基于双层微结构的纸基压阻传感器制备及 多功能应用

张转丽

兰州交通大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年4月18日; 录用日期: 2025年5月17日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

随着柔性电子器件的快速发展,对纸基压阻传感器的性能要求不断提高,柔性纸基压阻传感器在未来的 发展重点是高灵敏度、快速响应时间、宽测量范围和低功耗等方面。此外,为了满足不同的应用场景需 求,这些传感器还需要具备可弯曲、可拉伸和可穿戴等特性。然而随着对先进技术的不断追求,柔性传 感器也面临着一些挑战,这些设备必须兼顾高灵敏度、耐用性和快速响应时间,同时克服传统纸质基底 的局限性,在这种条件下,叉指电极的出现提高纸基压阻传感器传感性能的一种很有前途的解决方案。 本研究提出了一种结合单宁酸原位还原和微波诱导技术制备高性能纸基压阻传感器的新方法。以硝酸银 为晶种,直接在纸纤维上合成了不同尺寸的银纳米粒子。该传感器采用双层结构,以石墨叉指电极为导 电基底,显著提高了灵敏度和稳定性。传感性能测试表明:其压力响应范围为1.4~310 kPa,其中,在 1.4~26 kPa的范围内,灵敏度为6.193 kPa⁻¹,在27~165 kPa的范围内,灵敏度为0.215 kPa⁻¹,在 166~310 kPa的范围内,灵敏度为0.043 kPa⁻¹。它具有200 ms的快速响应时间和400 ms的恢复时间, 以及出色的耐用性,在20,000次循环中保持稳定的性能。这种耐用性归功于单宁酸的粘附性能,它可以 将导电材料牢固地原位还原在纸纤维上而不会脱落,从而增强了传感器的长期稳定性。这些特性的结合 使该传感器成为下一代柔性电子应用的有前途的候选者。

关键词

纸基压阻传感器,单宁酸,银纳米颗粒,纤维素,叉指电极

Preparation and Multifunctional Applications of Paper-Based Piezoresistive Sensors Based on Bilayer Microstructures

Zhuanli Zhang

School of Materials Science and Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 18th, 2025; accepted: May 17th, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

With the rapid advancement of flexible electronic devices, the performance requirements for paper-based piezoresistive sensors are becoming increasingly stringent. Future developments in flexible paper-based piezoresistive sensors will focus on achieving high sensitivity, fast response times, wide measurement ranges and low power consumption, etc. Additionally, to cater to diverse application scenarios, these sensors must incorporate characteristics such as bendability, stretchability and wearability. However, as the demand for advanced technologies grows, flexible sensors face several challenges. These devices must balance high sensitivity, durability and rapid response times while overcoming the limitations of traditional paper substrates. Under these conditions, the appearance of interdigital electrodes has emerged as a promising solution to enhance the sensing performance of paper-based piezoresistive sensors. The study proposes a novel approach to fabricate a high-performance paper-based piezoresistive sensor by combining tannic acid in-situ reduction and microwave-induced techniques. Silver nanoparticles of varying sizes are synthesized directly on paper fibers using silver nitrate as the seed crystal. The sensor is constructed using a doublelayer architecture with graphite interdigital electrodes as the conductive base, significantly improving sensitivity and stability. The sensing performance tests showed that the pressure response ranges were from 1.4 to 310 kPa, with a sensitivity of 6.193 kPa⁻¹ at 1.4 and 26 kPa, 0.215 kPa⁻¹ between 27 and 165 kPa, and 0.043 kPa⁻¹ from 166 to 310 kPa. It demonstrates a fast response time of 200 ms and a recovery time of 400 ms, alongside exceptional durability and maintaining stable performance over 20,000 cycles. This durability is attributed to the adhesive properties of tannic acid, which securely reduce the conductive materials in situ onto paper fibers without detachment, thereby enhancing the sensor's long-term stability. The combination of these features positions this sensor as a promising candidate for next-generation flexible electronic applications.

