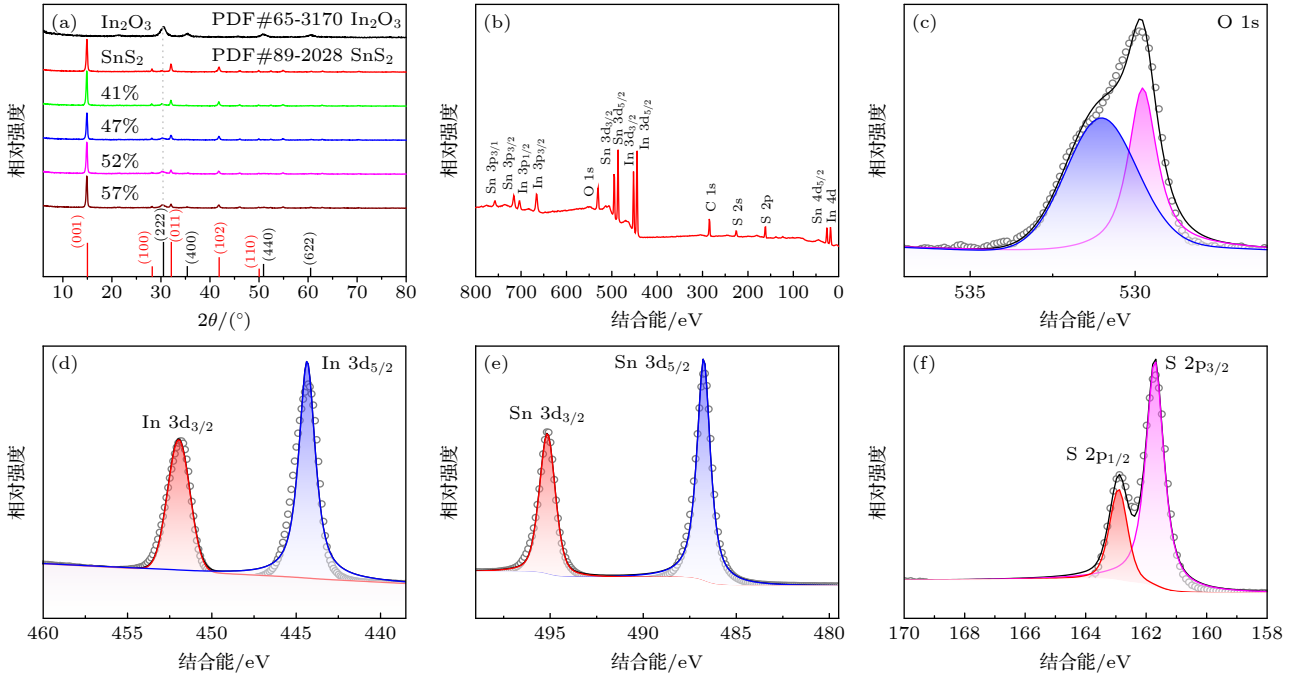


图 2 (a) In_2O_3 , SnS_2 和 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 的 XRD 图谱; (b) $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$, (c) O 1s, (d) In 3d, (e) Sn 3d, (f) S 2p 的 XPS 能谱
Fig. 2. (a) XRD patterns of In_2O_3 , SnS_2 and $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$; XPS spectra of (b) $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$, (c) O 1s, (d) In 3d, (e) Sn 3d, (f) S 2p.

