

基于PVA的湿敏薄膜制备与湿度响应性能研究

王 兵, 徐亚蕙

安徽理工大学材料科学与工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年12月4日; 录用日期: 2025年12月24日; 发布日期: 2025年12月31日

摘要

湿度传感器作为环境监测、医疗设备和农业物联网等领域的关键元件, 其核心在于敏感材料的湿敏特性。聚乙烯醇(PVA)具有亲水性基团和溶胀性能让其具备成为湿度敏感材料的可行性, 然而纯PVA薄膜存在湿度响应性能不够灵敏、电阻响应范围有限等问题, 制约其实际应用。本研究通过在PVA中添加氯化锂(LiCl)制备复合薄膜, 并测试了其湿敏性能。通过对薄膜在不同温度下的吸湿情况, 接触角测试, SEM及FT-IR等测试手段对样品的湿敏性能进行分析。并探究了LiCl的添加对PVA复合薄膜微观结构、湿度响应特性的调控机制。该PVA复合薄膜的湿敏行为研究为开发一种在低湿度环境下具高灵敏度及良好稳定性的湿度传感器材料提供了参考。

关键词

聚乙烯醇, 湿度传感器, 氯化锂, 湿度敏感材料, 电阻

Study on the Preparation and Humidity Response Performance of Humidity-Sensitive Films Based on PVA

Bing Wang, Yahui Xu

School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: December 4, 2025; accepted: December 24, 2025; published: December 31, 2025

Abstract

As a key component of environmental monitoring, medical equipment and agricultural Internet of Things, the performance of humidity sensors fundamentally depends on the humidity response characteristics of sensitive materials. Polyvinyl alcohol (PVA), rich in hydroxyl groups, has excellent hydrophilicity and hygroscopicity, making it an ideal choice for moisture-sensitive materials. How-

ever, pure PVA films have problems such as insufficient humidity response sensitivity and limited resistance response range, which restrict their practical application. In this study, the functional modification of PVA was carried out by introducing lithium chloride (LiCl), and the performance of the samples was characterized by means of hygroscopicity test, surface water droplet contact angle test, scanning electron microscopy (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The mechanism by which LiCl doping regulates the microstructure and humidity response characteristics of PVA composite films was further explored. Through the study of the moisture absorption behavior of PVA films, theoretical basis and technical support are provided for the development of humidity sensor materials with high sensitivity and good stability in low-humidity environments.

Keywords

Polyvinyl Alcohol, Humidity Sensor, Lithium Chloride, Humidity-Sensitive Material, Resistance

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

湿度作为关键环境参数, 对电子制造、生物医药、农业种植等领域影响深远[1]。湿度敏感薄膜是湿度检测与控制的核心材料[2] [3], 其性能直接决定传感系统的可靠性与精度。聚乙烯醇(PVA)因分子链含大量羟基(-OH), 赋予其优异的亲水性和吸湿能力, 同时具备良好的柔韧性、成膜性与生物相容性, 因而被视为理想的湿度敏感材料[4], 基于 PVA 的湿度敏感薄膜可广泛应用于微型电子传感器[5] [6]、细胞培养环境监测、农业土壤湿度检测以及食品保鲜包装等多个重要场景, 展现出广阔的应用前景[7] [8]。

纯 PVA 薄膜在实际应用中仍面临一系列挑战, 包括湿度响应灵敏度不足、电阻响应范围有限以及在低湿环境下响应不明显等问题, 限制了其更广泛的应用。PVA 湿度敏感薄膜的发展经历了多个阶段: 早在 20 世纪中期, 研究人员便开始关注其物理化学性能及在湿度响应方面的潜力[9]; 20 到 20 世纪 70~80 年代, 采用溶液浇铸法制备的早期薄膜普遍存在响应速度慢、灵敏度低等缺点[10]; 进入 90 年代至 21 世纪初, 旋涂法、静电纺丝法等新型制备工艺逐渐成熟, 并结合粒子掺杂与化学改性等手段, 显著提升了薄膜的综合性能[11] [12]; 近年来, PVA 薄膜进一步与微机电系统(MEMS)和人工智能(AI)技术融合, 推动其向微型化、智能化方向发展[13] [14]。

