

高性能SnO₂/NaTaO₃ MEMS湿度传感器

熊刘燕, 高云*

湖北大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年3月15日; 录用日期: 2026年4月7日; 发布日期: 2026年4月21日

摘要

本研究采用两步水热法成功制备了SnO₂/NaTaO₃复合浆料, 并将其应用于MEMS湿度传感器件。通过系统实验对比发现, 相较于纯SnO₂和纯NaTaO₃, SnO₂/NaTaO₃复合材料表现出显著增强的湿度敏感特性, 灵敏度提升达3~4倍, 同时保持良好的长期稳定性。性能优化机制主要源于SnO₂与NaTaO₃的协同复合效应: 两相复合促进电荷从NaTaO₃向SnO₂转移, 有效提升了表面水的吸附和解吸附能力。动力学测试进一步表明, 该复合材料具有快速的响应-恢复特性, 响应时间和恢复时间分别为70 s和95 s, 均优于单一组分材料。本研究不仅简化了高性能湿度敏感材料的制备流程, 更为MEMS湿度传感器的实用化提供了可靠的技术支撑。

关键词

SnO₂/NaTaO₃, MEMS器件, 湿度传感器

High-Performance SnO₂/NaTaO₃ MEMS Humidity Sensor

Liuyan Xiong, Yun Gao*

School of Materials Science and Engineering, Hubei University, Wuhan Hubei

Received: March 15, 2026; accepted: April 7, 2026; published: April 21, 2026

Abstract

In this study, SnO₂/NaTaO₃ composite slurry was successfully prepared via a two-step hydrothermal method and applied to MEMS humidity sensors. Systematic experimental comparisons revealed that, compared with pure SnO₂ and pure NaTaO₃, the SnO₂/NaTaO₃ composite exhibited significantly enhanced humidity sensing performance with a 3~4 fold improvement in sensitivity while

*通讯作者。

maintaining good long-term stability. The performance optimization mechanism primarily originated from the synergistic effect between SnO₂ and NaTaO₃: the two-phase composite facilitated charge transfer from NaTaO₃ to SnO₂, effectively enhancing the water adsorption and desorption capability on the surface. Kinetic tests further demonstrated that the composite material possessed rapid response-recovery characteristics, with response and recovery times of 70 s and 95 s, respectively, both superior to those of the single-component materials. This study not only simplifies the preparation process of high-performance humidity-sensitive materials but also provides reliable technical support for the practical application of MEMS humidity sensors.

Keywords

SnO₂/NaTaO₃, MEMS Devices, Humidity Sensors

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,湿度传感器在现代环境监测、农业生产、医疗卫生、航天航空及日常生活等领域发挥着不可替代的作用,其核心在于对环境中水蒸气含量的精确、快速感知[1]-[4]。目前,各种类型的湿度传感器已经得到了广泛的研究,湿度传感器的种类很多,可分为声表面波型、电阻型、石英晶体微天平型、光纤型、场效应管型、电容型、电化学型、离子梯度型等。其中电阻传感因其简单的传感器结构和直接的电读数而被广泛使用,使其非常适合实时和连续的环境和呼吸湿度监测便携式平台[5][6]。

在众多传感材料中,金属氧化物半导体因其成本效益与性能潜力的平衡而成为研究焦点[7]-[9]。其中,SnO₂是一种典型的n型金属氧化物半导体,其禁带宽度为3.6 eV,因其丰富的表面缺陷、高的表面活性和对水蒸气的微小浓度变化响应明显而被广泛研究,但其选择性差,对乙醇、一氧化碳、氨气等多种还原性气体均有响应,且工作温度高,易受交叉干扰[10]-[14],因此在具体应用中存在局限性。

近年来,利用有机-无机杂化材料调控SnO₂的形貌与比表面积以提升其气敏性能的研究日益受到关注[15]-[17]。在湿度传感领域,Ankit等采用简易湿度测试装置研究了SnO₂的湿度响应特性,该材料虽展现出良好的响应恢复性,但在95% RH高湿条件下的响应/恢复时间分别为576 s和84 s,响应速度仍有待提升[18]。相比之下,Malik等以介孔SiO₂(KIT-6)为硬模板,通过纳米包覆法制备了有序多孔SnO₂/介孔g-C₃N₄杂化纳米复合材料。该材料在11%~95% RH的宽相对湿度范围内表现出显著的可逆响应、优异的长期稳定性及可忽略的滞后效应[19]。

除上述杂化材料外,钙钛矿型复合氧化物因其优异的物理化学性质亦被广泛研究。相较于普通金属氧化物,钙钛矿型材料具有更大的比表面积,可产生丰富的活性位点,从而增强气体分子吸附能力和电催化活性,进而提升灵敏度和选择性[20][21]。NaTaO₃作为一种典型的钙钛矿型材料,具有快速的动力学特征和良好的恢复性能[20][22]-[24]。Qu等发现NaTaO₃的高湿度响应特性归因于其结构中较低的八面体畸变程度[25]。李鹏等将TiO₂跟NaTaO₃复合后,材料的响应值较纯TiO₂和纯NaTaO₃提高了1~2个数量级[26],这主要源于复合材料中比表面积显著增加,导致吸附水分子量增加。除此之外,Ta₂O₅是一种复杂的斜方晶系氧化物结构,对湿度也有一定的促进作用[27]-[30]。

本研究结合SnO₂与NaTaO₃在湿度传感领域的各自优势,采用两步水热法成功制备了SnO₂/NaTaO₃复合纳米材料,并将其应用于MEMS湿度传感器。结果表明,该复合材料显著提升了湿度传感响应度,

