

文章编号: 1671-7449(2026)01-0063-09

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(1): 63-71.

基于疏水聚合物的MEMS气体传感器抗湿方法

孙蓓蓓^{1,2}, 林建华^{1,2}, 徐 陈^{1,2}, 高晓光¹, 贾 建¹, 何秀丽^{1*}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 传感器技术全国重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要: MEMS金属氧化物气体传感器具有响应快、灵敏度高、体积小、功耗低等优点, 是气体检测的常用方法。然而, MEMS气体传感器的性能易受环境湿度的影响, 为了改善气体传感器的抗湿度干扰能力, 基于高透气性的疏水聚合物材料Teflon, 采用浸涂工艺实现了MEMS气体传感器敏感层的疏水透气包覆。研究了Teflon改性前后的MEMS气体传感器在不同相对湿度环境下的氢气敏感特性。当环境湿度从10%RH增加到90%RH, 未经处理的原始传感器对400 $\mu\text{L/L}$ 氢气的响应值从53.07下降到29.51, 下降了44.4%, 而Teflon改性后的传感器的响应值从28.87下降到26.17, 仅下降了9.4%, 表明改性处理方法使传感器的抗湿性能得到了改善。

关键词: 气体传感器; 湿度; 疏水性; Teflon材料; 氢气

中图分类号: TP212

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026039

引用格式: 孙蓓蓓, 林建华, 徐陈, 等. 基于疏水聚合物的MEMS气体传感器抗湿方法[J]. 测试技术学报, 2026, 40(1): 63-71.

SUN Beibei, LIN Jianhua, XU Chen, et al. Humidity resistance method for MEMS gas sensor based on hydrophobic polymer[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(1): 63-71.

Humidity Resistance Method for MEMS Gas Sensor Based on Hydrophobic Polymer

SUN Beibei^{1,2}, LIN Jianhua^{1,2}, XU Chen^{1,2}, GAO Xiaoguang¹, JIA Jian¹, HE Xiuli^{1*}

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Aerospace Information Research Institute,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: MEMS metal oxide gas sensors, characterized by rapid response, high sensitivity, compact size, and low power consumption, are widely employed in gas detection applications. However, the performance of MEMS gas sensors is easily affected by environmental humidity. To enhance the humidity resistance of gas sensors, based on the hydrophobic polymer material Teflon with high permeability, the hydrophobic and breathable coating of the sensitive layer of MEMS gas sensors is achieved through dip-coating. The hydrogen sensitivity characteristics of MEMS gas sensors, both before and after Teflon modification, are investigated under varying relative humidity conditions. When environmental humidity increases from 10%RH to 90% RH, the response value of the untreated pristine sensor to 400 $\mu\text{L/L}$

【收稿日期】2025-08-06

【基金项目】国家重点研发计划资助项目(2021YFB3201300)

【作者简介】孙蓓蓓(1999—), 女, 硕士生, 主要从事气体传感器研究。E-mail: sunbaby1999@163.com。

*【通信作者】何秀丽(1974—), 女, 研究员, 博士, 主要从事气体检测技术研究。E-mail: hxl@mail.ic.ac.cn。

hydrogen decreases from 53.07 to 29.51, a drop of 44.4%, whereas the Teflon-modified sensor exhibits a decrease from 28.87 to 26.17, only a 9.4% reduction in response value, demonstrating significant improvement in humidity resistance through the modification process.

Key words: gas sensor; humidity; hydrophobicity; Teflon material; hydrogen

0 引言

MEMS金属氧化物气体传感器具有体积小、功耗低、响应快和易于集成等优点,在环境监测、工业安全、智能家居、医疗诊断和车载电子等领域得到了广泛应用^[1-3]。然而,由于金属氧化物气敏材料的表面吸附特性,水分子会与目标气体竞争活性位点,湿度的变化会干扰气敏材料的表面反应,导致基线漂移、灵敏度下降,严重影响了传感器在潮湿环境中的可靠性^[4]。尤其在呼气分析、室内空气质量监测、地下管廊有毒气体检测等场景中,环境湿度波动剧烈,上述问题尤为突出。因此,研究抗湿度干扰策略,提高MEMS传感器在复杂环境中的稳定性,具有重要的应用价值。

为了提升基于金属氧化物的气体传感器在湿度环境下的抗干扰能力,研究人员提出了多种材料改性策略,包括金属掺杂、贵金属修饰、异质结构构建以及表面疏水改性^[5-7]。许多金属氧化物由于其固有的亲水性而受到湿度扰动^[8],因此,表面疏水改性被视为一种有效且简便的改善途径。常用的表面疏水改性材料包括金属有机框架材料(Metal-Organic Frameworks, MOFs)和疏水聚合物。MOFs如ZIF-8和ZIF-67不仅具有良好的湿度稳定性,还可通过原位生长包覆于敏感材料表面,其高比表面积和可调控的孔道结构也有助于提升传感器的灵敏度与选择性^[9-10]。聚合物疏水改性常采用旋涂^[11]、磁控溅射^[12-13]和气相沉淀^[14-15]等方法成膜。例如,Zhu等^[13]采用磁控溅射方法将聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene, PTFE)沉淀在Au/WO₃薄膜表面,形成PTFE/Au/WO₃复合结构,该传感器在相对湿度(Relative Humidity, RH)从30%升至90%后仍保持88.7%的响应,表现出良好的抗湿性能。Gao等^[14]通过气相沉淀法在Pd/TiO₂纳米管材料表面修饰聚二甲基硅氧烷,改性后的材料表现出明显疏水性,在25%~75%RH的范围内其气敏性能几乎不受湿度影响。尽管含氟聚合物和硅氧烷类材料均可用于抑制湿度的干扰,后者在实际应用中常受限于其热稳定性较差的问题。