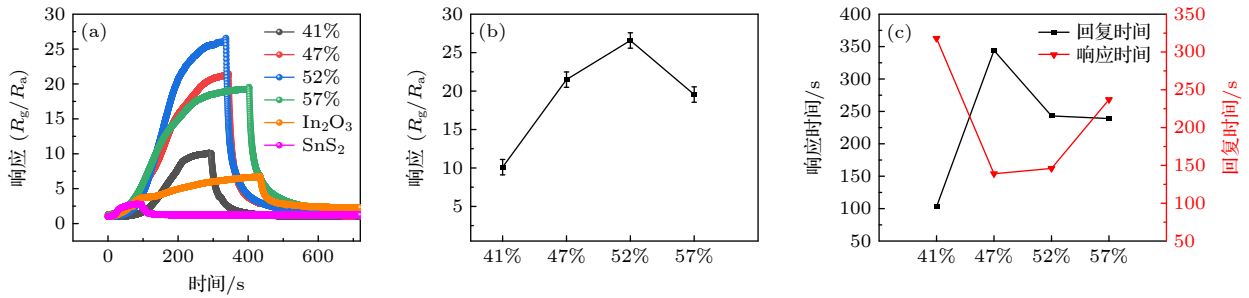


图 3 SnS_2 纳米片、 In_2O_3 量子点和 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 复合材料的气敏性能 (a), (b) 不同 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 比例的复合材料对体积分数为 1×10^{-6} NO_2 的响应大小及变化情况; (b) 不同 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 比例的复合材料对体积分数为 1×10^{-6} NO_2 的响应变化情况; (c) 室温下不同 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 比例的复合材料对体积分数为 1×10^{-6} NO_2 响应和恢复时间的变化情况
Fig. 3. Gas-sensing properties of SnS_2 nanoplates, In_2O_3 QDs and $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ composites: (a) Response sensitivity to 1×10^{-6} NO_2 of volume fraction of all composites of different $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ concentration; (b) variation of response sensitivity to 1×10^{-6} NO_2 of volume fraction of all composites of different $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ concentration; (c) variation of response and recovery time to 1×10^{-6} NO_2 of volume fraction of all composites of different $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ concentration.

数据可以看出, 传感器的响应随 NO_2 浓度的增加呈线性增加 ($R = 0.979$), 表明该传感器有利于 NO_2 的低浓度检测. 图 4(c) 展示了 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 传感器的选择性. 传感器对体积分数为 1×10^{-5} 的 H_2S , NH_3 , H_2 的响应分别为 5.6, 1.7, 1.4, 响应远小于体积分数为 1×10^{-6} 的 NO_2 , 这表明 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 传感器具有出色的选择性. 图 4(d) 是传感器在室温 ($25\text{ }^\circ\text{C}$) 下反复暴露于体积分数为 8×10^{-7} 的 NO_2 气体中的响应变化曲线, 可以看出所制备的传感器具有优异的可重复性.

表 1 总结了文献 [12, 17, 20–23] 中各种纳米

材料的 NO_2 传感性能以及本研究中的 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 与 SnS_2 纳米片、 $\text{SnO}_2/\text{SnS}_2$ 、单层 MoS_2 、 In_2O_3 微球、 In_2O_3 薄膜和 In_2O_3 纳米立方体相比, $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 表现出优异的 NO_2 传感性能. 结果表明, 该传感器在室温 ($25\text{ }^\circ\text{C}$) 下对体积分数为 10^{-9} 量级的 NO_2 具有高响应.

对于化学电阻式传感器, 传感材料和测试气体之间的氧化还原反应可以改变材料中的载流子浓度. 根据电阻的变化, 可实现气体检测 [24,25]. 图 5(a) 展示了 $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 的 n-n 结的能带图. SnS_2 和 In_2O_3 的功函数分别为 5.09 eV [26] 和 4.3 eV [8]. 如

