

正八面体 ZnO 传感材料的制备及其气敏性能研究

陈育中^{1,2*}, 高 鹏^{3,4}

(1.南京财经高等职业技术学校,江苏 南京 210019; 2.南京高职校工程检测有限公司,江苏 南京 210019;
3.河海大学机电工程学院,江苏 常州 213200; 4.常州朗锐凯途必减振技术有限公司,江苏 常州 213125)

摘要:针对空气污染中 NO₂ 气体的实时监测需求,开发了一种新型正八面体 ZnO (ZnO RO) 传感材料,以克服传统金属有机骨架化合物(MOFs)在电导率、稳定性和响应速度方面的不足。通过溶剂热法合成 Zn-BTC 前驱体,并在氮气氛围下高温(800℃)热解制得该材料,结合 ZnO 的宽带隙(3.37 eV)和高电子迁移率优势,实现结构优化。气敏测试采用叉指阵列电极,在干燥氮气环境中调控 NO₂ 浓度。ZnO RO 在 270℃ 下对 2 mg/L NO₂ 响应最优,随浓度增加呈线性关系($R^2=0.953$),功率律模型 β 值为 0.84,反映混合氧离子吸附机制。响应时间短(低浓度下更显著),恢复时间随浓度略升;对 NO₂ 选择性突出(响应值 3.8),远高于 SO₂(1.0)及其他干扰气体(<0.5)。湿度干扰导致响应指数衰减,电势变化 ΔV 随 NO₂ 浓度非线性上升,低浓度区敏感,高浓度趋饱和。该研究有望为新型传感材料的开发及其在气敏领域的应用提供新的思路。

关键词:氧化锌;气敏性;传感器

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)07-0177-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.031

Preparation and gas-sensing properties of octahedral ZnO sensing materials

CHEN Yu-zhong^{1,2*}, GAO Peng^{3,4}

(1.Nanjing Vocational College of Finance and Economics, Nanjing 210019, China;

2.Nanjing Technical Vocational College Engineering Inspection Co., Ltd., Nanjing 210019, China;

3.College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213200, China;

4.Changzhou Langrui Kaibei Vibration Reduction Technology Co., Ltd., Changzhou 213125, China)

Abstract: In response to the real-time monitoring needs of NO₂ gas in air pollution, a new type of octahedral ZnO (ZnO RO) sensing material has been developed to overcome the shortcomings of traditional metal-organic frameworks (MOFs) in terms of conductivity, stability, and response speed. Zn-BTC precursor was synthesized by solvothermal method and pyrolyzed at high temperature (800℃) under nitrogen atmosphere to obtain the material. Combining the wide bandgap (3.37 eV) and high electron mobility advantages of ZnO, structural optimization was achieved. The gas-sensing test uses interdigital array electrodes to regulate the NO₂ concentration in a dry nitrogen environment. ZnO RO exhibits the optimal response to 2 mg/L NO₂ at 270℃, showing a linear relationship with increasing concentration ($R^2=0.953$). The β value of the power-law model is 0.84, reflecting the adsorption mechanism of mixed oxygen ions. The response time was short (more significant at low concentrations), while the recovery time increased slightly with concentration; the selectivity for NO₂ is outstanding (response value 3.8), much higher than that of SO₂ (1.0) and other interfering gases (<0.5). Humidity interference leads to attenuation of the response index, and the potential change ΔV increases nonlinearly with the concentration of NO₂. The low concentration area is sensitive, while the high concentration tends to saturate. It is expected to provide new ideas for the development of new sensing materials and their applications in the field of gas sensing.

