

SnO₂/ZnS 异质结气体传感器的制备及其室温 NO₂ 敏感特性*

董逸蒙 孙永娇[†] 侯煜晨 王炳亮 陆志远 张文栋 胡杰[‡]

(太原理工大学电子信息与光学工程学院, 太原 030600)

(2023 年 5 月 6 日收到; 2023 年 6 月 13 日收到修改稿)

采用水热法一步合成二维 (2D) 纳米片组成的 SnS₂/ZnS 微花结构, 在空气气氛中煅烧获得不同组分的微花复合结构, 通过 X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线能谱仪 (EDS)、透射电子显微镜 (TEM) 和气敏特性分析仪, 研究了煅烧温度对微花结构组分和气敏性能的影响. 结果表明: 450 °C 煅烧得到的 SnO₂/ZnS (SZ-450) 微花结构的室温 NO₂ 气敏性能优于其他煅烧温度得到的微花结构, 其室温下对体积分数为 10⁻⁴ NO₂ 的响应值可达 27.55, 响应/恢复时间为 53 s/79 s, 理论检测下限低至 2.1×10⁻⁷ (体积分数), 并具有良好的选择性、重复性和稳定性. 分析认为 SZ-450 元件优异的室温气敏特性与 SnO₂ 和 ZnS 之间的异质结有关, 本文可为室温 NO₂ 气体传感器提供敏感材料, 推动其研发及应用进程.

关键词: SnO₂/ZnS, 气体传感器, NO₂ 检测, 室温**PACS:** 07.07.Df**DOI:** 10.7498/aps.72.20230735

1 引言

二氧化氮 (NO₂) 是一种有毒的、具有刺激性气味的气体, 广泛存在于日常生活中, 如汽车尾气和锅炉废气等. 作为对流层重要的痕量气体, 不仅是目前最主要的大气污染物之一, 还是引起臭氧空洞和光化学烟雾等环境问题的前体物^[1]. 另外, 少量吸入 NO₂ 便会刺激人体的呼吸道, 引发炎症和肺水肿, 持续吸入甚至可能导致癌变, 对人类健康造成损害^[2,3]. 因此, 无论是从环境保护还是人体健康的角度出发, 高效检测 NO₂ 都十分必要. 半导体金属氧化物气体传感器由于操作简单、体积小、性能优、成本低等优势, 常用于 NO₂ 气体的检测^[4]. 其中 SnO₂ 是一种宽带隙 n 型半导体, 对很多有毒

有害气体具有很好的响应特性, 已被广泛应用于气体传感领域^[5]. 然而, SnO₂ 气体传感器由于固有导电性差, 工作温度高、选择性差, 存在高功耗和潜在爆炸风险, 限制了其在室温环境中的应用^[6,7].

近年来研究表明, 类似于石墨烯的层状过渡金属硫化物 (TMDs) 材料具有较大的比表面积、极低的电子噪声以及良好的电子传输特性等优点, 因此适合用作室温气体传感器的改性材料^[8]. 将 SnO₂ 和金属硫化物进行复合, 形成 n-n 异质结构, 或许可以弥补 SnO₂ 气敏材料功耗高等缺点, 改善室温条件下对 NO₂ 的检测性能^[8,9]. SnS₂ (带隙为 2.18—2.44 eV) 由于二维平面结构, 高比表和低电子噪声等特点, 成为气体传感器的潜在敏感材料^[10]. SnS₂ 与 SnO₂ 形成的 n-n 异质结构可实现 NO₂ 的低工作温度检测^[11,12]. ZnS 作为一种宽带隙 (3.7 eV) 半

* 国家自然科学基金 (批准号: 61904122, 62171308) 和山西省回国留学人员科研经费 (批准号: 2022-071, 2022-070) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: sunyongjiao@tyut.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: hujie@tyut.edu.cn

导体,具有良好的热稳定性和极性表面,在电子学、光电子学和气敏等领域也得到了广泛的应用^[13]. ZnS 可与 ZnO 形成稳定的异质结构,在低测试温度下高效检测 NO₂ 气体^[14]. 但是目前对 SnS₂/ZnS, SnO₂/ZnS, SnO₂/ZnO 异质结构用于室温 NO₂ 气体的系统研究还未见报道.

本文采用一步水热法合成了 SnS₂/ZnS 微花结构,通过控制不同退火温度得到了具有不同异质结构的敏感材料,并将其用于室温 NO₂ 气体检测. 通过实验对比了不同敏感材料对 NO₂ 的气敏响应特性,确定了 450 °C 退火下的 SnO₂/ZnS (SZ-450) 对 NO₂ 响应最高,最后探讨了复合结构的敏感机理.

2 实验方法

2.1 敏感材料合成与表征

通过一步水热法合成 SnS₂/ZnS 微花结构. 首先分别将 0.3506 g SnCl₄·5H₂O 和 0.1835 g ZnAc₂·2H₂O 溶解于 20 mL 的乙二醇中,充分搅拌 30 min 形成溶液 A 和溶液 B. 将溶液 B 倒入溶液 A 中剧烈搅拌 30 min,并向其中加入 0.2254 g 硫代乙酰胺. 随后将搅拌好的溶液倒入反应釜中,180 °C 的条件下水热反应 12 h. 自然冷却后,将沉淀物分别用去离子水和无水乙醇反复洗涤 5 次,60 °C 下烘干 12 h,得到 SnS₂/ZnS 棕色粉末.

