

ZnO纳米线基MEMS传感器的制备及丙酮检测性能研究

柏俐江, 李旷怡*

辽宁师范大学物理与电子技术学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年3月10日; 录用日期: 2026年4月6日; 发布日期: 2026年4月14日

摘要

为开发低功耗、高灵敏度的适用于丙酮检测器件, 采用水热法合成氧化锌纳米线(ZnO NWs), 将其与微机电系统(MEMS)基板结合制备出ZnO NWs/MEMS丙酮气体传感器。通过X射线衍射仪、扫描电子显微镜表征材料物相结构与微观形貌, 利用气敏分析系统测试传感器丙酮检测性能。结果表明ZnO NWs为纯相六方纤锌矿结构, 呈一维线性形貌; 该传感器最佳工作电压为1.8 V, 在此条件下对20 ppm丙酮的响应时间为20 s、恢复时间为102 s, 对20~100 ppm丙酮的响应值与浓度呈现出良好的线性关系($R^2 > 98.48\%$), 理论最低检测限低至0.27 ppb, 该传感器对丙酮具有优异选择性, 对乙醇、甲醛等结构相似VOCs及H₂、CO、NH₃等常见气体的响应值显著低于丙酮。为环境监测、工业安全管控及糖尿病无创诊断等丙酮检测领域具有实际应用价值。

关键词

氧化锌纳米线, 气体传感器, 丙酮

Preparation and Acetone Detection Performance of ZnO Nanowire-Based MEMS Sensor

Lijiang Bai, Kuangyi Li*

College of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

Received: March 10, 2026; accepted: April 6, 2026; published: April 14, 2026

*通讯作者。

Abstract

To develop a low-power, high-sensitivity device for acetone detection, zinc oxide nanowires (ZnO NWs) were synthesized via a hydrothermal method and integrated with a micro-electro-mechanical system (MEMS) substrate to fabricate a ZnO NWs/MEMS acetone gas sensor. The phase structure and microscopic morphology of the material were characterized by X-ray diffractometer and scanning electron microscope, and the acetone detection performance of the sensor was tested by a gas-sensing analysis system. The results showed that the ZnO NWs possessed a pure hexagonal wurtzite structure with a one-dimensional linear morphology. The optimal operating voltage of the sensor was 1.8 V, under which the response time and recovery time for 20 ppm acetone were 20 s and 102 s, respectively. The response values of the sensor exhibited a good linear relationship with acetone concentrations in the range of 20~100 ppm ($R^2 > 98.48\%$), and the theoretical limit of detection was as low as 0.27 ppb. Additionally, the sensor demonstrated excellent selectivity for acetone, with its response values to structurally similar volatile organic compounds (VOCs) such as ethanol and formaldehyde, as well as common gases including H_2 , CO and NH_3 , being significantly lower than that to acetone. It has practical application value in acetone detection fields such as environmental monitoring, industrial safety control, and non-invasive diagnosis of diabetes.

Keywords

Zinc Oxide Nanowire, Gas Sensor, Acetone

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 空气污染已成为全球性重大健康挑战, 其中作为挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)对生态环境和人体健康的危害备受关注。丙酮是无色透明、带刺鼻气味的极性溶剂, 因价格低廉, 已被广泛应用于油漆、塑料、橡胶、炸药、纤维、皮革、化妆品等多个工业领域的必需溶剂和原材料[1]。同时在生物医学领域, 丙酮也是人呼吸中非侵入性糖尿病诊断的重要生物标志物, 当丙酮气体浓度超过一定量时, 不仅对环境造成不良影响, 还对人体健康造成危害[2]。与健康人体相比, 糖尿病患者由于胰岛素分泌不足而导致酮体代谢异常, 而且禁食和热量限制也会使人体丙酮体积分数显著升高。此外, 丙酮具有一定生物毒性, 人体吸入后会引发头痛、疲劳、嗜睡等症状, 对神经系统造成慢性损伤。因此, 开发高效、精准的丙酮气体检测技术, 是环境空气质量监测、工业生产安全管控及糖尿病无创诊断领域的重要研究方向[3]。