同时有效缩短了响应 - 恢复时间, 具备优异的湿度传感性能。

2. 实验部分

2.1. 实验试剂与药品规格

本实验所用试剂种类、规格及生产厂家见表 1。所有试剂均为购得后直接使用, 未经进一步纯化。实验全程在常温常压环境下进行。

Table 1. Reagent specifications and manufacturers

表 1. 试剂规格及生产厂家

试剂名称	分子式	规格	生产厂家
乙醇	C ₂ H ₆ O	分析纯	上海国药集团化学试剂有限公司
去离子水	H ₂ O	超纯	艾科普超纯水系统自制
氢氧化钠	NaOH	AR	上海国药集团化学试剂有限公司
五水四氯化锡	SnCl ₄ ·5H ₂ O	AR	上海国药集团化学试剂有限公司
柠檬酸	C ₆ H ₈ O ₇	≥99.5%	武汉惠天合计量实验仪器有限公司
五氧化二钽	Ta ₂ O ₅	99.9%	北京伊诺凯科技有限公司

2.2. SnO₂/NaTaO₃ 湿度传感器的制备

(1) SnO₂ 粉末的制备

称取 2.8 g 五水四氯化锡(SnCl₄·5H₂O)和 0.64 g 氢氧化钠(NaOH)置于 100 mL 烧杯中, 加入 50 mL 去离子水与 50 mL 乙醇的混合溶剂, 室温搅拌 30 min; 随后加入 0.05 g 柠檬酸, 继续搅拌 30 min。将上述前驱体溶液转移至 200 mL 聚四氟乙烯内衬不锈钢反应釜中, 180℃水热反应 24 h, 自然冷却至室温。取出反应釜, 过滤并弃去上层清液, 沉淀用无水乙醇多次洗涤离心, 直至洗涤液变成无色透明。将所得产物于 150℃真空干燥 2 h, 研磨成细粉备用。

(2) SnO₂/NaTaO₃ 复合材料的制备

称取 0.1 g 上述制备的 SnO₂ 粉末、0.44 g 五氧化二钽(Ta₂O₅)和 0.1 g 氢氧化钠(NaOH)置于 100 mL 烧杯中, 加入 100 mL 去离子水, 室温搅拌 15 min。将混合溶液转移至反应釜中, 150℃水热反应 12 h, 自然冷却至室温后取出。过滤并弃去上层清液, 沉淀用无水乙醇多次洗涤离心, 直至洗涤液变成无色透明。将所得产物于 350℃真空干燥 3 h, 研磨成细粉备用。

(3) 湿度传感器的制备

称取 0.1 g 上述敏感材料(SnO₂、NaTaO₃ 或 SnO₂/NaTaO₃)置于 2 mL 离心管中, 加入 1 mL 无水乙醇, 超声分散 20 min 形成均匀浆料。采用(1~10 uL)量程移液器吸取 1 uL 浆料滴涂于 MEMS 器件表面, 室温老化 48 h 后进行湿度性能测试。图 1 是具体实验流程示意图。

2.3. 测试与表征

本文采用多种表征手段对材料的元素组成及微观结构进行系统分析, 所用仪器型号及生产厂家列于表 2。采用 X 射线衍射仪(XRD)分析样品的晶体结构及物相组成; 利用扫描电子显微镜(SEM)观察材料的表面形貌, 以及能量色散谱仪(EDS)和 X 射线光电子能谱(XPS)来对样品进行具体元素分析和物种分析。用实验室自建湿度测试系统来进行湿度测试(图 2), 以商业购置 GSP-6 湿度器做标定。

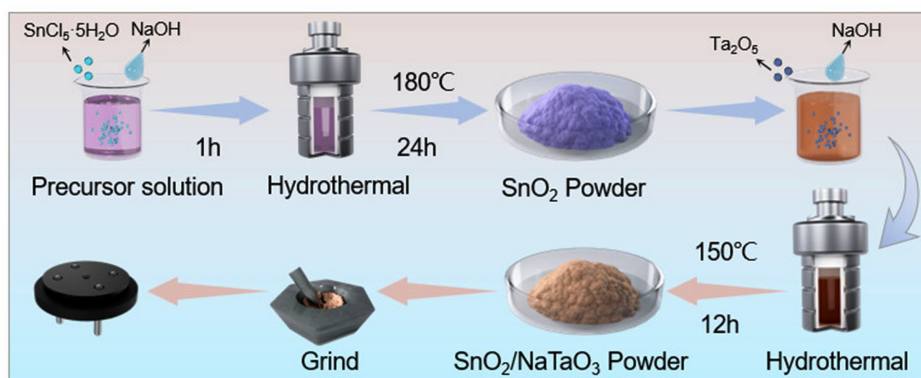


Figure 1. The schematic of humidity sensor

图 1. 湿度传感器的制备流程

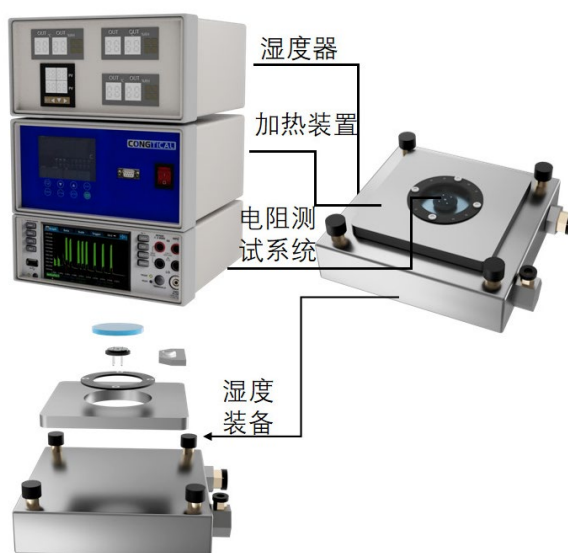


Figure 2. Humidity testing system

图 2. 湿度测试系统

Table 2. Test instrument models and manufacturers

表 2. 测试仪器型号与生产厂家

仪器名称	型号	生产厂家
X 射线衍射仪(XRD)	D8 Advance	德国布鲁克
场发射扫描电子显微镜(FESEM)	Sigma 500	德国卡尔蔡司
X 射线光电子能谱(XPS)	Escalab 250Xi	美国热电
能量色散谱仪(EDS)	Titan Themis G360-300	美国泰克

