

MXene-Cu₂O复合材料室温下检测NO₂气体性能的研究

宋元杞, 任文斌, 王常春

临沂大学物理与电子工程学院, 山东 临沂

收稿日期: 2025年5月29日; 录用日期: 2025年7月23日; 发布日期: 2025年8月4日

摘要

针对传统NO₂检测技术依赖高温、灵敏度不足等问题, 本研究通过水热法制备了MXene-Cu₂O复合材料, 开发了一种新型室温下超灵敏气体传感器。实验表明, 传感器在室温下展现出宽线性检测范围、低检测限及优异抗干扰性, 可稳定检测ppb至ppm级NO₂。该研究为开发低功耗、高灵敏的室温气体传感器提供了新策略, 在环境监测与工业安全领域具有重要应用价值。

关键词

Cu₂O, MXene, NO₂, 气体传感器

Study on the Performance of MXene-Cu₂O Composites in Detecting NO₂ Gas at Room Temperature

Yuanqi Song, Wenbin Ren, Changchun Wang

School of Physics and Electronic Engineering, Linyi University, Linyi Shandong

Received: May 29th, 2025; accepted: Jul. 23rd, 2025; published: Aug. 4th, 2025

Abstract

To address the limitations of conventional NO₂ detection technologies, such as high-temperature operation and insufficient sensitivity, this study developed a novel room-temperature ultrasensitive gas sensor based on MXene-Cu₂O composites synthesized via a hydrothermal method. Experimental results demonstrate that the sensor exhibits a wide linear detection range, low detection limit, and excellent anti-interference capability, enabling stable detection of NO₂ from ppb to ppm

文章引用: 宋元杞, 任文斌, 王常春. MXene-Cu₂O 复合材料室温下检测 NO₂ 气体性能的研究[J]. 凝聚态物理学进展, 2025, 14(3): 13-17. DOI: 10.12677/cmp.2025.143003

levels at room temperature. This research provides a new strategy for designing low-power, high-sensitivity room-temperature gas sensors, offering significant application potential in environmental monitoring and industrial safety fields.

Keywords

Cu₂O, MXene, NO₂, Gas Sensor

Copyright © 2025 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

氮氧化物(NO₂)作为主要的大气污染物之一,对人体呼吸系统和生态环境构成严重威胁[1]。根据世界卫生组织报告,长期暴露于高浓度 NO₂ 环境会增加呼吸道疾病和心血管疾病的发病风险[2]。传统 NO₂ 气体检测技术如化学发光法和光谱分析法虽然精度高,但存在设备庞大、成本高昂等缺点,难以满足实时监测的需求。

金属氧化物半导体(MOS)气体传感器因其成本低、体积小等优势备受关注,但其工作温度通常较高(>150℃),导致能耗大且存在安全隐患[3]。近年来,室温气体传感器的研发成为研究热点,其中 p 型半导体氧化亚铜(Cu₂O)因其独特的电子结构和可调控的氧空位特性展现出良好潜力[4]。然而,纯 Cu₂O 材料存在导电性差、表面易氧化等问题,限制了其传感性能[5]。

MXene 作为一种新型二维过渡金属碳化物,具有超高的导电性、丰富的表面官能团和可调控的界面特性,能有效抑制金属氧化物的表面氧化[6]。这些特性使其成为改善 Cu₂O 传感性能的理想材料。

本研究创新性地将 MXene 与 Cu₂O 复合,系统探究其在室温 NO₂ 检测中的性能。该研究不仅为开发高性能室温气体传感器提供了新思路,也为二维材料与金属氧化物的复合应用拓展了新方向。

2. 实验部分

本研究采用水热法制备 MXene-Cu₂O 复合材料。具体过程如下:将 0.176 g CuCl₂·2H₂O 溶解于 100 mL 去离子水中,在 55℃ 恒温水浴中持续搅拌,依次加入 NaOH 溶液和抗坏血酸溶液,经 5 小时反应后离心洗涤得到 Cu₂O 沉淀。随后将沉淀物与 MXene 分散液超声混合 1 小时,真空干燥后获得复合材料。