Key words: zinc oxide; gas sensing; sensor

现代社会的发展使工业化和城市化带来的严重空气污染的主要原因是汽车的使用和制造业排放。这些污染物对环境非常不利,并导致严重的健康问题。由于化石燃料的燃烧、高温反应过程和机动车排放大量的 NO₂。为了在全球范围内保护现代社会,需要最有效的实时气体传感设备。这吸引着研究人员寻找一类新的 NO₂ 传感材料^[1-2]。

近年来,人们开发了许多气体传感器,其中基于

金属氧化物的气体传感器由于其响应/恢复时间、优异的选择性、灵敏度、与微电子加工的高度兼容性以及合理的成本而获得了广泛的研究兴趣^[3-4]。此外,最主要的金属氧化物半导体(ZnO)作为一种理想的半导体,具有 3.37 eV 的宽带隙,令人印象深刻的性质,如高电子迁移率,低成本,无毒的性质^[5-7]。为了增强气体敏感性,科学界已经开发了各种基于 ZnO 的纳米结构,例如纳米棒^[8]、纳米线^[9]、纳米

收稿日期:2025-09-02;修回日期:2026-04-24

基金项目:2024 年度江苏省教育科学规划课题(C/2024/02/67)

作者简介:陈育中(1981-),男,硕士,高级工程师,研究方向为传感器与检测技术、电气自动化,通讯联系人,yuzhong20088@163.com。

带^[10]、纳米片^[11]以及空心球^[12]等。金属有机框架材料(Metal-Organic Frameworks, MOFs)凭借其高度可设计性和优异的物理化学性能,成为新型气敏材料的重要研究方向。MOFs 由金属离子或金属簇与有机配体通过配位作用自组装而成,具有高度有序的晶体结构和规则的孔道分布。这类材料往往具备超高比表面积和可调控的孔径,有利于气体分子的快速吸附与扩散,从而在理论上能够显著提高传感器的灵敏度与选择性^[13]。此外,MOFs 的结构和组成可通过调控金属中心或有机配体实现多样化设计,使其在特定气体分子的识别与检测中展现出广阔的应用潜力^[14]。然而,尽管 MOFs 在气体传感器领域表现出独特优势,其实际应用仍面临诸多挑战。首先,大多数 MOFs 的电导率较低,难以直接满足电阻型气敏传感器对电学响应的要求;其次,部分 MOFs 在高温或潮湿环境下结构稳定性不足,易发生框架坍塌,限制了其长期使用性能;此外,由于气体分子在 MOFs 孔道中的扩散与解吸速率较慢,导致传感器的响应和恢复过程相对滞后。这些问题使得 MOFs 虽具备优良的气体吸附与选择性识别能力,但在实际器件化应用中仍存在较大局限性。

在此背景下,研究者们提出将 MOFs 与半导体氧化物材料结合,以发挥二者的优势互补。其中, ZnO 作为一种典型的 n 型宽禁带半导体氧化物,因其化学稳定性高、制备工艺成熟、成本低廉而被广泛应用于气敏材料研究。本文提出了一种正八面体结构的 ZnO(Regular octahedron ZnO, ZnO RO),不仅继承了半导体氧化物的优异电学特性,还在结构上形成高度有序且稳定的形貌特征,能够提供更多暴露的活性位点和高效的电子传输通道,有助于克服 MOFs 在导电性与稳定性方面的不足。因此,基于 ZnO RO 的气敏材料研究,既能充分利用其结构优势提升气体分子的吸附与反应活性,又为发展高灵敏度和高稳定性的气体传感器提供了新的思路。