3. 实验结果和讨论

3.1. 实验表征与分析

图 3 为所制备的 SnO_2 、 NaTaO_3 及 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 复合材料的 X 射线衍射图谱。复合材料中同时检测到 SnO_2 和 NaTaO_3 的特征衍射峰, 表明 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 复合粉末成功制备。纯 SnO_2 在 $2\theta = 26.6^\circ$

与 $2\theta = 38.9^\circ$ 处呈现强衍射峰, 分别对应(110)与(101)晶面, 与金红石型 SnO_2 标准图谱(JCPDS41-145)一致。其中(101)取向增强, 说明 SnO_2 存在一定择优取向性。纯 NaTaO_3 在 $2\theta = 22.9^\circ$ 和 32.5° 处的衍射峰分别对应(020)和(200)晶面, 与正交晶系 NaTaO_3 标准图谱(JCPDS No. 25-0863)相符。对比复合物 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 中各物相的衍射峰强度发现, NaTaO_3 衍射峰强度显著高于 SnO_2 , 表明复合材料中 NaTaO_3 含量相对较高, 与实验设计原子配比($\text{Sn}:\text{Ta} = 1:3$)一致。此外, 复合材料中检测到 Ta_2O_5 杂相峰, 说明反应过程中 Ta_2O_5 过量。

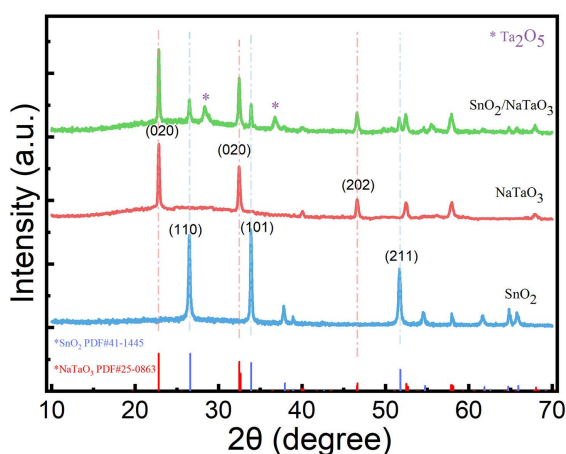


Figure 3. XRD spectra of SnO_2 , NaTaO_3 , and $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ composite materials
图 3. SnO_2 、 NaTaO_3 及 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 复合物的 XRD 图谱

图 4 为 SnO_2 、 NaTaO_3 及 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 复合材料的扫描电镜形貌图。纯 SnO_2 由短纳米棒组成团簇结构, 分散较为均匀, 晶粒边界清晰, 表明其结晶取向性良好, 与 XRD 分析的取向生长结果一致。纯 NaTaO_3 呈纳米方块状, 表面平整, 结晶度良好。 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 复合材料中主要以纳米方块结构存在, 平均尺寸大于纯相 NaTaO_3 纳米块。对复合样品进行 EDS 元素分布测试, 结果如图 5 所示。样品中含有 Sn 、 O 、 Ta 、 Na 四种元素, 且 Na 元素分布与 Sn 、 O 元素分布高度重合; 结合 XRD 检测到的 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 两相共存结果, 表明 SnO_2 与 NaTaO_3 形成了均匀有效的复合结构。

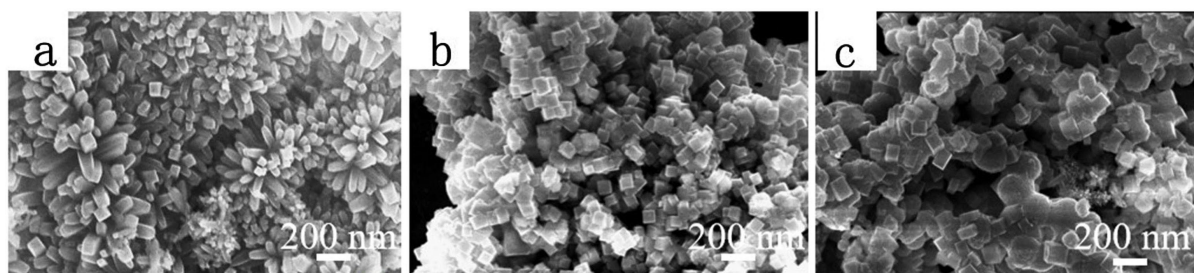


Figure 4. SEM morphology image (a) SnO_2 ; (b) NaTaO_3 ; (c) $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$
图 4. SEM 形貌图 (a) SnO_2 ; (b) NaTaO_3 ; (c) $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$

为进一步分析材料的化学态及表面氧化物种, 对样品进行了 X 射线光电子能谱(XPS)测试。图 6(a)为 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 复合材料的全谱图, 检测到 Sn 、 O 、 Ta 、 Na 四种元素, 证实了复合材料的成功制备。图 6(b)为 Sn 3d 轨道能谱。纯 SnO_2 中 Sn 3d_{5/2} 和 Sn 3d_{3/2} 的结合能分别为 486.70 eV 和 495.10 eV, 表明 Sn 以 Sn^{4+} 形式存在; $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 中相应峰位移至 486.30 eV 和 494.70 eV, 相较于纯 SnO_2 降低 0.40 eV, 表明电

