

Sb₂O₃八面体微晶的合成及其湿敏性能研究

王佳慧^{1*}, 张一博¹, 殷艳艳^{2#}, 别利剑¹, 尹静^{3#}

¹天津理工大学材料科学与工程学院, 天津

²南开大学滨海学院环境科学与工程系, 天津

³天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津

收稿日期: 2026年3月2日; 录用日期: 2026年3月25日; 发布日期: 2026年4月2日

摘要

本工作采用简单的水热法合成了Sb₂O₃粉体并研究了其湿敏性能。材料表征显示, 所制备的Sb₂O₃是立方相, 呈现微米级八面体形貌, 含有丰富的表面缺陷。将Sb₂O₃微晶作为敏感材料组装了阻抗型湿敏传感器, 并对器件的湿敏特性展开评价。结果表明, Sb₂O₃在11%~97%的相对湿度范围内表现出优秀的湿敏性能, 特别是灵敏度高(1.23×10^5), 响应时间短(2 s)及最大湿滞小(1.5%)。最后, 结合复阻抗谱与等效电路讨论了Sb₂O₃传感器的湿敏机理。本文报道了一种性能优异的感湿材料, 进而为该类材料在生态及环境等方面的应用奠定了物质基础。

关键词

Sb₂O₃, 八面体, 湿敏传感器

Synthesis and Humidity Sensing Performance of Sb₂O₃ Octahedral Microcrystals

Jiahui Wang^{1*}, Yibo Zhang¹, Yanyan Yin^{2#}, Lijian Bie¹, Jing Yin^{3#}

¹School of Materials Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin

²Department of Environmental Science and Engineering, Nankai University Binhai College, Tianjin

³School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin

Received: March 2, 2026; accepted: March 25, 2026; published: April 2, 2026

*第一作者。

#共同通讯作者。

文章引用: 王佳慧, 张一博, 殷艳艳, 别利剑, 尹静. Sb₂O₃ 八面体微晶的合成及其湿敏性能研究[J]. 材料化学前沿, 2026, 14(2): 100-106. DOI: 10.12677/amc.2026.142012

Abstract

In this work, Sb_2O_3 powder was synthesized by a simple hydrothermal method and its humidity sensing properties were investigated. The material characterization showed that as-prepared Sb_2O_3 was crystallized in a cubic phase, presenting a micron-sized octahedral morphology and containing abundant surface defects. Sb_2O_3 microcrystals were used as the sensitive layer to assemble an impedance-type humidity sensor, and then the humidity sensing characteristics of the device were evaluated. The results indicate that Sb_2O_3 exhibited excellent humidity sensing performance within a relative humidity range of 11%~97%, especially with high sensitivity (1.23×10^5), short response time (2 s), and small maximum humidity hysteresis (1.5%). Finally, the humidity sensing mechanism of the Sb_2O_3 sensor was discussed by combining the complex impedance spectrum with the equivalent circuit. This work reports an excellent humidity-sensing material, and then laying a material foundation for its applications in ecology, environment and other aspects.

Keywords

Sb_2O_3 , Octahedron, Humidity Sensor

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

湿度传感器是一类可以感知和监测空气中水分子含量的电子元件。作为一项重要的环境指标，精确调控湿度在食品、农业、工业、医疗等领域具有非常重要的意义[1]。例如：在食品生产或储存中，湿度传感器有助于监测环境的水分含量，进而有效防止水分流失或吸湿霉变，从而控制食物新鲜度[2][3]；在医疗领域，除了用于药物储存外，还可集成于临床设备中，通过实时监测并调控气流湿度，提升患者的呼吸舒适度而减轻疼痛[4][5]。尽管当前湿度传感技术已经取得了巨大进步，但市场上常用的湿度传感器在复杂恶劣环境中的适应性、检测精度及稳定性等方面仍然存在明显短板[6]。湿敏材料决定了湿度传感器的性能，因此，兼具高灵敏度、快响应速度的新型高效湿敏材料依然是该领域的研发重点与迫切需要。

