

# 面向仪器应用的电阻式湿度传感器： 结构、工艺与研究进展

陈恒峰<sup>1</sup>, 李慧千<sup>2</sup>, 李若朋<sup>2</sup>

<sup>1</sup>广州大学物理与材料科学学院, 广东 广州

<sup>2</sup>广州德芯半导体科技有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2026年1月16日; 录用日期: 2026年2月20日; 发布日期: 2026年3月18日

## 摘要

针对精密仪器与工业设备环境适应性的需求,湿度是影响其长期性能与可靠性的关键参量。具备高精度、宽范围、快速响应及长期稳定的湿度传感器,对于保障仪器信号质量、实现内部微环境监控及防护核心元件至关重要。电阻式湿度传感器凭借敏感材料丰富、制备工艺兼容性强、易于与读出电路集成等优势,在工业分析、医疗监护及便携式仪器系统中应用广泛。从器件层面出发,系统综述了湿度电阻式传感器的工作机理、材料体系、结构设计及制备工艺的发展现状,着重强调了“结构-工艺-性能”之间的关联机制。文章重点归纳了电极结构(梳状、指叉、微纳电极)、基底选择(陶瓷、硅、柔性基底)、湿敏薄膜结构(多孔、纳米复合、梯度结构)以及典型制备工艺(PVD、溶胶凝胶、印刷、MEMS微加工),并结合仪器设备需求分析了其工程应用场景。最后,总结当前面临的技术挑战并展望未来发展趋势,旨在为新型电阻式湿度传感器在仪器设备中的选型、集成与应用提供技术参考。文章重点比较了不同敏感材料在柔性基底上的结合工艺及其对传感器滞后性与灵敏度的影响,并对未来的多功能集成方向进行了展望。

## 关键词

湿度传感器, 电阻式湿敏器件, 器件结构, 制备工艺, MEMS, 仪器设备

# Resistive Humidity Sensors for Instrumentation Applications: Structure, Fabrication, and Research Progress

Hengfeng Chen<sup>1</sup>, Huiqian Li<sup>2</sup>, Ruopeng Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Materials Science, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Guangzhou Dexin Semiconductor Technology Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: January 16, 2026; accepted: February 20, 2026; published: March 18, 2026

文章引用: 陈恒峰, 李慧千, 李若朋. 面向仪器应用的电阻式湿度传感器: 结构、工艺与研究进展[J]. 仪器与设备, 2026, 14(1): 72-82. DOI: 10.12677/iae.2026.141010

## Abstract

For precision instruments and industrial equipment requiring environmental adaptability, humidity is a critical parameter affecting long-term performance and reliability. Humidity sensors featuring high accuracy, wide measurement range, rapid response, and long-term stability are essential for ensuring signal quality, enabling internal microenvironment monitoring, and protecting core components. Resistive humidity sensors, leveraging advantages such as diverse sensitive materials, strong process compatibility, and ease of integration with readout circuits, find extensive applications in industrial analysis, medical monitoring, and portable instrument systems. From a device perspective, this systematic review covers the working principles, material systems, structural designs, and fabrication processes of resistive humidity sensors, emphasizing the interrelated mechanisms between “structure, process, and performance”. The paper systematically categorizes electrode structures (comb, interdigitated, micro/nano electrodes), substrate selections (ceramic, silicon, flexible substrates), humidity-sensitive film architectures (porous, nanocomposite, gradient structures), and typical fabrication techniques (PVD, sol-gel, printing, MEMS microfabrication). It further analyzes their engineering applications based on instrumentation requirements. Finally, it summarizes current technical challenges and outlines future development trends, aiming to provide technical guidance for selecting, integrating, and applying novel resistive humidity sensors in instrumentation. The paper specifically compares bonding processes for different sensing materials on flexible substrates and their impact on sensor hysteresis and sensitivity, while also projecting future directions toward multifunctional integration.

## Keywords

Humidity Sensor, Resistive Humidity-Sensitive Device, Device Structure, Fabrication Process, MEMS, Instrument and Equipment

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

湿度控制在仪器设备中具有重大意义，尤其在光学仪器、工业检测仪器、分析化学设备、气体检测模块、生物医疗仪器及精密电子系统中，湿度对光学元件稳定性、灵敏器件寿命、化学分析结果、电子器件绝缘状态以及设备整体可靠性具有显著影响。高湿度容易导致腐蚀、漏电、信号漂移、材料吸水膨胀等问题，因此需要实时可靠的湿度监测模块作为仪器设备的重要组成部分。

湿度传感技术包括电容式、电阻式、光学式、光纤式、压电式、谐振式等多种形式。其中，电阻式湿度传感器因结构简单、工作电路容易设计、读数直观、材料选择范围广、适合多种制备工艺(如溅射、印刷、溶胶凝胶)及易于集成到现有仪器系统而被广泛采用。