在现阶段研究中, PVA 湿度敏感薄膜的制备工艺持续革新, 但也面临诸多挑战。例如, 静电纺丝法虽可有效提升薄膜灵敏度, 但设备复杂、成本较高; 涂布机成膜工艺虽具备规模化潜力, 却需精确控制多项参数。在性能方面, 薄膜的湿度响应特性受其微观结构、化学组成以及温度、气体环境等多种因素影响; 与此同时, PVA 基湿度敏感薄膜在综合性能、工艺稳定性与实际场景适配性等方面仍存在明显不足。基于上述背景, 本研究采用氯化锂(LiCl)与 PVA 混合制备薄膜, 系统探究 LiCl 添加量对薄膜微观结构及湿度响应行为的影响, 为开发适用于低湿环境的高灵敏度湿度传感器提供理论与实验依据。

2. 实验方法

2.1. 实验材料及仪器

本实验所用原料及仪器设备如表 1, 表 2 所示。

Table 1. Experimental materials**表 1. 实验原料**

试剂名称	规格	生产厂家
无水氯化锂(LiCl)	分析纯	西陇科学股份有限公司
聚乙烯醇(PVA)	分析纯	河南誉恒化工
导电铜箔胶带	0.06 mm	深圳德意胶带
蒸馏水		实验室自制

Table 2. Experimental apparatus**表 2. 实验仪器**

试剂名称	规格	生产厂家
磁力转子搅拌器	MS-H280-Pro	郑州南北仪器有限公司
电热鼓风干燥箱	DHG-9070A	上海精宏实验设备有限公司
分析天平	FA 1204N	精宏实验设备有限公司
湿度测量仪	GM1360	深圳市聚茂源科技有限公司
台式数字万用表	UT804	优利德科技股份有限公司
涂布器	SZQ	方舟仪器

2.2. PVA 复合薄膜的制备

实验中最关键的 PVA 复合薄膜制备过程如下：将盛有 92 g 去离子水的烧杯置于磁力搅拌器上，缓慢加热至 88℃。在持续搅拌下，将 8 g PVA 分次、均匀地加入热水中，持续搅拌 5~8 小时，直至 PVA 完全溶解，得到澄清、均一的 8% PVA 溶液。将 0.8 g LiCl 溶解于 1.6 g 去离子水中，制得 LiCl 溶液。取 17.6 g 上述 PVA 溶液，与 LiCl 溶液共同倒入烧杯，置于超声清洗机中震荡 10 分钟，确保 LiCl 完全溶解并均匀分散于 PVA 体系中，最终形成 PVA/LiCl 复合溶液。将复合溶液倾倒在放置于水平台的载玻片或 PET 基底铜膜电极上，采用湿膜厚度为 400 微米的涂面器进行涂布，待其自然流平。随后将其转移至 40℃ 烘箱内，干燥 2 小时。此过程需严格控制温度，以避免 PVA 分解或薄膜产生气泡、裂纹等缺陷。待薄膜完全干燥后，即得到湿度敏感复合薄膜。

2.3. 性能检测

(1) 表面亲疏水性表征

采用接触角测定仪，对尺寸为 2 cm × 2 cm 的洁净 PVA 薄膜样品进行表面水接触角测试。每个样品至少重复测量 3 次，结果取平均值，以此评估薄膜表面的亲水性。

(2) 吸湿性能评价

使用精度为 0.1 mg 的分析天平，对不同 LiCl 浓度的 PVA 复合薄膜样品进行定时称重，直至其质量不再变化(达到吸湿平衡)。通过计算平衡前后质量差与初始质量的比值，得到各薄膜的饱和吸湿率，以此评价其吸湿性能。