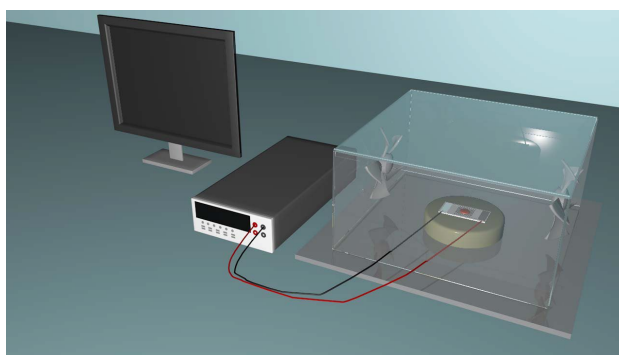


Figure 1. Gas sensitive testing system

图 1. 气敏测试系统

传感器制备采用滴涂法：将复合材料与 20 μL 去离子水混合研磨成均匀浆料，精确涂覆于叉指电极（银电极，指宽与间距均为 100 μm ）表面，室温干燥 24 小时后完成器件组装。气敏性能测试在自主搭建的静态配气系统中进行（图 1），测试条件严格控制在室温（ $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ）和 35% 相对湿度。目标气体浓度通过静态体积法配制，以高纯氮气作为平衡气体。使用 Keithley 2400 源表施加 1 V 偏压，实时监测传感器在空气和目标气体中的电流变化。响应值定义为暴露气体时的电流（ I_g ）与空气中基线电流（ I_a ）的比值（ $R = I_g/I_a$ ），响应时间和恢复时间分别定义为电流变化达到饱和值 90% 所需时长。

3. 结果与讨论

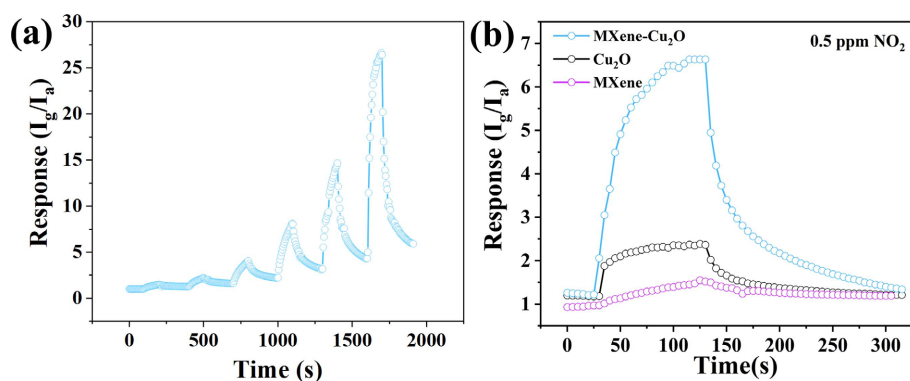


Figure 2. (a) Continuous dynamic response curves of the MXene-Cu₂O sensor to 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, and 5 ppm NO₂; (b) The response curves of MXene-Cu₂O, Cu₂O and MXene to 0.5 ppm NO₂
图 2. (a) MXene-Cu₂O 传感器对 0.1、0.2、0.5、1、2、5 ppm NO₂ 的连续动态响应曲线；(b) MXene-Cu₂O、Cu₂O 和 MXene 对 0.5 ppm NO₂ 的响应曲线

图 2(a) 展示了 MXene-Cu₂O 传感器对 0.1、0.2、0.5、1、2、5 ppm NO₂ 的连续动态响应曲线。在室温（ 25°C ）和 35% 相对湿度条件下，传感器对所有测试浓度均表现出快速、可逆的响应行为。当 NO₂ 浓度从 0.1 ppm 逐步增加至 5 ppm 时，响应值从 1.9 增长至 27.1，显示出超高的响应值和稳定的连续检测性能。值得注意的是，传感器对 0.1 ppm (100 ppb) NO₂ 的响应值仍达 1.9，随后对传感器的最低检测限做出测试（图 3），得出检测限为 25 ppb (响应值为 1.07)，这一性能显著优于已报道的多数 Cu₂O 基传感器。图 2(b) 展示了 MXene-Cu₂O、Cu₂O 和 MXene 对 0.5 ppm NO₂ 的响应曲线，可以观察到 MXene-Cu₂O 传感器对比纯 Cu₂O 和 MXene 在气体灵敏度方面有显著提升，但在响应/恢复时间方面并未观察到明显的变化。

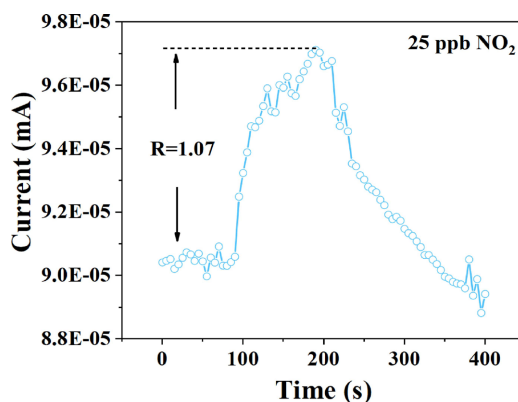


Figure 3. Dynamic current curve of 25 ppb NO₂ by the MXene-Cu₂O sensor
图 3. MXene-Cu₂O 传感器对 25 ppb NO₂ 的动态电流曲线