金属氧化物(Metal Oxide, MO)以其优异的灵敏度、快速的响应速度和持久的稳定性而成为被研究最广泛的一类湿敏材料。这说明 MO 在湿度感测领域具有广阔的创新空间与良好的发展前景。其中， Sb_2O_3 作为一种重要的金属氧化物，凭借独特的物理化学性质，已被广泛应用于阻燃涂料、功能填料、催化反应等多个技术领域[7]。然而，截至目前， Sb_2O_3 材料在湿度传感领域的研究仍相对匮乏。比如，Tudorache F 等首次报道了热蒸发沉积 Sb_2O_3 薄膜在不同湿度下的阻抗变化[8]。然而，该材料的灵敏度较低($S = 3.6$)，且缺乏关键湿敏特性参数，包括响应-恢复时间和最大湿滞等。

本工作以开发新型高效湿敏材料为研究目的，通过简单的水热法合成了 Sb_2O_3 材料。在材料表征的基础上，利用 Sb_2O_3 组装了湿敏传感器件并初次探索了湿敏性能，发现该材料对环境中的湿气能做出快速响应且具有较高的灵敏度。

2. 实验

2.1. 试剂

本文中，酒石酸锑钾($\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)和无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)均购于天津市百世化工有限公司，

钨酸钠二水合物($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)和氢氧化钠(NaOH)均购于阿拉丁生化科技股份有限公司。所有试剂均为分析纯,使用前无需进一步纯化。

2.2. 材料合成

本文中,利用简便的水热法制备了 Sb_2O_3 材料[9]。首先,将 2 mmol $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (6.14 g)与 2 mmol $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (1.65 g)分别溶解于 8 mL 蒸馏水中,磁力搅拌 10 min 至完全溶解。其次,将上述两种溶液混合,再磁力搅拌 10 min 以形成均相体系。再次,向上述体系加入 0.20 mL 浓度为 2 mol/L 的 NaOH 溶液并搅拌 30 min,将混合溶液的 pH 值调节至 9。然后,将混合物转移至具聚四氟乙烯内衬的 50 mL 水热釜中,在 180°C 保持 24 h。待水热釜自然冷却至室温后,将产生的混合物离心,用去离子水和无水乙醇洗涤数次,在 60°C 下真空干燥 12 h,最终得到白色粉体。

2.3. 表征手段

使用日本 Rigaku 公司的 D/Max2500pc 型 X 射线衍射仪(X-ray Diffractometer, XRD)来测试材料的晶体结构与物相组成,以 $\text{Cu K}\alpha 1$ ($\lambda = 0.15406$ nm)为辐射源。利用美国 FEI 公司的 QUANTA FEG 25 型扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)获取材料的表面形貌,加速电压 5 kV。采用中国 PERSEE 公司的 TU-1950 型紫外-可见分光光度计(Ultraviolet-Visible spectrophotometer, UV-Vis)获取材料的紫外-可见光谱,以 BaSO_4 为基准。

2.4. 传感器组装与测试

首先称取 5 mg Sb_2O_3 粉末置于玛瑙研钵中,滴入适量无水乙醇,研磨形成糊状物。将糊状物均匀涂覆在 Ag-Pd 叉指电极表面(氧化铝基板,指宽和间距均为 0.15 mm),室温晾干,即制成了平面传感器件。

在北京 Elite 公司的 CHS-1 湿敏分析仪上测试材料的湿敏性能,测试条件为 10² Hz 频率、1 V 交流电压。在湿敏性能测试中,室温下(~20°C)选定由低到高 6 个不同的相对湿度环境,分别为 11% (LiCl)、33% (MgCl_2)、54% ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$)、75% (NaCl)、85% (KCl)和 97% (K_2SO_4),由密闭的饱和盐溶液提供湿度梯度。灵敏度定义为 $S_r = Z_0/Z_{\text{RH}}$,其中, Z_0 表示在 11% 的相对湿度(Relative humidity, RH)下,以 Sb_2O_3 材料为敏感层所构建传感器的阻抗值(Z),而 Z_{RH} 表示传感器在一定待测湿度状况下的阻抗值。响应时间(τ_{res})或恢复时间(τ_{rec})定义为在吸附或者脱附条件下,传感器分别达到总阻抗改变 90%所需要的时间。最大湿滞(ΔH_{max})定义为在吸湿(湿度逐渐升高)和脱湿(湿度逐渐降低)过程中,传感器达到相同阻抗值时的最大相对湿度差值。