Keywords

Paper-Based Piezoresistive Sensor, Tannic Acid, Silver Nanoparticles, Cellulose, Interdigital Electrode

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC O Open Access

1. 引言

柔性压阻传感器作为人机交互、健康监测和物联网感知的核心元件,近年来在轻量化、可穿戴化及 可持续性需求驱动下,纸基复合材料因其天然柔韧性、可降解性和低成本优势备受关注[1]-[6]。通过将导 电材料(如碳纳米管[7]-[9]、金属纳米颗粒[10] [11])与纸纤维复合,纸基传感器可实现对压力信号的电阻 响应,在电子皮肤、智能包装和健康检测等领域展现出独特应用价值[12]。然而,传统纸基压阻材料面临 两难困境:一方面,简单物理混合的导电填料易因纸纤维表面光滑性导致界面结合弱化,引发纳米材料 脱落;另一方面,复杂化学修饰工艺虽可增强界面作用,却牺牲了纸基材的环保性与制造成本优势。如 何兼顾高灵敏度、强界面稳定性与绿色制造,成为纸基压阻传感器实用化的关键挑战。

多酚可以作为还原剂,在特定条件下将金属前驱体(例如金属盐溶液)还原为金属纳米颗粒。这个过程 可以在纤维表面进行,促进导电材料的原位生长,使得导电材料可以在纤维表面均匀分布。此外,多酚 还具有强粘附性,使还原生成的导电金属颗粒可以牢固地粘附在纤维表面,形成稳定的导电层。例如, Cao E 等人[13]开发了天然纤维衍生的空心管导向的聚多巴胺(Hollow-tubular-oriented polydopamine, HTO-PDA),并在天然木棉纤维衍生的 HTO-PDA 上原位还原银纳米颗粒,获得 Ag@HTO-PDA。同样,Wang Z 等人[14]通过使用茶多酚在石墨烯表面原位绿色还原银纳米颗粒,制备了 Ag-TPG 的催化剂,该催化剂 在 NaBH4 还原 4-硝基苯酚方面表现出增强的催化活性。另外,叉指电极的设计允许电极之间形成紧密的 交错结构,从而提供更大的电极面积和更均匀的电场分布。这种结构设计不仅提高了传感器的灵敏度,还能够实现更快速的压力响应[15]。叉指电极的基底材料的选择也异常重要,目前基底材料有聚二甲基硅 氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS),该材料具有高弹性、透明性和生物相容性,适用于微纳加工技术,是常用的柔性基底材料[16]-[18];聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene terephthalate, PET),该材料具有优良 的机械性能,耐化学腐蚀性和低成本,是柔性电子领域常用的基底材料[19]-[21];聚酰亚胺(Polyimide, PI) 具有高热稳定性,良好的机械性能和电器性能,适用于高温环境下的电子器件[22];但这些基底材料都比 较昂贵且不容易降解,对环境造成一定的污染。

基于上述分析,本文开发一种新型叉指电极/双层微结构纸基压阻传感器,以纤维素纤维(Cellulose,CF) 为原料,纳米银为导电介质,通过单宁酸(Tannic Acid,TA)原位生长和微波诱导技术,在纤维表面还原出 不同尺寸的银纳米颗粒,从而将 CF 转化为柔性导电纤维。本文所用的叉指电极是以纸张为基底,通过电脑 打印出叉指电极的图案,然后用 2B 铅笔将其空白的地方涂黑,制备石墨叉指电极。另外,制备叉指电极的 方法较以往通过丝网印刷的方式将导电物质涂覆在叉指电极上简单的多,并且所需的设备简单成本较低。

2. 实验部分

2.1. 材料

滤纸由杭州富阳北木纸浆有限公司提供,单宁酸购自上海阿拉丁生化科技有限公司,聚乙烯吡咯烷酮(PVP)购自沃凯(国药集团),硝酸银(AgNO₃)购自天津欧博凯化工有限公司,柠檬酸钠(C₆H₅Na₃O₇)和氨水(NH₃·H₂O)均构自烟台市双双化工公司,十二烷基硫酸钠(SDS)购自天津市百世化工有限公司,L-抗坏血酸(AA)购自上海麦克林化工有限公司,去离子水由实验室自制,无水乙醇购自利安隆博华有限公司,这些试剂不需要进一步纯化。所有的清洗过程和水溶液都使用去离子水。