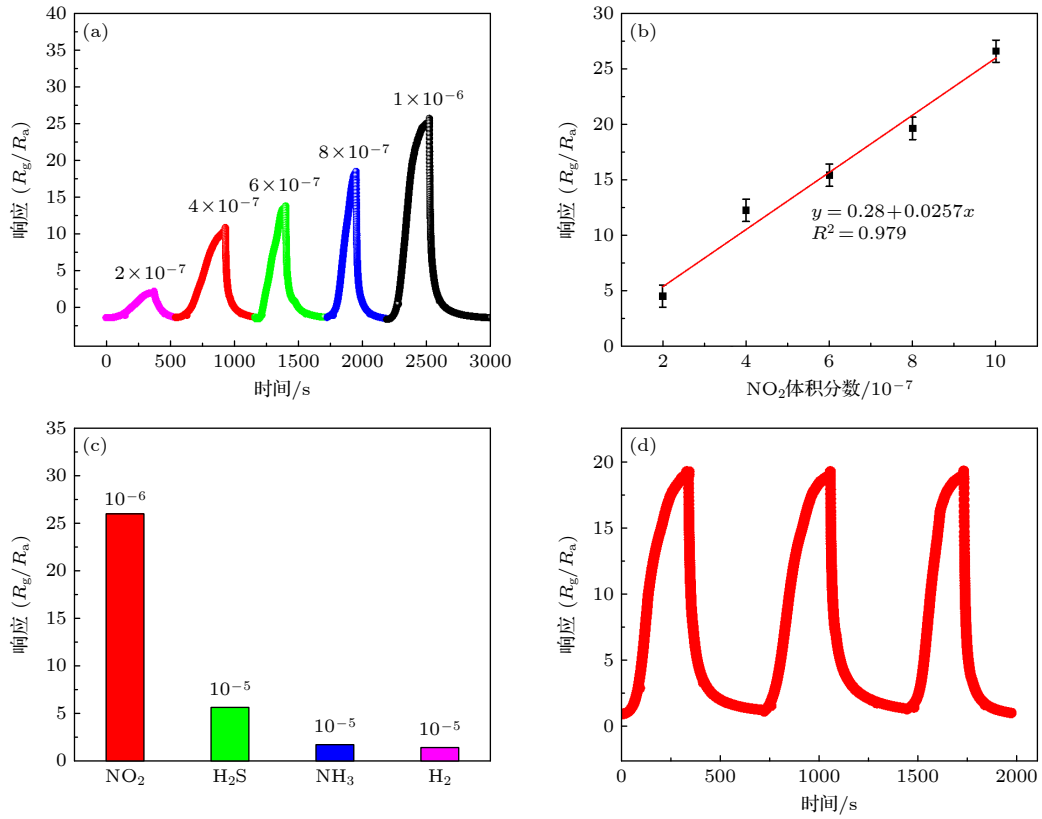


图 4 (a) 52% 传感器对不同 NO_2 浓度的电阻时间曲线; (b) 52% 传感器对不同 NO_2 浓度的线性拟合曲线; (c) 传感器的选择性; (d) 52% 传感器对体积分数为 8×10^{-7} NO_2 的重复性曲线

Fig. 4. (a) Resistance time curves of 52% sensor to different NO_2 concentrations; (b) the fitting curves of 52% sensor to different NO_2 concentrations; (c) selectivity of the sensor; (d) repeatability curves of 52% sensor toward NO_2 of volume fraction of 8×10^{-7} .

表 1 不同传感材料的 NO_2 气敏性能比较

Table 1. Performance comparison of NO_2 sensors based on different composites.

Material	Temp./ $^{\circ}\text{C}$	NO_2 concentration/ $\times 10^{-6}$	Response	Response/recovery time/s	Ref.
SnS_2 -nanosheets	250	10	2.49	6/40	[20]
$\text{SnO}_2/\text{SnS}_2$	80	1	1.8	159/297	[12]
Monolayer MoS_2	25	1.2	1.06	>1800	[21]
In_2O_3 microspheres	250	20	37	5/20	[22]
In_2O_3 thin films	200	5	10	—/—	[23]
In_2O_3 nanocubes	50	3	10	21/522	[17]
$\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$	25	1	26.6	146/243	This work

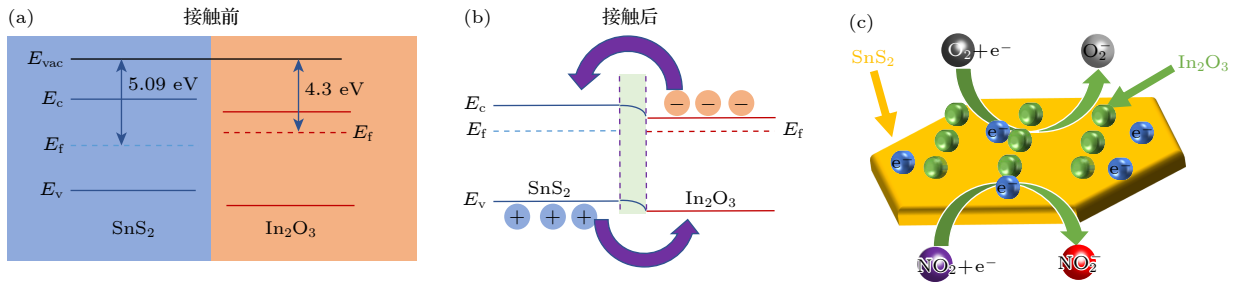
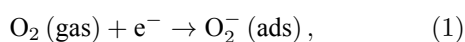


