

# 木基感能电子器件及融合微系统研究综述

曾 绪, 黄睿来, 涂 程, 张 翼, 张晓升\*

(电子科技大学集成电路科学与工程学院, 四川成都 611731)

**摘 要:** 木材作为地球上最丰富的可再生资源之一, 具有天然多孔结构、优异的力学性能及生物相容性, 赋予其在绿色电子学中巨大的应用潜力。不同于传统的高分子或无机基底, 木材独特的纤维取向及孔洞微纳结构, 使其在电荷传输、离子迁移以及界面调控等方面展现出独特的优势, 为构筑可再生、可降解的木基电子器件奠定了良好基础。近年来, 随着智能感知技术、自供能系统及柔性电子的迅速发展, 研究者们开始通过结构与材料功能化手段, 赋予木材导电性、柔性、透光性等新特性, 使其在绿色电子领域焕发新生。本文首先概述了木基材料的物理结构和化学组成特征, 并从木基材料电子功能化的角度归纳了常见的改性与处理方法, 包括去木质素、化学掺杂、碳化处理及仿生结构设计等。在此基础上, 多类型的高性能木基电子器件被研究人员构建出来, 其中能量采集器件如蒸发电器件、摩擦电器件能够有效采集转化环境能量; 多功能传感器则实现了压力、湿度、气体等信号的灵敏感知; 储能器件如超级电容器则展现出优异的能量存储与供电能力。进一步地, 本文探讨了木基电子微系统的集成化构建方式, 即通过能量管理模块、传感单元与无线通信模块的有机融合, 实现“传感功能+微纳供能”一体化的集成微系统。这类系统不仅展现了良好的信号响应能力和稳定性, 也契合绿色可持续发展的需求。最后, 本文展望了木基感能电子器件及集成微系统未来发展所面临的机遇与挑战。

**关键词:** 木基电子; 木基传感器; 纳米发电机; 木基蒸发电器件; 木基超级电容器; 木基微系统

**基金项目:** 国家重点研发计划(No. 2022YFB3206100); 国家自然科学基金(No. 62074029, No. 61905035, No. 61971108, No. 62004029, No. 51905554); 中央引导地方发展科技项目(No. 2024ZYD0166)

**中图分类号:** TN605 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2025)09-3433-21

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20250623

## Review of Wood-Based Sensing and Energy Electronic Devices and Integrated Microsystems

ZENG Xu, HUANG Rui-lai, TU Cheng, ZHANG Yi, ZHANG Xiao-sheng\*

(School of Integrated Circuit Science and Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

**Abstract:** Wood, as one of the most abundant renewable resources on Earth, possesses a naturally porous structure, excellent mechanical properties, and biocompatibility, endowing it with significant potential in the field of green electronics. Unlike conventional polymeric or inorganic substrates, wood has unique fiber orientation and porous micro/nanostructures. These features provide advantages in charge transport, ion migration, and interfacial regulation, which offer a sustainable and biodegradable basis for wood-based electronic devices. In recent years, intelligent sensing technologies, self-powered systems, and flexible electronics have developed rapidly. Researchers have modified wood through structural design and material functionalization. As a result, wood has been endowed with new properties such as conductivity, flexibility, and optical transparency. This has revived its potential in green electronics. This review summarizes the physical structure and chemical composition of wood. It also introduces common modification and functionalization methods. These include delignification, chemical doping, carbonization, and bioinspired structural design. Such strategies enable wood to acquire diverse functional properties. Based on these advances, researchers have built various high-performance wood-based devices. Energy-harvesting devices, such as evaporation-driven and triboelectric generators, can capture energy from the environment. Multifunctional sensors can detect pressure, humidity, and gas with high sensitivity. Energy-storage devices, such as

supercapacitors, show excellent energy storage and release performance. We further discuss the integration of wood-based electronic microsystems. Energy management modules, sensing units, and wireless communication modules are combined to achieve “sensing function-micro/nano power supply” integration. These systems provide stable operation and reliable signal response. They also match the goals of green and sustainable development. Finally, we discuss future opportunities and challenges facing the development of wood-based electronic technologies.

**Key words:** wood electronics; wood-based sensor; nanogenerator; wood-based evaporation-induced electricity generator; wood-based supercapacitor; wood-based microsystems

**Foundation Item(s):** National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB3206100); National Natural Science Foundation of China (No.62074029, No.61905035, No.61971108, No.62004029, No.51905554); Central Guidance for Local Science and Technology Development Fund Projects (No.2024ZYD0166)

## 1 引言

随着物联网的快速发展,智能电子设备已渗透到环境监测、医疗健康、智能家居等社会生活的方方面面<sup>[1-5]</sup>。然而,这一快速发展也伴随着日益严峻的资源消耗与环境污染问题,尤其是传统电子器件在制造、使用及报废过程中所产生的大量不可降解电子废弃物,对生态系统构成了极大威胁。据联合国环境规划署统计,全球每年产生的电子废弃物已超过5 000万吨,其中仅有20%得到有效回收。这种“技术扩张-环境代价”的悖论促使学术界寻求以可再生材料为核心的绿色电子技术。

在这一背景下,木基电子器件和微系统的兴起为解决当前技术面临的挑战提供了新的思路<sup>[6-8]</sup>。木材作为地球上最丰富的生物质资源,其独特的物理化学特性使其成为理想的电子基材。从物理结构上看,木材具有天然的三维多级孔道网络,这不仅为离子传输提供了高效通道,还可通过毛细作用实现自驱动流体运输,为能量采集系统设计奠定基础。从化学组分而言,纤维素、半纤维素和木质素的协同作用赋予木材优异的力学性能和可调控的化学特性。除此之外,木材具备完全生物降解性和生物相容性,这使其在穿戴式电子器件开发中展现出不可替代的优势。近年来,通过填充功能材料<sup>[9-13]</sup>、激光诱导石墨化<sup>[14-18]</sup>、木质素衍生碳化<sup>[19-23]</sup>等技术创新,研究者成功将木材转化为功能性电子材料,为多功能电子器件的设计提供了材料基础。

目前,木基电子材料已经在多个电子领域展现出显著的研究价值与应用潜力。例如,在多功能传感方面,通过对木材进行纳米结构调控和电活性材料的引入,可实现对压力、湿度、应变等多种信息的实时感知<sup>[24-29]</sup>;在能量采集方面,基于木材的力学灵活性和表面结构设计,可构建基于摩擦电<sup>[30-33]</sup>、压电<sup>[34,35]</sup>或蒸发电效应<sup>[36-39]</sup>的木基发电器件,为低功耗电子系统提供绿色能源;在能源储存方面,木材的微通道结构为离子传输和电极构建提供了天然模板,已广泛应用于木基超级电容器与电池电极材料的开发<sup>[40-43]</sup>。随着集成化、