3. 结果与讨论

3.1. 样品表征

图 1(a)展示了 Sb_2O_3 的 XRD 衍射花样。由观察可知,所有衍射峰均能与标准立方相 Sb_2O_3 (PDF#43-1071)相对应,表明成功制备了 Sb_2O_3 材料。此外,衍射峰较为尖锐狭窄,由此可知 Sb_2O_3 具有高结晶度。在 Sb_2O_3 的水热合成过程中,钨酸钠主要用作形貌控制剂。反应完成后,钨酸钠相关的表面吸附物 WO_4^{2-} 和 Na^+ 离子在样品洗涤过程中被去除。XRD 花样中未观察到与含钨晶体相关的衍射峰或者与含钨无定型物质相关的鼓包峰,说明所得 Sb_2O_3 样品中没有含钨物质,纯度较高。利用无机离子调控材料形貌是合成微纳晶体的常见策略。在本工作中, WO_4^{2-} 在 Sb_2O_3 八面体的形成过程中发挥着重要作用。阴离子 WO_4^{2-} 和 OH^- 可以通过静电作用吸附在 Sb_2O_3 的特定晶面处,减缓晶体成核速率,并改变了不同晶面的相对生长速率[9],最终形成八面体外形。由图 1(b)所示的 SEM 照片可以看出, Sb_2O_3 样品呈现出八面体外形,且微晶颗粒分散性良好,无明显团聚现象。通过统计分析可知,八面体微晶的边长约为 5 μm 。此外,这