Teflon-AF2400是一种由四氟乙烯和2,2-双(三氟甲基)-4,5-二氟-1,3-二氧杂环戊烯共聚而成的无定形含氟聚合物,具有良好的气体渗透性、热稳定性和化学惰性^[16],被认为是一种极具潜力的气体分离膜材料。研究表明,可通过简便的浸涂工艺^[17]实现Teflon-AF2400疏水透气膜的制备。

基于上述背景,本文采用Teflon-AF2400对商用MEMS气体传感器敏感材料进行表面疏水改性,以抑制环境湿度对传感器的干扰。搭建了气体传感器测试装置,对制备的Teflon薄膜进行表征,研究了Teflon改性前后传感器在不同湿度条件下对氢气的响应特性。实验结果表明,经Teflon-AF2400改性后的MEMS气体传感器在保持对氢气快速响应和恢复的同时,显著提升了抗湿度干扰能力。

1 实验

1.1 实验试剂及设备

MEMS半导体金属氧化物气体传感器(型号SMD1012),购自苏州慧闻纳米科技有限公司。含氟聚合物Teflon-AF2400(质量分数为1 wt%,稀释剂为FC40),购自杜邦公司。硫酸钾(K₂SO₄,分析纯),购自西陇科学股份有限公司。氢气(标准气体,浓度1%,稀释气体为合成空气),购自北京市华元气体化工有限公司。质量流量控制器(Mass Flow Controller, MFC; 型号CS200D),购自北京华丞电子有限公司。全自动空气源(型号A10),购自北京中惠普分析技术研究所。

1.2 薄膜制备和表征

采用浸涂工艺方法制备Teflon-AF2400覆膜改性气体传感器。通过注射器将Teflon-AF2400溶液(0.1 mL)滴到MEMS传感器表面,使表面完全浸入溶液之中,并静置30 s。该过程重复2~3次,然后将传感器放入管式炉中,通过设置程序先在100℃干燥10 min,之后再加热至200℃保持15 min以挥发稀释剂获得Teflon-AF2400改性的气体传感器。同理制备表征样片,衬底为5 cm×5 cm硅片。

使用场发射扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM; 日立 S-4800)表征材料形貌,使用能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)分析样品表面元素。通过热重分析仪(Thermogravimetric Analysis, TGA; 耐驰仪器制造有限公司)测试物质质量随温度的变化,以此分析样品的热稳定性能,在氮气氛围中以 10 °C/min 的速

率升温至 800 °C。采用接触角测量仪(Kruss DSA 100)在室温下测量 Teflon 膜的水接触角,以获得膜表面的润湿性。

1.3 气体传感器性能测试

气体传感器测试装置示意图如图 1 所示,主要包括传感器、测试气室、配气系统和电路模块。

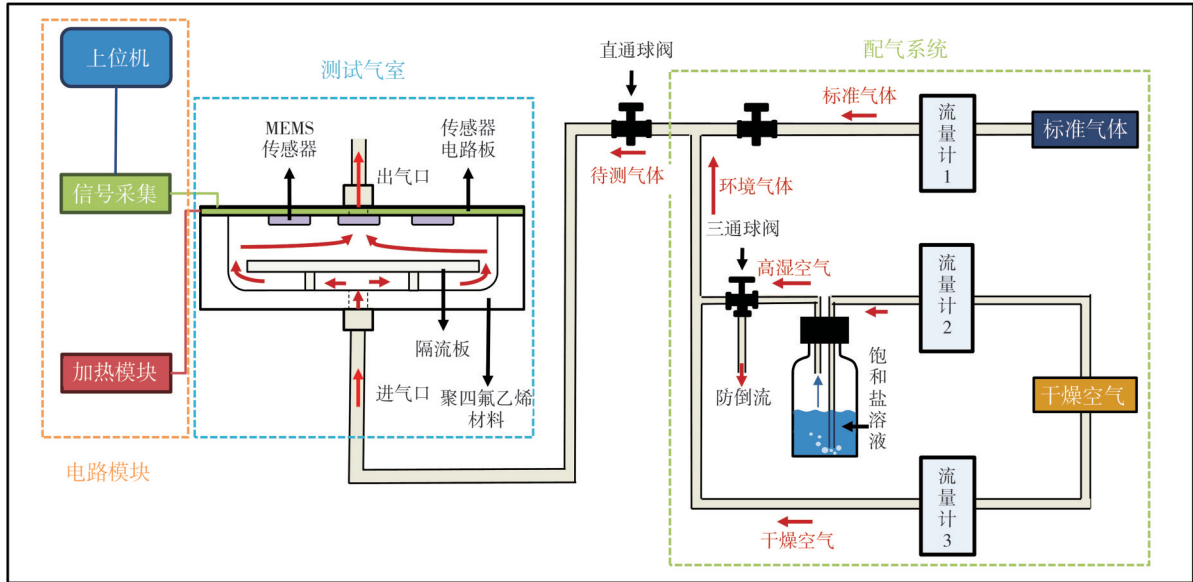


图 1 气体传感器测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gas sensor test device

本实验采用流气式测试方法,该系统可同步实现四路传感器的独立控制与信号采集。传感器均焊接于专用电路板上,并将该电路板倒扣安装于气室顶部,兼具电气连接与气室密封功能。气室容积为 6 mL,较小腔体有助于实现气体的快速切换。进气口处设有隔流板结构,可使气体进入后均匀分布于各传感器表面,提高测量一致性。气室采用聚四氟乙烯材料加工而成,其低吸附特性有助于减小气体残留对实验结果的影响。电路控制模块基于单片机实现,负责传感器的加热控制与信号采集。传感器电阻数据经由上位机实时记录与存储。

配气系统由三路气体组成,各路流量均通过 MFC 精确调控,总流量保持为 100 sccm。采用饱和硫酸钾溶液作为湿度发生源,其在室温下可提供稳定的具有 98%RH 的空气。干燥空气经饱和盐溶液后形成相对湿度稳定的空气,再与另一路干燥空气按比例混合,通过调节混合比例可实现 10%~90%RH 的宽范围湿度环境。目标气体浓度通过 MFC 控制标准气体与环境气体的混合比例进行精确配制。