氧化锌(ZnO)为典型 n 型金属氧化物半导体, 具有宽禁带(3.37 eV)、大激子结合能(60 meV)以及高电子迁移率、优异的热稳定性和化学稳定性, 成为目前应用最广泛的气敏材料之一[4][5]。目前, ZnO 一维纳米结构凭借独特结构优势成为气敏材料研究热点。与多晶 ZnO 材料相比, ZnO NWs 的气敏反应仅发生在纳米线表面, 无需晶间扩散, 有效提升了传感器响应速度, 基于 ZnO NWs 的气体传感器已成为 VOCs 检测领域的研究重点[6][7]。因此, 基于氧化锌纳米线(ZnO NWs)的气体传感器得到了广泛研究。

尽管 ZnO 基丙酮传感器的研究取得一定进展, 但现有电阻式丙酮传感器仍普遍存在选择性差、灵敏度不足、响应慢、长期稳定性不佳等问题, 导致器件能耗高、检测效率低, 难以满足实际应用中低浓度丙酮的精准快速检测需求。基于微机电系统(MEMS)的微热板气体传感器, 具有体积小、功耗低、响应速

度快、集成度高等显著优势, 为实现低功耗、高响应的气体检测提供了理想器件平台。本研究以水热法合成 ZnO NWs 为气敏材料, 与 MEMS 基板结合制备丙酮气体传感器; 通过 XRD、SEM 等手段分析材料物相结构与微观形貌; 通过调控加热电压探究工作温度对传感器丙酮气敏性能的影响, 系统研究传感器的响应值、响应/恢复时间、最低检测限及选择性等关键性能指标, 旨在开发一种适用于丙酮痕量检测的 MEMS 气体传感器, 为丙酮检测技术的发展提供实验依据与器件参考。

2. 实验材料及合成方法

2.1. 试剂与材料

氯化锌(ZnCl_2 , AR)、无水碳酸钠(Na_2CO_3 , AR)、乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, GR)购自国药化学试剂有限公司, 以上试剂使用前未作进一步纯化。实验过程中所用水均为去离子水(电导率 $< 1800 \mu\text{S}/\text{cm}@25^\circ\text{C}$)。实验所用 MEMS 基板为叉指电极型微热板芯片, 叉指电极材质为金, 电极间距 $50 \mu\text{m}$, 可通过加热电压调控工作温度。

2.2. 材料合成

氧化锌纳米线(ZnO NWs)的合成[11]: 先后称取 0.2 g ZnCl_2 和 $20 \text{ g Na}_2\text{CO}_3$ 置于烧杯中, 加入 40 ml 去离子水, 进行搅拌形成乳白色溶液。将溶液转移至 100 ml 聚四氟乙烯内衬反应釜中, 密封后于烘箱 130°C 反应 12 h 。反应结束后, 对产物进行洗涤, 将洗涤后的产物于 60°C 干燥 8 h , 得到 ZnO NWs 样品。

ZnO NWs/MEMS 芯片的制备: 称取 0.015 g ZnO NWs 粉末加入 $43 \mu\text{L}$ 松油醇, 在玛瑙研钵中研磨至无明显颗粒的均匀糊状物。使用尖头刷蘸取适量糊状物, 点涂在 MEMS 芯片的叉指电极区域, 将芯片转移至马弗炉中, 以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 400°C , 保温 4 h , 得到 ZnO NWs/MEMS 芯片。

2.3. 材料表征

采用配备铜靶($\lambda = 0.15418 \text{ nm}$ 、 $U = 40 \text{ kV}$ 、 $I = 40 \text{ mA}$)的 X 射线衍射仪(XRD, 日本 Rigaku SmartLab SE)对样品物相结构进行分析, 扫描范围为 $20^\circ \sim 80^\circ$, 扫描速度为 5° min^{-1} 。利用扫描电子显微镜(SEM, 日本 Regulus 8230)观察样品的微观形貌与结构特征。