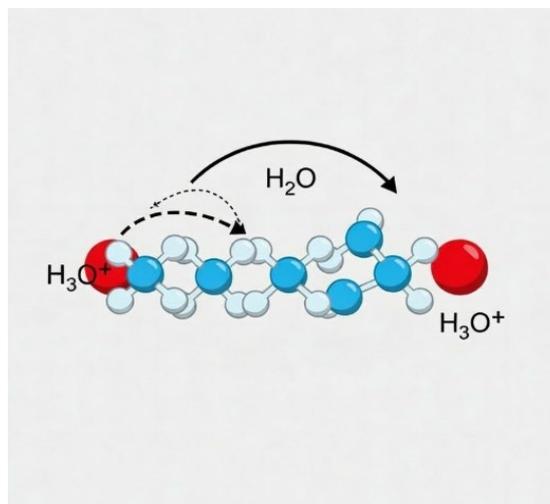
## 2. 核心感湿机理

电阻式湿度传感器的基本原理是敏感膜吸收水分子后，其内部载流子浓度或迁移率发生变化，从而引起宏观电阻值的改变。根据载流子类型的不同，主要分为离子导电机制和电子导电机制。

### 2.1. 质子传导机制

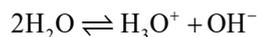
绝大多数聚合物电解质及亲水性陶瓷材料遵循此机制。如图 1 所示，当环境湿度较低时，水分子通

过化学吸附在材料表面形成第一层吸附水, 此时水分子受到强氢键束缚, 质子难以移动, 材料表现出极高的电阻(通常 $>10^7 \Omega$ )。



**Figure 1.** Schematic diagram of the Grotthuss proton conduction mechanism  
**图 1.** Grotthuss 质子传导机理示意图

随着相对湿度增加, 水分子通过物理吸附形成多层水膜, 表面的静电场促使水分子解离:



此时, 水合氢离子( $\text{H}_3\text{O}^+$ )作为主要载流子, 通过氢键网络在水分子间进行跳跃式传递( $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O}$ ), 这种链式反应即为 Grotthuss 机制[1]。随着吸附水层厚度的增加, 质子跳跃容易程度呈指数级上升, 导致电阻急剧下降。

## 2.2. 电子传导机制

对于 n 型半导体金属氧化物(如  $\text{SnO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ ), 在干燥空气中, 氧分子吸附在表面捕获电子形成  $\text{O}_2^-$  等离子, 导致表面形成电子耗尽层, 电阻较高。当水分子吸附时, 水分子取代吸附氧释放电子回到导带, 或作为施主直接提供电子, 使得载流子浓度增加, 电阻降低[2]。对于某些 p 型半导体或碳纳米管(CNT), 水分子作为电子给体可能会通过空穴复合导致电阻升高, 具体取决于材料的能带结构。

## 3. 湿敏材料体系

敏感材料的优劣直接决定了传感器性能的好坏[3]。湿敏材料是指能够对湿度变化作出响应或变化的材料, 广泛应用于湿度传感器、湿度控制系统以及其他需要湿度监测的领域。这些材料能够根据环境湿度的变化, 改变其物理性质, 如电阻、电导、尺寸和形态等。目前常用湿敏材料可分为四大类别: 金属氧化物、聚合物、碳基材料以及无机-有机复合材料。

### 3.1. 金属氧化物湿敏材料

金属氧化物(如  $\text{ZnO}$ 、 $\text{SnO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{In}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  等)因其化学稳定性高、成膜方式多样、与 MEMS 工艺兼容性好而成为仪器设备中应用最广的湿敏材料之一。金属氧化物具有主动吸附位点[4], 能够通过羟基的化学吸附与水分子相互作用。所以, 将金属氧化物掺入有机聚合物材料中, 显著增强了其对水分子的物理吸附能力。这导致复合材料内形成水层, 增加离子传输通道数量并稳定阻抗变化率。

### 3.2. 高分子(聚合物)湿敏材料

聚合物类湿敏材料具有柔性好、吸水性高、可低温加工等特点,适用于柔性器件与便携式仪器。聚合物根据分子结构和官能团分为一级、二级和三级,每种类别都有不同的传感应用。聚合物的感应活性可根据所用聚合物的数量变化,包括单一、二元或三元等传感器材料配置[5]。单一聚合物结构简单且缺乏专门官能基,对湿度产生膨胀,适合基础且经济的传感器,但灵敏度较低。二元聚合物含有两种不同的聚合物,它们与水分子相互作用,从而提高灵敏度,并在电阻或电容等电特性上发生可量化的变化。三元聚合物是最复杂的类别,包括亲水性和疏水性,具有三种聚合物的混合物结构,从而提升精度、加快反应时间和更高性能。