图 5 (a), (b) SnS_2 和 In_2O_3 接触前后的能带图; (c) $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 异质结的 NO_2 气体传感机理示意图

Fig. 5. (a), (b) Energy band structure diagram of SnS_2 and In_2O_3 before and after contact; (c) schematic diagram of NO_2 gas sensing mechanism of the sensor based on $\text{SnS}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ heterostructure.

图 5(b) 所示, 接触后, 由于 SnS₂ 的功函数高于 In₂O₃, 电子从 In₂O₃ 转移到 SnS₂, 直到达到费米能级平衡. 这导致氧可以从 SnS₂ 纳米片中捕获更多的电子, 从而导致 SnS₂/In₂O₃ 异质结可以吸附空气中更多的 O₂ 分子. 如图 5(c) 所示, 当 NO₂ 气体吸附在纳米结构的 SnS₂/In₂O₃ 表面时, NO₂ 气体从表面提取电子形成 NO₂⁻, 传感器电阻增加^[27]. 在空气中, 大气中的 O₂ 分子将从 SnS₂ 纳米片表面捕获电子并成为 O₂⁻. 以下方程给出了物理吸附机理:



当 NO₂ 分子从异质结表面捕获电子时, 电子耗尽区的宽度增加, 导致电导率降低. 当重新暴露在新鲜空气中时, 从 NO₂⁻ 释放出来的电子, 与异质结和空穴累积层的空穴重新结合, 导致导电性增加. 因此, 传感器性能的提高归因于 In₂O₃ 在 SnS₂ 中的掺入形成异质结构, 可以扩大其比表面积以吸收更多的氧分子, 从而在增强传感器响应和选择性方面发挥重要作用.

4 结 论

采用热注入法和水热法合成了 In₂O₃ 量子点和 SnS₂. 研究了 In₂O₃ 的复合比例, 最佳比例为 52%. 获得的 SnS₂/In₂O₃ 传感器在室温 (25 °C) 下对体积分数为 1×10⁻⁶ NO₂ 的响应为 26.6. 与 H₂S, NH₃ 和 H₂ 等多种气体相比, 该传感器对 NO₂ 具有出色的选择性. NO₂ 传感性能的增强可归因于 SnS₂/In₂O₃ 异质结的形成, 它可以在异质结表面引入额外的电子, 从而产生更多的 NO₂ 吸附活性位点. 总体而言, SnS₂/In₂O₃ 表现出显著增强的 NO₂ 传感性能, 可作为其他金属半导体传感器的参考.