2.4. MEMS 传感器的测试

MEMS 传感器的整体结构(图 1(a))以 ZnO NWs/MEMS 芯片为核心, 搭配加热电路与检测电路, 加热

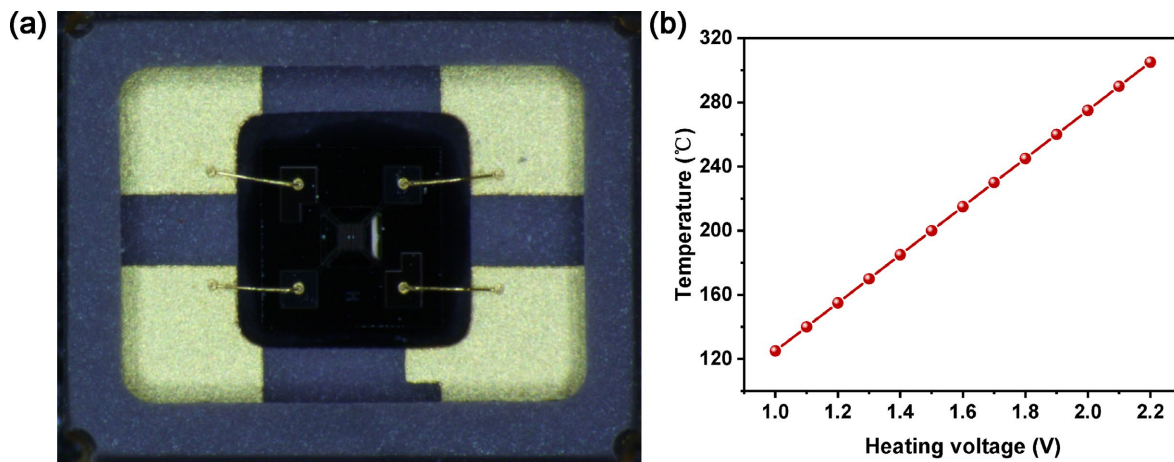


Figure 1. MEMS chip: Relationship between heating voltage (V_h) and operating temperature

图 1. MEMS 芯片: 加热电压(V_h)与工作温度之间的关系

电极提供气敏材料所需工作温度, 又指电极检测气敏材料在丙酮气体作用下的电阻变化, 实现丙酮浓度的定量检测。加热电压(V_h)与工作温度之间的关系如图 1(b)所示, 当加热电压为 1.8 V 时, 功耗为 35 mW。气敏性能测试在上海灵盘电子科技有限公司生产的智能气敏分析系统上完成, 采用静态分布法。氢气(H_2)、氨气(NH_3)、一氧化碳(CO)等标准气体购自上海伟创标准气体分析技术有限公司; 乙醇(C_2H_5OH)、甲醇(CH_3OH)、甲醛($HCHO$)、丙酮(CH_3COCH_3)等挥发性有机气体通过微量移液器精确移取特定体积的液体, 滴加至蒸发器中加热蒸发制备。传感器响应值定义为: 对于氧化性气体, $R = R_g/R_a$, 对于还原性气体, $R = R_a/R_g$ 。其中, R_a 和 R_g 分别表示传感器在空气和被测气体中的电阻值。响应时间和恢复时间定义为电阻变化达到总变化量 90%所需的时间。

3. 实验结果与讨论

3.1. 实验表征结果

首先, 通过 XRD 分析 ZnO NWs 样品的晶相结构, 其 XRD 图谱如图 2 所示。该样品在 31.7° 、 34.4° 、 36.2° 、 47.5° 、 56.6° 、 62.9° 、 66.4° 、 67.8° 和 69.1° 处出现明显特征衍射峰, 这些衍射峰分别与 ZnO 标准卡片(JCPDS No.36-1451)中的(100)、(002)、(101)、(102)、(110)、(103)、(200)、(112)和(201)晶面一一对应。衍射峰峰形尖锐、强度较高、基线平稳, 无明显杂质衍射峰出现, 表明本研究采用水热法制备的 ZnO NWs 为结晶度良好的六方纤锌矿结构, 无其他杂相生成。