将 SnS₂/ZnS 粉末在马弗炉 (YFX7/12Q-GC, SHANGHAI Y-Feng ELECTRICAL FURNACE CO, LTD) 空气气氛中以 5 °C/min 的升温速率煅烧 1 h 得到不同的样品,退火温度分别为 300 °C, 450 °C, 550 °C 和 700 °C. 方便起见,将退火样品分别记作 SZ-300, SZ-450, SZ-550 和 SZ-700,并将未退火的 SnS₂/ZnS 粉末记作 SZ-0.

利用日本 JEOL 公司的场发射扫描电子显微镜 (SEM, JSM-7100F, 10 kV 加速电压) 对所制备样品的形貌结构进行表征;利用连接的 X 射线能谱分析仪 (EDS) 对样品的元素组成进行分析;使用高分辨率透射电子显微镜 (HRTEM, JEOL, JEM-2100F) 进一步获得形貌和晶体结构的信息;通过德国 Bruker 公司的 D8ADVANCE X 射线衍射仪 (XRD) 对样品的晶体结构进行了表征分析.

2.2 传感器制作和测试

气体传感器的制作步骤如下:首先将制备的敏

感材料超声分散在乙醇中形成浆状涂料,然后将其涂敷在带有 Au 叉指电极的陶瓷衬底表面,得到基于不同敏感材料的传感器. 在 CGS-8 智能分析系统 (Elite, 中国) 的气室内,测试温度为 (25±3) °C,相对湿度 (RH) 为 (35%±5%) 的条件下对所制备的传感器进行测试. 将传感器的响应定义为 $S = R_g/R_a$, 其中 R_g 为传感器在测试气氛中的电阻值, R_a 为传感器在空气气氛中的电阻值. 响应/恢复时间被定义为电阻变化达到总变化范围的 90% 所需的时间.

3 结果与分析

3.1 结构和形态表征

图 1 是 SnS₂/ZnS 及经过不同温度煅烧的样品的 XRD 衍射图谱. 通过与标准卡片对比可知,未煅烧的 SZ-0 样品多数衍射峰与 SnS₂ 的标准峰 (JCPDS No.21-1231) 一致,且在 2θ 为 28.56° 处伴有 ZnS (JCPDS No.05-0566) 微弱的衍射峰,证明该样品是 SnS₂/ZnS 复合材料. 经过 300 °C 煅烧后,SnS₂ 的 (002) 晶面基本消失, (100) 和 (102) 晶面对应的衍射峰减弱,表明 SnS₂ 被部分氧化为 SnO₂, 晶格中部分 S 原子被 O 原子取代^[15,16]. 当煅烧温度达到 450 °C 时,SnS₂ 的 (100) 晶面衍射峰几乎消失,只保留了 ZnS 的 (111) 晶面,并且出现了新的衍射峰,分别对应于 SnO₂ (JCPDS No.41-1445) 的 (110), (101), (200), (211) 和 (220) 的晶面,证明 SZ-450 样品中的 SnS₂/ZnS 被氧化成 SnO₂/ZnS^[12]. 当退火温度达到 550 °C, ZnS 的 (111) 晶

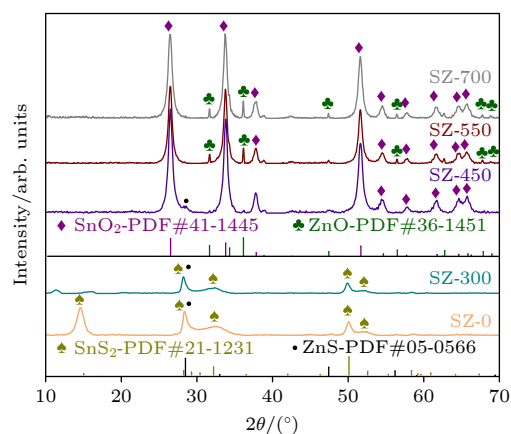


图 1 SZ-0, SZ-300, SZ-450, SZ-550 和 SZ-700 微花结构的 XRD 图谱

Fig. 1. XRD patterns of SZ-0, SZ-300, SZ-450, SZ-550 and SZ-700 microflower structures.