2.2. 导电压敏材料的制备

将滤纸浸湿并分散成纸浆,将纸浆加入到单宁酸(TA,1g)和 Tris-HCl 溶液(200 mL)的混合溶液中,磁力搅拌反应 24 h,得到单宁酸包覆的纸纤维样品(TA@CF);同时配制 0.08 mol/L 的 AgNO₃溶液,逐步加入氨水,在此过程中,硝酸银溶液颜色从澄清变浑浊再变澄清,从而形成银氨络合物;将 1.5 g PVP 溶解在 100 mL 的去离子水中,并将 200 mL 的 TA@CF 溶液加入到银氨溶液和 PVP 溶液的混合溶液中,磁力搅拌反应 12 h,单宁酸在弱碱性环境下通过还原作用将银离子还原为银纳米颗粒(晶种)原位沉积到纸纤维上,得到 AgNPs (晶种)-TA@CF,放在烧杯中备用。

然后将 1.5 g PVP, 1.5 g SDS, 0.75 g 柠檬酸钠, 一起溶解在 250 mL 去离子水中并记为溶液 A,将溶液 A 和银氨溶液加入上述 AgNPs (晶种)-TA@CF 中,水浴加热 95℃反应 3 h,得到 AgNPs-TA@CF 样品。最后将反应后的样品离心然后置入玻璃培养皿中使其自然晾干,得到 AgNPs-TA@CF 纸基压敏材料。

另外称取一定量的 L-抗坏血酸(L-Ascorbic acid, AA)配成溶液,将 AgNPs (晶种)-TA@CF 浆体加入 L-抗环血酸(AA)和银氨溶液的混合溶液中,放入微波合成仪(900 W, 2.45 GHz)中,在功率为 500 W 的条件下反应 10 min,然后离心得到不同尺寸下银纳米颗粒的纸纤维,记为 DS-AgNPs-TA@CF。最后进行抽滤,得到 DS-AgNPs-TA@CF 纸基压敏材料。

2.3. 双层纸基压阻传感器的组装

1) 柔性纸基石墨叉指电极的设计:通过在电脑上设计出叉指电极的样式,这种电极的设计图案类似 于手指交错排列,其目的是为了最大化增加电极与压敏材料之间的接触面积,从而提高传感器的灵敏度 和响应性能。设计好的叉指图案如图 1(a)所示,然后将画好的叉指电极图案通过打印机打印出来,得到 一个纸质的叉指模版,图 1(b)所示。接下来,为了赋予叉指电极导电性能,使用 2B 铅笔将其空白处涂黑, 如图 1(c)所示,2B 铅笔笔芯主要成分是石墨,而石墨是一种具有优异导电性能的材料,通过将叉指电极 的空白部分涂黑,石墨颗粒会均匀地附着在纸张表面,从而形成导电路径。当压敏材料与石墨叉指电极 接触时,石墨的导电性将使得其形成导电通路。最后,我们使用剪刀将涂黑后的叉指电极图案裁剪下来。 裁剪后的石墨叉指电极具有良好的导电性和柔韧性,能够与纸基压敏材料紧密结合,为柔性纸基压阻传 感器的组装和性能实现提供了关键的电极结构。这种基于石墨的叉指电极设计不仅成本低廉、制作简便, 而且具有良好的导电性能,非常适合用于柔性纸基传感器的开发和应用。



Figure 1. Fabrication of graphite interdigital electrodes: (a) Computer version, (b) Printed version, (c) Final version 图 1. 石墨叉指电极的构筑: (a) 电脑版, (b) 打印版, (c) 最终版

2) 双层纸基压阻传感器的组装:首先将制备好的两种压敏材料即 AgNPs-TA@CF 和 DS-AgNPs-TA@CF 纸基压敏材料,分别剪成边长为 2×2 cm 的正方形。这两种材料都具有独特的导电性能,是构建纸基压阻传 感器的关键材料。其次,在组装传感器时,将叉指电极放置在底层,叉指电极是一种特殊的电极结构,其形 状类似于手指交错排列,这种结构能够有效增大电极与压敏材料的接触面积,从而提高传感器的灵敏度和响 应时间。然后,将 DS-AgNPs-TA@CF 纸放置在中间层,AgNPs-TA@CF 纸放置在顶层,这两种材料具有良 好的导电性和力学稳定性,为了方便将传感器与后续搭建的传感测试装置连接,我们使用导电将叉指电极的 两端引出。导电引线能够确保电信号能够稳定、高效地传输到测试设备中,从而实现对传感器性能的实时监 测和分析。最后,为了保护传感器结构的完整性并防止外界环境因素对其性能产生干扰,我们使用 PI 胶带 将整个传感器进行封装。PI 胶带具有良好的绝缘性能、耐高温性能和机械稳定性,能够为传感器提供可靠的 保护,确保其在各种测试条件下都能稳定工作。其实物图如图 2(a)和图 2(b)所示。