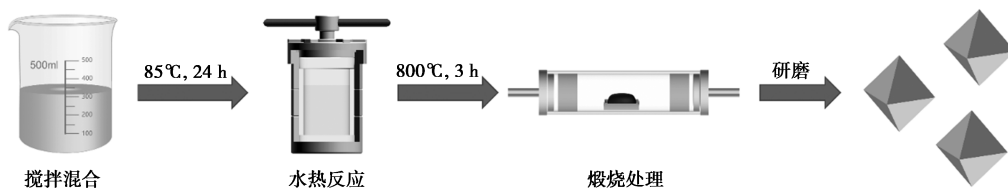


图 1 ZnO RO 传感材料的合成示意图

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

均苯三甲酸、*N,N*-二甲基甲酰胺、乙醇、六水合硝酸锌、四水合硝酸锰,均为分析纯,购于上海阿拉丁试剂有限公司,无需纯化直接使用。蒸馏水为实验室自制。

用 X 射线粉末衍射仪(XRD, PAN analytical X'Pert PRO 型)分析合成样品的结构测量。采用高分辨透射电镜(HRTEM)和场发射扫描电子显微镜(FESEM)对所合成的样品进行组分和形貌表征。使用 EDS 研究样品的元素组成。此外,使用岛津 8400 型光谱仪在 $400 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 的波数范围内记录了傅里叶变换红外(FT-IR)光谱。使用仪器 NETZSCH-STA 449F3 型进行样品的 TG/DTA 分析。进行 N_2 吸附-脱附分析(Micrometrics ASAP 2020 Plus HD88 型)以测量样品的 Brunauer-Emmett-Teller(BET)表面积和孔隙率。采用 X 射线光电子能谱(XPS, Thermo Scientific ESCALAB 250Xi 型)对所合成样品的表面元素组成进行了详细研究。

1.2 样品的制备

称取 1.0 g 均苯三甲酸(H_3BTC),溶解于由 15 mL *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)与 15 mL 无水乙醇组成的混合溶剂中,得到溶液 A。另取 2.0 g $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶解于 15 mL 去离子水中,配制溶液 B。随后将 2 种溶液混合,并在磁力搅拌条件下搅拌约 30 min,使其充分均匀。所得混合溶液转移至 100 mL 聚四氟乙烯内衬高压反应釜中,于 85°C 下反应 24 h 以上。反应结束后,冷却至室温,将产物过滤,并分别用 DMF 和乙醇多次清洗。经 80°C 真空干燥 24 h 后,得到中间产物固体粉末。称取 500 mg 粉末置于管式炉中,在氮气气氛下以 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 800°C ,并保持 3 h,冷却后获得正八面体结构的 ZnO 气敏材料。具体合成路线见图 1。

1.3 气体传感测量

气敏性能测试采用基于叉指阵列(IDA)电极的

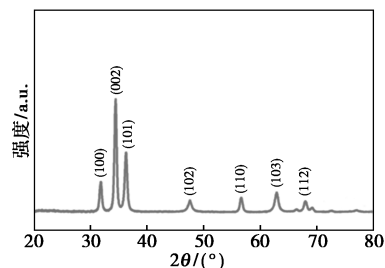
传感器平台。首先,在氧化铝基底上通过掩膜法沉积一层厚度约 150 nm 的 Au 薄膜,制备叉指间距为

30 μm 的 IDA 电极。随后,将制备所得的 ZnO 样品分散于适量溶剂中,经超声处理形成均匀悬浮液,并滴涂于 IDA 电极表面,自然干燥后作为气敏测试器件。气体传感性能测试在自建的不锈钢双层测试腔内完成。测试系统主要包括:温控热台(Eurotherm 2420, U. K.)、传感器固定装置、质量流量控制器(MFC, Alicat, USA)、数字万用表(Agilent 34401A, USA)以及基于 LabVIEW 软件的数据采集系统。通过高纯氮气作为载气,混合不同体积分数的目标气体(NO_2 、 SO_2 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 、 NH_3 、 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ 、 H_2S),并利用质量流量控制器精确调节进气比例与总流量,使测试气氛的浓度达到预定值。实验过程中,气体总流量保持在 400 sccm。传感器的工作温度通过温控热台进行调节和稳定。在达到平衡后,将目标气体通入测试腔体以记录传感器的实时电阻变化。当切换回纯氮气时,可获得器件的恢复过程。传感响应定义为目标气氛下电阻与基线电阻的比值,从而用于评估材料对不同气体的灵敏度和选择性。