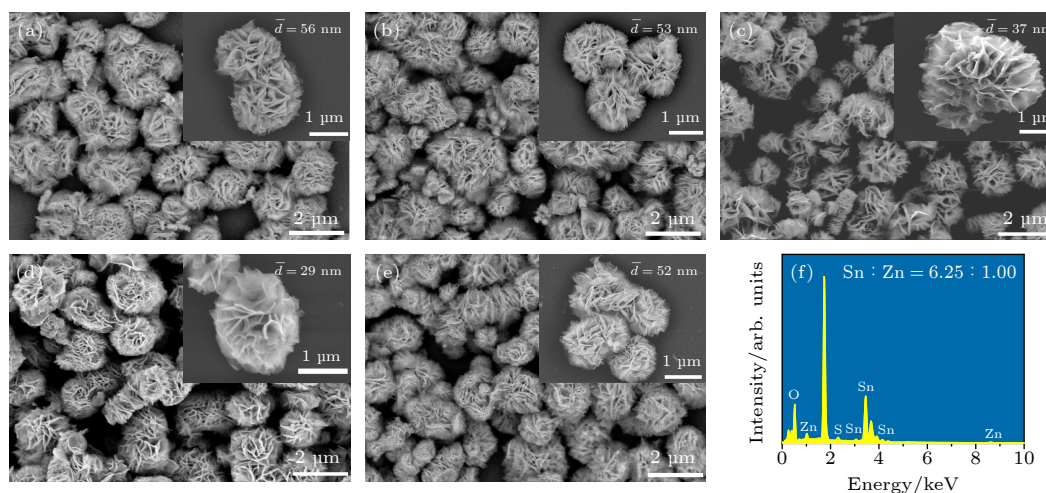


图 2 不同样品的 SEM 图 (a) SZ-0; (b) SZ-300; (c) SZ-450; (d) SZ-550; (e) SZ-700. (f) SZ-450 的 EDS 图谱

Fig. 2. SEM image of different samples: (a) SZ-0; (b) SZ-300; (c) SZ-450; (d) SZ-550; (e) SZ-700. (f) EDS pattern of SZ-450.

面逐渐消失, 对应于 ZnO (JCPD No.36-1451) 的 (100), (101) 和 (102) 和 (110) 晶面出现. 当退火温度达到 700 °C 时, 表示 ZnS(111) 晶面的衍射峰完全消失, ZnO 的衍射峰强度增大, 表明样品由 SnO₂/ZnS 被氧化为 SnO₂/ZnO^[17].

采用 SEM 对不同样品的表面形貌进行表征. 图 2(a)—(e) 分别为 SZ-0, SZ-300, SZ-450, SZ-550 和 SZ-700 的 SEM 图, 插图图为高倍数 SEM 图. 可以看出, 所有样品均是由薄片堆叠形成直径 1—2 μm 的 3D 花状结构, 在不同温度下退火并未破坏敏感材料的花状结构. SZ-0, SZ-300, SZ-450, SZ-550 和 SZ-700 的花瓣平均厚度分别约为 56, 53, 37, 29 和 52 nm, 从 SZ-0 到 SZ-550 花瓣厚度逐渐变薄, 而 SZ-700 的花瓣厚度增大. 对 SZ-450 进行了 EDS 能谱测试, 结果如图 2(f) 所示. 在图谱中观察到 Sn, Zn, O, S, C 和 Si 元素, 其中 Sn 与 Zn 元素的原子比约为 6.3:1.0, Si 元素来自于样品的衬底, C 元素可能是样品表面吸附的 CO₂ 造成的.

为了进一步研究 SZ-450 的微观结构, 采用 TEM 和高分辨率 TEM (HRTEM) 进行表征. 图 3(a) 和图 3(b) 为 SZ-450 样品的 TEM 图像, 可以看出其结构为纳米片组成的微米花结构, 花瓣为二维薄片结构, 与 SEM 结果基本一致. 图 3(c) 和图 3(d) 为 SZ-450 的 HRTEM 图像, 其中晶面间距 0.17, 0.33, 0.36 nm 对应 SnO₂ 的 (211), (110) 和 (101) 晶面, 而晶面间距 0.31 nm 对应 ZnS 的 (111) 晶面.

3.2 气敏性能测试

在室温下测试了不同传感器对体积分数为 10⁻⁴

各类气体的响应值, 如图 4(a) 所示. 结果表明所制备的传感器在室温下对 NO₂ 均有着相对较高的响应, 而对其他气体, 如氨气 (NH₃)、一氧化碳 (CO)、甲烷 (CH₄)、硫化氢 (H₂S)、氢气 (H₂)、乙醇 (C₂H₆O) 和异丙醇 (C₃H₈O) 等几乎没有响应. 这可能是因为相较于其他气体, 氧化性的 NO₂ 具有较大的电子亲和力和 (222 kJ/mol) 和较低的键能 (305.0 kJ/mol), 使其在传感层表面具有较高的吸附能力, 更易获得高响应^[6]. 其中 SZ-450 传感器在室温下对 NO₂ (体积分数为 10⁻⁴) 气体响应可达到 27.55, 分别约是 SZ-0 (6.07), SZ-300 (2.62), SZ-550 (2.95) 和 SZ-700 (10.03) 的 5 倍、10 倍、9 倍和 3 倍. 图 4(b) 为不同传感器在室温下空气中的电阻值, 可以看出随着煅烧温度从未煅烧升高到 300 °C 时, 传感器电阻从 28.98 MΩ 降低到 18.15 MΩ; 当退火温度升高到 450 °C 时, 传感器电阻增大, 达到最大值 38.52 MΩ; 当继续升高煅烧温度, 传感器电阻值随煅烧温度升高而持续下降.