参考文献

[1] Copat C, Cristaldi A, Fiore M, Grasso A, Zuccarello P,

- Signorelli S S, Conti G O, Ferrante M 2020 *Environ. Res.* **191** 110129
- [2] Cibella F, Cuttitta G, Della Maggiore R, Ruggieri S, Panunzi S, De Gaetano A, Bucchieri S, Drago G, Melis M R, La Grutta S, Viegi G 2015 *Environ Res.* **138** 8
- [3] Wang J, Shen H, Xia Y, Komarneni S 2021 *Ceram. Int.* **47** 7353
- [4] Xu Y, Zheng L, Yang C, Zheng W, Liu X, Zhang J 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 20704
- [5] Fang H R, Li S, Zhao H M, Deng J, Wang D, Li J 2022 *Sens. Actuators, B* **352** 131068
- [6] Mahajan S, Jagtap S 2020 *Appl. Mater. Today* **18** 100483
- [7] Zhang B W, Fang D, Fang X, Zhao H B, Wang D K, Li J H, Wang X H, Wang D B 2021 *Rare Met.* **41** 982
- [8] Gao L, Cheng Z, Xiang Q, Zhang Y, Xu J 2015 *Sens. Actuators, B* **208** 436
- [9] Wang M S, Wang Y W, Li X J, Ge C X, Hussain S, Liu G W, Qiao G J 2020 *Sens. Actuators, B* **316** 128050
- [10] Maeng S, Kim S W, Lee D H, Moon S E, Kim K C, Maiti A 2014 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **6** 357
- [11] Shah S, Han S, Hussain S, Liu G, Shi T, Shaheen A, Xu Z, Wang M, Qiao G 2022 *Ceram. Int.* **48** 12291
- [12] Gu D, Li X, Zhao Y, Wang J 2017 *Sens. Actuators, B* **244** 67
- [13] Ahmad I, Zhou Z, Li H Y, Zang S Q 2020 *Sens. Actuators, B* **304** 127379
- [14] Liu Y L, Wang L L, Wang H R, Xiong M Y, Yang T Q, Zakharova G S 2016 *Sens. Actuators, B* **236** 529
- [15] Hou M, Gao J Y, Yang L, Guo S H, Hu T, Li Y X 2021 *Appl. Surf. Sci.* **535** 147666
- [16] Wu J, Zhang D, Cao Y 2018 *J. Colloid Interface Sci.* **529** 556
- [17] Patil S P, Patil V L, Vanalakar S A, Shendage S S, Pawar S A, Kim J H, Ryu J, Patil D R, Patil P S 2022 *Mater. Lett.* **306** 130916
- [18] Liu H, Su Y, Chen P, Wang Y 2013 *J. Mol. Catal. A: Chem.* **378** 285
- [19] Price L S, Parkin I P, Hardy A M E, Clark R J H, Hibbert T G, Molloy K C 1999 *Chem. Mater.* **11** 1792
- [20] Kim Y H, Phan D T, Ahn S, Nam K H, Park C M, Jeon K J 2018 *Sens. Actuators, B* **255** 616
- [21] He Q, Zeng Z, Yin Z, Li H, Wu S, Huang X, Zhang H 2012 *Small* **8** 2994
- [22] Vanalakar S A, Patil V L, Harale N S, Vhanalakar S A, Gang M G, Kim J Y, Patil P S, Kim J H 2015 *Sens. Actuators, B* **221** 1195
- [23] Patil S P, Patil V L, Shendage S S, Harale N S, Vanalakar S A, Kim J H, Patil P S 2016 *Ceram. Int.* **42** 16160
- [24] Fang H R, Li S, Jiang W J, Zhao H M, Han C S, Li J, Wang G, Zhang Y, Wang S, Deng J, Feng B, Wang D 2022 *Sens. Actuators, B* **368** 132225
- [25] Yang B X, Myung N V, Tran T T 2021 *Adv. Electron. Mater.* **7** 2100271
- [26] Cheng M, Wu Z, Liu G, Zhao L, Gao Y, Zhang B, Liu F, Yan X, Liang X, Sun P, Lu G 2019 *Sens. Actuators, B* **291** 216
- [27] Ferro R, Rodríguez J A, Bertrand P 2008 *Thin Solid Films* **516** 2225

SnS₂/In₂O₃ based gas sensors and its high performance of detecting NO₂ at room temperature*

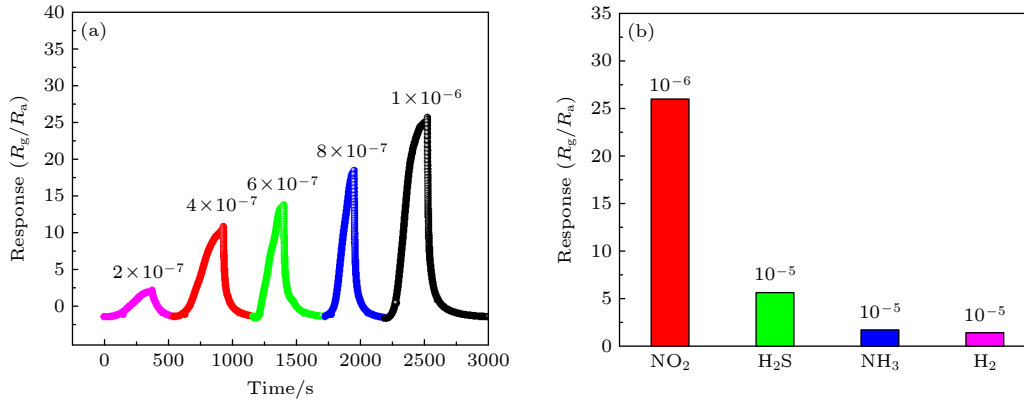
Chen Jin-Long Tao Ran[†] Li Chong Zhang Jian-Lei
Fu Chen Luo Jing-Ting[‡]