气体响应 S 定义为

$$S = \frac{R_0}{R_g}, \quad (1)$$

式中: R_0 和 R_g 分别为传感器在环境气氛中的电阻值和暴露在一定浓度测试气体中的电阻值。

响应时间 T_r 定义为气体传感器从环境气氛中暴露在一定浓度的测试气体中,传感器电阻变化达到总电阻变化 90% 所需的时间;恢复时间 T_i 定义为气体传感器从测试气体重新暴露在环境气氛中,传感器电阻恢复达到总电阻变化 90% 所需的时间。

稳定性定义为气体传感器暴露在一定浓度的测试气体中,随着环境气氛中相对湿度的变化,传感器响应的稳定情况。变异系数(Coefficient of Variation, CV)以及响应比是评估传感器抗湿度干扰能力的常用标准^[18]。采用 CV 来衡量传感器的湿度稳定性, CV 值越小,传感器的抗湿度干扰能力越好,反之,则越差。

CV 计算公式为^[18]

$$CV = \frac{S_{SD}}{S_{average}} \times 100\%, \quad (2)$$

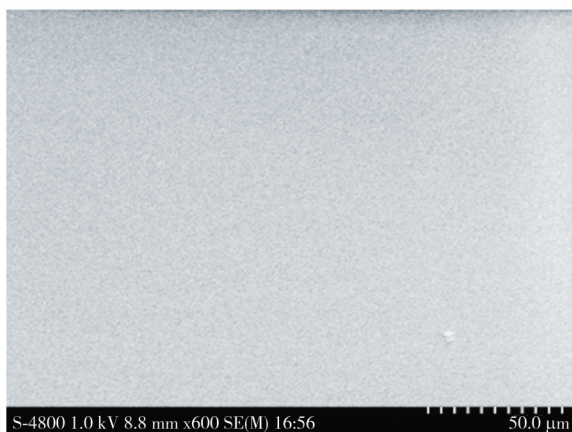
式中: S_{SD} 为不同湿度下响应值的标准差; $S_{average}$ 为

不同湿度下响应的平均值。

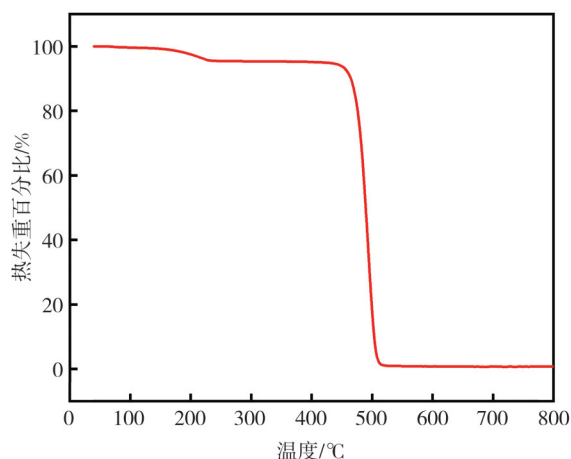
响应比定义为^[18]

$$\text{响应比} = \frac{S_{H\%RH}}{S_{L\%RH}}, \quad (3)$$

式中： $S_{H\%RH}$ 和 $S_{L\%RH}$ 分别为传感器在高相对湿度和低相对湿度环境中暴露在同一浓度测试气体中的电阻值。



(a) Teflon膜的表面SEM图

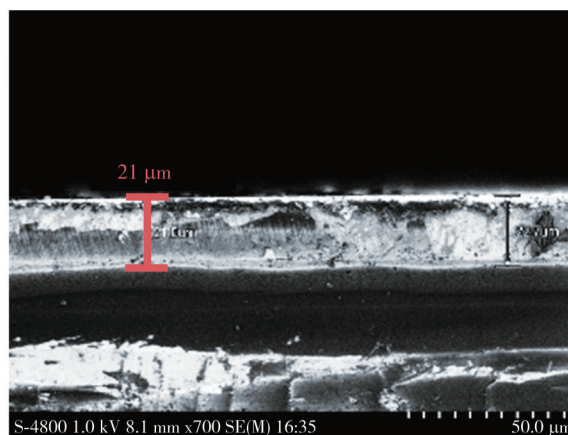


(c) Teflon膜的热失重曲线

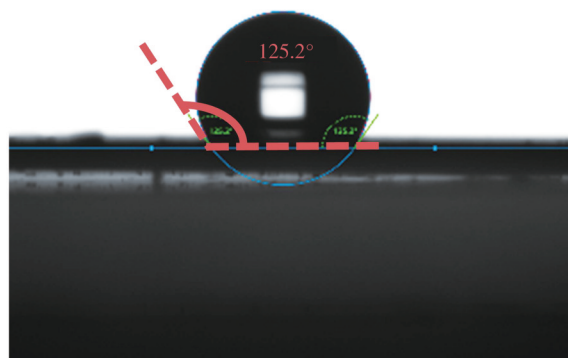
2 结果和讨论

2.1 薄膜表征

通过SEM表征了Teflon膜的表面形貌和截面厚度,结果如图2(a)和(b)所示。Teflon呈现连续、无缺陷的致密结构,其平均厚度约为21 μm。



(b) Teflon膜的截面SEM图



(d) Teflon膜的静态水接触角图

图2 Teflon膜的表征

Fig. 2 Characterization of Teflon membrane

对经200℃处理后的Teflon膜进行了TGA分析,结果如图2(c)所示。在100~200℃温度区间内,膜出现约5%的质量损失,主要归因于吸附水分的蒸发及部分短链分子的分解。当温度超过400℃后,Teflon由于分解表现出大幅度的质量损失,该现象与文献报道一致^[19]。