在室温下对所制备的传感器进行了动态响应测试实验, 测试 NO₂ 浓度范围为 5×10⁻⁷—4×10⁻⁴ (体积分数), 结果如图 5(a) 所示. 从动态响应曲线中可以看出, 无论从空气气氛到测试气氛还是从测试气氛回到空气气氛, 传感器在较短的时间内均能够达到稳定状态, 表明气体传感器具有良好的动态响应特性. 随着 NO₂ 气体浓度的增大, 传感器的响应值逐渐增大, 尤其 SZ-450 传感器在整个测试浓度范围内对各个浓度 NO₂ 气体有着最高的响应. 此外, SZ-450 传感器还对低浓度 NO₂ 气体有较高的响应, 比如对体积分数为 5×10⁻⁷ 的 NO₂ 响应达

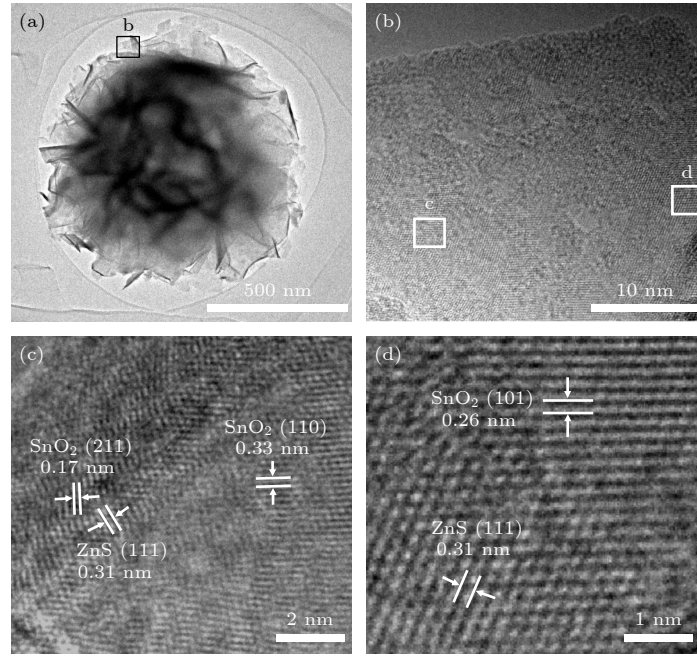


图 3 (a), (b) SZ-450 的 TEM 图像; (c), (d) SZ-450 的 HRTEM 图像
Fig. 3. (a), (b) TEM image of SZ-450; (c), (d) HRTEM image of SZ-450.

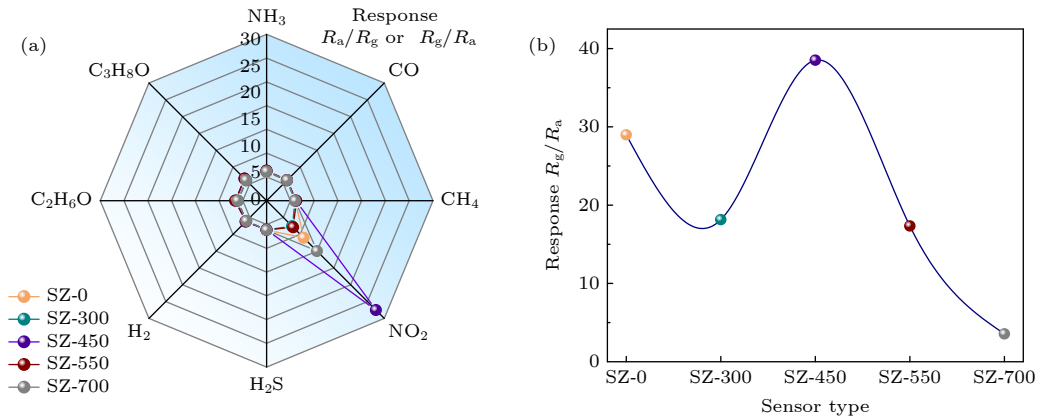


图 4 (a) 不同传感器在室温下对体积分数为 10^{-4} 气体的选择性; (b) 室温空气中的电阻
Fig. 4. (a) Gas selectivity of as-prepared samples for different sensors at 10^{-4} of volume fraction at room temperature; (b) resistance of different sensors in air at room temperature.

到 1.246, 说明其检测下限低于 5×10^{-7} (体积分数). 根据半导体氧化物经验公式 $S = a[C]^b + 1$, 可知响应与浓度存在对数关系 $\lg(S - 1) = b \lg(C) + \lg a$, 其中 a, b 为常数^[18]. 为了研究所制备传感器响应 (S) 和 NO_2 浓度 (C) 之间的关系, 绘制了对数形式下的气体浓度和响应关系曲线, 如图 5(b) 所示. 可以看出传感器在测试气体浓度范围内有非常好的线性度, 根据拟合曲线可以算出 SZ-450 传感器的理论检测下限为 2.1×10^{-7} (体积分数).

响应/恢复时间是气体传感器面向应用时不可忽略的重要参数, 气体传感器响应/恢复时间

决定其检测速度, 而检测速度的快慢影响传感器的工作效率. 为了研究气体传感器的响应/恢复时间, 分别测试了不同传感器在室温下对体积分数为 10^{-4} 的 NO_2 的响应/恢复曲线, 如图 6(a) 所示. 从图 6(a) 可以计算传感器的响应时间和恢复时间, 各传感器的响应/恢复时间如折线图 6(b) 所示. SZ-0, SZ-300, SZ-450, SZ-550 和 SZ-700 传感器的响应时间分别为 53, 5, 53, 7 和 18 s, 恢复时间分别为 60, 38, 79, 20 和 47 s, 所制备传感器的响应/恢复时间均在 60 s/80 s 以内, 展现出较快的响应恢复速度.