微型化电子技术的发展,木基电子微系统也开始受到重视。通过对木材或木基衍生材料进行处理与功能集成,研究人员已初步实现包括发电、感知、信号处理与通信等模块的协同运行,为构建绿色、柔性、可降解的集成电子系统奠定了基础<sup>[44-46]</sup>。这类微系统有望在未来的自供能可穿戴健康监测设备、环境智能监测节点等应用中发挥重要作用。除此之外,木基电子器件在可持续电子学领域也取得了显著进展,尤其在生物可降解性和环境适应性等关键方向展现出广阔前景。在过去5年中,研究者通过化学改性<sup>[47,48]</sup>、天然高分子复合<sup>[49]</sup>等策略,显著提升了木材材料的可控降解性能。Jia等人<sup>[47]</sup>采用透析分级和环氧化修饰手段,有效提高了木质素的结构均一性和表面活性,并与纳米纤维素协同构建出高性能绿色复合基底,成功应用于可降解射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)天线等柔性电子器件的制备。Sriya等人<sup>[49]</sup>则通过将木材与可降解聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)复合,实现了器件的可控3D打印制造及其良好的真菌降解性能。在环境适应性方面,研究重点聚焦于器件在多种温湿度、机械弯曲以及强紫外辐照等复杂条件下的稳定运行能力。通过构建超柔性木质薄膜、引入蜂窝结构及仿生设计,使得木基电子器件能够在复杂曲面上实现长期稳定工作,展现出优异的机械-电性能保持能力<sup>[27,50,51]</sup>。此外,结合表面疏水改性与环境响应型功能涂层等手段,有效提升了器件对雨水、汗液与灰尘等外部环境因素的抵抗能力<sup>[52-54]</sup>。进一步地,借助紫外稳定性化学改性策略,研究者显著增强了木基材料的抗紫外老化能力,推动其在绿色电子、生物医学监测和可降解物联网设备等领域的应用部署,为实现电子器件的环保替代提供了坚实基础<sup>[55]</sup>。

本文系统叙述木基电子学领域的最新研究进展,木基电子器件及微系统概述如图1所示<sup>[56-59]</sup>。首先从木材的结构-化学成分-改性角度出发,重点讨论木材层级孔洞结构、化学组成成分以及修饰改性对功能特性的调控机制。随后从传感感知、能量采集、电容储能三大功能维度出发,详细总结各类木基电子器件的工作

机理、制备方法与性能表现. 进而探讨基于木材的“功能-供能”一体化微系统的集成策略, 包括信号处理单元

与功能模块的协同设计. 最后总结了木基电子器件及微系统的技术难点并展望其发展方向.

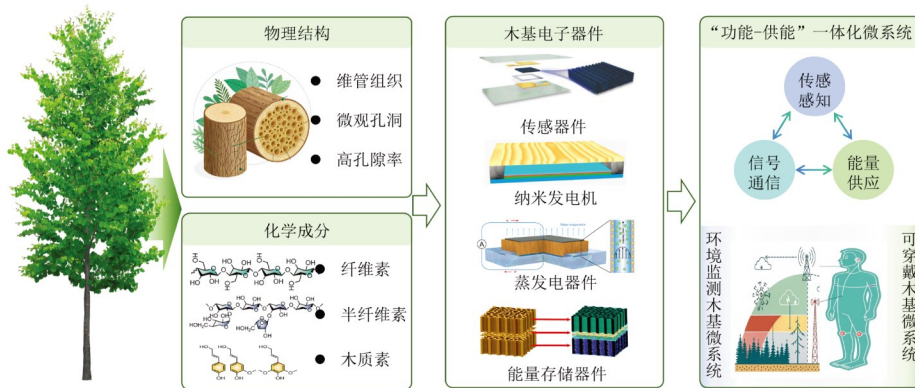


图1 木基电子器件及微系统概述<sup>[56-59]</sup>

## 2 木基材料特性

木材作为一种天然可再生材料, 具有独特的物理结构和化学组成, 在电子器件开发中表现出广阔的应用前景. 本节将从木基材料的物理结构特性、化学成分特性以及处理与改性技术3个方面出发, 系统阐述其在木基电子器件中的关键材料优势与应用潜力.

### 2.1 物理结构特性

木材是一种生物聚合物复合材料, 具有天然的多尺度层级结构, 从宏观尺度到微观尺度依次包括年轮层次、多孔结构及细胞壁的分层排列结构, 其结构如图2所示<sup>[60,61]</sup>. 这些结构特性不仅赋予木材良好的机械强度与稳定性, 也使其在电子器件领域展现出独特的可设计性和功能拓展性. 在宏观尺度上, 木材由平行排列的导管

(硬木直径 50~200  $\mu\text{m}$ )或管胞(软木直径 10~50  $\mu\text{m}$ )构成, 形成纵向贯通的多孔网络结构, 孔隙率可达 60%~80%. 这种三维贯通的多孔特性不仅赋予木材低密度 (0.1~1.2  $\text{g}/\text{cm}^3$ )和高比表面积(天然木材约 300  $\text{m}^2/\text{g}$ ), 还为离子传导、气体扩散及功能材料的渗透和固定提供了理想载体<sup>[62,63]</sup>. 这一特性使木材在作为能量存储器件的电极基体或作为改性功能材料方面展现出显著优势. 在细胞壁尺度上, 木材细胞壁由多层天然高分子组成, 结构致密, 赋予其优异的纵向抗拉强度(可达 80~200 MPa), 显著高于多数柔性聚合物. 这一特性使木基材料在柔性电子器件中, 不仅能承受复杂应变, 还具备长期结构稳定性和形变保持性, 特别适合作为动态应用场景下的柔性器件载体. 相比易发生断裂或塑性形变的聚合物基底, 木材结构更适用于重复弯折、压缩、拉伸等复杂环境.

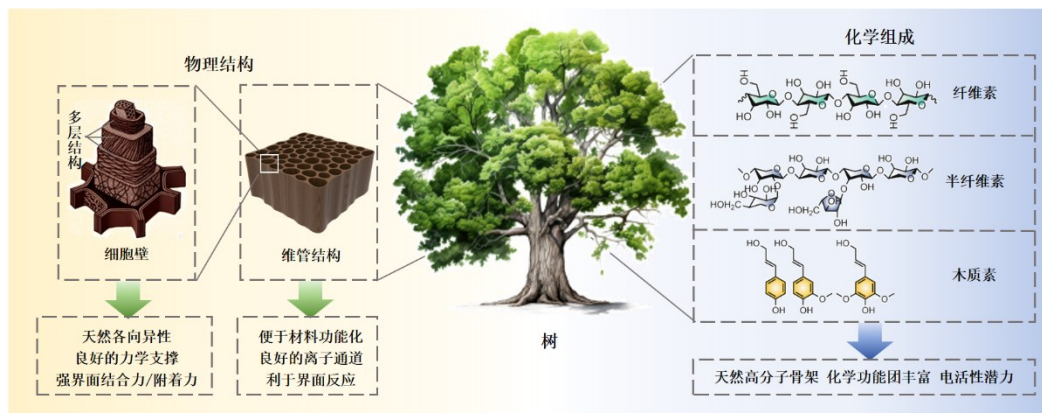


图2 木材的层级结构<sup>[60]</sup>及化学成分组成<sup>[61]</sup>

### 2.2 化学成分特性

木材主要由3种天然高分子组分构成: 纤维素 (33%~42%)<sup>[64,65]</sup>、半纤维素 (22%~40%)<sup>[66,67]</sup>和木质素 (27%~32%)<sup>[68,69]</sup>, 此外还含有一定比例的提取物和无