根据界面化学的基本理论,当材料表面水接触角等于或大于90°时,该表面被认定具有疏水性。

如图2(d)所示,Teflon膜的静态水接触角测

量值为125.2°,明显高于90°,表明其表面具备良好的疏水特性。

图3(a)~(d)对比展示了Teflon处理前后传感器敏感层的表面形貌。由图3(a)和(c)可知,未处理的敏感层呈颗粒状团簇分布。而从图3(b)和(d)可以看出,经Teflon处理后的敏感层表面孔隙略有变小,结构更为连续致密。此外,由图3(e) Teflon处理后的敏感层的EDS元素分析图可知,丰富的F元素表明Teflon成功覆盖敏感层表面,实现了有效的疏水改性。

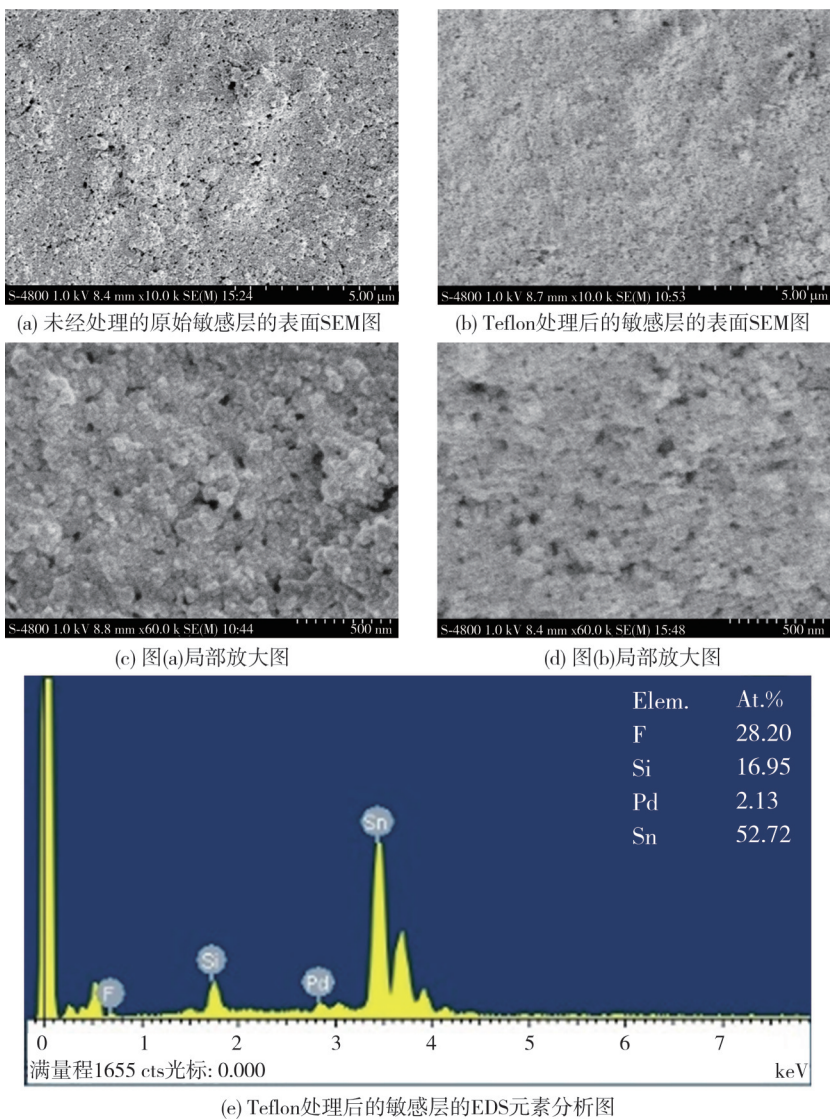


图 3 两种传感器敏感层的表征

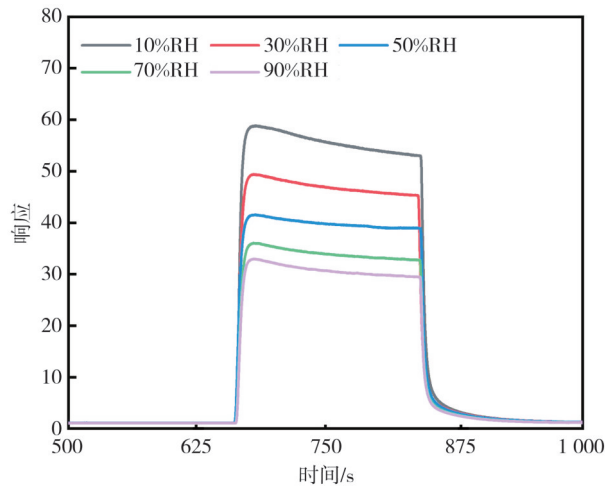
Fig. 3 Characterization of sensitive layers of two types of sensors

2.2 传感器性能

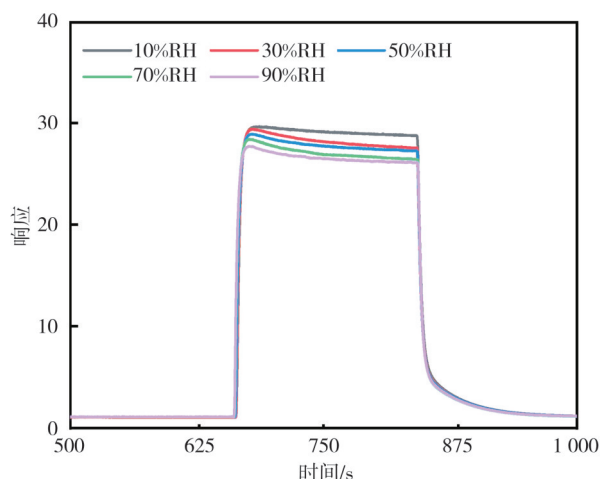
MEMS 氢气传感器在 1.8 V 恒定加热电压下工作,工作温度稳定约为 150 ℃。对比了 Teflon 改性前后传感器在不同相对湿度环境下的气敏性能,以评估 Teflon 涂层对传感器抗湿度干扰能力的影响。