(3) 湿度响应性能测试

利用湿度测量仪与台式数字万用表，在 30℃ 的恒温环境中，测定 PVA 薄膜在不同相对湿度条件下的电阻值变化，系统分析其电阻 - 湿度响应特性与灵敏度。

(4) 微观形貌观察

将 PVA 薄膜裁剪成 5 mm × 5 mm 的样品，经离子溅射仪进行喷金处理后，使用扫描电子显微镜分

别观察其表面及横截面的微观结构与形貌特征。

(5) 化学结构分析

采用傅里叶变换红外光谱仪, 在波数范围 $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ 内对薄膜样品进行扫描, 分析 PVA 及其复合薄膜的化学官能团与分子结构变化。

3. 结果与讨论

3.1. 表面亲水性分析

PVA 薄膜的亲疏水性是影响其应用性能的重要因素之一, 通过对 PVA 薄膜在其 LiCl 含量分别为 0%、1%、2%、3%、4% (分别用 a, b, c, d, e 表示) 时的样品进行接触角测量。每个样品测量多次, 取平均值。测量数据如表 3 所示。

Table 3. Contact angles corresponding to PVA films containing different concentrations of LiCl
表 3. 含不同浓度 LiCl 的 PVA 薄膜对应接触角

LiCl 浓度/ (%)	0	1	2	3	4
接触角度/ (°)	76	56	72	76	35

根据表 3 所体现的数据, 可知含 4% LiCl 的 PVA 薄膜具有最好的亲水性, 其亲疏水变化曲线如图 1 中所示。

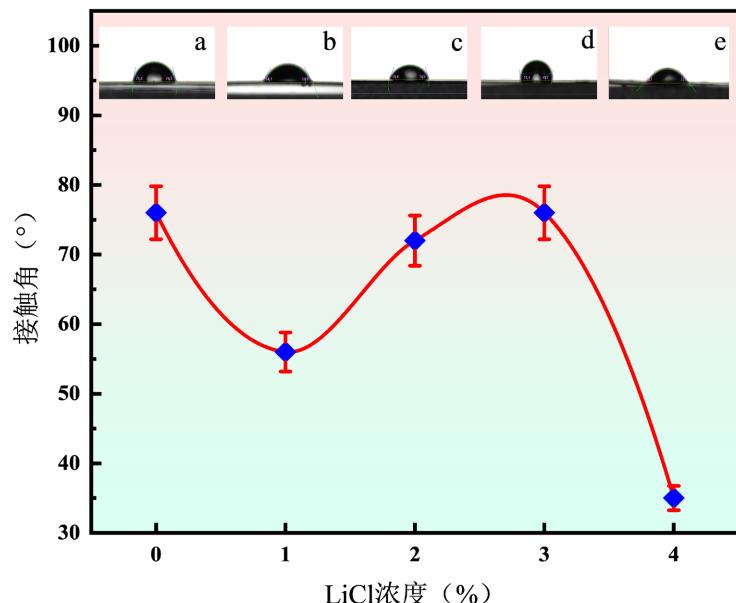


Figure 1. Contact angle curves corresponding to PVA films containing different concentrations of LiCl
图 1. 含不同浓度 LiCl 的 PVA 薄膜对应接触角变化曲线

由图 1 中可知, 未添加 LiCl 时, PVA 薄膜的接触角在 76 左右, 当加入少量的 LiCl 时, 由于 LiCl 的吸湿性使得薄膜的亲水性增加。但随着 LiCl 添加量的增加, 可能是由于盐效应的存在, 使得 PVA 膜表现出亲水性下降[15]。当添加量达到 4% 时, LiCl 的吸湿效应增强, PVA 溶胀度随盐浓度发生变化[16], 使得薄膜的亲水性极大地增加。由于超过 4% LiCl 的 PVA 薄膜成膜性下降很多, 所以不再添加更多的 LiCl 来增加亲水性。