机盐<sup>[61]</sup>. 不同组分间的比例及其相互作用决定了木材的热稳定性、化学活性及其可改性潜力. 纤维素为木材的主要骨架成分, 具备结晶性强、机械性能优良的特点; 半纤维素结构较为松散、富含极性基团, 有利于水

分和离子的传导;木质素则呈高度交联结构,在增强疏水性与热稳定性方面具有重要作用<sup>[63,70]</sup>.三者所携带的表面官能团(如羟基、羧基、酚羟基等)是后续化学功能化的关键点.通过对木材中这些官能团的调控和改性,可有效赋予其导电性、感应性或特定界面功能,是构建功能器件的核心环节.例如羧基化可引入负电荷,提高离子导电性并增强与活性材料的结合能力;碳化处理可显著提升导电性能,并保留木材的孔道结构用于负载功能材料;涂覆法(如喷涂或浸渍导电聚合物、金属纳米粒子等)可快速实现木材表面的电性能提升,适用于柔性传感器与能量器件构建.基于上述策略,木基材料在保持天然结构优势的同时,可实现对电学性能、界面反应性及生物功能的多维度调控,为绿色电子器件提供了高度可定制的材料平台.

由于木材的主要成分均为天然高分子,其在自然环境中可在微生物作用下实现降解,避免了传统电子材料带来的“电子垃圾”问题.同时,其良好的生物相容性也使得木基材料可广泛用于穿戴式电子、生物传感器等对生物相容性要求较高的应用场景.

### 2.3 处理及改性技术

天然木材虽然具有优良的物理特性和化学特性,但直接用于电子器件时仍存在导电性差、稳定性不足、功能单一等局限.因此,研究人员采用多种处理与改性手段,提升其性能并扩展其应用范围.主要改性技术可以分为自上而下改性技术和自下而上改性技术.

自上而下改性技术是指从已有的木材基体出发,通过化学、物理或机械手段去除部分成分或改变其结构,来制备目标功能的材料.这种方法在木基传感器的制造中应用广泛,尤其是在需要利用木材天然的孔洞结构、改变其功能性或改善其表面特性的情况下.去木质素法是自上而下改性技术中的一种重要方法,广泛采用亚硫酸钠/氢氧化钠体系去除木材中的木质素成分来调节木材的结构与性能<sup>[71-74]</sup>.木质素作为木材中的主要成分之一,不仅对木材的力学性能有重要影响,还影响着其电学性能和化学性能.去除木质素后,木材的纤维素和半纤维素将更加暴露,形成更为多孔的结构,获得了更高比表面积和亲水性,这对于改善其表面活性、后续填充功能材料以及增强其对外界刺激的反应能力非常重要.进一步地,通过引入导电高分子<sup>[75-77]</sup>、金属纳米粒子<sup>[78-80]</sup>、氧化石墨烯<sup>[81-83]</sup>等功能材料,可显著提升木材的导电性与功能响应能力.

此外,通过结构重构也可以进一步优化木材的导电特性与力学特性.例如,热压处理(120~200 °C、5~20 MPa)<sup>[84-86]</sup>可使木材孔隙率降至10%~30%,密度提升至1.3~1.5 g/cm<sup>3</sup>,同时诱导纤维素微纤丝定向排列,使纵向电导率提高2个数量级.激光诱导石墨化是一种

高效的碳化处理方式,利用激光在木材表面快速扫描,在局部高温下将木质材料转化为石墨态碳层,即可直接在木材表面形成导电图案<sup>[14-16]</sup>.冷冻干燥法则通过定向冷冻构建垂直排列的纳米孔道或波浪堆叠状的层状结构<sup>[87,88]</sup>,可以提高木材的离子渗透率,适用于制备高能量密度的超级电容器<sup>[89]</sup>.

与自上而下的改性技术不同,自下而上改性技术是在分子或纳米尺度上出发,通过将木材的基本结构单元,如纤维素、半纤维素和木质素提取出来,进一步转化为薄膜、凝胶或多孔骨架材料.同时结合多种化学修饰手段,构建具有特定功能的木基电子器件.这种方法不仅打破了天然木材结构的局限,还赋予了材料更多可设计性和功能灵活性.通过分子层面的加工,可以精准控制材料的组成比例、孔隙结构、结晶度以及表面化学特性,从而实现对力学性能、电学性能、湿度响应性等多种性能的定向调控.在具体实现过程中,研究人员开发了多种自下而上改性技术手段,如静电纺丝、溶液浇铸成膜、冷冻干燥构建多孔结构和制备水凝胶等.通过静电纺丝技术,可以将纤维素纳米纤维(Cellulose NanoFibers, CNFs)加工成连续的纳米纤维膜,形成具有良好柔性和高表面积三维网络,广泛应用于柔性传感器和能量收集器中<sup>[90]</sup>.溶液浇铸或冷冻干燥的方法则能够制备出具有定向孔道或蜂窝状结构的多孔膜,适合用于压力传感、高性能电极等领域.通过化学或物理交联的方法形成的纤维素水凝胶,具备高含水量、优异的离子传导性能及机械可调性,非常适用于湿度、温度和生物信号的响应检测.此外,通过对纤维素基材料进行化学修饰(如表面官能化)或掺杂导电成分(如碳纳米管、石墨烯、导电聚合物等),可以进一步赋予其传感、压电或电学活性等多种功能,满足不同类型传感器的性能需求.木质素作为另一类重要的天然高分子,其丰富的芳香环结构和良好的成膜性使其在自下而上构筑导电薄膜、能量存储器件及电化学传感器方面展现出巨大潜力.相比自上而下的改性技术,自下而上改性技术在材料制备的尺度、形貌和化学组成控制上更加灵活,能够实现从宏观到微观结构的精准设计,极大地拓展了木基电子器件的应用领域.