些八面体微晶外形发育完整，几何结构规整，这一特征可为材料表面提供充足的水分子吸附位点，为其优异的湿敏性能奠定结构基础。

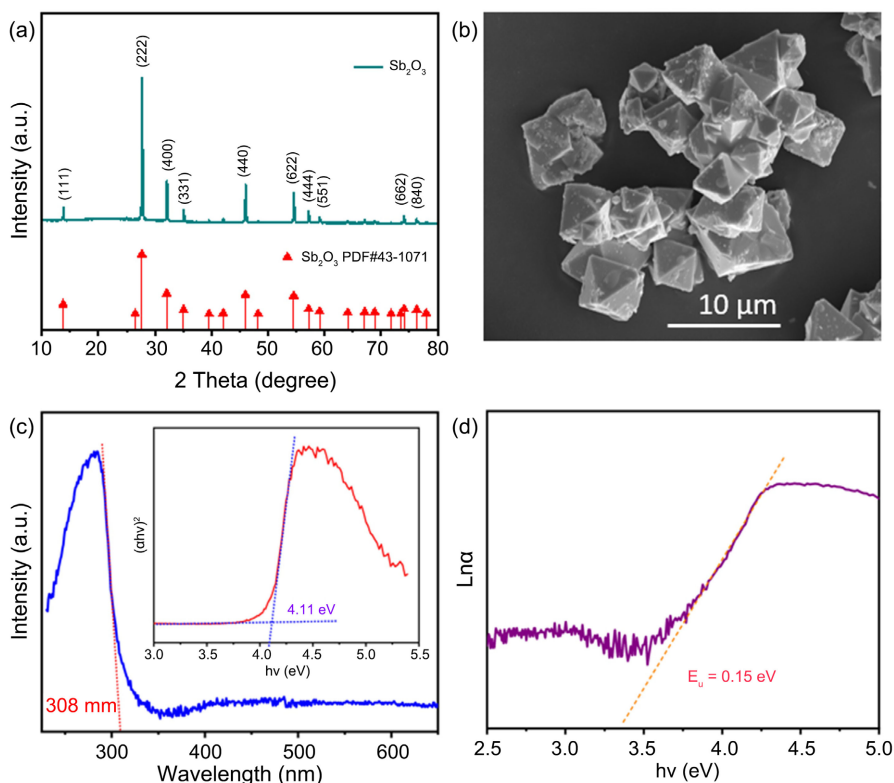


Figure 1. (a) XRD patterns, (b) SEM image, (c) UV-Vis spectrum, (d), $\text{Ln}\alpha-(h\nu)$ plot of Sb_2O_3 . Inset in (c): Tauc plot
图 1. Sb_2O_3 的 (a) XRD 图, (b) SEM 照片, (c) UV-Vis 光谱及 (d) $\text{Ln}\alpha-(h\nu)$ 图。(c) 中插图为 Tauc 关系

通过 UV-Vis 分析了 Sb_2O_3 的光学性质。结果如图 1(c)所示, Sb_2O_3 的吸收边约为 308 nm, 表明其对紫外光区域的光子具有特征吸收响应, 显示了典型的半导体特性。图 1(c)插图为相应的 Tauc 关系, 显示了 Sb_2O_3 的禁带宽度(E_g)为 4.11 eV, 大于文献报道结果(3.34 eV) [7]。扩展禁带宽度可以有效降低材料在低湿情况下的本征电导率, 提高基线阻抗值(Z_0), 这是由于禁带展宽使价带电子更难以吸收外界能量跃迁至导带; 根据灵敏度定义, 当湿度增加后, 水分子可以提供额外的载流子降低材料阻抗, 从而实现对湿度变化的高灵敏响应。Urbach 能量(E_u)是表征半导体材料缺陷密度与晶格无序程度的关键参数, 其数值大小与材料内部缺陷能级的分布直接相关。由图 1(d)可知, Sb_2O_3 的 E_u 值为 0.15 eV, 远低于 Sb_2O_3 薄膜 (0.31 eV) [10]。缺陷能级的减少增加了 Sb_2O_3 八面体材料价带中电子向导带跃迁的难度, 从而有利于促进表面载流子的自由迁移与跳跃(hopping)过程。这一特征与 Sb_2O_3 八面体扩展的禁带宽度相呼应, 见图 1(c), 降低了 Sb_2O_3 材料的本征电导率, 为其在湿度传感过程中高灵敏响应奠定了物理基础。

3.2. 湿敏性能

湿敏性能测试首先需要确定湿度传感器的最佳工作频率。图 2(a)展示了 Sb_2O_3 湿度传感器在 11%~97% RH 的相对湿度区间, 10^1 ~ 10^5 Hz 的测试频率范围内的阻抗特性。测试结果表明, 在低于 10^2 Hz 的频率区间, 低湿度环境下传感器的阻抗值超出 CHS-1 测试系统的记录上限(1 GΩ), 导致有效数据缺失; 在更高频率范围内(10^2 ~ 10^5 Hz), 随着 RH 的提高, 传感器阻抗值降低, 表现湿敏响应。其中, 在 10^2 Hz 下湿度传感器显示出最大的阻抗变化, 这意味着此工作频率下传感器的灵敏度最高。因此, 选择 10^2 Hz 作为最

佳工作频率。图 2(b)所示为 Sb₂O₃ 湿度传感器在 11% RH 与 97% RH 湿度环境间循环测试时的动态响应 - 恢复曲线。测试结果显示, Sb₂O₃ 材料在湿度为 11% RH 时的阻抗值为约 739 MΩ, 而 97% RH 下的阻抗值为 0.006 MΩ, 得出灵敏度高达 1.23 × 10⁵。此外, Sb₂O₃ 材料也表现出较快的动态响应行为, 其中响应时间仅为 τ_{res} = 2 s 而恢复时间为 τ_{rec} = 98 s。