(Shenzhen Key Laboratory of Advanced Thin Films and Applications, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

(Received 23 September 2023; revised manuscript received 24 March 2024)

Abstract

NO₂ is a toxic gas that can react with other organic compounds in the air, causing air pollution and posing a significant harm to human health. Therefore, a gas sensor that can detect NO₂ is needed. However, conventional NO₂ gas sensors are difficult to operate at room temperature (25 °C). In this work, NO₂ gas sensing based on SnS₂/In₂O₃, which can operate at room temperature (25 °C), is reported. In₂O₃ quantum dots and SnS₂ nanosheets are prepared by the hot-injection method and hydrothermal method. By using the unique two-dimensional structure of SnS₂, In₂O₃ is decorated on it, and the composite enhances its sensing performance. The products are characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), high-resolution transmission electron microscopy (HR-TEM), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The results demonstrate that the composites prepared by 52% In₂O₃ exhibit the best sensing response. The fabricated sensor shows a response range from 26.6 to NO₂ of 1×10⁻⁶ in volume fraction, fast response and short recovery time at room temperature (25 °C). Moreover, this sensor demonstrates excellent reproducibility and selectivity. The heterojunction structure increases the number of active sites and accelerates the gas transport, which promotes charge transfer and gas desorption to improve NO₂ gas sensing performance. This excellent sensing performance has a great application prospect in NO₂ detection.



Keywords: gas sensing, SnS₂/In₂O₃, NO₂, room temperature

PACS: 68.43.-h, 07.07.Df, 06.60.Ei

DOI: 10.7498/aps.73.20231554

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12104320), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFF0603704), the Research Project in Fundamental and Application Fields of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2020A1515110561, 2019A1515111199), the Research and Development Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2020B0101040002), the Key Research Program of Education Department for Guangdong Province, China (Grant No. 2020ZDZX2007), the Shenzhen Science & Technology Project, China (Grant Nos. RCBS20200714114918249, GJHZ20200731095803010, JCYJ20220818095611025, JSGG20201103090801005), and the Start-up Research Foundation of Shenzhen University, China (Grant No. QNJS0352).

[†] Corresponding author. E-mail: ran.tao@szu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: luojt@szu.edu.cn



基于SnS₂/In₂O₃的气体传感器及其室温下高性能NO₂检测

陈进龙 陶然 李冲 张健磊 付琛 罗景庭

SnS₂/In₂O₃ based gas sensors and its high performance of detecting NO₂ at room temperature

Chen Jin-Long Tao Ran Li Chong Zhang Jian-Lei Fu Chen Luo Jing-Ting

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 106801 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231554

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231554>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于银纳米线电极-rGO敏感材料的柔性NO₂气体传感器

Flexible nitrogen dioxide gas sensor based on reduced graphene oxide sensing material using silver nanowire electrode

物理学报. 2020, 69(5): 058101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191390>

水合肼还原的氧化石墨烯吸附NO₂的实验研究

Adsorption of NO₂ by hydrazine hydrate-reduced graphene oxide

物理学报. 2019, 68(11): 118102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182242>

氧化钨纳米线气敏传感器的制备及其室温NO₂敏感特性

Tungsten oxide nanowire gas sensor preparation and P-type NO₂ sensing properties at room temperature

物理学报. 2018, 67(5): 058101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172236>

铁掺杂多孔氧化铟的NO₂传感特性

NO₂ sensing properties of porous Fe-doped indium oxide

物理学报. 2020, 69(24): 248101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200956>

室温磁性斯格明子材料及其应用研究进展

Research progress of room temperature magnetic skyrmion and its application

物理学报. 2020, 69(23): 231201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200984>

二维材料WTe₂用于气体传感器的性能研究

Sensing performance of two-dimensional WTe₂-based gas sensors

物理学报. 2019, 68(19): 197101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190642>