子由 NaTaO_3 向 SnO_2 转移。图 6(c) 显示 Ta $4f_{7/2}$ 和 Ta $4f_{5/2}$ 的结合能分别为 25.44 eV 和 27.33 eV, 自旋轨道分裂能为 1.89 eV, 证实 Ta 以 Ta^{5+} 形式存在。图 6(d) 为 O 1s 谱。纯 SnO_2 可拟合为两个峰, 位于 530.54 eV 和 531.80 eV, 分别对应晶格氧(O_{latt})和氧空位(O_v); $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 可拟合为三个峰, 位于 529.53 eV、531.00 eV 和 534.00 eV, 分别归属于晶格氧、氧空位及表面吸附水; NaTaO_3 亦可拟合为三个峰, 位于 529.62 eV、531.10 eV 和 534.10 eV, 分别对应晶格氧、氧空位及表面吸附水。 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 复合材料中晶格氧峰位更接近 NaTaO_3 , 且相较纯 NaTaO_3 蓝移 0.09 eV, 表明 NaTaO_3 包覆于 SnO_2 表面, 且其表面存在电子损失现象, 该结果与 Sn 3d 能谱分析揭示的电子由 NaTaO_3 向 SnO_2 转移机制相一致。通过表面定量分析, 发现 SnO_2 未检测到表面吸附水峰, NaTaO_3 表面吸附水峰面积占比为 8.5%, 而 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 样品该比例增至 17.4%, 表明复合界面促进了水分子通过氢键与 NaTaO_3 表面的羟基(-OH)结合, 形成化学吸附水分子层。

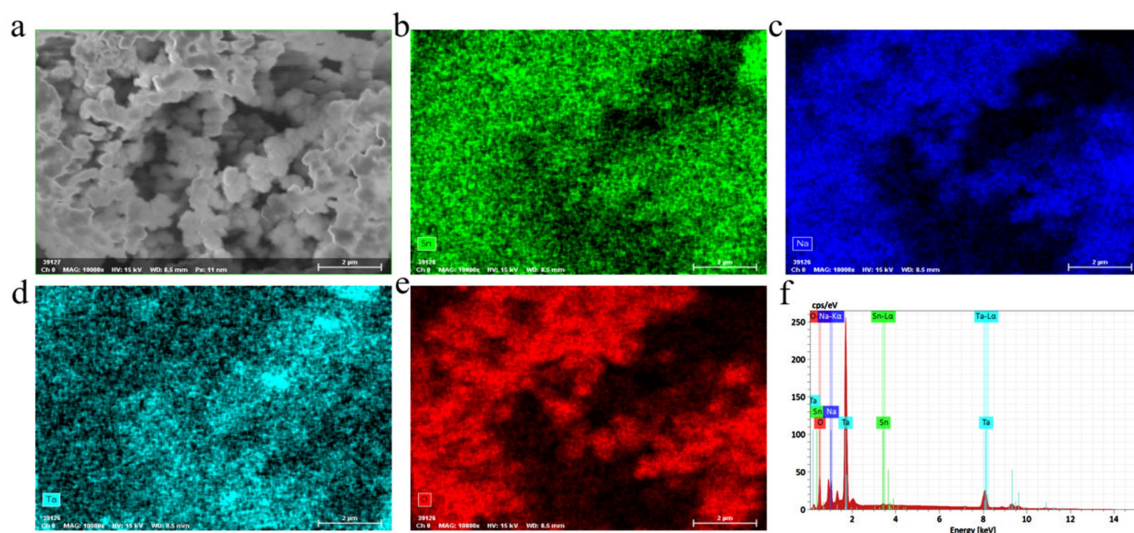


Figure 5. SEM and EDS elemental distribution maps of $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ composite materials (a) SEM image; (b) Elemental distribution map of Sn; (c) Na; (d) Ta; (e) O; (f) Elemental EDS energy spectrum

图 5. $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 复合材料的 SEM 及 EDS 元素分布图 (a) SEM 图; (b) Sn; (c) Na; (d) Ta; (e) O; (f) 元素 EDS 能谱图

3.2. 湿敏性能分析

图 7(a) 为 SnO_2 、 NaTaO_3 及 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 湿度传感器在动态湿度测试中的实时电阻响应曲线。响应初期电阻呈缓慢下降趋势, 这可归因于测试过程中向密闭腔体内加热槽滴加水溶液后, 水分完全挥发并达到预定湿度所需的时间。当液态水完全蒸发且湿度稳定后, 电阻迅速下降, 表明三种敏感材料均对湿度变化具有快速响应特性, 并能在特定湿度下达到稳定状态。开启腔盖后, 水蒸气迅速散失, 随湿度降低电阻快速回升, 证实材料具有良好的恢复特性。

传感器的响应速度如图 7(b), $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 的响应时间和恢复时间分别为 70 s 和 95 s, 较纯 SnO_2 和纯 NaTaO_3 缩短 1~2 倍, 表现出优异的快速响应-恢复特征。图 7(c) 对比了三种材料制备的传感器在不同湿度下的响应度。在 40%~96% RH 湿度范围内湿度响应从高到低的顺序为 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3 > \text{NaTaO}_3 > \text{SnO}_2$ 。其中 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 在 96% RH 条件下响应值高达 3500, 比纯 SnO_2 高 6 倍, 比 NaTaO_3 高 3 倍, 说明 SnO_2 与 NaTaO_3 复合能有效提高湿敏响应。线性拟合结果显示, $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 的湿度响应度与相对湿度变化呈现良好的线性关系, 展现出极高的灵敏度(36.6/1% RH)。图 7(d) 考察了 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 传感器的长期稳定性。30 天后的湿度响应值仅下降了 10%, 无显著衰减, 证实该器件具有良好的长期稳定性。