湿度传感器在不同 RH 下切换时往往会产生湿度滞后现象进而影响传感器的准确度。图 2(c)为 Sb₂O₃ 传感器在 11%~97% RH 不同湿度下的吸湿 - 脱湿曲线。由图 2(d)相应的湿滞曲线得出, 传感器的 ΔH_{max} 仅为 1.5% RH。极高的灵敏度、快速的响应行为以及较小的湿滞说明 Sb₂O₃ 材料具有良好的湿敏性能, 有望成为未来湿敏传感器较好的候选材料之一。

在湿度传感领域, Sb₂O₃ 材料的应用研究尚处于初步探索阶段, 目前仅有一篇文献报道了 Sb₂O₃ 薄膜在不同湿度下的阻抗变化[8]。表 1 汇总了 Sb₂O₃ 八面体与部分 MO 的湿敏性能。对比数据显示, 本工作的 Sb₂O₃ 基湿度传感器在灵敏度、响应时间及湿滞三方面均显著优于对照组材料。这一性能优势不仅凸显了 Sb₂O₃ 材料在湿度传感领域的潜在应用前景, 同时也验证了本研究工作的创新性与实践价值。

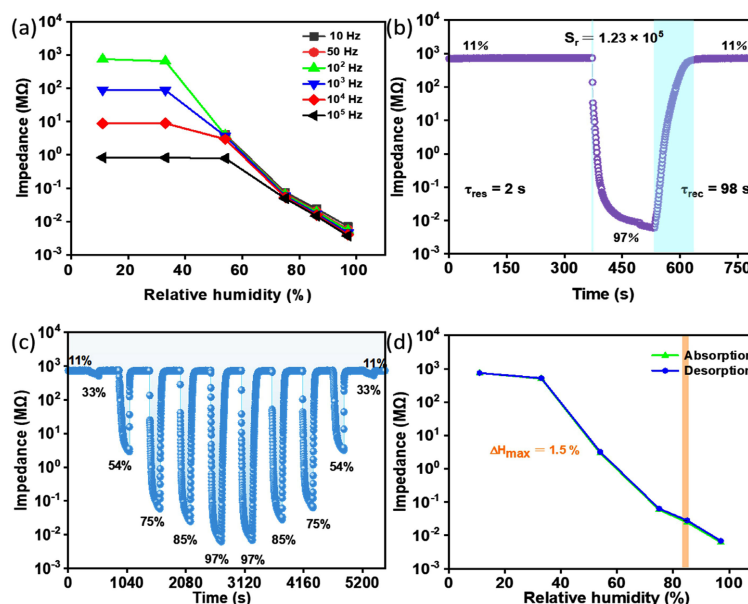


Figure 2. (a) Z-RH relationships at different working frequencies, (b) the dynamic response-recovery curve between 11% RH and 97% RH, (c) the moisture adsorption-desorption curve at different RH, (d) and the humidity hysteresis of Sb₂O₃

图 2. Sb₂O₃ 在 (a) 不同频率下的 Z-RH 关系, (b) 11%~97% RH 间切换的动态响应 - 恢复曲线, (c) 在不同 RH 下的吸湿 - 脱湿曲线, 以及 (d) 湿滞结果

Table 1. Performance comparison of humidity sensors using different metal oxides

表 1. 不同金属氧化物的湿度传感器性能比较

Materials	S _r	τ _{res} /τ _{rec} (s)	ΔH _{max} (% RH)	Range (% RH)	Reference
Sb ₂ O ₃	3.6	-/-	-	0~100	[8]
SnO ₂	1.34 × 10 ³	84/576	0.94	11~94	[11]
ZnO	220	600/3	5	12~96	[12]
SnO ₂ /SiO ₂	100	14/16	2	11~96	[13]
ZnO/SnO ₂	371	197/54	-	40~90	[14]
Sb ₂ O ₃	1.23 × 10 ⁵	2/98	1.5	11~97	此工作