### 3.3. 碳基湿敏材料

石墨烯、CNTs 及 GO 等碳基材料在湿度传感领域的应用潜力,本质上源于碳原子  $sp$ 、 $sp^2$  及  $sp^3$  杂化所赋予的构型自由度。这种成键方式的差异在形成多样化微观形貌的同时,也使材料的电输运特性与表面活性具有极宽的调节范围。基于这种结构-性能的强大关联特征,可以针对不同的检测需求实现湿敏器件的差异化设计。

### 3.4. 无机-有机复合湿敏材料

为了解决单一材料在结构稳定性与灵敏度之间难以平衡的问题,无机-有机复合体系被广泛采用。其中,无机氧化物主要凭借化学惰性与机械强度起到“骨架”支撑作用,保证了宽湿域下微观结构的完整性与测试复现性。引入的聚合物或碳基组分,则依靠丰富的表面官能团及柔性特征增强了水分子吸附。这种协同作用实际上是在不改变基本感湿原理的前提下,通过重构吸附动力学与载流子传输通道,实现了对响应特性的调控。

以 ZnO-GO 为代表的氧化物-石墨烯复合体系中,无机组分通常作为刚性支撑骨架,氧化石墨烯则凭借二维片层及含氧官能团优势增强对水分子的捕获,直接调制材料阻抗[6]。在  $TiO_2$ -PVA 这类氧化物-聚合物体系中,聚乙烯醇在无机颗粒间起到了类似于连续相的填充作用,这有助于提升膜层的致密程度并改善湿敏响应的一致性[7]。对于 CNT-PVP 体系,机制主要体现为碳纳米管构建导电渗流网络[8],聚合物负责表面亲水改性,二者耦合后共同决定最终的电学响应行为。

为了在实际仪器设计中选择最合适的技术路线,须对比不同材料体系的关键性能。表 1 为电阻式湿度传感器不同材料体系性能对比,从灵敏度、响应速度、迟滞、稳定性及成本维度详细总结了主流电阻式湿度传感器的性能范围。

**Table 1.** Performance comparison of different material systems for resistive humidity sensors.

**表 1.** 电阻式湿度传感器不同材料体系性能对比

材料体系	灵敏度( $\Delta R/R_0$ )	响应/恢复时间	迟滞	长期稳定性	制备成本
金属氧化物	中-高(主要在低湿区敏感)	10 s~60 s	<2% RH	极优(耐高温/腐蚀)	低
导电聚合物	中等(线性度较好)	5 s~30 s	3%~5% RH (易吸湿膨胀)	中(受温度/氧化影响)	低
碳基材料	极高(超大比表面积)	<1 s~5 s	<1% RH	优(需表面修饰)	中
复合材料	高(协同效应)	0.01 s~2 s	<1.5% RH	优	中

## 4. 传感器结构设计

除了湿敏材料的本征特性外,器件的几何结构设计是决定传感器最终性能的另一关键维度。结构设

计本质上是在调控电场分布(决定灵敏度)、水分子扩散动力学(决定响应速度与湿滞)以及机械适应性(决定应用场景)。

#### 4.1. 电极结构与信号收集效率

电极是传感器实现“湿敏特性与电信号”转换的核心接口,其几何参数直接决定了传感器的初始阻抗与探测灵敏度。电阻式传感器通常采用叉指电极(IDE)结构,目的是在有限尺寸内最大化感测面积。

几何参数优化:电极的指宽、指间距及对数是关键设计变量。基于保角变换理论[9],减小指间距可以显著增强电极边缘的边缘电场强度。这种增强效应对于低湿环境下的微量水分子感测尤为重要。现代光刻工艺已能制备间距小于 $5\ \mu\text{m}$ 的微间距电极,有效提升了器件的信噪比。

材料选择权衡:电极材料的选择需在性能与成本间取得平衡。金电极化学稳定性最佳,适合高精度仪器;银电极易发生离子迁移,需配合表面钝化工艺;而碳浆电极成本最低,常用于丝网印刷的大规模制造。

#### 4.2. 湿敏薄膜的微观形态调控

如果说电极决定了信号收集的效率,那么湿敏薄膜的微观形态则决定了水分子进出的“阻力”。传统的平面膜层结构虽然工艺标准化程度高,但往往受限于水分子向深层扩散的路径长度,导致在高湿环境下容易饱和,且响应慢、湿滞大。为突破这一限制,三维多孔网络结构成为主要方向(如图2所示)。