图 4(a) 和 (b) 分别为原始传感器和 Teflon 改性传感器在 10%~90% RH 环境下对 400 μL/L 氢气的响应过程曲线。可见原始传感器的响应受湿度影响显著,当相对湿度从 10% 升至 90%,其响应值从 53.07 降至 29.51,降幅约 44.4%。而 Teflon 改性传感器在不同湿度下的响应变化差异显著减小,在相同湿度变化范围内,响应值从 28.87 下降至 26.17,降幅仅约 9.4%,表现出优异

的湿度稳定性。



(a) 原始传感器的响应曲线

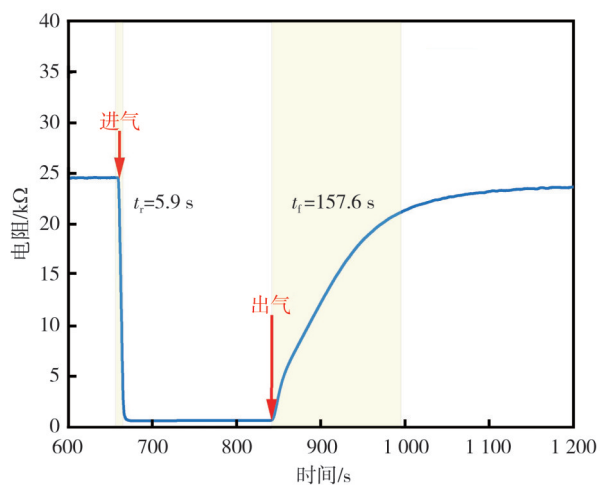


(b) Teflon改性传感器的响应曲线

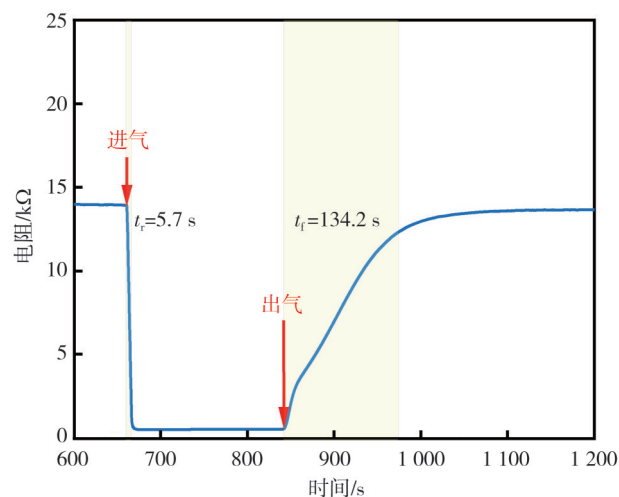
图4 原始传感器和Teflon改性传感器在不同相对湿度环境中对400 $\mu\text{L/L}$ 氢气的响应曲线

Fig. 4 Response curves of pristine sensor and Teflon modified sensor to 400 $\mu\text{L/L}$ hydrogen in different relative humidity environments

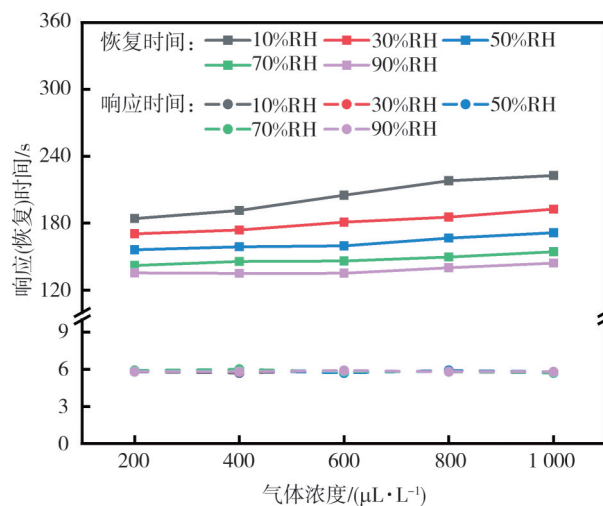
图5(a)和(b)分别显示了原始传感器和Teflon改性传感器在50%RH环境中对400 $\mu\text{L/L}$ 氢气的响应时间和恢复时间。原始传感器响应时间和恢复时间分别为5.9 s和157.6 s, 而Teflon改性后分别为5.7 s和134.2 s, 表明改性未影响其响应与恢复特性。图5(c)和(d)进一步比较了两种传感器在不同湿度下响应与恢复时间对氢气浓度的依赖关系。可见在测试湿度下, 两种传感器的响应时间均低于6.0 s, 且恢复时间随着氢气浓度的升高而延长。这可能是因为较高氢气浓度下, 敏感材料吸附氢气量增加, 解吸达到平衡所需时间更长。此外, 在同一浓度氢气下, 环境相对湿度越高, 两种传感器的恢复时间越短。



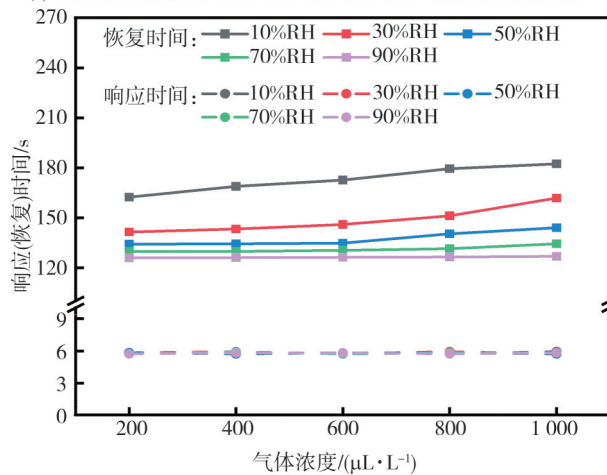
(a) 原始传感器的响应时间和恢复时间



(b) Teflon改性传感器的响应时间和恢复时间



(c) 原始传感器的响应时间和恢复时间对氢气浓度的依赖关系



(d) Teflon改性传感器的响应时间和恢复时间对氢气浓度的依赖关系

图5 原始传感器和Teflon改性传感器在50%RH环境中对400 $\mu\text{L/L}$ 氢气的响应时间和恢复时间及其对氢气浓度的依赖关系

Fig. 5 Response time and recovery time of pristine sensor and Teflon modified sensor to 400 $\mu\text{L/L}$ hydrogen in 50% RH environment and dependence of response time and recovery time on hydrogen concentration