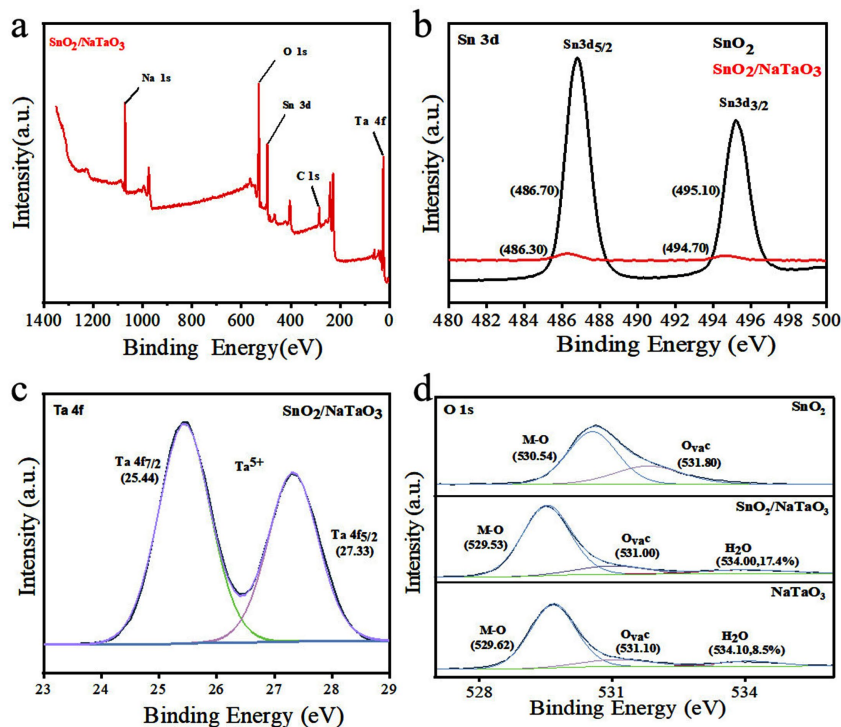


Figure 6. (a) XPS full spectrum; (b) Sn 3d; (c) Ta 4f; (d) O 1s
图 6. XPS 分析 (a) XPS 全谱; (b) Sn 3d; (c) Ta 4f; (d) O 1s

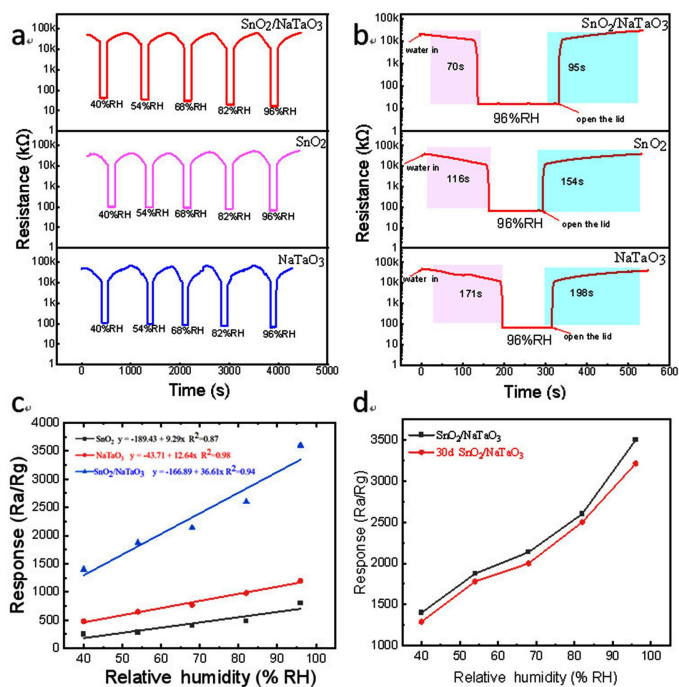


Figure 7. Impedance changes of SnO₂, NaTaO₃, and SnO₂/NaTaO₃ at different relative humidity (RH) levels; (b) Response-recovery time at 96% RH; (c) Comparison of responsivity at different RH levels; (d) Comparison of long-term stability of SnO₂/NaTaO₃

图 7. SnO₂、NaTaO₃、SnO₂/NaTaO₃ (a) 在不同 RH 下的阻抗变化; (b) 在 96% RH 下的响应 - 恢复时间; (c) 不同 RH 下的响应度比较; (d) SnO₂/NaTaO₃ 的长期稳定性比较

图 8(a)是 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 在不同相对湿度下的五次重复性测试结果, 显示出优异的响应可重复性。由图 8(b)可见, 五次测试的响应值波动极小, 相对标准偏差(RSD)低于 4%(计算公式: $\text{RSD} = [(\text{单次测量电阻值} - \text{测量电阻平均值})/\text{测量电阻平均值}] \times 100\%$), 表明该器件具有良好的循环稳定性。图 8(c)为 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 复合材料对还原性气体的选择性测试结果。器件在室温下对 250 ppm H_2 和 CO 的响应值分别为 2 和 1.5; 升温至 200°C 后, 响应值分别提升至 15 和 12。相比之下, 该器件在室温条件下对 95%相对湿度(RH)的响应值高达 3500。上述数据表明, 其他还原性气体对湿度检测的交叉敏感性极低, 证实了该材料对水蒸气具有优异的选择性, 且具备良好的抗还原性气体干扰能力, 可有效应用于复杂气体环境中的湿度监测。