### 2.4 生物基材料的评估标准与测试规范

为推动生物基电子材料的可持续发展与国际化应用,构建科学、统一的标准化测试体系已成为亟需解决的重要问题.当前,国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)已针对生物基材料的环境属性、成分构成及降解行为等方面制定了多项技术标准,广泛适用于以纤维素、木质素等天然高分子为基础的材料体系.其中,ISO 16620系列标准针对生物基碳含量、生物基合成聚合物含量以及整体生物基

质量分数的测定提供了系统的量化方法,是目前评估材料“生物基程度”的核心参考依据之一。此外,如 ISO 20200(模拟工业堆肥条件下的降解性能测试)等标准,也为评估生物基材料在实际环境中的降解行为提供了可操作性强的实验框架。这些标准体系的建立,不仅有助于推动生物基电子材料从实验室研究向产业化、工程化阶段的规范发展,更为其进入绿色电子、柔性可降解器件、可持续物联网等新兴应用领域奠定了技术基础与认证保障。尤其是在全球“双碳”目标和循环经济趋势驱动下,标准化已成为生物基电子材料获得政策支持、市场认可和国际准入的关键桥梁。未来,围绕木基电子材料的物理性能、生物降解性、环境相容性等方面的标准制定,将成为该领域走向高质量发展的重要方向之一。

### 3 木基电子器件

随着柔性电子学、可穿戴设备和物联网的发展,对绿色、可再生、可降解电子材料的需求日益增长。木基材料因其天然的可持续性、结构的可设计性及优良的生物相容性,成为构建下一代环保电子器件的重要材

料平台。木基电子器件涵盖了从功能到供能等多个方面,本节主要介绍传感感知、能量采集及能量存储方向的木基电子器件。其中,木材的多孔结构、高度有序通道与复杂的化学组分为器件的功能实现提供了天然优势。

#### 3.1 木基传感器件

传感器作为智能系统的核心部件,其性能的提升直接关系到系统的灵敏度、响应速度以及稳定性。传统的传感器多依赖于金属或硅基材料,然而,随着绿色、可持续发展理念的推进,基于木材的传感器因其天然的生物相容性、可降解性、良好的机械性能以及丰富的化学功能基团,成为新型环保传感器的研究热点。本节将重点介绍木基传感器件的研究进展,包括木基压力传感器<sup>[91,92]</sup>、湿度传感器<sup>[93,94]</sup>、气体传感器<sup>[95,96]</sup>以及动作监测传感器<sup>[97,98]</sup>等,探讨其工作原理、构建方法及应用。表 1 列举了部分木基传感器的类型,包括压力传感器、应变传感器、湿度传感器等,并对它们的工作机理、制备方式、特性及灵敏度进行了总结,还对比了不同器件的传感性能。

表 1 部分木基传感器的类型及性能对比

传感器类型	工作机理	制备方式	特性	灵敏度	文献来源
压力传感器	电阻式	去木质素/负载 rGO	柔性/表面微结构	1.85 kPa <sup>-1</sup> (0~60 kPa)	文献[99]
压力传感器	电阻式	磺化碳纳米管与纤维素分散体结合制备水凝胶	柔性/可拉伸性	4.4 kPa <sup>-1</sup> (0~500 Pa) 1.7 kPa <sup>-1</sup> (500~2 000 Pa)	文献[100]
压力传感器	电容式	木材表面激光诱导石墨烯	柔性/表面微锥阵列	0.11 kPa <sup>-1</sup> (0~20 kPa) 0.014 kPa <sup>-1</sup> (20~155 kPa) 0.003 kPa <sup>-1</sup> (155~1 393 kPa)	文献[101]
压力传感器	电容式	[EMIM][NTF2]对木材进行改性	高介电常数	2.09 kPa <sup>-1</sup> (0~80 kPa)	文献[102]
应变传感器	电阻式	去木质素/真空浸渍聚丙烯酰胺水凝胶	柔性/抗溶胀性	2.1 MPa <sup>-1</sup> (0.1~25 kPa) 0.4 MPa <sup>-1</sup> (25~125 kPa) 0.14 MPa <sup>-1</sup> (125~245 kPa) 0.04 MPa <sup>-1</sup> (245~490 kPa)	文献[103]
湿度传感器	电容式	TEMPO 处理纳米纤维素纤维纸	柔性/湿度高灵敏	8 063 pF/%RH	文献[93]
气体传感器	摩擦发电式	去木质素/负载碳纳米管	多孔微结构	—	文献[96]
复合传感器(压力、温度、湿度)	电阻式	木材表面涂覆聚亚甲基二苯基异氰酸酯/炭黑和碳纤维改性	多参数敏感	—	文献[104]

Huang 等人<sup>[56]</sup>提出了一种基于自上而下改性技术的木基高灵敏度、宽线性范围压力传感器,如图 3(a)所示。通过去木质素处理和碳化方法将刚性非导电块状木材转化为柔性导电块状木材,进一步地,通过真空处理将聚二甲基硅氧烷(PolyDiMethylSiloxane, PDMS)渗透到碳化木材的通道中以提高碳化结构的柔韧性和稳定性。水平切割作为压阻传感层,在上下电极之间施加 1 V 的恒定工作电压,通过传感器的电流随着压力的增加而上升,当压力减小时,材料迅速恢复,导致电流下

降。用电流变化率作为表征器件灵敏度的参数,即  $S = \frac{\Delta I/I_0}{\Delta P} = \frac{(I_p - I_0)/I_0}{\Delta P}$ , 其中  $S$  表示器件灵敏度,  $I_p$  和  $I_0$  分别代表一定压力下的电流和不施加任何压力下的电流,  $\Delta P$  代表压力变化,计算结果显示该器件可实现高达 10.74 kPa<sup>-1</sup> 的灵敏度。传感器的整体出色传感特性可以精确地连续测量人体脉搏和呼吸,有利于实时健康信号监测和疾病诊断。图 3(b)展示了通过向去木质素的木材骨架注入水凝胶制备具有高强度、抗吸湿膨胀和

良好应变敏感性的木基传感器的制备流程<sup>[103]</sup>。得到的木基应变传感器具有良好的柔韧性,可以随意弯曲和扭转,实现和皮肤的保形性贴附,从而保证了高精度的监测。Liu 等人<sup>[105]</sup>通过将木基骨架浸泡在离子液体中,以部分溶解木材骨架中的纤维素,然后将丙烯酸渗透到木基模板中,通过原位聚合的方法成功合成了具有双重网络的木基离子凝胶,传感器工艺流程如图 3(c) 所示。制备得到的木基离子凝胶具有半透明性(53.9%)、抗干燥性(在室温下保持稳定 30 d 以上)、抗疲劳性(>500 加载循环)和柔韧性。此外,它们具有优异的导电性和高灵敏度,因此可以用作应变传感器的传感层。灵敏度被定义为相对电阻变化的斜率 $(R-R_0)/R_0$  作为拉伸应变( $\epsilon$ )的函数。在拉伸过程中,记录拉伸应变及其相应的电阻变化,并拟合函数方程,计算得出木基离子凝胶在 35% 的应变范围内可实现高达 8.6 的灵敏度。其被贴附于人体关节上时,可以监测手肘、手腕、手指不同程度的弯曲,有望应用于包括电子皮肤、可穿戴医疗设备等领域。