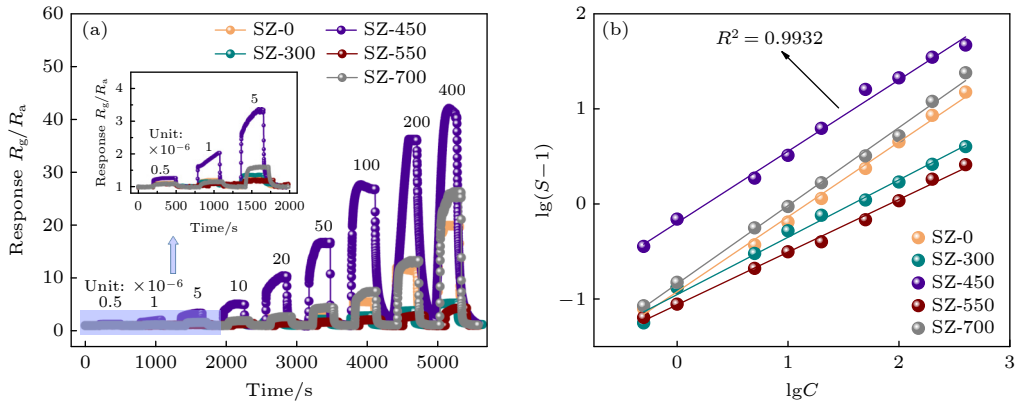


图 5 (a) 不同传感器对体积分数为 5×10^{-7} — 4×10^{-4} NO_2 的动态响应曲线; (b) 对数形式下的响应-浓度关系

Fig. 5. (a) Dynamic response curves of different sensors for NO_2 at 5×10^{-7} — 4×10^{-4} of volume fraction; (b) relationship curves of the responses-concentrations in logarithm form.

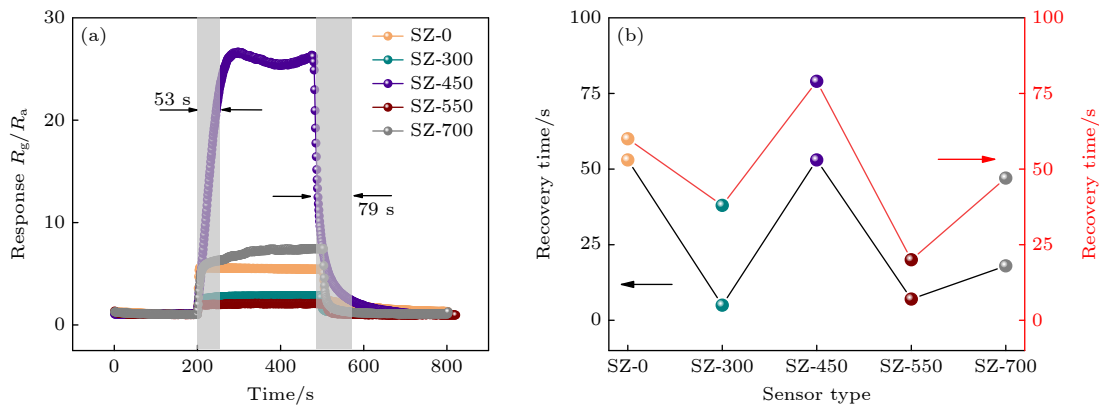


图 6 不同传感器的响应/恢复时间曲线 (a) 和折线 (b)

Fig. 6. Response/recovery time curves (a) and line graph (b) for different sensors.

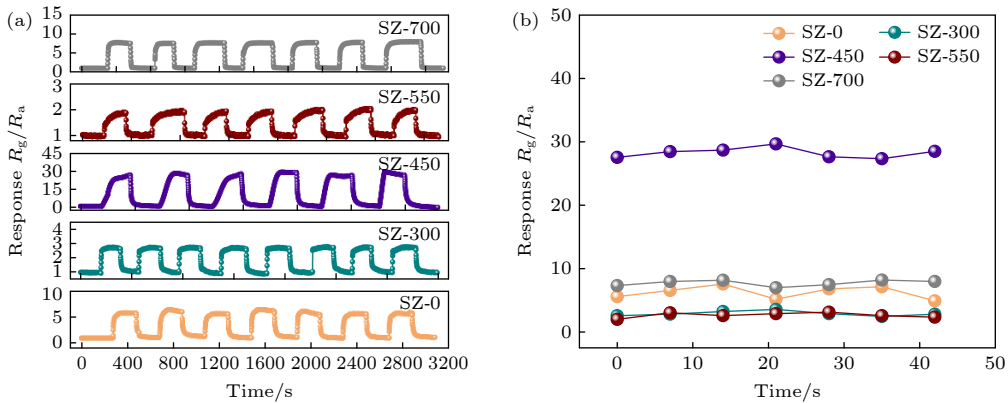


图 7 不同传感器在体积分数为 10^{-4} 的 NO_2 下的重复性 (a) 与长期稳定性 (b)

Fig. 7. Repeatability curves (a) and long-term stability curves (b) of different sensors for NO_2 at 10^{-4} of volume fraction.