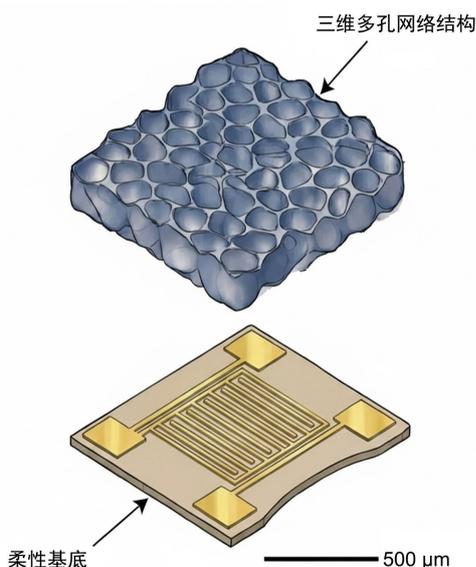


Figure 2. Three-dimensional porous structure  
图2. 三维多孔结构

三维多孔优势:利用静电纺丝等技术构建的纳米纤维网或多孔骨架,不仅提供了巨大的比表面积供水分子吸附,其内部高度连通的孔隙通道[10]也极大缩短了湿气的吸脱附路径。相比于致密的平面结构,三维微纳结构虽然在响应速度和低湿滞方面表现优异,非常适合呼吸监测等医疗应用,但其代价是机械强度变差,且防尘防水封装设计更为困难。

#### 4.3. 柔性基底与结构适配性

随着可穿戴技术的发展,传感器结构设计正从刚性向柔性演变。基底材料已从传统的氧化铝陶瓷、

玻璃转向聚酰亚胺(PI)、PET 及热塑性聚氨酯(TPU)。柔性化不仅仅是更换基底材料,更要求上层的电极与湿敏膜具备抗形变能力。如图 3 柔性基底所示的柔性平面叉指结构,需通过结构设计(如蛇形走线)或材料复合来释放弯曲产生的应力,防止导电层断裂或敏感膜剥离,确保在动态佩戴下的信号稳定性。

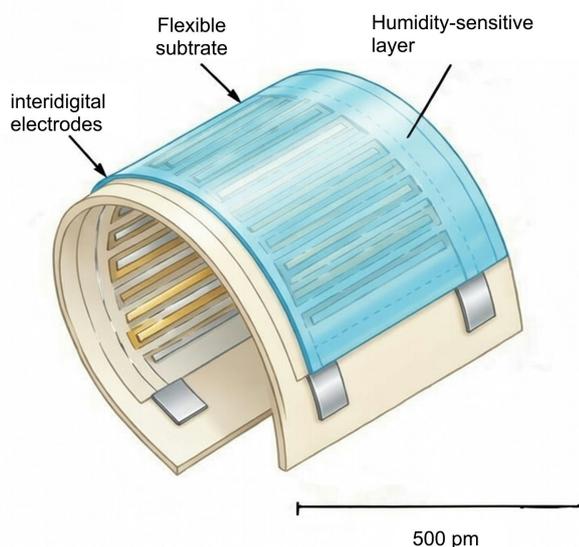


Figure 3. Flexible substrate  
图 3. 柔性基底

## 5. 敏感膜制备工艺

制备工艺决定了敏感膜的微观形貌、厚度均匀性及与基底的结合力,是实现高性能传感器的关键环节。

### 5.1. 丝网印刷

这是目前工业化量产最成熟的工艺,如图 4 丝网印刷工艺。将敏感材料调制成浆料,通过丝网漏印在基板上。该工艺成本极低,适合批量生产。但其膜层较厚(通常 $>10\ \mu\text{m}$ ),导致水分子向深层扩散慢,响应时间通常在 10 秒以上,且难以制造精细图形。

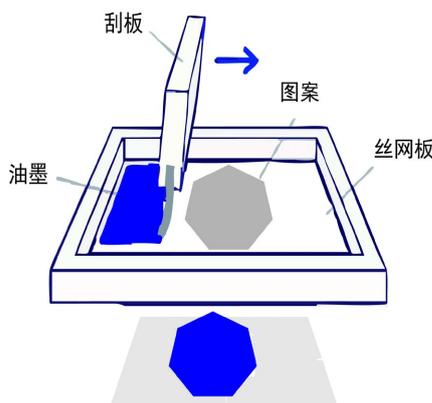


Figure 4. Screen printing process  
图 4. 丝网印刷工艺

## 5.2. 喷墨打印

作为一种数字化增材制造技术，喷墨打印可精确控制墨滴的沉积位置。通过多次打印可调控膜厚，实现纳米级薄膜制备。Ali 等利用喷墨打印[11]在 PET 基底上制备了全碳基湿度传感器，展现了较好的一致性。该工艺最大的优势在于节省材料且无需掩膜版，非常适合湿敏膜的制备。

丝网印刷：优势是成本极低，适合低端消费电子或一次性耗材；劣势是膜层厚导致响应慢，一致性较差，需要逐个校准，不适合高精度分析仪器。

喷墨打印：适合小批量、定制化的高端传感器制备，材料利用率高，但对墨水流变性要求高，工业化成熟度不如丝印。

MEMS 工艺：优势是集成度高、一致性好、具备自校准/自清洁能力，是精密电子与半导体设备的首选；劣势是设备投入大，研发周期长，单片成本高(除非超大规模量产)。

## 5.3. 激光直写与微纳加工

利用飞秒激光或激光诱导石墨烯(LIG)技术，如下图 5 所示，可以在聚合物前驱体上直接烧蚀出导电的碳化图案。这种方法集电极制备与敏感层沉积于一体，工艺流程大大简化。此外，基于 MEMS(微机电系统)工艺传感器集成了微加热器，可通过周期性加热实现传感器的“自清洁”，解决高湿环境下的漂移问题[12]。