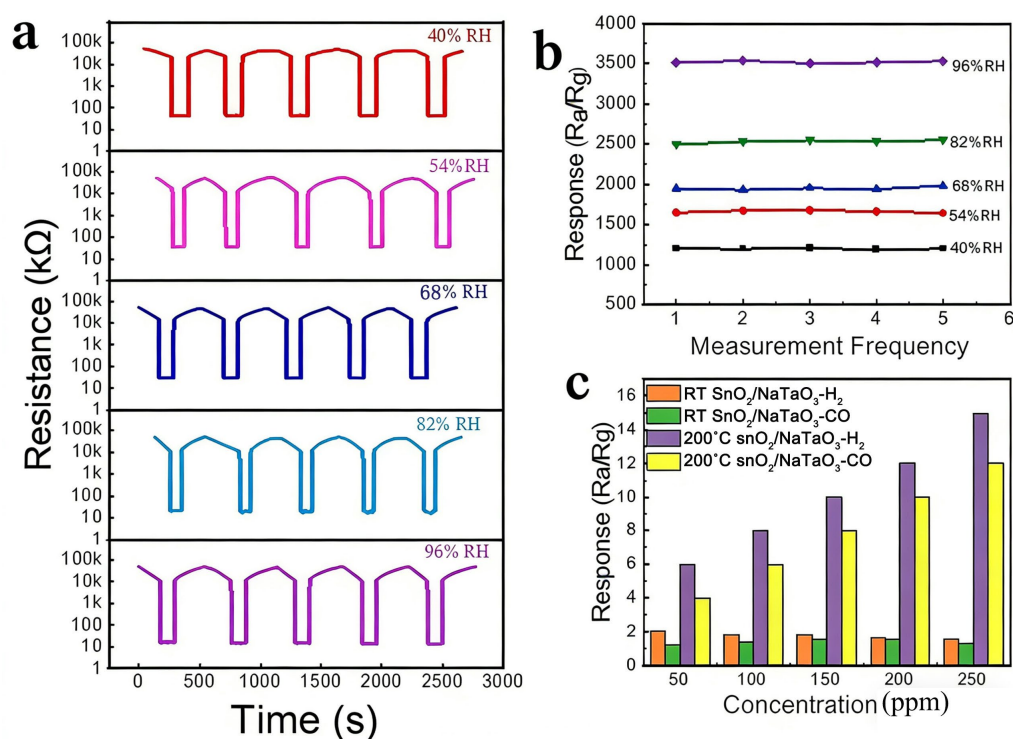


Figure 8. (a) Dynamic repeatability test; (b) Cycle test response; (c) Selectivity test of $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$
图 8. $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 的 (a) 动态重复性测试; (b) 循环测试响应度; (c) 选择性测试

Table 3. Comparison of this work with other reported high-performance humidity sensors

表 3. 本工作与其他报道的高性能湿度传感器对比

材料	湿度检测范围	湿度响应值	响应时间	恢复时间	参考文献
ZnO-SnO ₂	11%~95% RH	1225	35 s	8 s	[31]
Ag/TiO ₂ /PDMS	60%~100% RH	488	1.3 s	1.55 s	[32]
HPC/[Bmim] ₂ [NiCl ₄]	30%~90% RH	163	0.8 s	/	[33]
Borophene-MoS ₂	11%~97% RH	155	2.5 s	3.1 s	[34]
In(OH) ₃	11%~95% RH	430.6	14 s	204 s	[35]
CeLaCuO/Ni-BTC	11%~63% RH	/	24.5 s	47.8 s	[36]
SnO ₂	0%~82% RH	56.8	50 s	120 s	[37]
SnO ₂ /NaTaO ₃	40%~96% RH	3500	70 s	95 s	本实验工作

如表 3 所示, 与近 3~5 年报道的高性能湿度传感器相比, 本工作所制备的器件在高湿区表现出更高的响应度, 显示出卓越的湿度分辨性能。根据 XPS 分析结果, $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 复合材料表面优先化学吸附水分子层, 在高湿环境下, 水分子在首层化学吸附水基础上通过氢键网络逐层堆叠, 形成物理吸附的多层连续水膜, 为质子($\text{H}^+/\text{H}_3\text{O}^+$)提供了高效的 Grotthuss 型跳跃传导通道, 显著降低材料电阻, 实现优异的湿度响应。此外, SEM 结果显示, 复合结构晶粒更加致密。高湿环境中, 水分子在晶界处的选择性聚集, 形成连续的液相传导通道, 进一步降低界面阻抗, 有利于提升整体电导和湿敏响应。

4. 结论

本文采用两步水热法成功合成了 $\text{SnO}_2/\text{NaTaO}_3$ 复合纳米材料, 并制备了 MEMS 器件用于湿度传感检测。研究表明, 与纯 SnO_2 或 NaTaO_3 相比, 复合材料制备的器件响应度提高了 3~6 倍, 响应时间缩短, 且具有良好的循环可重复性和长期稳定性。结构分析表明, 复合材料形成了 NaTaO_3 包覆 SnO_2 结构; XPS 分析证实电荷由 NaTaO_3 向 SnO_2 转移, 使表面呈电子耗尽的高阻态。此外, 复合材料具有较强的水分子吸附能力, 有利于高湿环境下表面水物理吸附及质子输运, 从而降低表面电阻产生湿敏响应。该材料体系具备良好的工艺兼容性, 可与其他 MEMS 气体传感器件实现单片集成, 在微型化多参数环境监测领域展现出广阔的应用前景。