在工业生产中, 重复性和长期稳定性也是评价气体传感器的重要指标. 在室温下将不同传感器暴露在浓度为 10^{-4} (体积分数) 的 NO_2 的氛围中进行多次连续响应测试, 结果如图 7(a) 所示. 可以看出, 将传感器连续多次暴露在浓度为 10^{-4} (体积分

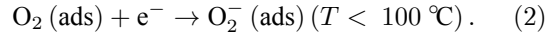
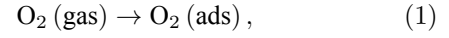
数) 的 NO_2 氛围中时, 皆能达到目标响应值; 当传感器脱离 NO_2 氛围时, 均可以恢复到平衡电阻值, 说明所制备的传感器具有良好的重复性. 为了研究传感器的长期稳定性, 每隔 7 天将传感器暴露在浓度为 10^{-4} (体积分数) 的 NO_2 氛围中测试其响应值,

结果如图 7(b) 所示. 传感器对 NO₂ 的响应随着天数变化略有波动, 但总体较为稳定, 表明所制备的传感器在长时间工作后仍能保持良好的响应特性. 例如, SZ-450 在 42 天测试期间对体积分数为 10⁻⁴ 的 NO₂ 的响应最大值为 29.68, 最小值为 27.35, 上下浮动在可接受范围之内. 表 1 对比了本文制备的传感器和其他 NO₂ 气体传感器测试结果, 总体而言, 本文制备的 SZ-450 传感器在室温下对 NO₂ 的响应比较高, 响应恢复时间比较短, 具有良好的 NO₂ 响应特性.

3.3 气敏机理分析

对于 n 型金属氧化物半导体气体传感器, 吸附气体与敏感材料之间的电荷传递是影响其气敏性能的核心过程. 如图 8(a) 所示, 当传感器暴露于空

气中时, 室温下, 氧分子会通过捕获敏感材料中的电子以 O₂⁻ 的形式吸附在材料表面, 而在材料晶粒表面形成电子耗尽层, 使传感器处于高阻态. 主要反应如下 [27,28]:



而当传感器暴露于含有 NO₂ 气体的气氛中时, 如图 8(b) 所示, 作为氧化性气体分子的 NO₂ 会通过以下两个过程进一步从敏感材料的导带捕获电子, 从而导致传感器电阻的进一步增大 [29]. 一方面, NO₂ 分子直接从敏感材料导带中提取电子, 其过程如 (3) 式所示. 另一方面, NO₂ 的电子亲和力 (222 kJ/mol) 高于 O₂ 的电子亲和力 (43 kJ/mol), NO₂ 分子不仅可以与 O₂ 分子竞争敏感材料表面

表 1 室温下不同 NO₂ 传感器的比较

Table 1. Comparison of different NO₂ sensors at RT.

敏感材料	NO ₂ 浓度/10 ⁻⁶	响应	温度/°C	响应/恢复时间/(s·s ⁻¹)	理论检测下限/10 ⁻⁶	Ref.
Pd/ZnS	5	15.1	室温	—/—	—	[19]
ZnS/ZnO	5	1.16	室温	—/—	—	[20]
Au/ZnS	5	8.84	300	—/—	—	[21]
ZnS/N-rGO	10	2.20	室温	—/724	—	[22]
ZnO-ZnS	10	1.51	室温	100/132 (170 °C)	0.5	[23]
TiO ₂ -ZnS	1	1.91	300	—/ ~540	—	[24]
MoS ₂ /ZnS	5	7.20	室温	—/276	—	[25]
CuO-ZnS	5	1.14	室温	52/45	—	[26]
SnO ₂ /ZnS	5	3.34	室温	53/79	0.2	本文

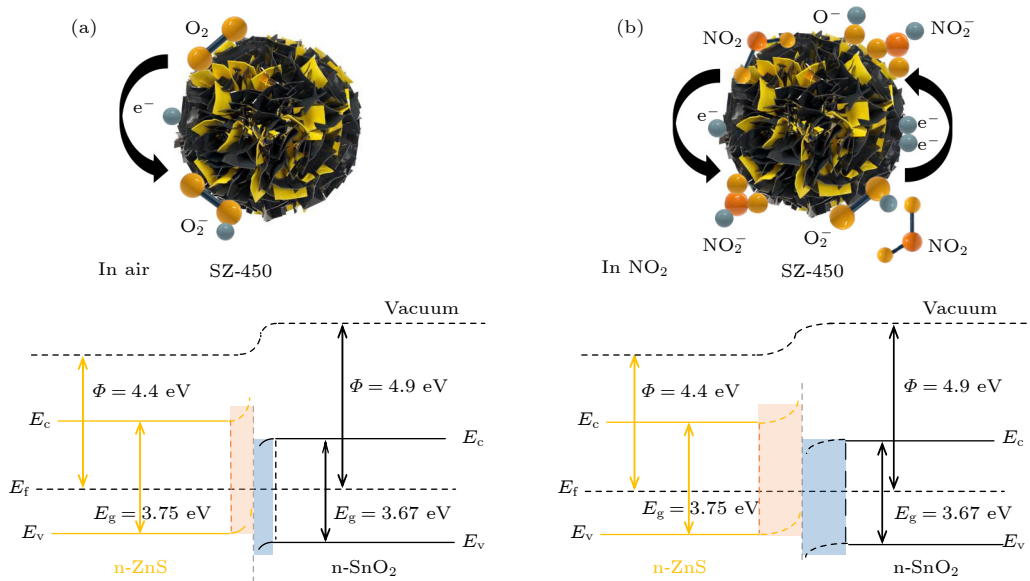
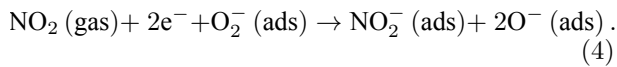


图 8 SZ-450 传感器在不同气体中的传感机制示意图 (a) 空气; (b) NO₂

Fig. 8. Schematic diagram of SZ-450 sensor in different gases: (a) Air; (b) NO₂.