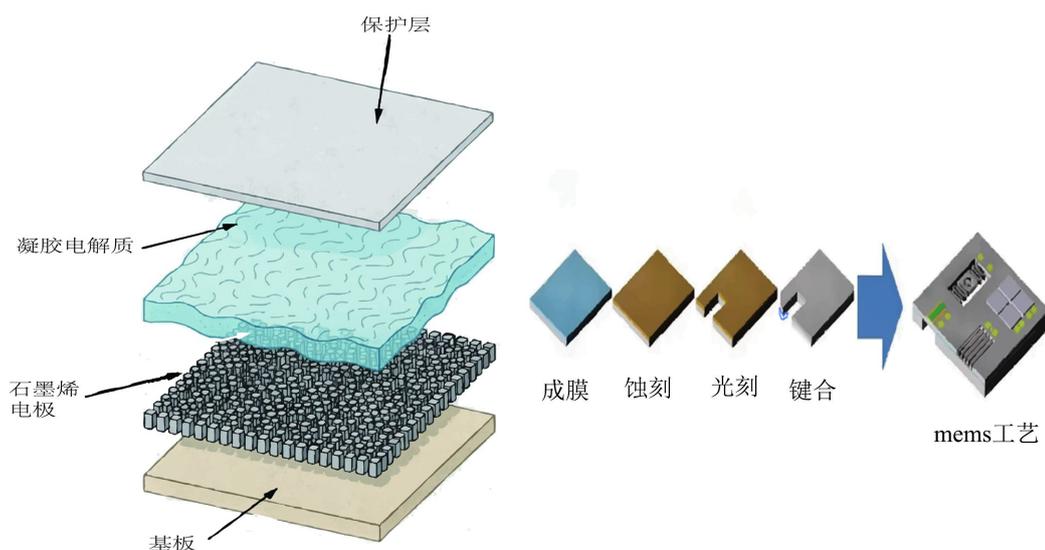


Figure 5. Laser-induced detection and micro/nano fabrication  
图 5. 激光诱导探测与微纳加工

## 6. 工程应用

### 6.1. 光学仪器中的应用

透镜、光栅等精密光学元件对高湿环境很敏感，表面吸附水的冷凝或霉菌滋生往往直接导致光通量损耗及光路漂移[13]。在仪器密封腔体内集成微型电阻式传感器进行原位监测已成为一种通用设计。特别是在高精度光谱分析系统中，通过反馈回路将相对湿度控制在 30%~50% RH，能够有效抑制金属部件的电化学腐蚀及光学镀膜剥落，这对保障长期测量数据的复现性至关重要。

## 6.2. 工业分析仪器与气体检测设备

针对气相色谱等工业过程控制设备，湿度的波动往往是造成检测误差的主要原因，严重时会导致载气污染、传感器基线漂移甚至催化元件损坏[14]。利用电阻式湿敏元件引入实时湿度补偿，是保障分析数据可靠性的通用手段。特别是在高温炉腔或尾气排放监测等特殊工况下，基于 ZnO、SnO<sub>2</sub> 等金属氧化物体系的电阻元件表现出了更优的耐受性，能够有效监控水分含量，从而预防酸露点腐蚀对核心部件的损害。

## 6.3. 医疗与生物仪器

医疗仪器(如呼吸机、孵化器、麻醉机和监护仪)需严格控制患者周围湿度，以防止交叉感染和设备故障。电阻式湿度传感器[15]集成于呼吸回路或腔体中，可监测呼出气体湿度，支持非接触呼吸监测和湿度补偿。在 COVID-19 相关医疗设备中，此类传感器有助于降低高湿环境下的病毒传播风险，并确保仪器内部电子元件的绝缘性能[16]。

## 6.4. 其他精密仪器应用

在半导体加工设备、精密电子测试仪和航空航天仪器中，电阻式湿度传感器用于防止静电放电和材料吸湿膨胀。MEMS 工艺制备的微型电阻式传感器易于片上集成，提供高分辨率湿度数据，支持仪器自校准和故障预警。

**Table 2.** Comparison of key performance requirements and selection criteria for resistive humidity sensors in different instrument and equipment application scenarios