为了提高传感器的灵敏度,通常在传感层中引入微结构。目前,在木基传感器中构建微结构最常用的方法就是利用自下而上改性技术,赋予再生木基薄膜期望的微结构。Chen 等人<sup>[106]</sup>通过简单的再生和热压工艺制备了具有表面微结构的木基传感层,具体工艺流程如图 3(d) 所示。首先将纤维素浆均匀浇注在玻璃板上制备纤维素膜,再将纤维素膜置于筛网下,用热压机进行固化同时引入表面微结构,然后碳化得到电阻式压力传感器的传感层。由于微结构的引入,有源层和电极之间的接触面积变化增大,从而实现了高灵敏度的压力传感设计。然而,在高压负载下,由于传感层和电极相互紧密压缩,即微观结构的变形已接近饱和,该器件的灵敏度增加受到限制。在图 3(e) 所示的工作中,研究者们利用木质素和纤维素纳米纤维制备了具有微结构的木材衍生弹性木基气凝胶<sup>[107]</sup>。柔性的纤维素纳米纤维互相缠绕,构筑起连续互联的三维框架,木质素凭借其优异的热稳定性和高刚性,在退火过程中有效抑制了框架的结构收缩。得益于这种独特的微观结构,木材来源的碳气凝胶展现出卓越的机械性能,具有极高的可压缩性(应变可达 95%)和优异的抗疲劳能力。它还在 0~16.89 kPa 的宽工作压力范围内显示出高灵敏度,并能准确地检测人体生物信号。图 3(f) 展示了以木基气凝胶为传感层的压力传感器<sup>[108]</sup>。将具有优异电导率的碳化细菌纳米纤维素和木材衍生的纤维素纳米纤维结合起来,通过定向冰模板和冷冻干燥制备多孔结构的气凝胶。将气凝胶用作活性层,在纸基材上制备电阻式压力传感器。测试压力传感器在不同静压载荷下的电流-电压( $I-V$ ) 曲线,发现曲线的斜率随着压力负载的增加而增

加。当传感器被压缩时,气凝胶内部的纤维结合位点增加,导电路径增加,电阻降低,实现了压力传感的响应。

另一方面,还可以通过功能材料复合来提高灵敏度。Teng 等人<sup>[109]</sup>将聚乙烯醇-硼酸-单宁酸-硫酸钠多组分引入纤维素基木材基体,构建出具有动态硼键、氢键及金属-配体作用的木基水凝胶,赋予其优异的机械强度及灵敏度,并在高盐环境中依然表现稳定。Meng 等人<sup>[110]</sup>通过保留木材中木质素结构并引入  $Al^{3+}$  离子配位,进一步结合聚丙烯酰胺与聚苯胺共聚,制备出具备高灵敏度的木基复合水凝胶传感器,在保持导电性能的同时展现良好的人体运动监测能力。两项研究均展示了天然木材与功能高分子协同构建多重网络结构在提升传感器灵敏度和稳定性方面的巨大潜力。

### 3.2 木基能量采集器件

能量采集是木基电子系统实现自供能运行的基础环节,特别是在可穿戴、生物医疗与环境监测等对自供能高要求的场景中,其重要性愈加突出。利用木材天然的多孔结构、机械响应性,及水汽输运能力构建新型能量采集装置,已成为近年来的研究热点。

#### 3.2.1 木基纳米发电机

纳米发电机是一种基于摩擦电或压电效应将机械能转化为电能能量采集装置。木材作为一种具有各向异性结构和良好力学性能的天然多孔材料,非常适合作为纳米发电机的功能基底。其工作原理如下:当两种具有不同电子亲和力的材料发生接触时,界面会由于电荷转移而形成相反极性的电荷分布,从而实现机械能向电能的转化。这一过程被称为摩擦起电效应,其本质是材料接触时电子从高能态区域向低能态区域迁移。在随后的分离过程中,一部分电子无法回到原始状态,造成材料表面残留电荷的积累。一般来说,电子亲和力较强的材料倾向于获得负电荷,而电子亲和力较弱的材料则倾向于带正电。当两种材料在外力作用下反复接触和分离,电极间的感应电势也会随之发生周期性变化。此时若将电极与外部电路相连,便可产生稳定的交流电信号,从而高效地将机械能转化为可用电能,实现能量采集功能<sup>[111-113]</sup>。纳米发电机的基本工作原理可以通过表面极化电荷的作用进行解释,其理论基础可追溯至麦克斯韦方程组。其输出电流的产生与麦克斯韦位移电流密切相关,表明电荷的动态变化在能量转换过程中起着关键作用。木基纳米发电机的类型及性能对比如表 2 所示。

图 4(a) 和图 4(b) 展示了用于智能体育领域的木基摩擦纳米发电机。通过自上而下的化学处理,即将天然木材中的木质素/半纤维素部分去除得到柔性木材,作为单电极式摩擦纳米发电机的摩擦层<sup>[119]</sup>。将其应用于乒乓球桌表面,可以和乒乓球构成一个单电极式的摩