的活性位点,还可以与吸附的氧离子 (O_2^-) 相互作用,进一步捕获电子,其过程如式 (4) 所示^[30]:



对于 SZ-450 传感器,其增强的传感性能可能与其异质结有关.本实验涉及的异质结有 SnS_2/ZnS , SnO_2/ZnS 和 SnO_2/ZnO 三种. SnS_2 , ZnS , SnO_2 和 ZnO 的功函数分别约为 4.4, 4.4, 4.9 和 5.2 eV, 当它们相互接触时,电子将从功函数小的材料导带中转移到功函数大的材料导带中,直到两种材料的费米能级相等^[31–33].对于 SnO_2/ZnS 和 SnO_2/ZnO 异质结构,电子将分别从 ZnS 转移到 SnO_2 和从 SnO_2 转移到 ZnO ,而 SnS_2 和 ZnS 因为功函数几乎相同,电子转移较少.我们推测 SnO_2/ZnS 异质结构功函数相差相对较大,所以其电子转移更多,从而产生更厚的电子耗尽层 (ZnS) 和电子积累层 (SnO_2),而电子积累层又会促进表面氧吸附,夺取更多的电子.电子积累层又可以提供更多的活性位点,使得更多的 O_2 分子和 NO_2 分子参与反应,产生更大的电阻变化,即提高传感器的响应^[34,35].

4 结 论

本文采用一步水热法合成了 SnS_2/ZnS 微花结构,并通过在不同温度下煅烧制备了不同组分的微花结构.利用 XRD 分析了不同煅烧温度下微花结构的组成,并将所制备的材料用于室温 NO_2 气体的检测.结果表明,450 °C 煅烧得到的 SnO_2/ZnS 异质结构 (SZ-450) 传感器在室温下对 NO_2 的响应最高 (体积分数为 10^{-4} 时响应为 27.55),并且具有很好的选择性、快速的响应恢复速度、良好的重复性和长期稳定性. SZ-450 传感器优异的 NO_2 室温气敏特性与 SnO_2 和 ZnS 之间形成异质结密不可分.

参考文献

- [1] Chu X Y, Liu H R, Yan S 2021 *J. Inorg. Mater.* **36** 950 (in Chinese) [储宇星, 刘海瑞, 闫爽 2021 *无机材料学报* **36** 950]
- [2] Xu X M, Li B R, Yang B C, Jiang L, Yin L Z, Ding Y P, Cao C 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 200704 (in Chinese) [许雪梅, 李奔荣, 杨兵初, 蒋礼, 尹林子, 丁一鹏, 曹繁 2013 *物理学报* **62** 200704]
- [3] Yang Z, Su C, Wang S T, Han Y T, Chen X W, Xu S, Zhou Z H, Hu N T, Su Y J, Zeng M 2020 *Nanotechnology* **31** 075501