3.2. PVA 复合膜吸湿性能分析

把相同的 PVA 薄膜在 100% 的相对湿度环境中做吸湿试验, 其测试结果如图 2 所示。

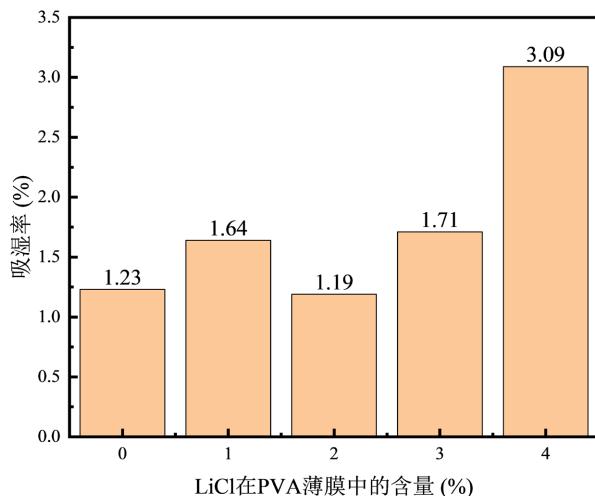


Figure 2. Relationship diagram between moisture absorption rate of PVA film and LiCl concentration
图 2. PVA 薄膜吸湿率与 LiCl 在 PVA 含量的关系图

在吸湿初始阶段, 薄膜表面的吸湿位点迅速与环境中的水分子快速结合, 表现出较高的初始吸湿速率。随着 LiCl 添加量的增加, 薄膜内部出现了盐效应。在 PVA 薄膜中添加 4% 的 LiCl 后, 其吸湿率是纯 PVA 薄膜的 2.51 倍。其吸湿性变化趋势与接触角的结果相一致, 两种方法的亲疏水性表现出良好的吻合性。考虑到盐添加量会影响薄膜的成膜性, 在后续的实验中以 4% LiCl 的 PVA 薄膜为主要研究对象。

3.3. 湿度响应性能分析

温度响应性能是 PVA 复合薄膜的重要指标, 以 4% LiCl 的 PVA 复合薄膜为测试对象与纯 PVA 薄膜在不同湿度环境下进行湿度响应性对比。其测试结果如图 3 中所示。

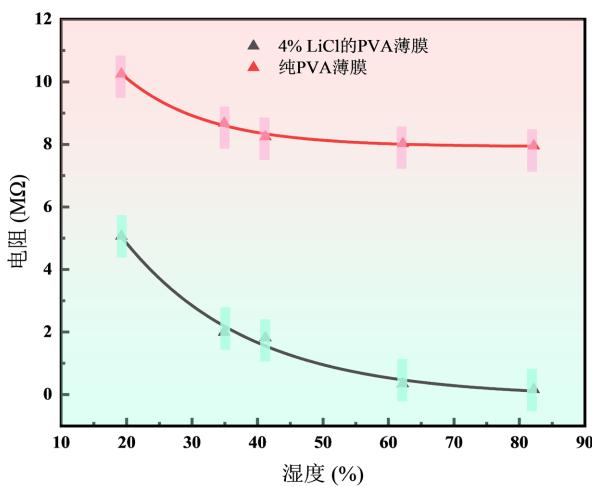


Figure 3. Moisture absorption response properties and fitting curves of pure PVA film and PVA film doped with 4% LiCl under different humidity conditions
图 3. 不同湿度下纯 PVA 薄膜及复合 4% LiCl 的 PVA 薄膜的吸湿响应性能

从图3中可以看出添加4% LiCl的PVA薄膜具有更好的吸湿性能。首先,从电阻随湿度的变化率来看,含4% LiCl的PVA薄膜湿度响应性能优于纯PVA薄膜,其电阻变化率最高达81%而纯PVA薄膜只有15%,其在低湿度下的灵敏度高于纯PVA薄膜。尤其是在20%~35%湿度条件下,每10度湿度变化为 $2.0\text{ M}\Omega$,相比于湿度变化为 $1.0\text{ M}\Omega$ 的纯PVA薄膜具有更高的湿度响应性。其根本原因是PVA作为亲水性高分子材料,具有大量的羟基(-OH)基团,这些基团能够与水分子通过氢键作用相结合,从而使得薄膜具有吸水性。当环境中湿度升高时, LiCl作为强吸湿性的盐,从环境中吸湿后在PVA薄膜中发生电离,产生 Li^+ 和 Cl^- 离子。这些离子在溶胀的PVA薄膜内部构建了离子导电通道,为电荷的传输提供了载体。随着环境湿度的持续升高,薄膜中水分子数量持续增多,从图2的吸湿率数据来看, LiCl的浓度变化不大,导致电阻变化率降低。从上述实验结果可知,该复合薄膜在中低湿度环境中响应性好。为优化薄膜性能、开发在低湿度环境下的高性能湿度传感器提供了重要的理论与数据支持。