Figure 2. Physical photographs of the bilayer paper-based piezoresistive sensor: (a) Front view, (b) Side view 图 2. 双层纸基压阻传感器的实物照片: (a) 正面照片, (b) 侧面照片

2.4. 表征

采用场发射扫描电子显微镜(SEM, JSM-6701F, 日本)和能量色散 X 射线光谱仪(EDS)对其微观形貌 和 Ag 元素分布进行了研究。采用 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D8, 北京)对材料的晶体结构进行表征, 衍射角范围为 2*θ* = 5°~50°, 扫描速率为 5° min。采用全反射傅里叶变换红外光谱仪(FTIR, Nicolet iS20, 美国)对样品的化学成分进行表征。利用万用表(UT61E+,广东)测量其电阻。利用电化学工作站(CHI660E, 上海)对纸基压阻传感器的响应和恢复时间进行了评估。采用计算机化电子万能试验机(UTM2502, 深圳) 加压。所有涉及人体受试者的程序均按照兰州交通大学的相关法律和机构准则进行。所有受试者在参与 实验前均已获得其知情同意。

3. 结果与讨论

3.1. 导电压敏材料的微观形貌

本研究利用 SEM 对原始纸纤维和所制备的导电压敏材料进行微观形貌的表征,结果如图 3 所示。从 图中可以看出,与原始纤维(图 3(a1)和图 3(a2))相比,AgNPs-TA@CF(图 3(b1)和图 3(b2)和 DS-AgNPs-TA@CF(图 3(c1)~(c2)纸纤维表面布满了银纳米颗粒,并且 DS-AgNPs-TA@CF 的纤维表面的银纳米颗粒 尺寸要大,且均匀的分布在纤维表面,彼此之间相互连接,形成导电通路。这是因为在微波诱导的作用 下,利用单宁酸原位还原,将不同尺寸的银纳米颗粒原位还原在纸纤维表面。同时,从 EDS(图 3(d)~(f)) 中可以看出 DS-AgNPs-TA@CF 中 C、O和 Ag 元素的面分布图,从图中可以看出银元素含量较多,且均 匀的分布在纤维素表面。



Figure 3. Microscopic morphology of the conductive pressure-sensitive material: SEM images of CF (a1)~(a3), AgNPs-TA@CF (b1)~(b3) and DS-AgNPs-TA@CF (c1)~(c3), (d)~(f) EDS images of DS-AgNPs-TA@CF (**21**)~(a3), AgNPs-TA@CF (b1)~(b3)和DS-AgNPs-TA@CF (c1)~(c3)的 SEM 图, (d)~(f) DS-AgNPs-TA@CF 的 EDS 图

3.2. 导电压敏材料的结构表征

为了进一步证明银纳米颗粒沉积在纸纤维表面,本研究利用 XRD 对所制备的两种纸基压敏材料进

行晶体结构分析,结果如图 4(a)所示。从图中可以看出,在 2*θ*=14.8°,16.5°,22.6°处的衍射峰分别对应 原始纸纤维的(101)、(101)和(002)晶面。对于制备的两种纸基压敏材料而言,在 2*θ*=38°,44.2°出现了银 的(111)、(200)晶面[23]。而且 2*θ*=14.8°,16.5°的衍射峰几乎消失不见,在 2*θ*=22.6°处的衍射峰也大大 降低,说明通过单宁酸原位还原和微波诱导还原出来的银附着在纤维素的表面,这与图中 SEM 所观察到 的结果相一致。另外,根据 XRD 谱图显示出其峰型尖锐且没有其他杂质干扰峰,说明原位还原制备的压 敏材料表面的纳米颗粒结晶性能很好,并且纯度很高。

图 4(b)为 CF 和所制备的 TA@CF、AgNPs-TA@CF、DS-AgNPs-TA@CF 的红外图谱。从图中可以看出,与 CF 相比,TA@CF 在 3600~3000 cm⁻¹范围内出现了宽频峰带,这是由于单宁酸分子中羟基的伸缩振动引起的。在 1620~1590 cm⁻¹出现的吸收峰归属于芳香环中 C=C 伸缩振动峰。与 TA@CF 相比,AgNPs-TA@CF 和 DS-AgNPs-TA@CF 在 3600~3000 cm⁻¹和 1620~1590 cm⁻¹处的峰消失不见并且引入了新的峰,并出现了峰的强度变化,这表明银纳米颗粒的成功引入对材料的化学结构产生了影响。