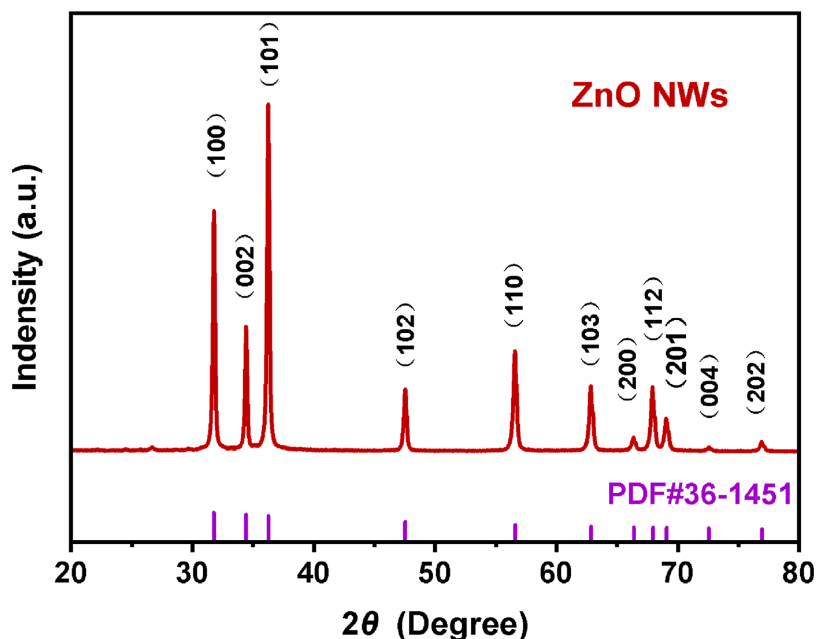


Figure 2. XRD pattern of ZnO NWs
图 2. 氧化锌纳米线的 XRD 图谱

ZnO NWs 的 SEM 图像如图 3 所示。其中图 3(a)为低倍率下的 SEM 图像, 可见 ZnO NWs 具有相对均匀的结构, 无明显团聚现象, 可保证气体分子与气敏材料的充分接触, 为气敏反应提供充足的接触通道; 图 3(b)为高倍率下的 SEM 图像, 显示制备的 ZnO NWs 为典型一维线性结构, 具有较高的长径比, 直径和长度分别为 100~200 nm 和 10~20 μm , 大长径比结构可提供较大的比表面积, 增加气体分子与气敏材料的接触位点, 为传感器气敏性能的提升奠定了良好的结构基础。

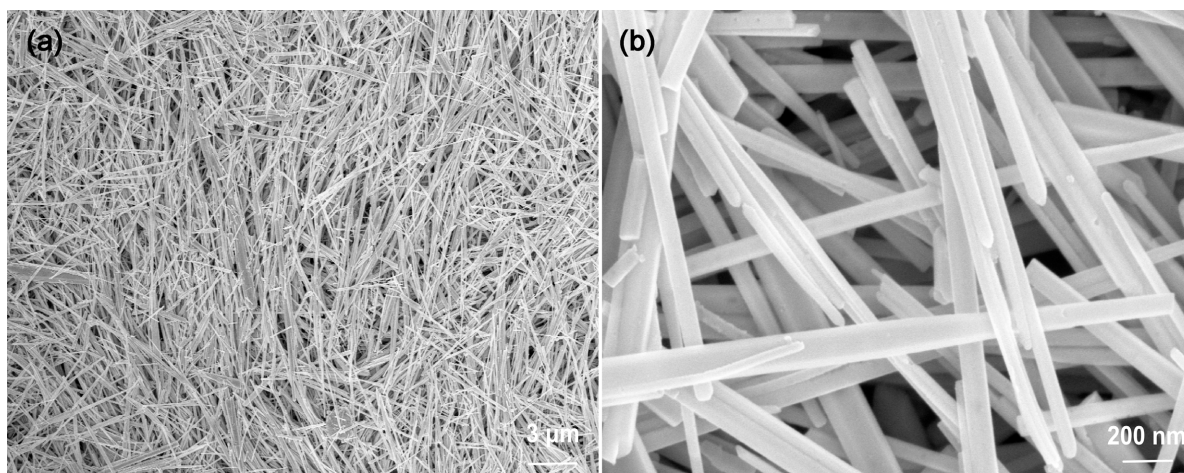


Figure 3. SEM images of ZnO NWs

图 3. 氧化锌纳米线的 SEM 图像

3.2. 气敏性能结果及讨论

为了评估 ZnO NWs 传感器的气敏性能, 首先研究了在不同加热电压(对应不同工作温度)下对金属氧化物气体传感器的气敏性能影响, 测试了该传感器在 1.2~1.8 V 区间对 20 ppm 的丙酮气体的响应性能, 同时在 1.8 V 的最佳工作电压下进行重复性测试, 结果如图 4 所示。