**表 2.** 不同仪器设备应用场景下的电阻式湿度传感器关键性能需求与选型对比

应用领域	典型仪器设备	关键性能需求	推荐技术路线/材料特点	主要工程挑战
光学仪器	光谱仪、激光器谐振腔、天文望远镜	长期稳定性、低漂移、无挥发性残留	陶瓷基/高分子聚合物 需具备优异的化学稳定性，避免材料挥发污染镜片	密闭狭小空间内的微型化集成与热管理
工业过程控制	气相色谱仪、烟气分析仪、环境试验箱	耐高温、耐腐蚀、抗毒化	金属氧化物 利用其在高温与酸性气体环境下的结构鲁棒性	复杂背景气体导致的交叉干扰与基线漂移
医疗与生物监护	呼吸机、麻醉机、婴儿培养箱	超快响应速度(ms 级)、非接触监测、抗冷凝	纳米复合材料/超薄膜 利用高比表面积实现快速吸脱附，以捕捉呼吸频率	高湿环境(>90% RH)下的湿滞效应与灭菌兼容性
精密电子与半导体	晶圆存储柜、静电放电防护系统	高灵敏度(低湿范围)、易于数字化集成	MEMS 微加工器件 易于与 CMOS 电路片上集成，实现自校准功能	低湿环境下的信号信噪比提升
柔性穿戴与 IoT	电子皮肤、智能包装、便携式检测仪	机械柔性、低功耗、低成本制造	碳基材料印刷工艺 在弯曲应变下保持电学性能稳定	机械形变导致的结构疲劳与连接接口的可靠性

综合上述应用案例分析，不同类型的仪器设备对湿度传感器的性能侧重点存在显著差异。如表 2 不同仪器设备应用场景下的电阻式湿度传感器关键性能需求与选型对比所示，光学仪器更关注长期监测的绝对稳定性以保护精密元件，而医疗呼吸监测设备则对传感器的动态响应速度提出了毫秒级的苛刻要求。工业分析设备则必须克服高温与腐蚀性气体的侵蚀，这对敏感材料的化学鲁棒性是巨大考验。因此，在仪器系统的设计阶段，必须根据具体的工况环境与测量目标，权衡灵敏度、响应时间与可靠性，选择匹配的传感器结构与工艺路线。

## 7. 老化与失效性能测试分析

电阻湿度传感器因其结构简单、成本低廉而在工业、环境监测和消费电子领域广泛应用。然而，其长期稳定性较差，主要表现为传感器输出随时间发生的缓慢变化，即漂移。漂移会显著降低传感器的测量精度，影响其在精密应用中的可靠性。漂移的主要成因包括敏感材料的化学毒化、物理老化以及机械脱落等失效模式。

为快速评估传感器的长期性能，加速老化测试被广泛采用。该方法通过施加高温、高湿、污染物暴露等极端条件，模拟传感器在实际使用中的多年老化过程，从而在短时间内揭示漂移机理。

### 7.1. 加速老化测试方法

加速老化测试[17]通常采用高温高湿环境或高度加速应力测试，以加速水分扩散和化学反应过程。对于电阻湿度传感器，常见测试协议包括：

恒温恒湿暴露：传感器在 85℃、85%RH 条件下连续运行数千小时，定期测量电阻 - 湿度响应曲线，计算漂移率。

污染物暴露测试：引入挥发性有机化合物、清洁剂或硅氧烷等污染物，模拟实际环境中的化学毒化。

热循环结合湿度测试：模拟温度和湿度交变引起的机械应力，导致脱落失效。

### 7.2. 失效模式分析

#### 7.2.1. 毒化失效

毒化是电阻湿度传感器最常见的漂移原因，主要源于环境中污染物的不可逆吸附。这些污染物占据敏感材料(如导电聚合物或盐基材料)的活性位点，导致电阻基线偏移。在加速老化测试中，暴露于含硅氧烷或醇类蒸气的环境中，传感器响应会迅速下降。

#### 7.2.2. 老化失效

老化失效源于敏感材料的物理化学降解，包括聚合物链断裂、水解或氧化。在高温高湿加速测试下，水分子渗透导致离子迁移率永久改变，电阻随时间缓慢增加。长期暴露于极端湿度会加速材料劣化，导致灵敏度下降。

#### 7.2.3. 脱落失效

脱落失效主要发生在薄膜型电阻湿度传感器中，由于热膨胀系数失配或水分诱导的膨胀应力，敏感层与基底或电极间发生分离。在热湿循环加速测试中，这种机械失效尤为明显，导致电阻突变或完全失效。

虽然直接针对电阻湿度传感器的脱落研究较少，但类似薄膜电阻(如丝网印刷碳电阻)在高湿环境下的可靠性测试显示，基底(如聚酯或 TPU)与敏感层易发生开裂和脱落[18]。复合材料湿度传感器研究也表明，水分吸收可诱导层间分离，加速机械失效[19]。