Figure 4. XRD (a) and FTIR (b) of the conductive pressure-sensitive material 图 4. 导电压敏材料的 XRD (a)和 FITR (b)

3.3. 双层纸基压阻传感器的压敏机理分析

当压力施加到传感器上时,中间压敏层会发生形变和位移,这些纳米结构的位移导致纤维之间的接触面积和接触点发生变化,从而引起电阻的变化。具体来说,当压力 F 施加到传感器上时,纤维素纤维中的不同尺寸的 AgNPs 会影响导电路径的长度和数量,较小尺寸的 AgNPs 可以更密集得分布在纤维表面,从而形成更多的导电路径,压阻效应更显著;另外,AgNPs 的尺寸会影响其与石墨叉指电极的接触面积和接触电阻,较小的 AgNPs 与基体的接触面积较小,接触电阻较大;而较大的银纳米颗粒与基体的接触面积较大,接触电阻较小。在受到压力时,较大的 AgNPs 更容易发生接触电阻的变化,从而增强压阻效应。此外,TA 的粘附特性增强了导电物质与纤维素纤维之间的界面结合,从而提高了传感器在重复使用和机械应力下的稳定性。而构建的双层结构可以更好的形成稳定的导电网络,在收到压力时,双层结构中的导电颗粒之间的接触更加紧密,导电路径更加稳定;另外,双层结构可以分散应力,减少应力集中。在受到压力时,双层结构可以将应力分散到两个层中,减少单层结构中应力集中的现象,从而增强压阻效应。

3.4. 双层纸基压阻传感器的导电性能分析

在对双层纸基压阻传感器进行传感性能测试之前,本研究使用万用表对其电阻进行了测量,如图 5(a) 和图 5(b)所示,当传感器上没有施加任何压力时,用万用表测量发现没有电阻产生,说明压敏材料与石

墨叉指电极之间没有形成导电通路,而当稍微施加一点压力时,万用表测量的电阻为 83.48 kΩ,这一结 果说明在外加压力的作用下,压敏材料与石墨叉指电极之间形成了导电通路,两者之间接触良好,从而 使得万用表能够测量其具体的电阻值。另外,微小的压力下就可以形成导电通路,说明该传感具有很好 的敏感性能。



Figure 5. Electrical conductivity of the bilayer paper-based piezoresistive sensor: (a) Resistance without pressure, (b) Resistance with pressure 图 5. 双层纸基压阻传感器的导电性能: (a) 无压力时的电阻, (b) 有压力时的电阻

3.5. 双层纸基压阻传感器的传感性能分析

通过施加外部压力来评估传感器的传感性能,将传感器和搭建的传感装置串联起来形成导电通路,然后施加不同的压力得到传感性能。图 6 展示了双层纸基压阻传感器的传感性能。具体如下:图 6(a)为 I~V 曲线,将电压从 0 V 增加到 1.9 V 时,在不同的压力(5、15、50、85 和 300 kPa)条件下的电流与电压的关系,这些曲线表明了传感器的欧姆特性。图 6(b)为传感器在不同压力下的相对电阻的变化,即灵敏度曲线。图中给出了三个不同压力范围内的灵敏度,分别为在 1.4~26 kPa 的范围内为 6.193 kPa⁻¹,在 27~165 kPa 的范围内为 0.215 kPa⁻¹,在 166~310 kPa 的范围内为 0.043 kPa⁻¹。图 6(c)为传感器的响应时间和恢复时间曲线,图中展示了传感器在 50 g 砝码的重量下对压力的响应和恢复时间,从图中可以看出该传感器的响应时间为 200 ms,恢复时间为 400 ms。以上测试表明双层纸基传感器具有良好的传感性能。这是因为在石墨叉指电极按触时,有更多的大面积接触点,因而反应更加灵敏。