基金项目

本研究得到了国家自然科学基金(批准号: 12174092)的资助。

参考文献

- [1] Sun, H., Yang, J., Li, J., Shan, Y., Leng, L., Chen, R., *et al.* (2026) Breath-to-Exercise Monitoring via Ultrafast SnO_2 -LSMO Humidity Sensors. *Journal of Alloys and Compounds*, **1056**, Article ID: 186421. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.186421>
- [2] Shah, S., Sajid, M., Hassan, M., Muhammad, Z., Zhao, X., Hussain, S., *et al.* (2026) High-Performance and Humidity-Resistant NO_2 Gas Sensors Using ZnO/SnO_2 Nano-Heterostructures: Experimental and DFT Study. *Microchemical Journal*, **221**, Article ID: 116974. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2026.116974>
- [3] Li, Q., Li, F., Li, P. and Yu, S. (2025) Humidity Sensor Based on ZnS/SnO_2 Nanocomposites with Improved Sensing Properties. *Ceramics International*, **51**, 48935-48943. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.08.227>
- [4] Li, S., Hou, J., Xu, Y., Guo, L., Zhang, R., Pan, J., *et al.* (2026) Inkjet-Printed Wireless Passive Humidity Sensor with Ultrahigh Sensitivity Using $\text{ZnO}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene Nanocomposite. *Measurement Science and Technology*, **37**, Article ID: 035101. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ae309d>
- [5] Arman Kuzubasoglu, B. (2022) Recent Studies on the Humidity Sensor: A Mini Review. *ACS Applied Electronic Materials*, **4**, 4797-4807. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.2c00721>
- [6] Biswas, M., Dey, A. and Sarkar, S.K. (2022) Polyaniline Based Field Effect Transistor for Humidity Sensor. *Silicon*, **14**, 8919-8925. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01594-3>
- [7] Zhang, H., Zhang, H., Jia, Z., Chen, C., Yang, C., Dou, Q., *et al.* (2025) Design of Humidity Sensor Based on Poly(sodium 4-Styrenesulfonate) Modified SnO_2 for Visual Monitoring of Plant Growth Environments. *Journal of Colloid and Interface Science*, **692**, Article ID: 137540. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.137540>
- [8] Liu, H., Liu, B., Li, P., Kang, W. and Zhang, Y. (2022) High Sensitivity and Anti-Humidity Gas Sensor for Nitrogen Dioxide Based on Ce/SnO_2 Nanomaterials. *Sensors and Actuators A: Physical*, **344**, Article ID: 113717. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113717>
- [9] Zhu, X., Chang, X., Tang, S., Chen, X., Gao, W., Niu, S., *et al.* (2022) Humidity-Tolerant Chemiresistive Gas Sensors Based on Hydrophobic $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ Heterostructure Films. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **14**, 25680-25692. <https://doi.org/10.1021/acsaami.2c03575>
- [10] Gherardi, S., Astolfi, M., Gaiardo, A., Malagù, C., Rispoli, G., Vincenzi, D., *et al.* (2024) Investigating the Temperature-Dependent Kinetics in Humidity-Resilient Tin-Titanium-Based Metal Oxide Gas Sensors. *Chemosensors*, **12**, Article No. 151. <https://doi.org/10.3390/chemosensors12080151>
- [11] Chandra, S., Shashidhar, R. and Choudhary, N. (2023) Application of SRCBD S: SnO_2 Nanostructured Thin Films as