图 6(a) 和 (b) 分别显示了原始传感器和 Teflon 改性传感器在相对湿度为 10%~90% 环境下的响应对氢气浓度的相关性。在所有测试湿度下, 原始传感器和 Teflon 改性传感器的响应都与气体浓度呈现出良好的线性关系。

图 6(c) 显示了原始传感器和 Teflon 改性传感器在 200~1 000 $\mu\text{L/L}$ 氢气浓度范围内对不同相对湿度环境的响应比。各个浓度下的响应均以同一氢气浓度下环境湿度为 10%RH 时的响应为基准进行归一化处理。由图可见, 随着环境湿度的上升, 原始传感器的响应急剧下降, 在 90%RH

时, 对 200 $\mu\text{L/L}$ 氢气的响应仅为初始的 54.6%。而 Teflon 改性传感器在全部湿度范围内的响应均能保持为初始值的 90.2% 以上, 表明 Teflon 涂层可以有效增强传感器的抗湿性能。

图 6(d) 显示了原始传感器和 Teflon 改性传感器对 200~1 000 $\mu\text{L/L}$ 氢气的变异系数。原始传感器的 CV 值随着氢气浓度增加而下降, 而 Teflon 改性传感器在所有浓度下的 CV 值均稳定在 4.00% 左右, 说明 Teflon 涂层有效抑制了湿度波动对响应稳定性的影响, 提升了传感器在实际环境中的适用性。

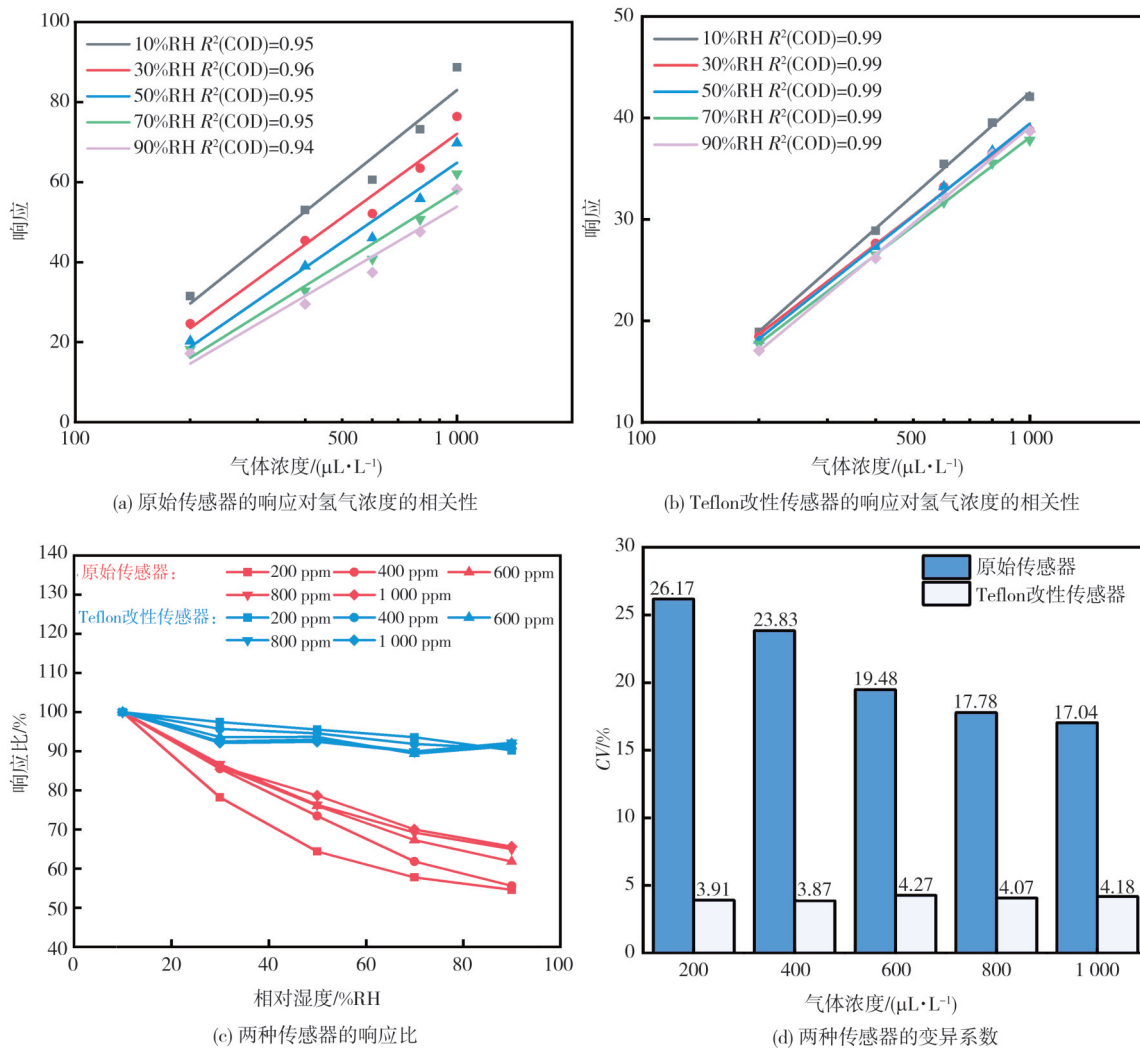


图 6 原始传感器和 Teflon 改性传感器在不同相对湿度环境中的响应对氢气浓度的相关性及其 200~1000 $\mu\text{L/L}$ 氢气的响应比和变异系数