图 6. 双层纸基压阻传感器的传感性能: (a) I~V 曲线, (b) 灵敏度曲线, (c) 响应时间和回复时间曲线

3.6. 双层纸基压阻传感器的稳定性能研究

除了灵敏度和响应时间这几个参数以外,传感器的稳定性和耐久性也是衡量传感性能的一个重要的 因素。我们用线性马达往复反推机测试了传感器的循环稳定性,如图 7(a)~(c)所示。图 7(a)显示了传感器 在超过 20,000 个周期内的电阻变化情况,可以看出,电阻变化率非常小,这表明传感器具有极高的稳定 性。这种稳定性主要归功于 AgNPs 在 CF 上的均匀分布,这种分布形成了连续的导电通路,减少了界面 电阻,从而提高了传感器的整体稳定性。图 7(b)和图 7(c)展示了传感器在不同时间段内的循环曲线,图(b) 显示了大约 13,000 次的循环响应,图(c)则展示了大约 18,400 次的循环响应。这些曲线显示了传感器在不 同时间段内都能保持稳定的电阻变化,进一步证明了传感器的稳定性和可靠性。图 7(d)显示了不同砝码 下的响应曲线,可以看到,随着时间的推移,传感器的电阻变化(ΔR/R₀)迅速达到稳定状态,这表明传感 器能够快速响应不同的压力变化。图 7(e)展示了不同循环次数下的电阻变化,可以看到,即使在 1000 次 循环后,电阻值仍然保持稳定,这进一步证实了传感器的长期稳定性和耐用性。



Figure 7. Stability of the bilayer paper-based piezoresistive sensor: (a)~(c) Cyclic curves and partial enlarged views, (d) Response curves under different weights, (e) Changes in resistance under different cycling times 图 7. 双层纸基压阻传感器的稳定性: (a)~(c) 循环曲线及部分放大图, (d) 不同砝码的响应曲线, (e) 不同循环次数下的电阻的变化

3.7. 双层纸基压阻传感器的多功能应用

通过 PI 胶带将纸基传感器贴在人体的各个部位并监测与人体运动相关的传感信号,展示了双层纸基 压阻传感器在人体可穿戴领域的应用,结果如图 8 所示。首先,对传感器进行了食指按压的检测实验, 结果如图 8(a)所示,随着食指轻轻接触传感器时,相当于给传感器施加了一个微小的压力,在这个过程 中,传感器内部的导电结构发生了微小的形变,从而导致电阻发生变化;而当撤销压力时,传感器内部 结构恢复原来的样子,电阻也随之恢复到初始值。接下来,本研究进一步测试了传感器在实际行走场景 中的应用效果,结果如图 8(b)所示。将纸基压阻传感器安装在地板上时,模拟在步行时对纸基压阻传感 器的踩踏过程,这种信号的产生和变化与行人的步行节奏高度一致,从而证明了传感器可以有效识别步 行动。由此说明,双层纸基压阻传感器具有优异的性能,可以用于人体运动的实时监测。



Figure 8. Wearable applications of the bilayer paper-based piezoresistive sensor: (a) Thumb press, (b) Foot press 图 8. 双层纸基压阻传感器的可穿戴应用: (a) 食指按压, (b) 脚按压

图 9 展示了双层纸基压阻传感器的传感阵列,图 9(a)显示了传感阵列的实物图,我们设计一个 3 × 3 的阵列,相当于多个压阻传感器单元,这些单元被排列成一个矩形形式,以便于多点压力检测,每个传感器单元底部为石墨叉指电极,中间夹有双层导电压敏材料,能够对施加的压力产生响应。我们在构筑的传感阵列上在不同的位置放置不同的砝码(10g、20g、50g和 100g),图 9(b)以三维柱状图的形式展示了相对电阻的变化,结果显示,随着砝码质量的增加,柱形图的高度也越来越高,根据柱形图可以分辨每个位置的质量的高低。



Figure 9. Sensing array of the bilayer paper-based piezoresistive sensor: (a) Photograph drawings of the sensor array, (b) Variation of relative resistance under different weights **图 9.** 双层纸基压阻传感器的传感阵列: (a) 传感阵列的实物图, (b) 不同重量下的相对电阻的变化

压阻传感器还可以通过分析电阻的变化来识别压力的分布情况。图 10 展示了纸基双层压阻传感器的 压力分布图。为了测试传感器对不同类型物体的压力分布检测能力,本研究在所构筑的 3×3 的传感阵列 上,分别在不同的位置上放置砝码(图 10(a))、玻璃棒(图 10(b))和橡皮擦(图 10(c)),图中使用热图的形式 来直观地展示电阻的大小,其中颜色深浅与电阻的变化的幅度直接相关,颜色越深,表明电阻变化越大, 从而反映出施加在此位置上的压力越大。通过这种可视化的方式,可以清晰地看到不同物体在传感器阵 列上所产生的压力分布情况。