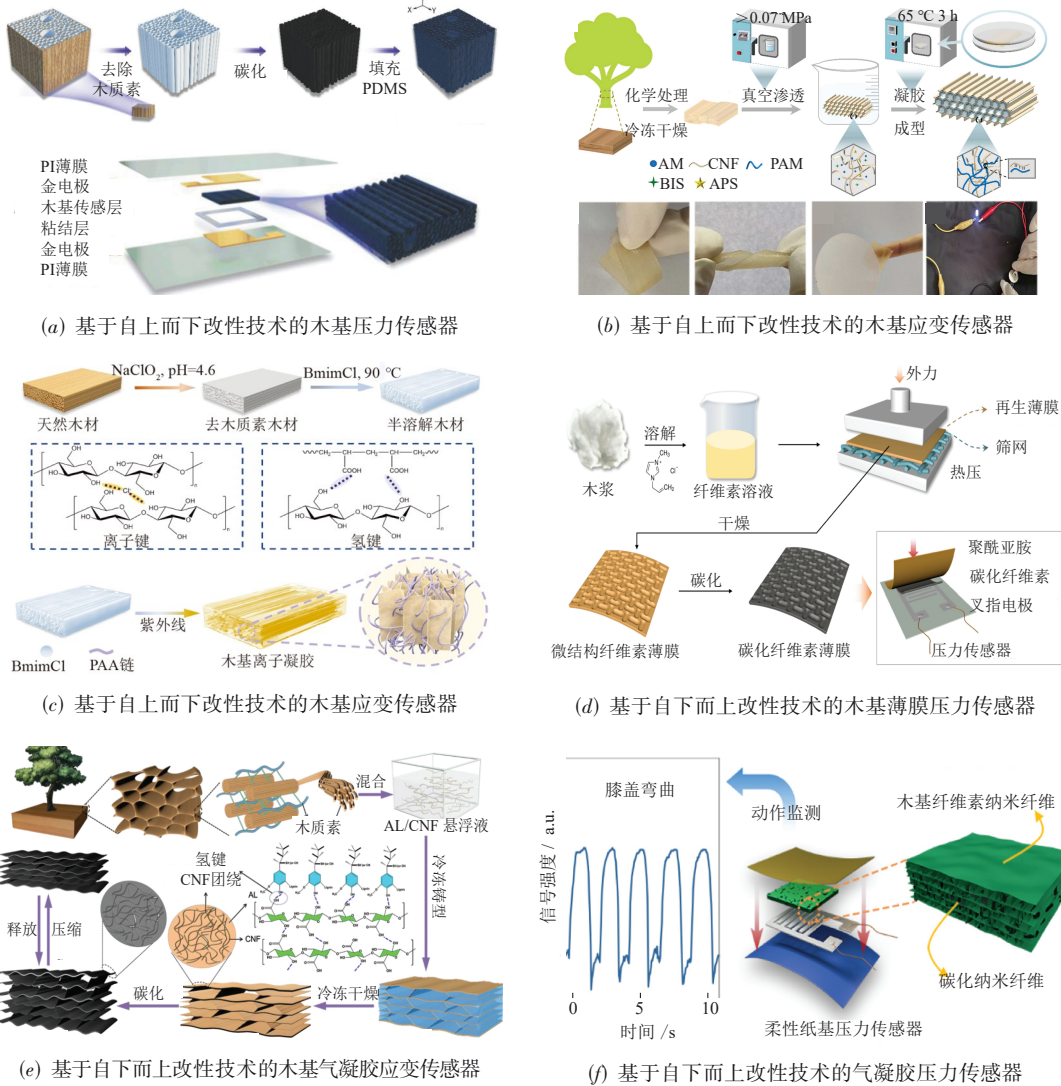


图 3 木基电子器件在传感器感知领域的应用<sup>[56, 103, 105-108]</sup>

表 2 木基纳米发电机的类型及性能对比

发电机类型	制备方式	特性	电压幅值/V	电流幅值	峰值功率密度/(mW/m <sup>2</sup> )	文献来源
压电纳米发电机	去木质素	层状堆叠结构	0.69	7.1 nA	6	文献[34]
压电纳米发电机	填充压电材料/熔融结晶	可调控晶相	30	4 μA	18.8	文献[35]
摩擦纳米发电机	天然巴尔沙木材	天然多孔结构	110	0.72 μA	87	文献[114]
摩擦纳米发电机	去木质素	蜂窝状多孔结构	208	60.12 μA	4 860	文献[115]
摩擦纳米发电机	去木质素/填充紫外光固化树脂	高透光率	131	1.45 μA	43.7	文献[116]
摩擦纳米发电机	旋涂纤维素纳米晶片复合溶液制备薄膜	柔性薄膜/高表面电荷	350	11.25 μA	7 600	文献[117]
复合纳米发电机	PDMS、BaTiO <sub>3</sub> 、复合纤维素/再生气凝胶	弹性可压缩	48	—	2.125 × 10 <sup>5</sup>	文献[118]

擦纳米发电机. 当球落在台面上时,可以精确地检测到跌落点,并实现球速传感. 随着乒乓球的速度增加,输出电压也随之上升. 通过分析统计结果,可以获得运动员的运动习惯数据,从而为运动训练制定更好的竞争策略. 木基纳米发电机除了可以应用于体育领域,还可

以应用于智能家居. 图 4(c)i 展示基于天然木材的摩擦纳米发电机的结构设计及输出性能<sup>[58]</sup>. 其中两个摩擦层分别是木材和聚四氟乙烯(PolyTetraFluoroEthylene, PTFE),以铜作为电极,通过将两块海绵固定于天然木材和 PTFE 之间,可以增加在摩擦起电过程中的有

效接触区域以增大输出电压. 将该装置应用于门铃, 通过手指按压使两个摩擦层接触, 产生的输出电压和电流如图 4(c)ii 和图 4(c)iii 所示. 类似地, 该装置还可以用于照明开关、弹簧地板等, 共同构成智能家居以实现居家自动化. Cheng 等人<sup>[116]</sup>基于自上而下的化学处理方法制备了透明的木基摩擦纳米发电机, 其工艺流程如图 4(d) 所示. 首先对木材进行去木质素处理, 然后用紫外光固化树脂并对木材进行浸泡, 使木材复合物的折射率变得和空气相似, 从而减少光的反射和折射, 提高了木材的透明度. 制备的透明木基摩擦纳米发电机兼具能量采集和装饰的作用. 为了克服木基摩擦纳米发电机脆性和低表面电荷密度的问题, Yao 等人<sup>[120]</sup>报道了一种由预处理和后改性组成的简单方法, 以获得柔性且具有良好力学性能的木基摩擦层材料. 采用三甲基氯化铵溶液对去木质素木材进行化学改性, 以调节正摩擦层材料的表面电位并扩大能量势垒差以产生高静电电荷流. 制备得到的木基摩擦纳米发电机具有更高的开路电压、短路电流和功率密度. 为了进一步提高木基纳米发电机的集成度, Zeng 等人<sup>[121]</sup>通过向去木质素的巴尔沙木里掺杂功能材料(氯化钙、银纳米线)分别制得了具有离子导电性和电子导电性的改性木材. 该导电木材同时作为摩擦纳米发电机的摩擦层和电极层, 得到的单电极式摩擦纳米发电机具有良好的输出性能, 如图 4(e) 所示. Ba 等人<sup>[122]</sup>利用重组工艺, 将基于胡萝卜组织的纤维素纳米纤维和氯化钙混合, 得到基于天然纳米纤维的单层摩擦纳米发电机, 如图 4(f) 所示. 它结合了表面电荷转移和离子迁移, 形成了一种新的混合工作原理, 在单层器件内成功实现了表面电荷转移和离子迁移的结合. 这里额外离子的掺杂可以调节制备的摩擦纳米发电机的电输出, 器件的峰间电压和短路电流分别为 254 V 和 11.52  $\mu\text{A}$ . 传统摩擦纳米发电机在高湿环境下工作时, 附着在摩擦电层表面的水分子会带走表面电荷, 导致摩擦电性能降低, 这显著制约了摩擦电纳米发电机的进步. Zhang 等人<sup>[123]</sup>基于天然木材各向异性结构, 采用定向冷冻干燥辅助机械压缩工艺, 制备了一种具有优异的湿度适应性和摩擦电性能的壳聚糖/聚乙烯醇纵向气凝胶膜. 基于该气凝胶膜的摩擦纳米发电机对高湿度环境具有很强的适应性和稳定性. 由于湿度增加, 材料软化会使接触面积增加, 反而提升了输出性, 其设计思路在能量收集和自供电传感方面具有出色的应用优势. 表 2 列举了部分典型的木基纳米发电机, 包括压电纳米发电机、摩擦纳米发电机以及复合纳米发电机, 对它们的制备方式及特性进行了总结, 并对比了不同器件的输出性能. 不同制备方式得到的木基摩擦纳米发电机的性能对比雷达图如图 5 所示.