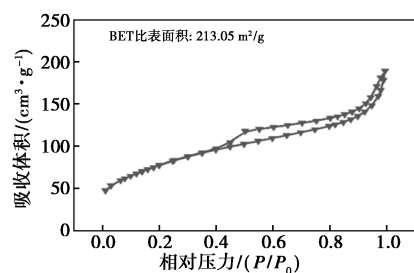
2 结果与讨论

2.1 物理结构表征分析

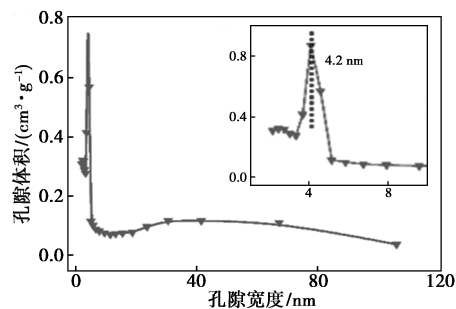
XRD 测试用于研究合成样品的晶体结构。ZnO RO 传感材料的 XRD 谱图如图 2(a) 所示,衍射角在 $2\theta = 31.7^\circ$ 、 34.4° 、 36.2° 、 47.5° 、 56.6° 、 62.9° 、 67.9° 分别对应 ZnO 晶格的(100)、(002)、(101)、(102)、(110)、(103)、(112) (JCPDS, PDF #36—1451)。氮气吸附-脱附等温线[图 2(b)]显示,ZnO RO 在相对压力 $p/p_0 = 0.45 \sim 1.0$ 范围内呈典型 IV 型等温线特征,并伴随明显的 H4 型滞后回线,说明材料主要为介孔结构。滞后环的出现源于毛细管凝聚作用,导致吸附与脱附曲线不完全重合。比表面积分析结果表明,ZnO RO 的比表面积达到 $213.05 \text{ m}^2/\text{g}$ 。其孔径分布曲线[图 2(c)]进一步显示,平均孔径约为 4.2 nm,符合典型的介孔特征。BET 分析结果表明,ZnO RO 兼具较大的比表面积与均一的介孔分布,这为气体分子的吸附、扩散及表面反应提供了更



(a) ZnO RO 的 XRD 谱图



(b) N_2 -BET 气体吸附等温线

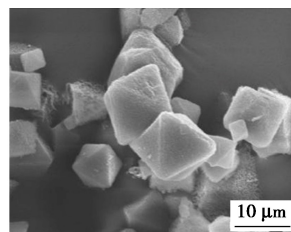


(c) N_2 -BET 气体脱附等温线

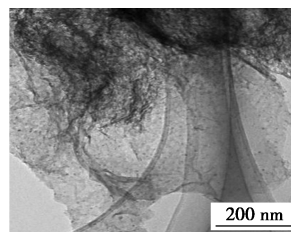
图 2 ZnO RO 的物理表征分析

多的活性位点和可利用空间,从而为其优异的气敏性能奠定了结构基础。

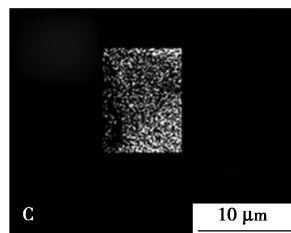
采用扫描电子显微镜测试得到材料的形貌。从图 3(a) 可知,ZnO RO 具有八面体晶体结构,粒径约为 14 μm ,且颗粒尺寸均一,表面略有粗糙,这有利