### 7.3. 预防措施

针对上述失效模式，可采取以下预防措施以提高电阻湿度传感器的长期稳定性。

抗毒化：在传感器表面添加选择性滤膜或疏水涂层，阻挡 VOC 和污染物进入。部分传感器集成加热功能，通过周期性加热挥发吸附污染物。

抗老化：选用耐水解聚合物(如聚酰亚胺基或纳米复合材料)作为敏感层，提高化学稳定性。优化制备工艺(如掺杂稳定剂)可减缓材料降解。

抗脱落：改善敏感层与基底的附着力，如采用等离子处理或中间粘接层。设计柔性基底以缓解热应力，并在封装中加入防潮层。

## 8. 发展趋势与挑战

尽管电阻式湿度传感器在过去几十年中取得了长足进步，但在面对极端环境监测、精密医疗以及物联网大规模应用的新需求时，仍面临诸多挑战。未来的研究与发展趋势主要集中在以下几个方面。

### 8.1. 高灵敏度与低湿滞的平衡

许多高性能湿敏材料(如聚合物和部分金属氧化物)普遍存在“湿滞”现象，即吸湿和脱湿过程中的电阻曲线不重合，这严重影响了测量的准确性和动态响应速度。此外，高灵敏度往往伴随着非线性响应，增加了信号处理电路的复杂性。未来的研究需致力于开发低湿滞、高线性度的纳米复合材料。例如，利用氧化石墨烯(GO)、MoS<sub>2</sub>等二维材料[20]具有超大比表面积的特性，构建分级多孔结构以优化水分子的吸附与解吸动力学，从而在保证高灵敏度的同时显著降低湿滞。

### 8.2. 柔性化与可穿戴集成

随着柔性电子和电子皮肤的兴起，传统的刚性陶瓷或硅基传感器已难以满足人体健康监测的需求。发展趋势正转向基于PET、PI、纺织品甚至纸张的柔性电阻式湿度传感器。这要求敏感材料(如导电高分子、碳纳米管、金属纳米线)不仅要具备优异的湿敏特性，还需在弯曲、拉伸或扭曲等机械形变[21]下保持电学性能的稳定(即机械鲁棒性)。如何解决敏感层在反复形变下的裂纹扩展与剥离问题，实现与人体皮肤[22]的保形接触，是实现长期稳定生理信号监测的关键。

### 8.3. 多功能集成与抗干扰设计

在复杂的实际应用环境中，湿度传感器常受温度、挥发性有机化合物及其他气体的交叉干扰，导致测量误差。未来的趋势是向阵列化、多功能化发展，例如将湿度传感器与温度、气体(如NO<sub>2</sub>、CO)或压力传感器集成在同一微型芯片上。通过传感器算法实现对特定环境参数的精准解耦与补偿，从而提高在复杂工况下的抗干扰能力和数据的可靠性[23]。

### 8.4. 无源无线与自供电技术

在物联网节点分布广泛且难以更换电池的场景下(如智能包装、农业监测)，功耗是巨大的制约因素。基于射频识别(RFID)技术的无源无线湿度传感器，以及基于摩擦纳米发电机或压电效应的自供电湿度传感器成为研究热点。这类器件能够收集环境中的机械能转化为电能驱动工作，或通过无线射频信号的变化直接反馈湿度信息，为构建免维护的分布式传感网络提供了新的解决方案[24]。

## 9. 总结

本文系统综述湿度电阻式传感器的结构与工艺进展，重点分析电极结构、基底材料、薄膜结构及制造工艺对性能的影响，并讨论未来发展方向。

## 参考文献

- [1] Chen, Z. and Lu, C. (2005) Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*, **3**, 274-295. <https://doi.org/10.1166/sl.2005.045>
- [2] Traversa, E. (1995) Ceramic Sensors for Humidity Detection: The State-of-the-Art and Future Developments. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **23**, 135-156. [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(94\)01268-m](https://doi.org/10.1016/0925-4005(94)01268-m)