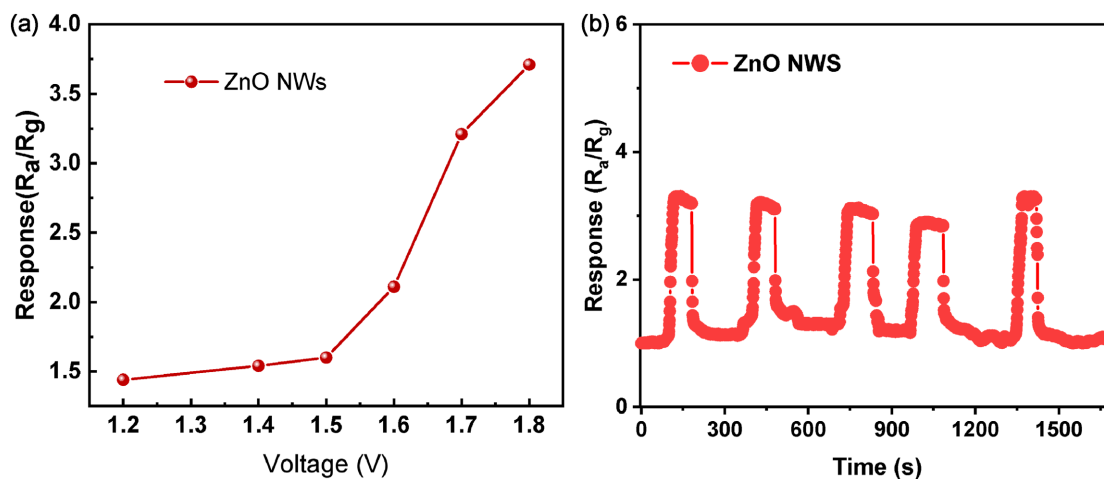


Figure 4. Response performance of zinc oxide nanowires to 20 ppm acetone gas in the range of 1.2~1.8 V and repeatability at 1.8 V

图 4. 氧化锌纳米线在 1.2~1.8 V 区间对 20 ppm 的丙酮气体的响应性能及在 1.8V 下的重复性

由图可知, ZnO NWs 气体传感器对 20 ppm 丙酮气体响应值随着加热电压的升高而上升, 这是由于温度升高可促进气体分子热运动, 加快气敏材料表面氧化还原反应速率, 进而增强气敏响应[8]。ZnO NWs 传感器的响应性能在 1.8 V 下对丙酮气体的响应值最高, 因此在后续气敏性能测试中, 确定 1.8 V (245℃) 为最佳工作电压进行气敏性能测试。同时, 在 1.8 V 的最佳工作电压下, 对 20 ppm 的丙酮进行了 5 次循环的重复性测试, 结果显示通入丙酮后响应值快速上升至稳定值, 排出丙酮后又可恢复至基线附近水平, 无明显漂移, 表明该传感器具有优异的重复性, 可满足多次循环的应用需求。

如图 5 所示, 在 1.8 V 的最佳工作电压下, ZnO NWs 传感器对于不同浓度(20~100 ppm)的丙酮气体

表现出良好的动态响应特性, 随丙酮气体浓度的增加, 响应值也随之增大。并且传感器的响应值与浓度均呈现良好线性特性, 线性相关系数 $R^2 > 98.48\%$, 表明该传感器适用于丙酮的精准检测。

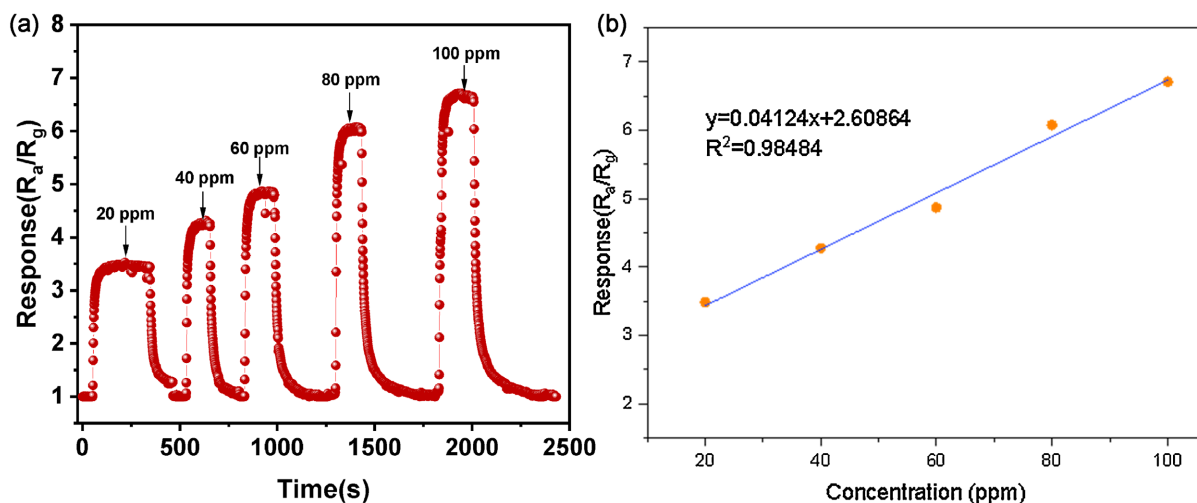


Figure 5. Dynamic response and linear fitting of the sensor to different concentrations of acetone
图 5. 氧化锌纳米线对丙酮气体的浓度梯度及线性关系