3.3. 湿敏机理

借助复阻抗谱(Complex Impedance Spectrum, CIS)结合等效电路(Equivalent Circuit, EC)讨论了 Sb_2O_3 传感器的湿敏机理, 见图 3。图 3(a)展示了低湿条件下传感器的 Nyquist 图: 当 RH 为 11% 时, CIS 近乎为一条直线, 表明传感器具有较高的固有阻抗, 此时 Sb_2O_3 表面化学吸附的水分子很少, 解离的质子(H^+)以跳跃形式参与电导[4]; 当 RH 从 11% 逐渐增加到 33%, 再到 54%, CIS 逐渐过渡到半圆, 说明表面物理吸附的水分子逐渐形成不连续水层, 促进了 H^+ 向水合氢离子(H_3O^+)的转化与迁移, 采用 Grotthuss 质子传导机制。图 3(a)中插图即为低湿条件下的等效电路图, 由两部分串联在一起: 一部分是表示电极的电阻(R_s), 另一部分是表示敏感层的电阻(R)与恒相位元件(CPE1)并联。

在高湿条件下, 如图 3(b)所示, 阻抗图由半圆和斜线构成, 其中半圆表示传感器固有阻抗, 斜线表示电极-电解质界面的阻抗(Warburg 阻抗)。此时随着 RH 继续增加, CIS 半圆半径逐渐变小, 尾线逐渐上升和增加。在此过程中, 水分子多层物理吸附在 Sb_2O_3 表面形成连续水层, 作为电荷转移通道有利于 H^+ 与 H_3O^+ 快速转移, 进一步提高了 Sb_2O_3 传感器的电导率。如图 3(b)插图所示, EC 与传感器在低 RH 时相似, 所不同的是表示敏感层的电阻由电阻(R)和恒相位元件(CPE2)串联而成。

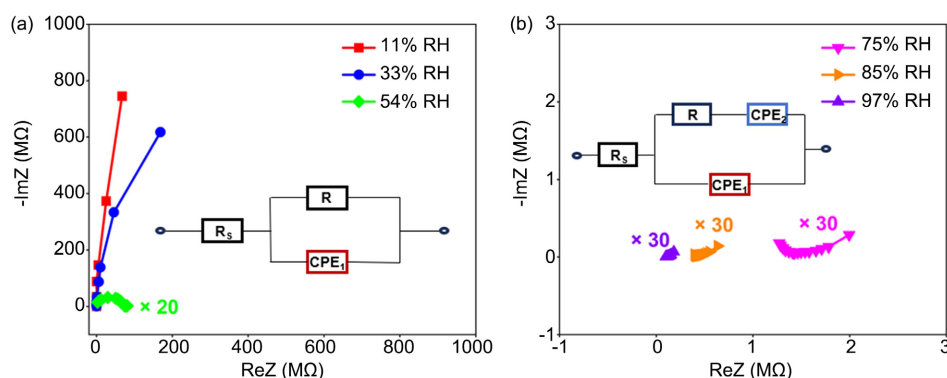


Figure 3. CIS of the Sb_2O_3 sensor at (a) lower and (b) higher RH ranges, respectively. Insets in (a, b): the corresponding ECs

图 3. Sb_2O_3 传感器分别在 (a) 低湿和 (b) 高湿范围的 CIS。插图: 相应的 ECs

4. 结论

本文基于水热法成功制备了具有八面体外形的 Sb_2O_3 微晶, 并系统探究了其湿度传感性能。在 11%~97% RH 范围内, Sb_2O_3 湿度传感器的灵敏度超过五个数量级(1.23×10^5), 响应时间仅为 2 s, 湿滞只有 1.5% RH, 展示出了卓越的湿敏响应特性。最后, 借助复阻抗谱与等效电路讨论了 Sb_2O_3 传感器的湿敏机理。优异的综合性能充分证实 Sb_2O_3 八面体有望作为候选材料应用于湿度传感领域, 也为该类材料在生态及环境等方面的应用奠定了物质基础。