- Room Temperature Gas and Humidity Sensors. *Journal of the Korean Physical Society*, **82**, 392-410.
- [12] Verma, M., Bahuguna, G., Saharan, A., Gaur, S., Haick, H. and Gupta, R. (2023) Room Temperature Humidity Tolerant Xylene Sensor Using a Sn-SnO₂ Nanocomposite. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **15**, 5512-5520. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c22417>
- [13] Govindharaj, K., Manoharan, M., Muthumalai, K., Poovarasan, S., Thirugnanam, S., Haldorai, Y., *et al.* (2024) Inter-connected SnO₂ Nanoflakes Decorated WO₃ Composites as Wearable and Ultrafast Sensors for Real-Time Wireless Sleep Quality Tracking and Breath Disorder Detection. *Chemical Engineering Journal*, **482**, Article ID: 148759. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148759>
- [14] Verma, M., Bahuguna, G., Singh, S., Kumari, A., Ghosh, D., Haick, H., *et al.* (2024) Porous SnO₂ Nanosheets for Room Temperature Ammonia Sensing in Extreme Humidity. *Materials Horizons*, **11**, 184-195. <https://doi.org/10.1039/d3mh01078c>
- [15] Ni, Q., Lou, Q., Shen, C., Zheng, G., Song, R., Hao, J., *et al.* (2024) Sensitive Humidity Sensor Based on Moisture-Driven Energy Generation. *Nano Research*, **17**, 5578-5586. <https://doi.org/10.1007/s12274-024-6499-3>
- [16] Liao, K., Wang, F., Shen, Q., Liu, Y., Mei, Z., Wang, H., *et al.* (2025) Advances in Humidity Sensors Based on Self-Powered Technology. *Chemical Engineering Journal*, **505**, Article ID: 159480. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159480>
- [17] Lao, S., Duan, Z., Zhao, Q., Yuan, Z., Jiang, Y. and Tai, H. (2025) Recent Advances in Mass-Sensing Humidity Sensors: Mechanisms, Materials, and Applications. *Nanoscale*, **17**, 23763-23787. <https://doi.org/10.1039/d5nr03048j>
- [18] 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>
- [19] Wang, X., Li, P. and Yu, S. (2025) Design and Mechanism of Highly-Stability SnO₂/g-C₃N₄ Nanohybrid Material Humidity Sensor. *Ceramics International*, **51**, 11354-11362. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.12.554>
- [20] Hong, K., Tan, S., McDermott, M.J., Huang, T., Babbe, F., Kodalle, T., *et al.* (2022) Shape-Controlled NaTaO₃ by Flux-mediated Synthesis. *Advanced Functional Materials*, **32**, Article ID: 2206641. <https://doi.org/10.1002/adfm.202206641>
- [21] Pallavi, K.M., Mamatha, G.P., Nagaraju, G. and Soundarya, T.L. (2023) Facile Synthesis of NaTaO₃ Nanoparticles and Fabrication of Nanostructured NaTaO₃ for Detection of Dopamine. *Inorganic Chemistry Communications*, **158**, Article ID: 111427. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111427>
- [22] Dong, C., Sun, S., Zhang, Y., Liu, Y., Wang, B., Wang, J., *et al.* (2026) Self-Powered Wireless System for Sleep Apnea Syndrome Self-Management Using Π -Conjugated Poly(benzodifurandione)-Based Low-Hysteresis Humidity Sensors and Highly Sensitive Pressure Sensors. *ACS Sensors*, **11**, 1302-1312. <https://doi.org/10.1021/acssensors.5c03531>
- [23] Chen, G., Guan, R., Shi, M., Dai, X., Li, H., Zhou, N., *et al.* (2022) A Nanoforest-Based Humidity Sensor for Respiration Monitoring. *Microsystems & Nanoengineering*, **8**, Article No. 44. <https://doi.org/10.1038/s41378-022-00372-4>
- [24] Zhao, W., Li, Q., Wang, Q., Li, Z., Liang, J. and Wu, W. (2025) All-Printed Flexible Self-Powered Humidity Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **440**, Article ID: 137868. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.137868>
- [25] Luévano-Hipólito, E., Aguirre-Astrain, A. and Torres-Martínez, L.M. (2025) Ink-Jet Printing of NaTaO₃ Films for Photocatalytic H₂O and CO₂ Conversion in Seawater. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **185**, Article ID: 108984. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108984>
- [26] Mi, Y. and Li, P. (2023) Preparation and Performance of NaTaO₃/TiO₂ Humidity Sensors with High Responsivity. *Results in Physics*, **50**, Article ID: 106560. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.106560>
- [27] Ngadiman, N.L.S., Abdul Rani, R., Makhsin, S.R. and Zoolfakar, A.S. (2023) Improving the Performance of Anodized Ta₂O₅ Humidity Sensors through Surface Modification with Gold Nanoparticles. *Sensors and Actuators A: Physical*, **364**, Article ID: 114788. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114788>
- [28] Wongsricha, J., Sreejivungsa, K., Thanamoon, N., Harnchana, V., Srepusharawoot, P., Phromviyo, N., *et al.* (2024) Enhanced Humidity Sensing Properties of Ta₂O₅ and ITO Doped Rutile-TiO₂ Porous Ceramics. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 18856. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69910-6>
- [29] Grimm, B., Nitzsche, M. and Bredow, T. (2022) Energetic Order of Nb₂O₅ and Ta₂O₅ Polymorphs. *Physica Status Solidi (B)*, **259**, Article ID: 2200052. <https://doi.org/10.1002/pssb.202200052>
- [30] Ngadiman, N.L.S., Abdul Rani, R., Makhsin, S.R., Ayub, M.A., Abu Talip, M.A. and Zoolfakar, A.S. (2022) Facile Fabrication Method and Decent Humidity Sensing of Anodised Nanotubular Ta₂O₅ on Ta Foil Substrate. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **33**, 3065-3080. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07509-7>
- [31] Li, F., Li, P. and Zhang, H. (2021) Preparation and Research of a High-Performance ZnO/SnO₂ Humidity Sensor. *Sensors*, **22**, Article No. 293. <https://doi.org/10.3390/s22010293>
- [32] Zheng, L., Li, K., Du, H. and Li, S. (2026) High-Sensitivity PCF-SPR Sensor for Simultaneous and Independent

- Monitoring of Humidity and Temperature. *Physica Scripta*, **101**, Article ID: 075505. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ae3c66>
- [33] Rincón-Iglesias, M., Krebsbach, P., Correia, D.M., Mendes-Felipe, C., Lanceros-Méndez, S. and Hernandez-Sosa, G. (2025) Sustainable Fully Inkjet-Printed Humidity Sensor Based on Ionic Liquid and Hydroxypropyl Cellulose. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **17**, 32680-32690. <https://doi.org/10.1021/acsami.5c00505>
- [34] Hou, C., Tai, G., Liu, Y., Wu, Z., Wu, Z. and Liang, X. (2021) Ultrasensitive Humidity Sensing and the Multifunctional Applications of Borophene-MoS₂ Heterostructures. *Journal of Materials Chemistry A*, **9**, 13100-13108. <https://doi.org/10.1039/d1ta01940f>
- [35] Zhao, Z., Meng, X., Pan, Y., Jin, G., Shen, X. and Wu, L. (2024) Humidity Sensor Based on In(OH)₃ Nanoparticles. *ACS Applied Nano Materials*, **7**, 16498-16505. <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c02529>
- [36] Rodrigues, J., Santhakumar, K.C., Nawaz, H., Singh, S., Mishra, S.M., Anjum, D.H., *et al.* (2025) Highly Sensitive and Stable CeLaCuO/Ni-BTC MOF-Based Humidity Sensor for Plant Monitoring. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **17**, 67823-67836. <https://doi.org/10.1021/acsami.5c16966>
- [37] Grimaldi, T.L., Estefani, R.B., Aradi, E., *et al.* (2025) Impact of Relative Humidity on the Response of Hollow Tin Dioxide Micro-Sphere-Based Impedimetric Sensors. *ACS Materials Au*.