气体传感器的理论检测限 LOD 是通过公式(1)~(3)计算得出的, 其中 RMS_{noise} 为基线噪声的标准差, Slope 为灵敏度, y_i 表示在目标气体不存在时测得的基线响应数据, y 表示无目标气体存在时的最佳响应值($y = 1$)。

$$V_{x^2} = \sum (y_i - y)^2 \tag{1}$$

$$RMS_{noise} = \sqrt{\frac{V_{x^2}}{N}} \tag{2}$$

$$LOD(ppb) = 3 \frac{RMS_{noise}}{Slope} \tag{3}$$

通过对 20~100 ppm 高浓度丙酮的响应值数据, 推算出 ZnO NWs 传感器对丙酮的最低理论检测限 (LOD)为 0.27 ppb, 展现出该传感器具备优异的低浓度丙酮检测能力, 但在实际的环境监测、生物医学等领域中进行低浓度丙酮检测仍有待验证。在没有目标气体时基线处测得的响应数据 y_i (取基线响应数据 50 个进行计算)见表 1。

Table 1. Baseline response data y_i in the absence of the target gas
表 1. 在目标气体不存在时的基线响应数据 y_i

y_i									
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.00868
1	1	1.01192	1.00216	1.00433	1.00433	1.00216	1.00433	1	1
1.00108	1.00216	1.00108	1.00433	1.00216	1.00433	1.00433	1	1	1.00247
1.00433	1	1.00649	1	1	1	1	1	1	1.01482
1	1	1	1	1	1	1	1	1.01482	1

响应和恢复特性是评价气敏元件气敏性能的重要参数。在 1.8 V 的最佳工作电压下, ZnO NWs 传感器对 20 ppm 丙酮气体的响应/恢复特性如图 6(a)所示。

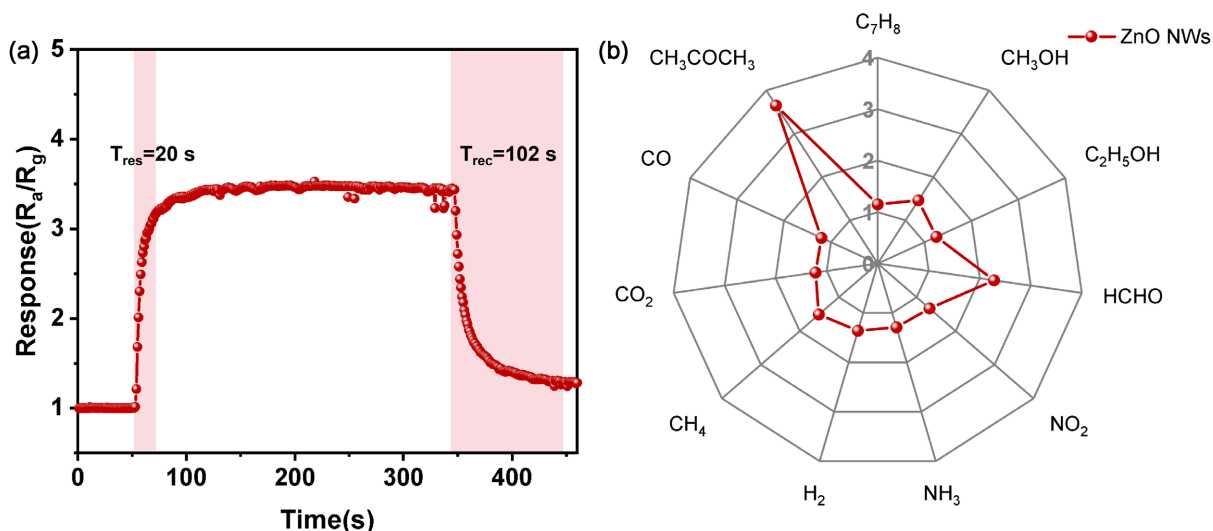


Figure 6. Response/recovery characteristics and selectivity of the sensor to acetone
图 6. 氧化锌纳米线对丙酮气体的响应/恢复实时曲线及选择性