- [3] 郑慧宜. 基于壳聚糖的半导体聚合物湿度传感器的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [4] Qian, J., Tan, R., Feng, M., Shen, W., Lv, D. and Song, W. (2024) Humidity Sensing Using Polymers: A Critical Review of Current Technologies and Emerging Trends. *Chemosensors*, **12**, 230. <https://doi.org/10.3390/chemosensors12110230>
- [5] Pasalwad, K.A., Baby, N., Edjenguele, A., Sadhasivam, S., Palanisamy, G., Magdum, S.S., *et al.* (2025) Progress on Polymer-Based Materials and Composites for Humidity Sensor Applications: From Materials Aspects to Sensor Performances. *Journal of Materials Chemistry A*, **13**, 23248-23311. <https://doi.org/10.1039/d5ta00028a>
- [6] Huo, C., Chen, H., Chen, L., Yang, S., Cui, P. and Song, J. (2024) Humidity Sensor Based on ZnO MS/GR Composite Material. *Journal of Electronic Materials*, **53**, 5238-5245. <https://doi.org/10.1007/s11664-024-11259-7>
- [7] Salman, M.K., Karhib, M.M., Mohammed, K.A., Mezher, M.H., Jasim, S.A. and AlRubaie, A.J. (2023) Preparing and Studying Some Physical Properties of TiO<sub>2</sub>-PVA Hybrid Nanocomposite Material for Possible Environmental Applications. *AIP Conference Proceedings*, **2839**, Article ID: 050014. <https://doi.org/10.1063/5.0169634>
- [8] Park, S., Kim, M. and Ha, T. (2023) All-Printed Wearable Humidity Sensor with Hydrophilic Polyvinylpyrrolidone Film for Mobile Respiration Monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **394**, Article ID: 134395. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134395>
- [9] Li, D., Chen, A., Zheng, D., Li, Z., Na, R., Cui, F., *et al.* (2022) Design and Optimization of Interdigital Capacitive Humidity Sensor with Highly Sensitive and Dynamic Response Time. *Applied Sciences*, **12**, Article 12362. <https://doi.org/10.3390/app122312362>
- [10] Wang, X., Zhang, Y., Li, T., *et al.* (2021) High Sensitive and Fast Response Humidity Sensor Based on Polymer Composite Nano-Fibers for Breath Monitoring and Non-Contact Sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **328**, Article ID: 129048.
- [11] Ali, S., Hassan, A., Hassan, G., Bae, J. and Lee, C.H. (2016) All-Printed Humidity Sensor Based on Graphene/Methyl-Red Composite with High Sensitivity. *Carbon*, **105**, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.04.013>
- [12] Lan, L., Le, X., Dong, H., Xie, J., Ying, Y. and Ping, J. (2020) One-Step and Large-Scale Fabrication of Flexible and Wearable Humidity Sensor Based on Laser-Induced Graphene for Real-Time Tracking of Plant Transpiration at Bio-interface. *Biosensors and Bioelectronics*, **165**, Article ID: 112360. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112360>
- [13] Farahani, H., Wagiran, R. and Hamidon, M. (2014) Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors*, **14**, 7881-7939. <https://doi.org/10.3390/s140507881>
- [14] 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>
- [15] Paul, S., Saikia, A., Majhi, V., *et al.* (2022) Introduction to Biomedical Instrumentation and Its Applications. Academic Press.
- [16] Rittersma, Z.M. (2002) Recent Achievements in Miniaturised Humidity Sensors—A Review of Transduction Techniques. *Sensors and Actuators A: Physical*, **96**, 196-210. [https://doi.org/10.1016/s0924-4247\(01\)00788-9](https://doi.org/10.1016/s0924-4247(01)00788-9)
- [17] Thor, P., Jolly, M., Montgomery, J., *et al.* (2021) Humidity as a Use Condition for Accelerated Aging of Polymers. Medical Device and Diagnostic Industry.
- [18] Somarathna, U.S., Garakani, B., Weerawarne, D.L., Alhendi, M., Poliks, M.D., Misner, M., *et al.* (2025) Reliability of Screen-Printed Water-Based Carbon Resistors for Sustainable Wearable Sensors. *IEEE Sensors Journal*, **25**, 6449-6463. <https://doi.org/10.1109/jsen.2024.3525055>
- [19] Davies, G.D., Krebs, L.A. and Dacres, C.M. (2001) Sensor to Detect Moisture/Degradation of Composites and Adhesive Bonds. *Proceedings of the 46 International SAMPE Symposium 2001*, Covina, 6-10 May 2001, 1-10.
- [20] Hassan, J.Z., Raza, A., Din Babar, Z.U., Kumar, U., Kaner, N.T. and Cassinese, A. (2023) 2D Material-Based Sensing Devices: An Update. *Journal of Materials Chemistry A*, **11**, 6016-6063. <https://doi.org/10.1039/d2ta07653e>
- [21] Cheng, J., Xue, N., Zhou, W., Qin, B., Qiu, B., Fang, G., *et al.* (2025) Recent Progress in Flexible Wearable Sensors for Real-Time Health Monitoring: Materials, Devices, and System Integration. *Micromachines*, **16**, Article 1124. <https://doi.org/10.3390/mi16101124>
- [22] Ferreira, R.G., Silva, A.P. and Nunes-Pereira, J. (2024) Current On-Skin Flexible Sensors, Materials, Manufacturing Approaches, and Study Trends for Health Monitoring: A Review. *ACS Sensors*, **9**, 1104-1133. <https://doi.org/10.1021/acssensors.3c02555>
- [23] Xu, C., Yang, Y. and Gao, W. (2020) Skin-interfaced Sensors in Digital Medicine: From Materials to Applications. *Matter*, **2**, 1414-1445. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.03.020>
- [24] Xiao, Y., Guo, C., Yan, H., Zhao, D., Tan, P. and Qi, R. (2025) A Review of Self-Powered High-Precision Humidity Sensors from Device Structure Design to Key Material Enhancement. *The Innovation Energy*, **2**, Article ID: 100099. <https://doi.org/10.59717/j.xinn-energy.2025.100099>