### 3.2.2 木基蒸发电器件

蒸发电技术是一种通过水的蒸发驱动离子流动, 从而实现能量转换的新型方法. 木材天然的多孔网络结构与亲水性使其在水分输运方面具有显著优势, 成为构建蒸发电器件的理想平台<sup>[124, 125]</sup>. 在溶液中, 固体表面通常因表面基团的解离或对溶液中特定离子的选择性吸附而带上电荷. 为了满足电中性条件, 固体表面附近的液体区域会聚集等量但带相反电荷的反离子, 二者共同形成了双电层结构<sup>[126, 127]</sup>. 当水分子在蒸发力和毛细力的驱动下, 流过具有带电表面的木材狭窄毛细通道时, 双电层中相反电荷的离子可以和水分子一起流动, 从而形成流动电势和电流. 因此自然蒸发可以被用来驱动毛细水流, 从而产生可持续的电力. 图 6(a) 展示了木基蒸发电器件的工作机理. Lin 等人<sup>[128]</sup>通过不同方法制备得到去木质素后的木材样品, 并在其上下表面覆盖金属网状电极进一步组装得到蒸发电器件. 测试不同器件的关键性能参数, 进行了综合研究和比较, 为木基蒸发电器件的设计和制备提供了思路. 为了提高木基蒸发电器件的输出性能, 除了可以对木材进行去木质素改性处理, 还可以采用柠檬酸溶液以增强木材通道的 zeta 电位和亲水性, 以进一步提高输出功率. 图 6(b) 展示了用柠檬酸改性的木基蒸发电器件的原理图及实物图<sup>[59]</sup>. 该试剂的引入增加了木材孔洞内壁上的羟基丰富性, 表面电荷也随之提高, 通过串联五个蒸发电器件, 可以为日常电子设备进行供电. Janus 木质膜具有两侧不对称的特殊润湿特性, 该特性为液体的定向输送提供了良好的解决途径. 由于不对称的特殊润湿性、独特的木材蒸腾微通道以及木材基体改性的协同作用, Janus 介孔木质基膜可以在没有任何外部能量输入的情况下促进水分的运输, 可用于蒸发发电以及高效的海水淡化, 如图 6(c) 所示<sup>[129]</sup>. 除了利用 Janus 不对称润湿性来提高蒸发电, 光热效应也可以用于提高木材微通道中水的蒸发效率. 金属纳米颗粒是一种等离激元材料, 可以在照明下有效地将光转化为热量. Zhu 等人<sup>[130]</sup>通过将细金属纳米颗粒均匀地装饰到 3D 天然木材中制成了一种新型的等离激元木材, 如图 6(d) 所示. 由于金属纳米颗粒的等离激元效应以及木基质中微通道的波导效应, 等离子体木在 200 ~ 2 500 nm 的宽波长范围内表现出高光吸收能力. 借助毛细管效应和垂直的 3D 通道, 器件可以有效地从设备的底部运输水, 且具有高太阳转换效率和海水脱盐的潜力.

除了对木质材料进行改性, 具有相似结构的生物质材料也可以构成蒸发电器件. Li 等人<sup>[131]</sup>利用甘蔗独特的物理微结构制备了一台高效的蒸发驱动发电机. 甘蔗由大量的一维毛细通道网络组成, 非常适合用于