3.4. PVA复合膜微观形貌分析

用扫描电子显微镜对PVA膜和改性PVA膜表面微观形貌进行观察,其形貌如图4所示。

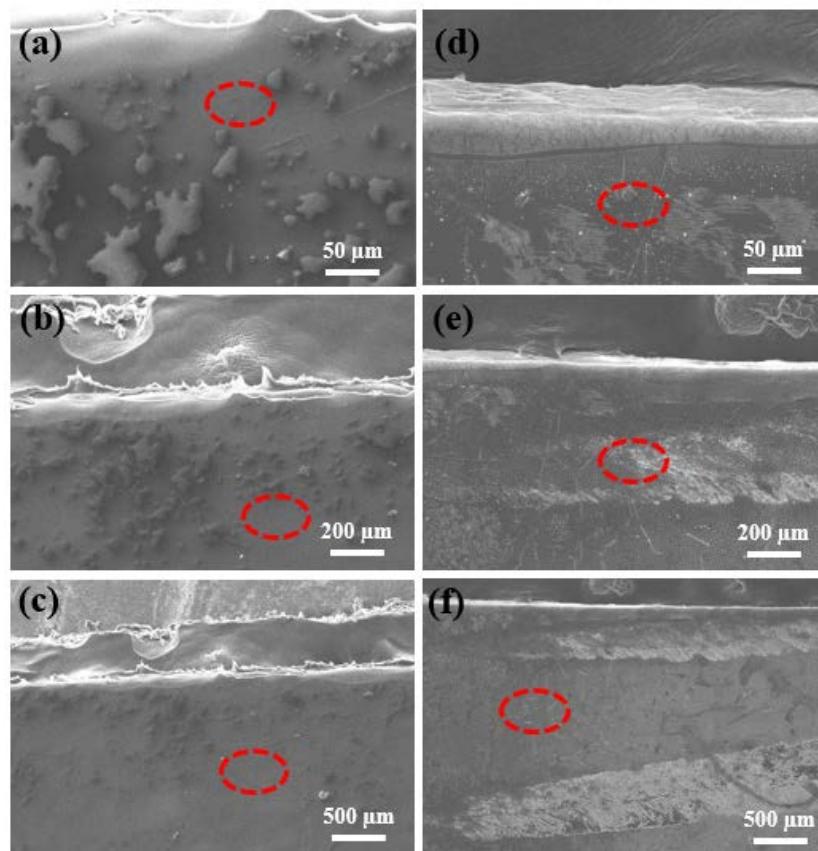


Figure 4. Comparative scanning electron microscopy images of PVA films ((a), (b), (c) represent pure PVA films, while (d), (e), (f) represent films with 4% LiCl added)

图4. PVA薄膜扫描电镜对比图((a), (b), (c)为纯PVA薄膜, (d), (e), (f)为添加4% LiCl的薄膜)

从表面形貌来看,纯PVA薄膜((a), (b), (c))呈现出较为平滑特征,表面无明显孔隙结构,形成了较为致密、均匀的薄膜。这种结构使得纯PVA薄膜在水分子吸附过程中,仅依赖聚合物链上羟基的物理吸附作用,限制了其湿度响应性能。相比之下,含4% LiCl的PVA薄膜((d), (e), (f))表面可观察到LiCl结晶颗

粒, 由于盐效应的存在, 其表面光滑度下降。同时, 这些结晶颗粒的引入提供了更多的吸湿位点, 吸附水分子后 PVA 发生溶胀, 有利于提升薄膜对湿度变化的响应速度与灵敏度。