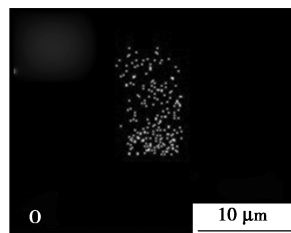
(a) SEM 图



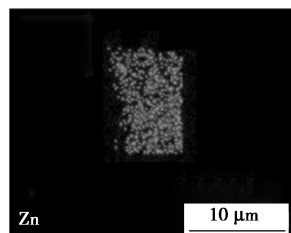
(b) TEM 图



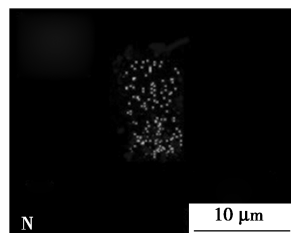
(c) C 元素分布图



(d) O 元素分布图



(e) Zn 元素分布图



(f) N 元素分布图

图 3 ZnO RO 的 SEM、TEM 及元素分布图

于电子的快速转移。从图3(b)的透射电子显微镜(TEM)图像可以进一步观察到,所制备的ZnO材料呈现出由大量纳米颗粒和片层状结构堆叠而成的多孔形貌,这种多孔网络结构能够显著增加比表面积,从而为气体分子的吸附与反应提供更多活性位点。图3(c)~(f)为元素分布的能谱(EDS)映射结果,可以清晰地看到材料中C、O、Zn及N元素均匀分布。其中Zn和O元素分布密集且覆盖范围较广,表明产物主体由ZnO组成;而C和N元素的存在则说明在合成过程中伴随了碳源和氮源的引入与掺杂,有助于改善材料的导电性与表面活性。整体来看,该八面体ZnO不仅保持了规则的晶体形貌,还兼具多孔结构和杂原子掺杂特征。

图4为样品的傅里叶变换红外光谱(FT-IR)图。从图可以看到,在 3570 cm^{-1} 处出现明显的吸收峰,对应于O—H键的伸缩振动,这主要来源于材料表面吸附的羟基基团或水分子。该特征峰的存在表明样品表面具有一定的亲水性,有利于气体分子的吸附过程。在 1544 cm^{-1} 处观察到C=N的特征峰,这可能与前驱体或合成过程中有机配体残留及氮源引入有关,说明材料中存在氮元素的掺杂,有助于改善材料的表面电子结构和导电性。位于 1457 cm^{-1} 处的吸收峰对应于Zn—O键的振动特征,进一步证明产物的主体结构为ZnO晶体。综合分析表明,该ZnO材料不仅具有典型的Zn—O骨架结构,同时表面还引入了O—H及C=N等基团,这些表面官能团和杂原子掺杂的存在可有效调节材料的表面化学性质,从而有望提升其气敏响应特性。

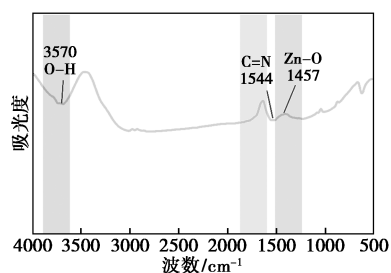
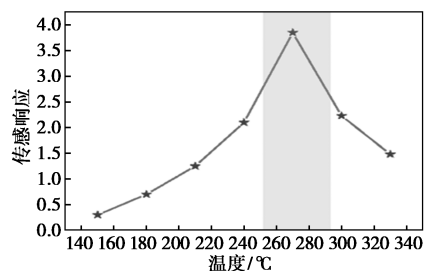


图4 ZnO RO的红外谱图

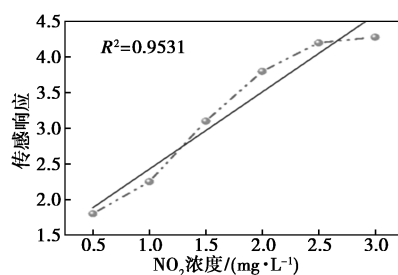
2.2 气敏特性分析

工作温度是固态化学金属氧化物气体传感器的一个重要参数,它取决于对目标分析物的灵敏度和选择性的调制。因此,测量了ZnO RO对暴露于 2 mg/L NO_2 气体时的传感器响应 $S[(R_g - R_a)/R_a]$ 与温度的函数关系。由图5(a)可见,传感响应值随工作温度的升高逐渐增加,并在约 270°C 时达到最