Fig. 6 Correlation between response of pristine sensor and Teflon modified sensor in different relative humidity environments and hydrogen concentration, and response ratio and coefficient of variation sensors to 200~1000 $\mu\text{L/L}$ hydrogen

图 7 显示了 Teflon 改性传感器在 150 $^{\circ}\text{C}$ 下老化 60 天后于 50%RH 环境中对 400 $\mu\text{L/L}$ 氢气响应的重复性。由图可见, Teflon 改性后的传感器在老化 60 天后对氢气的响应仍保持稳定。结合图 2(c) Teflon 膜的热失重曲线可知, 其在 150 $^{\circ}\text{C}$ 下热稳定性良好, 表

明该改性传感器具备一定的长期稳定工作能力。

为了进一步评估 Teflon 改性传感器的抗湿性能, 表 1 总结了不同抗湿度干扰策略下气体传感器的性能。Teflon 改性氢气传感器表现出最低的 CV 值, 说明其在宽湿度范围内响应最为稳定。此

外,本文采用的Teflon改性方法工艺简单、易于实施,具备良好的推广应用潜力。

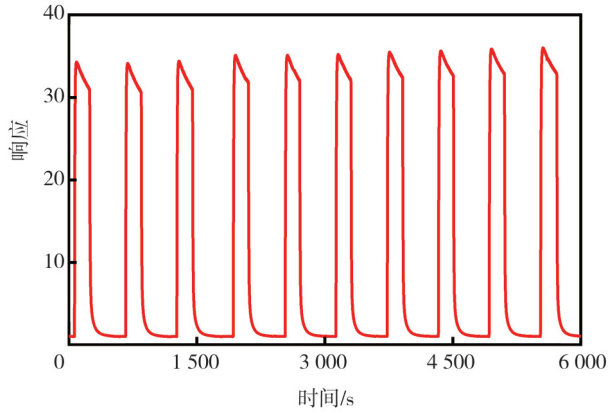


图7 Teflon改性传感器老化60天后在50%RH环境中对400 $\mu\text{L/L}$ 氢气的重复性

Fig. 7 Repeatability of Teflon modified sensor to 400 $\mu\text{L/L}$ hydrogen in 50% RH environment after aging for 60 days

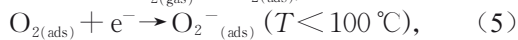
表1 不同抗湿度干扰策略气体传感器的性能

Tab. 1 Performance of gas sensors with various anti-humidity interference strategies

敏感材料	RH范围/%	响应比/%	CV/%	来源
MCM-48-Au/SnO ₂	32~91	83.0	—	文献[6]
CeO ₂ -SnO ₂	45~96	~90.0	~5.00	文献[7]
ZnO ₂ @ZIF-8	0~75	120.0	10.40	文献[9]
PTFE/ZnO/Ti ₃ C ₂ C _x	30~90	~50.0	~18.70	文献[11]
Teflon-Pd/SnO ₂	10~90	90.6	3.87	本研究

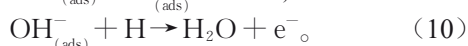
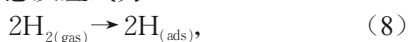
2.3 气敏机理及湿度影响分析

SnO₂是一种典型的n型金属氧化物,其气体传感机制基于还原性气体H₂与材料表面吸附氧之间发生的氧化还原反应^[20]。在空气中,氧气会化学吸附于SnO₂表面,捕获导带电子并形成活性吸附氧离子O₂⁻、O⁻和O²⁻,从而形成电子耗尽层,引起表面势垒升高,相邻晶粒之间形成的势垒阻碍电子传输,导致传感器电阻值增大^[20]。吸附氧离子反应式为



由于传感器的工作温度约150℃,因此吸附氧离子的类型主要为O⁻,如式(6)所述。

当SnO₂暴露于还原性气体H₂中时,气体会与SnO₂表面吸附的氧离子发生反应生成H₂O,同时释放被捕获的电子回导带,使耗尽层变薄、势垒高度降低,从而促进电子在晶粒间的传输,引起电阻下降^[20]。传感反应式为



然而,在高湿环境中,水分子会与吸附氧离子发生竞争反应,消耗部分活性氧离子,导致传

感器表面羟基化,引起灵敏度下降和性能退化。水分子与氧离子的反应表达式为^[21]



传感器敏感层经Teflon处理后,其疏水性与透气性示意图如图8所示。由于碳-氟键的高稳定性,Teflon表现出低表面能特性,能够有效阻隔水分子透过^[22]。此外,Teflon分子结构中的二氧戊环刚性较高,链间范德华力较弱,导致膜材料的自由体积分数较大,从而使其透气性优异^[22]。Teflon涂层允许H₂透过并与材料表面的吸附氧发生反应,抑制了水分子与吸附氧的竞争性反应,进而显著提升了传感器的抗湿度性能。随着环境相对湿度的增加,传感器对H₂的响应逐渐趋于稳定,这可能是由于水分子在敏感层表面达到吸附饱和所致^[21]。

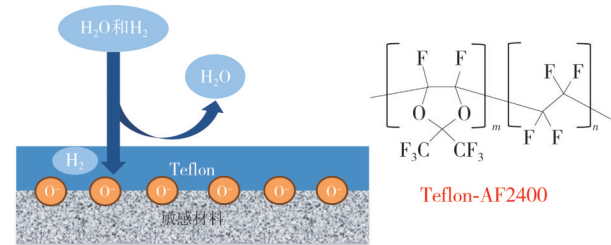


图8 Teflon改性传感器疏水透气示意图

Fig. 8 Schematic diagram of Teflon modified sensor for hydrophobic and breathable properties