Figure 10. Pressure distribution map of the bilayer paper-based piezoresistive sensor: (a) Weight, (b) Glass rod, (c) Eraser 图 10. 纸基双层压阻传感器的压力分布图: (a) 砝码, (b) 玻璃棒, (c) 橡皮擦

4. 结论

本研究以植物纤维为原料,利用单宁酸的原位还原和微波诱导技术制备了不同尺寸下的银纳米颗粒 纤维素基复合材料,这些纤维可以转换为导电纸,作为传感器的导电压敏材料,并利用石墨叉指电极组 装成具有三明治结构的双层纸基压阻传感器,具体结论如下:

1) 双层纸基压阻传感器的关键传感性能如下: 在 1.4~26 kPa 的范围内的灵敏度为 6.193 kPa⁻¹, 在 27~165 kPa 的范围内的灵敏度为 0.215 kPa⁻¹, 在 166~310 kPa 的范围内的灵敏度为 0.043 kPa⁻¹。传感器 在 50 g 砝码的重量下, 它的响应时间为 200 ms, 恢复时间为 400 ms。

2) 制备的传感器有良好的线性关系,并且大约超过 20,000 多次的循环稳定性。可用于传感阵列并且 可检测压力的分布。

参考文献

- [1] Chen, Y., Wang, S., Liu, Y., Deng, H., Gao, H., Cao, M., et al. (2024) Ultra-Low Cost and High-Performance Paper-Based Flexible Pressure Sensor for Artificial Intelligent E-Skin. Chemical Engineering Journal, 499, Article ID: 156293. <u>https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156293</u>
- [2] Wang, Q., Li, Y., Xu, Q., Yu, H., Zhang, D., Zhou, Q., et al. (2023) Finger-Coding Intelligent Human-Machine Interaction System Based on All-Fabric Ionic Capacitive Pressure Sensors. Nano Energy, 116, Article ID: 108783. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108783
- [3] Huang, C., Xiao, M., Li, Z., Fu, Z. and Shi, R. (2024) Bioinspired Breathable Biodegradable Bioelastomer-Based Flexible Wearable Electronics for High-Sensitivity Human-Interactive Sensing. *Chemical Engineering Journal*, 486, Article ID: 150013. <u>https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150013</u>
- [4] Shi, Z., Meng, L., Shi, X., *et al.* (2022) Morphological Engineering of Sensing Materials for Flexible Pressure Sensors and Artificial Intelligence Applications. *Nano-Micro Letters*, **14**, 141.
- [5] Luo, J., Gao, W. and Wang, Z.L. (2021) The Triboelectric Nanogenerator as an Innovative Technology toward Intelligent

Sports. Advanced Materials, 33, Article ID: 2004178. https://doi.org/10.1002/adma.202004178