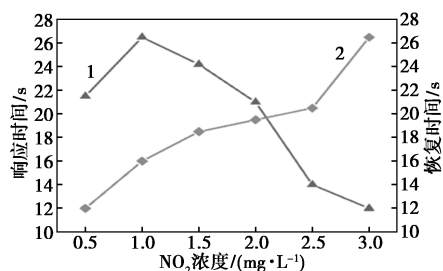
大值,之后响应反而有所下降。这说明该材料在该温度下活性位点的吸附-脱附动力学处于最优平衡状态。值得注意的是,正八面体结构的ZnO晶体表面暴露了更多高能晶面和边缘位点,同时表面粗糙度较高,这显著提升了气体分子的有效吸附量,从而带来更高的响应值。图5(b)为气敏响应与 NO_2 气体浓度的关系曲线,可以看出传感响应随浓度升高而近似线性增加,且拟合优度达到 $R^2 = 0.9531$,表明该材料在不同浓度下均表现出稳定且可重复的气敏行为。八面体形貌赋予了ZnO较大的比表面积和较为均一的孔道分布,这有助于气体分子的快速扩散和充分接触,提高了材料在低浓度下的检测灵敏度。图5(c)显示了响应时间和恢复时间随气体浓度的变化趋势。随着 NO_2 浓度的升高,响应时间基本保持在较低水平,而恢复时间有所延长。这一现象与气体分子在八面体ZnO表面强吸附作用有关。得益于八面体结构所形成的多面体晶面及其丰富的表面活性位点,气体分子能够快速吸附并引起电导率的显著变化,从而实现较快的响应速率;而在



(a) 2 mg/L NO_2 气体下传感器响应曲线与ZnO RO温度的关系



(b) 传感器响应与 NO_2 浓度的关系



1—响应时间;2—恢复时间

(c) 由ZnO RO制成的传感器的响应-恢复时间关系图

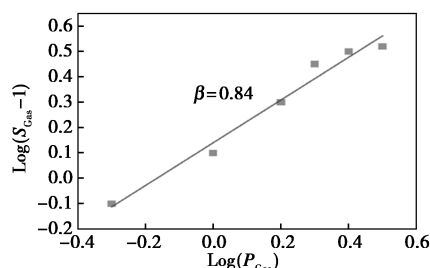
图5 ZnO RO传感器的气敏特性分析

高浓度下,分子的解吸附过程相对缓慢,导致恢复时间有所增加。

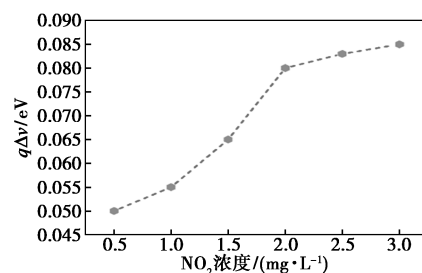
综上,正八面体 ZnO 不仅在结构上保证了高度有序的晶体取向和均一粒径,还在性能上表现出高响应值、良好的线性检测关系以及快速响应特性。这些优势充分说明,八面体结构在提升 ZnO 气敏性能方面发挥了关键作用,为其在高性能气体传感器中的应用奠定了基础。

图 6 展示了正八面体 ZnO 传感材料对 NO_2 气体的响应特性及其相关影响因素。图 6(a) 描绘了传感器响应值 S 与 NO_2 气体浓度 P_{Gas} 的对数关系。具体而言, $\log(S-1)$ 与 $\log(P_{\text{Gas}})$ 呈现出良好的线性关系,拟合斜率 β 约为 0.84。该线性关系符合气敏传感器的功率律模型,即 $S-1 \propto P_{\text{Gas}}^\beta$, 其中 β 值通常用于表征氧物种的吸附类型和电子转移机制。对于 n 型半导体如 ZnO, 当 $\beta \approx 0.5$ 时, 常对应于 O^{2-} 吸附主导, 而 $\beta \approx 1$ 则对应于 O^- 吸附主导。本实验中 $\beta = 0.84$ 表明 NO_2 吸附过程中可能存在混合氧离子形式 (O^- 和 O^{2-}), 这与 ZnO 表面在工作温度下的氧吸附行为一致。理论上, NO_2 作为氧化性气体, 会捕获 ZnO 表面的导带电子, 形成负电荷层, 导致耗尽层加宽和电阻增加, 从而增强响应。该 β 值接近 1, 暗示 NO_2 分子可能直接参与单电子转移过程, 如 $\text{NO}_2 + e^- \rightarrow \text{NO}_2^-$, 这增强了传感器的灵敏度。图 6(b) 显示了传感器在不同 NO_2 浓度下的电势变化 ΔV 。随着 NO_2 浓度从 0 增加至 3.0 mg/L, ΔV 呈非线性上升趋势, 从约 0.045 V 增至 0.090 V。该行为可归因于气体吸附诱发的表面势垒变化。根据半导体气敏理论, NO_2 吸附会降低 ZnO 的电子浓度, 抬高费米能级, 导致 Schottky 势垒升高。曲线在低浓度区 (< 1 mg/L) 上升较缓, 而在高浓度区趋于饱和, 表明存在吸附位饱和效应。这与 Langmuir 吸附等温线模型相符, 其中吸附覆盖度 $\theta \propto P/(1+bP)$, b 为吸附常数。该结果暗示正八面体 ZnO 在低浓度 NO_2 检测中具有潜在应用价值, 但需优化以避免高浓度饱和。图 6(c) 比较了正八面体 ZnO 对多种气体的选择性响应, 包括 NO_2 、 SO_2 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 、 NH_3 、 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ 和 H_2S 。在相同浓度下, 对 NO_2 的响应高度最高 (3.8), 远高于其他气体 (如 SO_2 为 1.0, 其余 < 0.5)。这种高选择性源于 ZnO 表面对氧化性气体的亲和力差异。理论上, NO_2 的电子亲和能较高 (约 2.3 eV), 易于从 ZnO 捕获电子, 形成稳定的表面络合物, 而还原性气体如 NH_3 或 H_2S 则可能释放电子, 削弱响应。此外, 正八面体 ZnO 的 $\{111\}$ 暴露面具有较高