3 结 论

在MEMS金属氧化物氢气传感器的敏感材料表面成功制备了具有疏水及透气特性的Teflon薄膜,显著增强了传感器在高湿环境中的抗干扰性能。改性后的传感器对氢气表现出良好的响应与恢复特性,在实验浓度范围内,其响应值与氢气浓度之间呈现显著的线性关系。在90%RH条件下,该传感器对400 $\mu\text{L/L}$ 氢气的响应仍可保持在10%RH条件下的90.6%。与已有研究中采用其他涂层材料的改性传感器相比,本工作所制备的Teflon改性传感器具有更低的变异系数,表明其对环境湿度变化具备更优的稳定性。该方法采用商用Teflon原料,通过简单的涂层工艺即可实现MEMS传感器的性能提升,工艺简单、成本较低,展现出良好的应用潜力。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

[1] SHWETHA H R, SHARATH S M, GURUPRASAD

- B, et al. MEMS based metal oxide semiconductor carbon dioxide gas sensor[J]. *Micro and Nano Engineering*, 2022, 16: 100156.
- [2] ZHANG M, HE Z, CHENG W, et al. A room-temperature MEMS hydrogen sensor for lithium ion battery gas detecting based on Pt-modified Nb doped TiO₂ nanosheets[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 74: 307-315.
- [3] NAGARJUNA Y, HSIAO Y J. TeO₂ doped ZnO nanostructure for the enhanced NO₂ gas sensing on MEMS sensor device[J]. *Sensors and Actuators: B. Chemical*, 2024, 401: 134891.
- [4] DUONG V T, NGUYEN C T, LUONG H B, et al. Ultralow-detection limit ammonia gas sensors at room temperature based on MWCNT/WO₃ nanocomposite and effect of humidity[J]. *Solid State Sciences*, 2021, 113: 106534.
- [5] YU S, JIA X, ZHANG J, et al. Recent advances in different materials for moisture resistance of metal oxide-based gas sensors: a review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 505: 159639.
- [6] LIU W, SIX, CHEN Z, et al. Fabrication of a humidity-resistant formaldehyde gas sensor through layering a molecular sieve on 3D ordered macroporous SnO₂ decorated with Au nanoparticles[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 919: 165788.
- [7] ZHU X, CHANG X, TANG S, et al. Humidity-tolerant chemiresistive gas sensors based on hydrophobic CeO₂/SnO₂ heterostructure films[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(22): 25680-25692.
- [8] WANG Y, ZHOU Y, WANG Y, et al. Conductometric room temperature ammonia sensors based on titanium dioxide nanoparticles decorated thin black phosphorus nanosheets[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 349: 130770.
- [9] NAIR S S, ILLYASKUTTY N, TAM B, et al. ZnO@ZIF-8: gas sensitive core-shell hetero-structures show reduced cross-sensitivity to humidity[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 304: 127184.
- [10] LESEGO M, NDINTEH D T, NDUNGU P, et al. Zeolitic imidazolate framework as humidity-resistant solid state-chemiresistive gas sensors: a review[J]. *Heliyon*, 2023, 9(11): e22329.
- [11] LIU Z, YANG X, SUN J, et al. PVDF modified Pd-SnO₂ hydrogen sensor with stable response under high humidity[J]. *Materials Letters*, 2018, 212: 283-286.
- [12] 高风娇, 常雪婷, 李俊峰, 等. 基于 PTFE/ZnO/Ti₃C₂T_x 复合薄膜的抗湿性氨气传感器研究[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(7): 3656-3667.
- GAO Fengjiao, CHANG Xueting, LI Junfeng, et al. Humidity-resistant ammonia sensor based on PTFE/ZnO/Ti₃C₂T_x composite films [J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2024, 41 (7) : 3656-3667. (in Chinese)
- [13] ZHU X, CHANG X, JIANG Y, et al. Hydrophobicity-promoted humidity-resistant ethanol sensors based on PTFE/Au/WO₃ composite films [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2025, 430: 137386.
- [14] GAO Z, SONG G, ZHANG X, et al. A facile PDMS coating approach to room-temperature gas sensors with high humidity resistance and long-term stability [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 325: 128810.
- [15] JIA X, YU S, YANG J, et al. High sensitivity, humidity-independent ethanol gas sensors based on PFDS-ZnSnO₃ hollow microsphere[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(3): 1916-1923.
- [16] MERKEL T C, BONDAR V, NAGAI K, et al. Gas sorption, diffusion, and permeation in poly (2, 2-bis (trifluoromethyl) -4, 5-difluoro-1, 3-dioxole-co-tetrafluoroethylene) [J]. *Macromolecules*, 1999, 32: 8427-8440.
- [17] HAN Y, DING F, HAO C, et al. The oil-gas separation characteristics of ceramic/Teflon AF2400 composite membrane[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 88: 19-23.
- [18] WANG Y, ZHOU Y. Recent progress on anti-humidity strategies of chemiresistive gas sensors[J]. *Materials*, 2022, 15(24): 8728.
- [19] RESNICK P R, BUCK W H. Teflon® AF: a family of amorphous fluoropolymers with extraordinary properties [M]//*Fluoropolymers 2*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2006: 25-33.
- [20] CAI Z, GOO E, PARK S. Hydrogen sensing performance and its enhanced sensing mechanisms of hollow structured-SnO₂ nanospheres activated by noble metal nanoparticles [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 1716-1731.
- [21] MA N, SUEMATSU K, YUASA M, et al. Effect of water vapor on Pd-loaded SnO₂ nanoparticles gas sensor [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(10): 5863-5869.
- [22] LIU S, MA L C, CHEN C H, et al. Highly gas permeable, ultrathin Teflon AF2400/ γ -alumina composite hollow fiber membranes for dissolved gas analysis [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 540: 243-250.