3.5. 官能团分析(FT-IR)式

对添加 4% 含量 LiCl 的 PVA 薄膜和纯 PVA 薄膜的红外光谱进行对比分析, 得到的结果如图 5 所示。

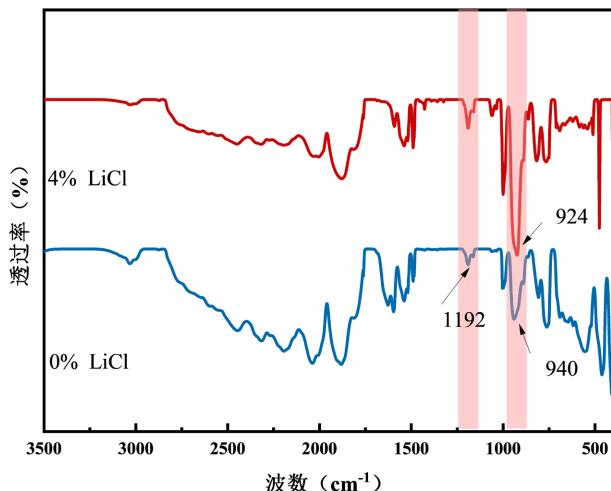


Figure 5. FT-IR results of PVA films with different LiCl contents
图 5. 添加不同含量 LiCl 的 PVA 薄膜的 FT-IR 结果

在 FT-IR 图谱对比中可以看出, 未添加 LiCl 的 PVA 薄膜在 940 cm^{-1} 处出现 C-H 键面外弯曲振动特征峰。但在添加 4% LiCl 后, 可能由于 Li^+ 的强极化能力使 PVA 链段中 C-H 键的电子云分布改变, 导致 C-H 面外弯曲振动频率向 924 cm^{-1} 处移动。从 FT-IR 图谱的基团变化来看, LiCl 的添加显著影响了 PVA 薄膜的结构特性, 进而改变其吸湿性。C-H 键振动频率从 940 cm^{-1} 移至 924 cm^{-1} , 说明 Li^+ 的强极化作用使 C-H 键电子云偏移, 削弱了 PVA 分子链间的非极性相互作用, 分子链间距增大, 暴露更多羟基用于与水分子形成氢键, 提升了薄膜吸湿性。另一方面, 在 1192 cm^{-1} 处, 添加 4% LiCl 的特征峰增强, 可能是由于 Li^+ 与羟基氧的配位作用使 C-O 键极性增加, 同时氢键网络破坏导致峰形更尖锐。 1192 cm^{-1} 处 C-O 键特征峰增强且峰形变尖锐, 源于 Li^+ 与羟基氧配位, 增强 C-O 键极性, 同时破坏分子间氢键网络, 增加自由羟基比例, 同样促进了对水分子的吸附。这种吸湿性变化表明吸湿性增加可使湿敏器件对湿度变化做出快速响应, 湿度响应线性范围增大。

4. 结果与讨论

本研究采用涂布技术成功制备了 LiCl 复合的 PVA 复合湿度敏感薄膜。结果表明, LiCl 的引入显著提升了 PVA 薄膜的湿敏性能。其中含 4% LiCl 的样品表现最优, 该薄膜的吸湿率是纯 PVA 薄膜 2.5 倍, 水接触角降低至 35° , 显示出更强的亲水性。在 20%~35% 的相对湿度范围内, 其电阻变化率达到每 10% 湿度变化 $2.0\text{ M}\Omega$, 远优于纯 PVA 薄膜的 $1.0\text{ M}\Omega$, 表明灵敏度显著增强。通过非线性拟合建立的湿度-电阻关系曲线具有良好的相关性, 进一步验证了其响应行为的可靠性。微观结构分析表明, LiCl 颗粒均匀分散于 PVA 基质中, 为水分子吸附提供了更多吸附活性位点。当环境湿度变化时, 水分子可与 LiCl 发生相互作用, 促使 Li^+ 离子脱离晶格并迁移, 从而显著增强薄膜的离子电导率, 为其优异的湿敏性能奠定了结构基础。