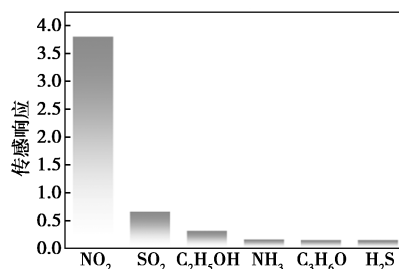
表面能, 促进了 NO_2 的优先吸附。图 6(d) 考察了相对湿度对传感器响应的影响。随着湿度从 0% 增加至 100%, R_a/R_g 从约 3.5 下降至 0.5, 呈现指数衰减趋势。该湿度干扰效应可解释为水分子竞争吸附: H_2O 在 ZnO 表面解离形成 OH^- , 占用氧吸附位点, 减少 NO_2 的有效吸附。同时, 高湿度下形成的液相层可能促进离子导电, 旁路电子传输路径, 导致灵敏度降低。根据 Arrhenius 模型, 湿度诱导的激活能变化会影响载流子迁移率。为缓解此问题, 可考虑表面修饰 (如负载贵金属) 或操作温度优化, 以提升传感器的环境稳定性。



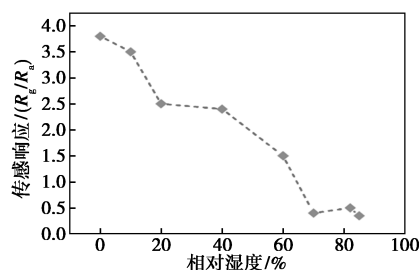
(a) $\log(S_{\text{gas}}-1)$ 与 $\log(P_{\text{gas}})$ 图