由图可知, 传感器对 20 ppm 丙酮的响应时间为 20 s, 恢复时间为 102 s, 响应速度较快, 且测试过程中基线保持平稳, 通入丙酮后响应值快速上升并保持稳定, 排除丙酮后电阻可快速恢复至初始基线水平, 响应值与空气环境下基本一致。选择性是气体传感器在复杂气体环境中精准检测目标气体的重要性指标, 决定了传感器在复杂气体环境中对目标气体的识别能力。在相同测试条件下, 对 20 ppm 丙酮及常见干扰气体进行了测试, 结果如图 6(b)所示。对丙酮气体的响应值远高于对其他所有干扰气体的响应值, 对乙醇、甲醛、甲醇、甲苯等挥发性有机气体的响应值也显著低于丙酮, 表明该传感器对丙酮具有优异的选择性, 实现了丙酮的特异性检测。

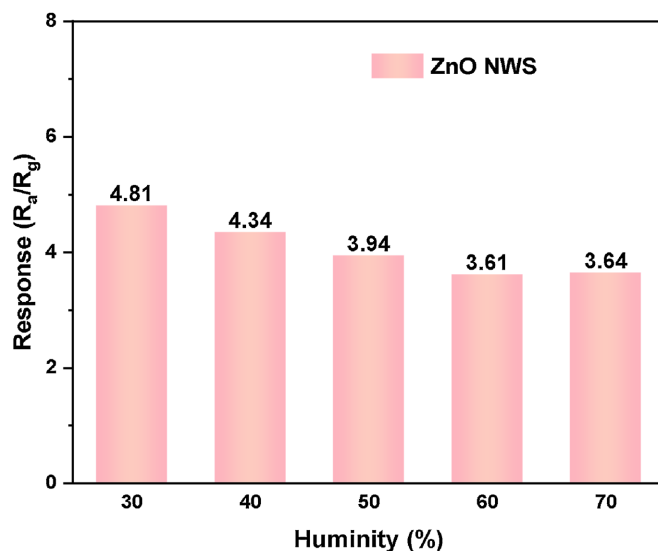
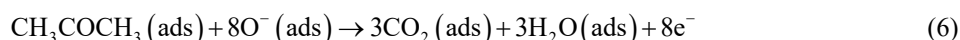
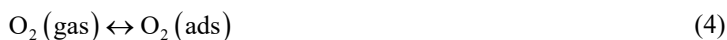


Figure 7. Humidity of zinc oxide nanowires to acetone gas
图 7. 氧化锌纳米线对丙酮气体的湿度

为进一步评估传感器的实用性, 在实际应用场景中, 环境湿度会对气体传感器的检测性能产生显著影响, 因此湿度适应性也是评价传感器实用性的关键指标。在 1.8 V 的工作电压下, 通过测试 ZnO NWs 传感器在不同相对湿度(RH)条件下, 对 20 ppm 丙酮气体进行性能测试如图 7 所示。随着环境相对湿度的升高, 传感器的响应值逐渐降低, 即使湿度在 70%下, 该传感器对 20 ppm 丙酮的响应值仍达 3.64, 表明该传感器具有良好的抗湿性。

3.3. 气敏机理讨论

ZnO NWs 为典型 n 型金属氧化物半导体, 对丙酮的气敏机理可通过材料表面氧化物种吸附与氧化还原反应及电子传输过程解释。在空气环境中, 氧气分子会吸附在 ZnO NWs 的表面, 捕获材料导带上的自由电子, 形成吸附氧化物种; 在 245 °C 的工作温度下, 吸附氧主要以 O⁻形式存在(200 °C~300 °C), 电子的大量捕获使 ZnO NWs 表面形成耗尽层, 导致材料的电阻率升高, 传感器呈现较高的基线电阻[9][10]。当传感器暴露于丙酮气体中时, 丙酮分子与 ZnO NWs 表面的吸附氧化物种发生氧化还原反应, 丙酮被氧化为二氧化碳和水, 同时吸附氧得到电子并释放回导带, 使材料表面的电子耗尽层变薄, 电阻率降低, 传感器的电阻值发生显著变化, 从而产生可检测的气敏响应。具体的反应过程如下:



综上, 在 n 型金属氧化物半导体中, 氧气吸附在金属氧化物半导体表面, 捕获导带上的自由电子, 形成电子耗尽层。此外, ZnO NWs 的高长径比一维结构是传感器高气敏性能的重要支撑, 大比表面积提供了充足的氧分子与丙酮分子吸附位点, 使氧化还原反应更充分; 一维线性结构的连续电子传输路径, 可快速传递反应产生的电子信号, 提升响应速率。

4. 结论

本研究采用水热法合成法制备出 ZnO NWs 丙酮气体传感器, 在最佳工作电压 1.8 V 下, 对丙酮气体的响应速度快、理论检测限低至 0.27 ppb, 20~100 ppm 范围内具有良好的线性关系, 且对其他干扰气体选择性优异。本研究制备的 ZnO NWs 丙酮气体传感器, 解决了传统 ZnO 基丙酮传感器灵敏度不足等问题, 在环境痕量丙酮监测、工业丙酮泄漏管控、糖尿病无创诊断等领域具有实际应用前景, 为丙酮检测技术的发展提供了实验依据与器件参考。后续可通过 ZnO NWs 表面改性、复合其他纳米材料等方式, 优化传感器恢复时间, 推动其在实际场景中的应用。

参考文献

- [1] Lyu, L., Xie, Q., Yang, Y., Wang, R., Cen, W., Luo, S., *et al.* (2022) A Novel CeO₂ Hollow-Shell Sensor Constructed for High Sensitivity of Acetone Gas Detection. *Applied Surface Science*, **571**, Article 151337. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151337>
- [2] Lekshmi, M.S. and Suja, K.J. (2023) Role of Thermal and UV Activation on Microwave Treated NiO Nanoparticles for VOC Sensing. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **34**, Article No. 464. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-09678-5>
- [3] Mirzaei, A., Leonardi, S.G. and Neri, G. (2016) Detection of Hazardous Volatile Organic Compounds (VOCs) by Metal Oxide Nanostructures-Based Gas Sensors: A Review. *Ceramics International*, **42**, 15119-15141. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.145>
- [4] Chen, Y., Li, X., Li, X., Wang, J. and Tang, Z. (2016) UV Activated Hollow ZnO Microspheres for Selective Ethanol

-
- Sensors at Low Temperatures. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **232**, 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.138>
- [5] Ding, Y., Guo, X., Kuang, D., Hu, X., Zhou, Y., He, Y., *et al.* (2021) Hollow Cu₂O Nanospheres Loaded with MoS₂/Reduced Graphene Oxide Nanosheets for Ppb-Level NO₂ Detection at Room Temperature. *Journal of Hazardous Materials*, **416**, Article 126218. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126218>
- [6] Hao, R., Deng, X., Yang, Y. and Chen, D. (2014) Research Progress in Preparation and Applications of ZnO Nanowire/Rod Arrays by Hydrothermal Method. *Acta Chimica Sinica*, **72**, 1199-1208. <https://doi.org/10.6023/a14080593>
- [7] Rackauskas, S., Barbero, N., Barolo, C. and Viscardi, G. (2017) ZnO Nanowire Application in Chemoresistive Sensing: A Review. *Nanomaterials*, **7**, Article 381. <https://doi.org/10.3390/nano7110381>
- [8] Thomas, A. and Sivaperuman, K. (2024) Chemical Spray Pyrolysis Deposited ZnO/ZIF-8 and Cobalt Doped ZnO/ZIF-8 Composite Thin Films for Highly Sensitive and Selective Ammonia Sensing at Room Temperature. *Surfaces and Interfaces*, **54**, Article 105241. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105241>
- [9] Zhang, H., Guo, S., Zheng, W., Wang, H., Li, H., Yu, M., *et al.* (2023) Facile Engineering of Metal-Organic Framework Derived SnO₂-ZnO Composite Based Gas Sensor toward Superior Acetone Sensing Performance. *Chemical Engineering Journal*, **469**, Article 143927. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143927>
- [10] Li, K., Li, X., Chang, X., Qiao, X., Xiong, Y., Xia, F., *et al.* (2020) Metal-Organic Frameworks Derived Hierarchical Flower-Like ZnO/Co₃O₄ Heterojunctions for ppb-Level Acetone Detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **325**, Article 128814. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128814>
- [11] Chen, X.X., Shen, Y.B., Zhou, P.F., *et al.* (2019) NO₂ Sensing Properties of One-Pot-Synthesized ZnO Nanowires with Pd Functionalization. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **280**, 151-161. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.10.063>