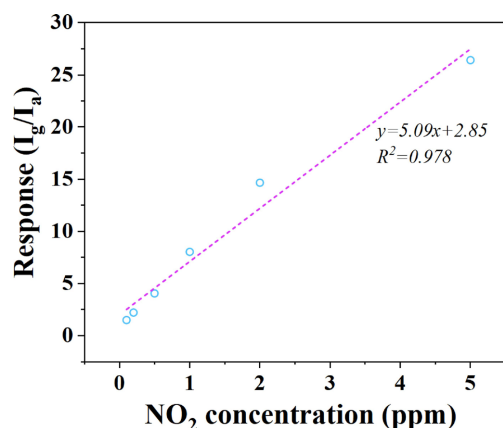


Figure 4. Fitting curve of the response value of the MXene-Cu₂O sensor and the concentration of NO₂

图 4. MXene-Cu₂O 传感器响应值与 NO₂ 浓度的拟合曲线

图 4 为传感器响应值与 NO₂ 浓度的拟合曲线。在 0.1~5 ppm 范围内，响应值与浓度呈良好的线性关系，拟合方程为 $y = 5.09x + 2.85$ ($R^2 = 0.978$)。这种宽线性范围(横跨两个数量级)与高灵敏度的结合，使传感器既能检测环境本底浓度(ppb 级)，又可满足工业泄漏监测(ppm 级)需求。

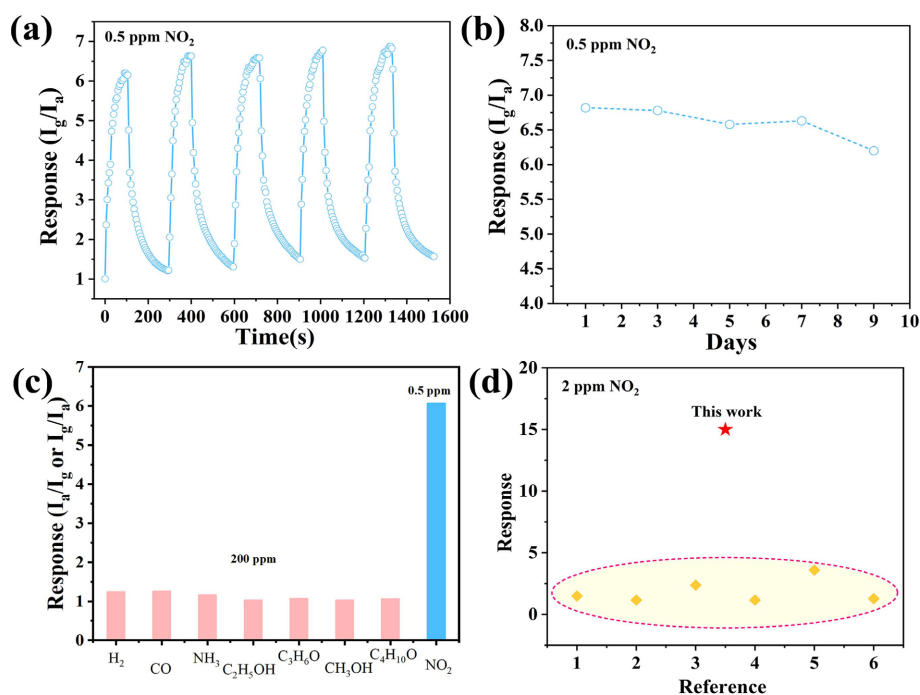


Figure 5. The MXene-Cu₂O sensor's performance: (a) Five repeatability tests in an environment of 0.5 ppm NO₂; (b) Stability test in an environment of 0.5 ppm NO₂; (c) Comparison of responses to 0.5 ppm NO₂ and 200 ppm interfering gas; (d) Comparison of responses of the same type of sensors to 2 ppm NO₂

图 5. MXene-Cu₂O 传感器性能: (a) 在 0.5 ppm NO₂ 环境下的 5 次重复性测试; (b) 在 0.5 ppm NO₂ 环境下的稳定性测试; (c) 对 0.5 ppm NO₂ 与 200 ppm 干扰气体的响应对比; (d) 对比同类型传感器对 2 ppm NO₂ 的响应

如图 5(a)和图 5(b)对传感器在 0.5 ppm NO₂ 环境下进行了五个循环的重复性测试和稳定性性能统计，传感器均表现出较为稳定的性能。图 5(c)对比了传感器对 0.5 ppm NO₂ 与 200 ppm 干扰气体(氢气、一氧