参考文献

- [1] 王志刚, 石凤良, 刘先焯. 电阻和电容型湿度传感器的物理性能及其应用[J]. 物理通报, 2008(2): 55-56.
- [2] Moustafa, H., Morsy, M., Ateia, M.A. and Abdel-Haleem, F.M. (2021) Ultrafast Response Humidity Sensors Based on Polyvinyl Chloride/Graphene Oxide Nanocomposites for Intelligent Food Packaging. *Sensors and Actuators A: Physical*, **331**, Article 112918. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112918>
- [3] Chen, Q., Yao, Y., Ao, J., Yu, X., Wu, D., Shou, M., et al. (2025) Advances in Quartz Crystal Microbalance Relative Humidity Sensors: A Review. *Measurement*, **243**, Article 116415. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116415>
- [4] Kumari, M., Dhariwal, N., Yadav, P., Kumar, V. and Thakur, O.P. (2025) Urea Modified Cu-Doped LaFeO_3 Nanoparticles for Humidity Sensing with Contactless Moisture Detection for Medical and Agricultural Application. *Sensors*

- and Actuators B: Chemical*, **423**, Article 136749. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.136749>
- [5] Lu, J., Xu, X., Zhang, H., Huang, M., Wang, Y., Feng, Z., *et al.* (2025) All-Printed MXene/WS₂-Based Flexible Humidity Sensor for Multi-Scenario Applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **422**, Article 136605. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.136605>
- [6] 王艺历, 梁晨, 刘欣悦, 等. 湿敏功能材料的制备及应用研究进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 88-96.
- [7] Hjiri, M., Dhahri, R., Barakat, F.M. and Neri, G. (2025) Sb₂O₃, Sb₂O₅, and Sb-Doped Based Resistive Gas Sensors: A Review. *Brazilian Journal of Physics*, **55**, Article No. 217. <https://doi.org/10.1007/s13538-025-01850-6>
- [8] Tudorache, F., Tigau, N. and Condurache-Bota, S. (2019) Humidity Sensing Characteristics of Sb₂O₃ Thin Films with Transitional Electrical Behavior. *Sensors and Actuators A: Physical*, **285**, 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.11.002>
- [9] Zhu, S., Yang, X., Li, T., Li, F. and Cao, W. (2017) Phase and Morphology Controllable Synthesis of Superhydrophobic Sb₂O₃ via a Solvothermal Method. *Journal of Alloys and Compounds*, **721**, 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.327>
- [10] Haj Lakhdar, M., Smida, Y.B. and Amlouk, M. (2016) Synthesis, Optical Characterization and DFT Calculations of Electronic Structure of Sb₂O₃ Films Obtained by Thermal Oxidation of Sb₂S₃. *Journal of Alloys and Compounds*, **681**, 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.04.026>
- [11] Kumar, A., Kumari, P., Kumar, M.S., Gupta, G., Shivagan, D.D. and Bapna, K. (2023) SnO₂ Nanostructured Thin Film as Humidity Sensor and Its Application in Breath Monitoring. *Ceramics International*, **49**, 24911-24921. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.05.020>
- [12] Tsai, F. and Wang, S. (2014) Enhanced Sensing Performance of Relative Humidity Sensors Using Laterally Grown ZnO Nanosheets. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **193**, 280-287. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.11.069>
- [13] Zhu, Y., Chen, J., Li, H., Zhu, Y. and Xu, J. (2014) Synthesis of Mesoporous SnO₂-SiO₂ Composites and Their Application as Quartz Crystal Microbalance Humidity Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **193**, 320-325. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.11.091>
- [14] Sin, N.D.M., Mamat, M.H., Hussin, M.Z., Kamaruzaman, D. and Rusop, M. (2026) Enhancement of ZnO/SnO₂ Composite-Based Humidity Sensors through Porous Growth at Different Oxygen Ratios. *Materials Today Communications*, **50**, Article 114322. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.114322>