- [6] Xiong, X., Liang, J. and Wu, W. (2023) Principle and Recent Progress of Triboelectric Pressure Sensors for Wearable Applications. *Nano Energy*, **113**, Article ID: 108542. <u>https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108542</u>
- [7] Guo, Y., Zeng, S., Liu, Q., Sun, J., Zhu, M., Li, L., et al. (2024) Review of the Pressure Sensor Based on Graphene and Its Derivatives. *Microelectronic Engineering*, 288, Article ID: 112167. <u>https://doi.org/10.1016/j.mee.2024.112167</u>
- [8] Matsukawa, R., Kobayashi, D., Mitsui, H. and Ikuno, T. (2020) Environment-Friendly Paper-Based Flexible Pressure Sensors with Carbon Nanotubes and Liquid Metal. *Applied Physics Express*, 13, Article ID: 027001. https://doi.org/10.7567/1882-0786/ab658b
- [9] Jiang, C., Lv, R., Zou, Y. and Peng, H. (2024) Flexible Pressure Sensor with Wide Pressure Range Based on 3D Microporous PDMS/MWCNTs for Human Motion Detection. *Microelectronic Engineering*, 283, Article ID: 112105. https://doi.org/10.1016/j.mee.2023.112105
- [10] Xu, X., Wang, R., Nie, P., Cheng, Y., Lu, X., Shi, L., et al. (2017) Copper Nanowire-Based Aerogel with Tunable Pore Structure and Its Application as Flexible Pressure Sensor. ACS Applied Materials & Interfaces, 9, 14273-14280. <u>https://doi.org/10.1021/acsami.7b02087</u>
- [11] Kim, C., Ahn, H. and Ji, T. (2020) Flexible Pressure Sensors Based on Silicon Nanowire Array Built by Metal-Assisted Chemical Etching. *IEEE Electron Device Letters*, 41, 1233-1236. <u>https://doi.org/10.1109/led.2020.3001977</u>
- [12] Gao, L., Yu, J., Li, Y., Wang, P., Shu, J., Deng, X., et al. (2020) An Ultrahigh Sensitive Paper-Based Pressure Sensor with Intelligent Thermotherapy for Skin-Integrated Electronics. *Nanomaterials*, 10, Article 2536. <u>https://doi.org/10.3390/nano10122536</u>
- [13] Cao, E., Duan, W., Wang, F., Wang, A. and Zheng, Y. (2017) Natural Cellulose Fiber Derived Hollow-Tubular-Oriented Polydopamine: *In-Situ* Formation of Ag Nanoparticles for Reduction of 4-Nitrophenol. *Carbohydrate Polymers*, 158, 44-50. <u>https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.12.004</u>
- [14] Wang, Z., Xu, C., Li, X. and Liu, Z. (2015) In Situ Green Synthesis of Ag Nanoparticles on Tea Polyphenols-Modified Graphene and Their Catalytic Reduction Activity of 4-Nitrophenol. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 485, 102-110. <u>https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.09.015</u>
- [15] Cai, Z., He, X., Wang, K., Hou, X., Mei, Y., Ying, L., et al. (2023) Enhancing Performance of GaN/Ga₂O₃ P-N Junction Uvc Photodetectors via Interdigitated Structure. Small Methods, 8, Article ID: 2301148. https://doi.org/10.1002/smtd.202301148
- [16] He, J., Zhou, Y., Zhang, Y., Hu, K., Han, L., Qi, Y., et al. (2025) Research on the Performance of Flexible Piezoresistive Sensors Based on Ag@MXene-PVA Composite Hydrogel. In: Song, H., Xu, M., Yang, L. and Zhang, L., Eds., Advances in Printing, Packaging and Communication Technologies, Springer, 452-459. https://doi.org/10.1007/978-981-96-4467-4_52
- [17] Li, Z., Xie, X., Xiao, J., Zeng, Y. and Huang, Y. (2025) Development of Highly Sensitive and Stable Patterned PDMS Flexible Strain Sensors for Motion Monitoring via Laser Direct Writing. *Optics & Laser Technology*, 182, Article ID: 112212. <u>https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.112212</u>
- [18] Chen, G., Zhang, X., Sun, Z., Luo, X., Fang, G., Wu, H., et al. (2025) Sandwich-Structured Flexible Strain Sensors for Gesture Recognition in Human-Computer Interaction. *The European Physical Journal Special Topics*. <u>https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-025-01560-9</u>
- [19] Zhao, W., Natsuki, J., Dinh Trung, V., Li, H., Tan, J., Yang, W., et al. (2024) AgNPs/CNTs Modified Nonwoven Fabric for PET-Based Flexible Interdigitated Electrodes in Pressure Sensor Applications. *Chemical Engineering Journal*, 499, Article ID: 156252. <u>https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156252</u>
- [20] Muhammad, W. and Kim, S. (2023) Flexible Bending Sensors Fabricated with Interdigitated Electrode Structures Cross-Linked by Transition Metal Doped ZnO Nanorods. *Chemosensors*, 11, Article 529. <u>https://doi.org/10.3390/chemosensors11100529</u>
- [21] Lee, S., Nam, K., Muhammad, W., Shin, D., Seo, S. and Kim, S. (2022) Influence of N₂O Plasma Treatment on Pet-Based Flexible Bending Sensors with ZnO Nanorod Array Cross-Linked with Interdigitated Electrode Structures. *Ceramics International*, 48, 25696-25704. <u>https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.177</u>
- [22] Ali Khan, M.U., Raad, R., Tubbal, F., Theoharis, P.I., Liu, S. and Foroughi, J. (2021) Bending Analysis of Polymer-Based Flexible Antennas for Wearable, General IoT Applications: A Review. *Polymers*, 13, Article 357. https://doi.org/10.3390/polym13030357
- [23] 郭闯. 基于纳米银/炭黑的导电硅胶的设计及其在柔性传感器中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大 学材料系, 2024.