化碳、氨气、乙醇等)的响应值。结果显示,传感器对 0.5 ppm NO₂ 的响应值(6.07)是其他气体(200 ppm)的 4.8~5.8 倍,表现出优异的选择性,说明其在实际的应用环境中有着较强的抗干扰能力。如图 5(d), MXene-Cu₂O 传感器对 2 ppm NO₂ 的响应远高于同类型气体传感器[7]-[12],这一高响应值有力证明了我们的传感器在 NO₂ 检测上具有显著的性能优势。

4. 总结

本研究通过水热法制备了 MXene-Cu₂O 复合材料,成功开发了一种室温下高灵敏检测 NO₂ 气体的传感器。实验结果表明,传感器对 0.1~5 ppm 的 NO₂ 表现出优异的检测性能。在 0.1 ppm 浓度下响应值为 1.9,随浓度升高至 5 ppm 时响应值显著提升至 27.1,检测限低至 25 ppb (响应值 1.07),能够满足环境本底浓度监测需求。此外,传感器在 0.1~5 ppm 范围内呈现良好的线性响应,且对 0.5 ppm NO₂ 的响应值(6.07)是 200 ppm 干扰气体(H₂、CO、NH₃ 等)的 4.8~5.8 倍,展现出高选择性。该传感器在环境空气质量监测和工业安全领域具有重要应用潜力。未来工作将聚焦于材料制备工艺优化及复杂环境适应性研究,推动其实际应用进程。

参考文献

- [1] Yuan, W., Liu, A., Huang, L., Li, C. and Shi, G. (2012) High-Performance NO₂ Sensors Based on Chemically Modified Graphene. *Advanced Materials*, **25**, 766-771. <https://doi.org/10.1002/adma.201203172>
- [2] Ren, W., Luan, J., Yin, L., Xu, R., Wang, C., Zhang, P., *et al.* (2025) Ultrasensitive Room-Temperature NO₂ Gas Sensor Based on Graphene-Modified Cu₂O Nanocomposites: A Combined Experimental and First-Principles Study. *Measurement*, **245**, Article 116647. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116647>
- [3] 陈进龙, 陶然, 李冲, 等. 基于 SnS₂/In₂O₃ 的气体传感器及其室温下高性能 NO₂ 检测[J]. 物理学报, 2024, 73(10): 274-280.
- [4] 刘儒平, 杜利东, 岳钊, 等. Cu₂O 纳米晶制备及其在乙醇气体传感器中的应用[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(12): 138-141.
- [5] 孔灿, 刘雨函, 盛誉, 等. 聚苯胺增强氧化亚铜催化二氧化碳还原[J]. 化工进展, 2025, 44(6): 3144-3153.
- [6] 黄振乾, 郑梦杰, 郭庆峰, 等. 织物基 ZnO/MXene 复合光催化材料的制备及性能[J]. 印染, 2025, 51(4): 12-16+21.
- [7] Arkoti, N.K. and Pal, K. (2024) Improved Selectivity of Borophene Sensor Towards NO₂ Gas with PEI-ZIF-8 Overlayer. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **401**, Article 135033. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.135033>
- [8] Pan, Z., Wang, D., Zhang, D., Yang, Y., Yu, H., Wang, T., *et al.* (2024) rGO Doped MOFs Derived α -Fe₂O₃ Nanomaterials for Self-Supporting Ppb-Level NO₂ Gas Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **405**, Article 135378. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.135378>
- [9] Bharathi, P., Harish, S., Shimomura, M., Mohan, M.K., Archana, J. and Navaneethan, M. (2024) Ultrasensitive and Reversible NO₂ Gas Sensor Based on SnS₂/TiO₂ Heterostructures for Room Temperature Applications. *Chemosphere*, **346**, Article 140486. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140486>
- [10] Fang, H., Shang, E., Wang, D., Ma, X., Zhao, B., Han, C., *et al.* (2023) A Chemiresistive Ppt Level NO₂ Gas Sensor Based on CeO₂ Nanoparticles Modified CuO Nanosheets Operated at 100°C. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **393**, Article 134277. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134277>
- [11] Quan, W., Shi, J., Luo, H., Fan, C., Lv, W., Chen, X., *et al.* (2023) Fully Flexible MXene-Based Gas Sensor on Paper for Highly Sensitive Room-Temperature Nitrogen Dioxide Detection. *ACS Sensors*, **8**, 103-113. <https://doi.org/10.1021/acssensors.2c01748>
- [12] Chang, J., Qin, C., Zhang, Y., Zhu, L., Zhang, Y., Wang, Y., *et al.* (2023) Abundant Active Sites Triggered by Co-Doped SnS₂ for Ppb-Level NO₂ Detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **395**, Article 134511. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134511>