本研究通过构建“无机盐-高分子”复合体系,有效克服了纯有机材料在低湿环境下的吸湿与导电变化不明显的缺点,实现了离子-聚合物协同增强的湿敏响应机制。该研究不仅为半导体制造、极端环境监测等领域的精准湿度检测提供了新材料支撑,也为复合型湿敏材料提供了新参考。同时,此类传感器制备工艺简单、成本低,有望为工业自动化、环境监测与健康医疗等领域开发高灵敏度、低成本湿度传感器提供参考。

参考文献

- [1] 王晨雪. 基于 PVA 纳米纤维基氧化石墨烯湿度传感器性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2024.
- [2] Tessaro, L., Benoso, P., Siracusa, V., Lourenço, R.V., Dalla Rosa, M. and Sobral, P.J.D.A. (2025) The Conditioning Relative Humidity Influences the Gas Permeability of Active Films and Nanocomposites Based on Gelatin. *Polymer Engineering & Science*, **65**, 3595-3606. <https://doi.org/10.1002/pen.27235>
- [3] 张楠. 基于滤波器设计的微波气湿敏传感器增感研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [4] 楼恒屹, 万军民. PVA-AgNWs@PVA 水凝胶纤维制备及传感性能研究[J]. 浙江理工大学学报, 2024, 51(11): 735-742.
- [5] 杨涵, 谢康, 陈廷阔, 等. 基于 PVA 涂覆的 U 型超细光纤湿度传感器[J]. 光子学报, 2023, 52(12): 15-23.
- [6] 刘卓瑶, 常建华, 倪海彬, 等. 基于表面等离子体共振效应的单模光纤高灵敏度温湿度传感器[J]. 中国激光, 2023, 50(14): 185-193.
- [7] 杜静静, 蒋军, 徐信武, 等. 不同聚合度对聚乙烯醇成膜过程、膜结构和膜性能的影响[J]. 化工进展, 2025, 44(3): 1588-1598.
- [8] Shao, X., Xie, Y., Chen, A., Lan, L., Zhao, Q., Ma, L., et al. (2025) Sustainable Lignocellulosic Nanofibers-Based Films with Sensitive Humidity and Ph Response for UV-Blocking Food Preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, **309**, Article 143115. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143115>
- [9] 邵敏, 杨萌, 张文松, 等. 基于氧化石墨烯-聚乙烯醇薄膜的光纤光栅湿度传感器[J]. 光电子·激光, 2024, 35(7): 673-682.
- [10] 王博, 李有为, 王柯. 基于无芯片 RFID 的低成本湿度传感器设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(3): 1047-1052.
- [11] Özden, M., Çoban, Ö. and Karacali, T. (2025) Structural and Surface Characterization of PZT (52/48) Films Deposited by Spin Coating Method. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, **20**, 1679-1686. <https://doi.org/10.1002/tee.70046>
- [12] 夏雨人, 薛严冰, 冯冲, 等. 纸基 PVA 无芯片 RFID 湿度传感器[J]. 微波学报, 2022, 38(4): 82-87.
- [13] 杨涵. 基于 U 型微纳光纤的湿度传感器[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2024.
- [14] Yang, T., Zhong, H., Xu, C., Luo, D. and Mei, C. (2023) Fabrication and Mechanism Analysis of Wood Polymer Composites with Improved Hydrophobicity, Dimensional Stability and Mechanical Strength. *Cellulose*, **30**, 3099-3112. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05056-4>
- [15] Jiang, X., Li, H., Luo, Y., Zhao, Y. and Hou, L. (2016) Studies of the Plasticizing Effect of Different Hydrophilic Inorganic Salts on Starch/Poly (Vinyl Alcohol) Films. *International Journal of Biological Macromolecules*, **82**, 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.11.046>
- [16] Maksimkin, A., Zadorozhny, M., Filippova, K.V., Iudina, L.D., Telyshev, D.V. and Dayyoub, T. (2025) The Influence of Concentration and Type of Salts on the Behaviour of Linear Actuators Based on PVA Hydrogel Activated by AC Power. *Gels*, **11**, Article 484. <https://doi.org/10.3390/gels11070484>