- [4] Das S, Jayaraman V 2014 *Prog. Mater.* **66** 112
- [5] Zhang J, Wang S R, Wang Y M, et al. 2009 *Sens. Actuators B Chem.* **135** 610
- [6] Li J, Yang M, Cheng X L, et al. 2021 *J. Hazard. Mater.* **419** 126414
- [7] Shah V, Bhaliya J, Patel G, Joshi P 2022 *J. Inorg. Organomet. P.* **32** 741
- [8] Kumar S, Pavelyev V, Mishra P, Tripathi N, Sharma P, Calle F 2020 *Mat. Sci. Semicon. Proc.* **107** 104865
- [9] Bag A, Lee N E 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 13367
- [10] Mutlu Z, Wu R J, Wickramaratne D, et al. 2016 *Small* **12** 2935
- [11] Hao J Y, Zhang D, Sun Q, Zheng S L, Sun Y J, Wang Y 2018 *Nanoscale* **10** 7210
- [12] Gu D, Li X G, Zhao Y Y, Wang J 2017 *Sens. Actuators B Chem.* **244** 67
- [13] Wang X, Xie Z, Huang H, Liu Z, Chen D, Shen G 2012 *J. Mater. Chem. A* **22** 6845
- [14] Li Y, Shan L X, Lian X X, Zhou Q J, An D M 2021 *Ceram. Int.* **47** 27411
- [15] Wahab R, Ansari S G, Kim Y S, Dhage M S, Seo H K, Shin S H S 2009 *Met. Mater. Int.* **15** 453
- [16] Houšková V, Štengl V, Bakardjieva S, Murafa N, Kalendová A 2007 *J. Phys. Chem. A* **111** 4215
- [17] Mohamed S H, Awad M A, Shaban M 2022 *Appl. Phys. A* **128** 1
- [18] Hu J, Gao F Q, Zhao Z T, Sang S B, Li P W, Zhang W D, Zhou X T, Chen Y 2016 *Appl. Surf. Sci.* **363** 181
- [19] Park S, An S, Mun Y, Lee C 2014 *Curr. Appl. Phys.* **14** S57
- [20] Park S, Kim S, Ko H, Lee C 2014 *J. Electroceram* **33** 75
- [21] Park S H, An S Y, Ko H S, Lee S M, Lee C M 2013 *Sens. Actuators B Chem.* **188** 1270
- [22] Chen X W, Wang T, Han Y T, Lv W, Li B L, Su C, Zeng M, Yang J H, Hu N T, Su Y J, Yang Z 2021 *Sens. Actuators B Chem.* **345** 130423
- [23] Gao R, Zhang X F, Wu Y Y, et al. 2023 *Sens. Actuators B Chem.* **380** 133304
- [24] Laera A M, Mirengi L, Cassano G, et al. 2020 *Thin Solid Films* **709** 138190
- [25] Liu C, Chen X W, Luo H Y, Li B L, Shi J, Fan C, Yang J H, Zeng M, Zhou Z H, Hu N T, Su Y J, Yang Z 2021 *Sens. Actuators B Chem.* **347** 130608
- [26] Park S, Sun G J, Kheel H, Ko T, Kim H W, Lee C 2016 *Appl. Phys. A* **122** 1
- [27] Wetchakun K, Samerjai T, Tamaekong N, Liewhiran C, Siriwong C, Kruefu V, Wisitsoraat A, Tuantranont A, Phanichphant S 2011 *Sens. Actuators B Chem.* **160** 580
- [28] Li Y, Song S, Zhang L B, Lian X X, Zhou Q J 2021 *J. Alloys Compd.* **855** 157430
- [29] Liu D, Tang Z L, Zhang Z T 2020 *Sens. Actuators B Chem.* **324** 128754
- [30] Huang B Y, Zhu Q Q, Xu H, Li X L, Li X, Li X G 2023 *Sens. Actuators B Chem.* **380** 133303
- [31] Zhu Q Q, Gu D, Liu Z, Huang B Y, Li X G 2021 *Sens. Actuators B Chem.* **349** 130775
- [32] Sharma I, Mehta B R 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 061602
- [33] Yang X L, Zhang S F, Yu Q, et al. 2019 *Sens. Actuators B Chem.* **281** 415
- [34] Xu X H, Ma S Y, Xu X L, Pei S T, Han T, Liu W W 2021 *J. Alloys Compd.* **868** 159286
- [35] Liu Y M, Zhang J N, Li G, Liu J, Liang Q F, Wang H J, Zhu Y Y, Gao J Z, Lu H B 2022 *Sens. Actuators B Chem.* **355** 131322

Preparation and room-temperature NO₂ sensitivity of SnO₂/ZnS heterojunctions gas sensor^{*}

Dong Yi-Meng Sun Yong-Jiao[†] Hou Yu-Chen Wang Bing-Liang
Lu Zhi-Yuan Zhang Wen-Dong Hu Jie[‡]

(College of Electronic Information and Optical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030600, China)

(Received 6 May 2023; revised manuscript received 13 June 2023)

Abstract

SnS₂/ZnS microflower structures are prepared by one-step hydrothermal method. The microflower structures with different components are obtained after calcinating SnS₂/ZnS in air atmosphere. The influences of calcination temperature on the components and gas-sensing properties of microflower structures are investigated by X-ray diffractometry (XRD), scanning electron microscopy (SEM), X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS), transmission electron microscopy (TEM), and gas sensitive characteristic analyzer. The results show that the gas-sensing performance to NO₂ at room temperature of SnO₂/ZnS microflower structure (SZ-450) is better than that of microflower structure calcinated at the other temperature. The response of SZ-450-based sensor to 10⁻⁴ NO₂ at room temperature can reach 27.55, the response/recovery time is 53 s/79 s, the theoretical detection limit is as low as 2.1×10⁻⁷, and it has good selectivity, repeatability, and stability. The analysis indicates that the excellent room-temperature gas-sensing characteristic of SZ-450 is related to the heterojunction between SnO₂ and ZnS. This work can provide sensitive materials for room-temperature NO₂ gas sensor and promote its development and application.

Keywords: SnO₂/ZnS, gas sensor, NO₂ detection, room temperature

PACS: 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.72.20230735

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61904122, 62171308) and the Shanxi Scholarship Council of China (Grant Nos. 2022-071, 2022-070).

[†] Corresponding author. E-mail: sunyongjiao@tyut.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: hujie@tyut.edu.cn

SnO₂/ZnS异质结气体传感器的制备及其室温NO₂敏感特性

董逸蒙 孙永娇 侯煜晨 王炳亮 陆志远 张文栋 胡杰

Preparation and room-temperature NO₂ sensitivity of SnO₂/ZnS heterojunctions gas sensor

Dong Yi-Meng Sun Yong-Jiao Hou Yu-Chen Wang Bing-Liang Lu Zhi-Yuan Zhang Wen-Dong Hu Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 160701 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230735

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230735>

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

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>

基于纳米传感器矩阵的混合气体组分探测与识别

Detection and identification of gas components based on nano sensor array

物理学报. 2022, 71(18): 180702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220955>

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>

基于第一性原理的二维材料黑磷砷气体传感器的机理研究

First principle study on gas sensor mechanism of black-AsP monolayer

物理学报. 2021, 70(15): 157101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201952>

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>

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>