(b) NO_2 气体浓度为 0.5~3 mg/L 时, NO_2 浓度的增加与能带弯曲的变化曲线



(c) ZnO RO 的选择性



(d) ZnO RO 的湿度响应

图 6 ZnO RO 传感材料对 NO_2 气体的响应特性

3 结论

本研究成功制备了一种正八面体结构的 ZnO (ZnO RO) 气敏材料, 通过以均苯三甲酸和锌盐为前驱体的溶剂热法结合高温热解工艺获得。该材料表现出高度有序的晶体结构、多孔形貌以及较大的比表面积, 正八面体形态不仅提供了丰富的表面活性位点和高效的电子传输通道, 还引入了杂原子掺杂 (如 N 和 C 元素), 显著提升了材料的表面化学活性和导电性能。在气敏性能测试中, ZnO RO 对 NO₂ 气体展现出优异的响应特性: 在 270℃ 工作温度下, 对 2 mg/L NO₂ 的响应值达到最大; 响应值随 NO₂ 浓度呈近线性增加 ($R^2=0.9531$), 并符合功率律模型 ($\beta \approx 0.84$), 表明混合氧离子吸附机制的参与。该材料还具备快速响应/恢复时间 (响应时间较低, 恢复时间随浓度略增)、高选择性 (对 NO₂ 响应远高于 SO₂、C₂H₅OH、NH₃、C₃H₆O 和 H₂S 等干扰气体) 以及良好的低浓度检测能力。尽管湿度对响应有一定干扰效应 (随湿度增加响应衰减), 但整体性能优于传统 ZnO 材料, 归因于八面体结构的独特优势, 如暴露的高能晶面和多孔网络。本工作为开发高性能 NO₂ 气体传感器提供了新型材料策略, ZnO RO 的结构设计有效克服了传统 MOFs 和半导体氧化物的局限性, 具有广阔的应用前景, 如环境监测和工业安全。未来研究可进一步优化表面修饰或复合策略, 以提升湿度抗干扰能力和长期稳定性。

参考文献

- [1] Cao P, Cai Y, Pawar D, *et al.* Au@ZnO/rGO nanocomposite-based ultra-low detection limit highly sensitive and selective NO₂ gas sensor[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10: 4295–4305.
- [2] Bai H, Guo H, Feng C, *et al.* Highly responsive and selective ppb-level NO₂ gas sensor based on porous Pd-functionalized CuO/rGO at room temperature[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10: 3756–3769.
- [3] Bonyani M, Zebajrad S M, Janghorban K, *et al.* Enhanced NO₂ gas sensing properties of ZnO-PANI composite nanofibers[J]. *Ceramics International*, 2022, 49(1): 1238–1249.
- [4] Bonyani M, Zebajrad S M, Janghorban K, *et al.* Au sputter-deposited ZnO nanofibers with enhanced NO₂ gas response[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 372: 132636.
- [5] Kannan K, Radhika D, Sadasivuni K K, *et al.* Nanostructured metal oxides and its hybrids for photocatalytic and biomedical applications[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 281: 102178.
- [6] Safaei-Ghomi J, Elyasi Z, Babaei P. N-doped graphene quantum dots modified with CuO (0D)/ZnO (1D) heterojunctions as a new nanocatalyst for the environmentally friendly one-pot synthesis of monospiro derivatives[J]. *New Journal of Chemistry*, 2020, 45: 1269–1277.
- [7] Sharma D K, Shukla S, Sharma K K, *et al.* A review on ZnO: Fundamental properties and applications[J]. *Materials Today Proceedings*, 2020, 49(8): 3028–3035.
- [8] Yang D, Ramu A G, Lee Y, *et al.* Fabrication of ZnO nanorods based gas sensor pattern by photolithography and lift off techniques[J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2021, 33(3): 101397.
- [9] Hsueh T J, Peng C H, Chen W S. A transparent ZnO nanowire MEMS gas sensor prepared by an ITO micro-heater[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 304: 127319.
- [10] Kim K, Choi P G, Itoh T, *et al.* Atomic step formation on porous ZnO nanobelts: Remarkable promotion of acetone gas detection up to the parts per trillion level[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10: 13839–13847.
- [11] Van Duy L, Nguyet T T, Hung C M, *et al.* Ultrasensitive NO₂ gas sensing performance of two dimensional ZnO nanomaterials: Nanosheets and nanoplates[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(20): 28811–28820.
- [12] Xing Y, Zhang L X, Chong M X, *et al.* In-situ construction of carbon-doped ZnO hollow spheres for highly efficient dimethylamine detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 369: 132356.
- [13] Han R, Zhao M, Li X, *et al.* N-doped regular octahedron MOF-199 derived porous carbon for ultra-efficient adsorption of oxytetracycline[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 302: 121960.
- [14] Yang Y, Gao X, Yang S, *et al.* Synthesis and superior SERS performance of porous octahedron Cu₂O with oxygen vacancy derived from MOFs[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56: 9702–9711. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。