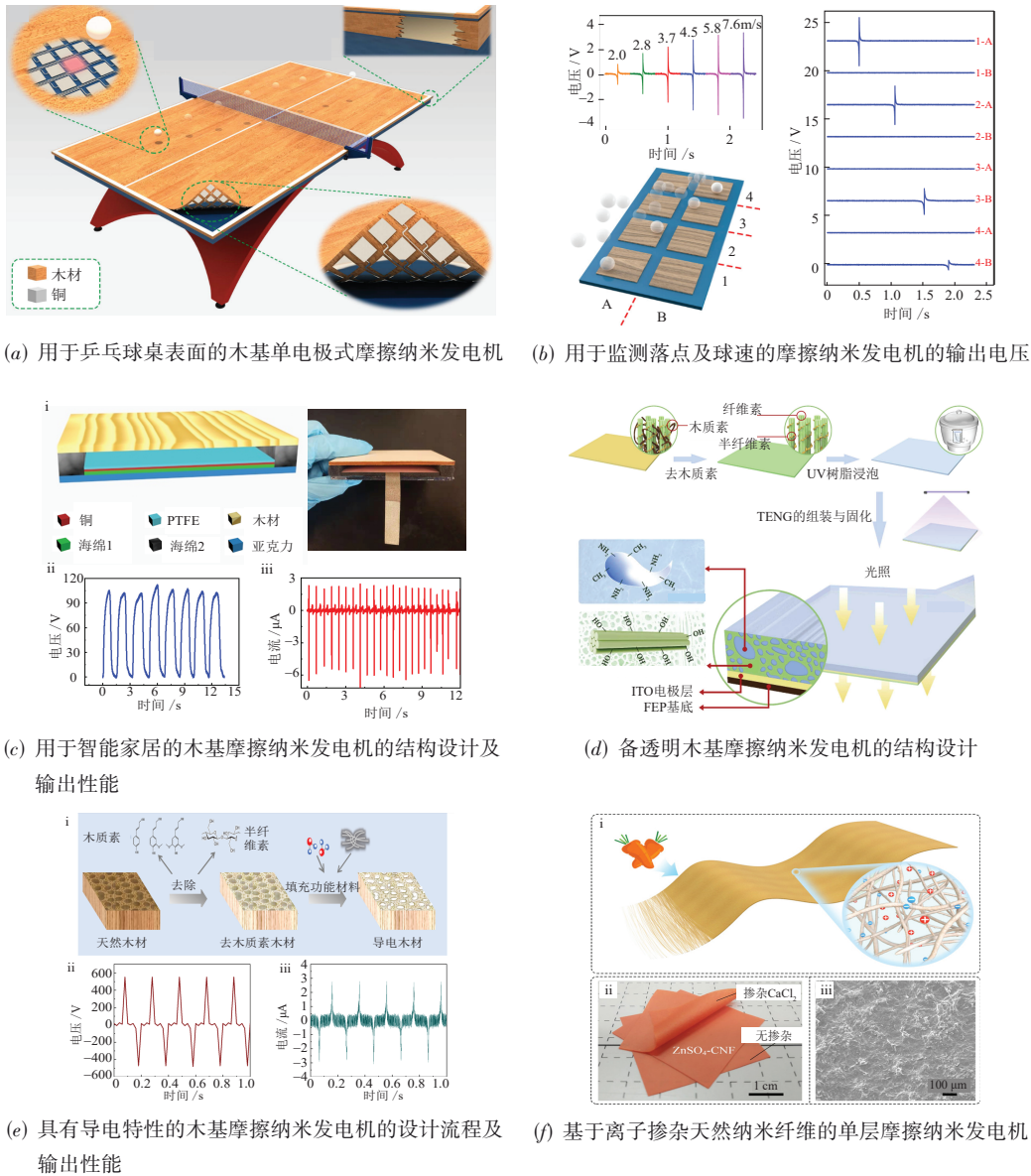


图 4 木基电子器件在纳米发电机领域的应用<sup>[58,116, 119, 120, 123]</sup>

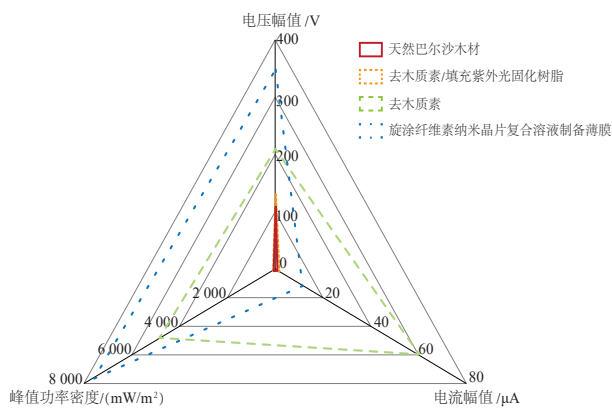
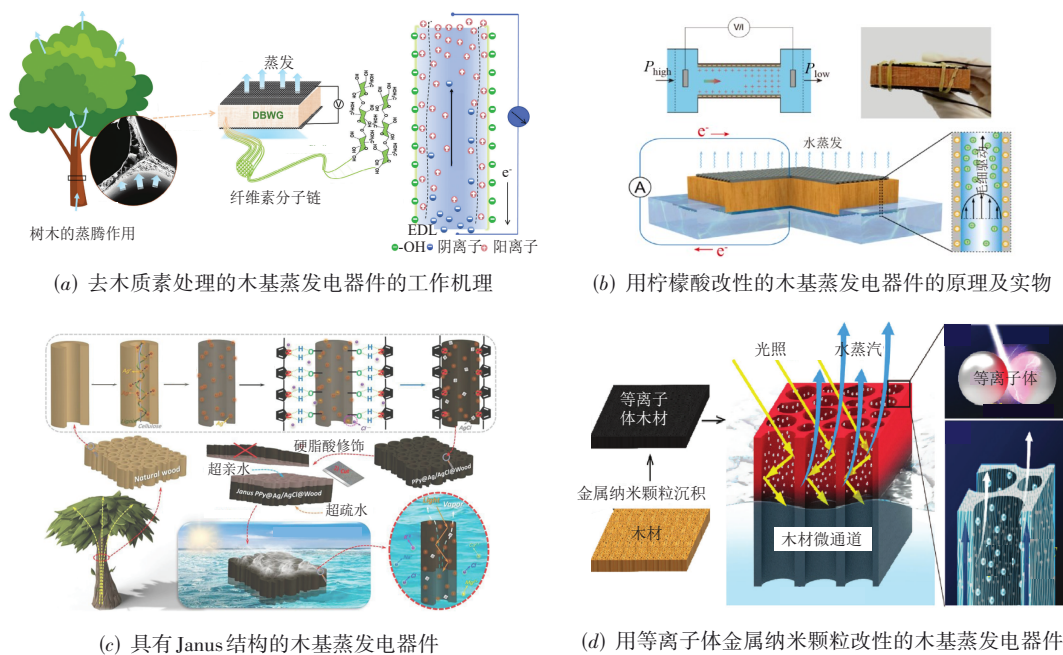


图 5 木基摩擦纳米发电机的性能对比雷达图

定向蒸发电过程. 使用海水作为电解质溶液, 甘蔗基蒸发电器件可以在室温下高效地收集电能, 输出具有约 470 mV 的高开路电压, 8.2  $\mu$ A 短路电流和 36.7 nW/cm<sup>2</sup> 的输出功率. 通过利用甘蔗作为绿色生物材料和海水作为发电的丰富能源原料, 该研究为可持续的能源收集提供了新的思路.

### 3.3 木基储能器件

传统储能器件如锂离子电池、超级电容器等虽然性能优异, 但存在不可再生、环境污染等问题. 通过结构调控与功能化处理, 木材及其衍生物可应用于电极材料、电解质及支撑骨架等多种储能组件中, 为可持续储能技术提供了新思路和发展方向<sup>[40, 41, 132-135]</sup>.

图6 木基电子器件在蒸发发电领域的应用<sup>[59,128,129,131]</sup>

木材中丰富的纤维素、半纤维素及木质素提供了良好的碳源,通过热处理、化学活化等工艺可将其转化为导电性优异的碳材料。目前商业离子电池技术面临性能提升的挑战,过去的研究多集中在新型电极材料的探索上,而对电极微结构工程的研究相对较少。在现有商用电池中,电极有效材料的厚度普遍限制在50~100  $\mu\text{m}$ ,制约了单位体积/面积的能量密度提升。因此,通过增加电极厚度或优化微结构成为提升能量密度的重要策略。Shen 等人<sup>[136]</sup>通过直接碳化木材设计了一个3D碳电极,该碳化木材垂直于生长方向切割,维持了天然的开放通道,因此离子传输的曲折度低。碳化木材具有良好的导电性,为电子传输提供了极好的路径。碳化木材具有天然存在的多孔结构,而且电极的厚度可以简单地通过切割木材的厚度来控制。开放的通道可以有效地促进离子在厚度方向上的传输,得益于独特的结构,即使电极厚度达到毫米级,也可以获得优异的离子电导率,其电极示意图如图7(a)所示。Lu 等人<sup>[137]</sup>借助自然木材中垂直导管的低弯曲率结构,采用溶胶-凝胶浸渍与高温煅烧工艺,将天然木材模板转化为具有有序微通道的自由支撑型电极材料。该电极厚度可达1 mm,是传统电极的约12倍,同时保留了良好的离子传输性能和高倍率响应能力。其设计示意图及能量密度曲线如图7(b)所示。Chen 等人<sup>[138]</sup>通过碳化天然木材构建三维碳框架作为导电骨架,再注入  $\text{LiFePO}_4$  (Lithium Iron Phosphate, LFP) 活性材料,制备厚度达800  $\mu\text{m}$ 的电极,如图7(c)所示。显著提升了电极的面容量(7.6  $\text{mAh}/\text{cm}^2$ )、机械强度及循环寿命。木基材料除

了应用于电极,还可以用于超级电容器的分离膜,从而构成一个全木基的超级电容器。图7(d)展示了一种构建的全木基非对称超级电容器的设计方案,利用天然木材构建阳极活性炭、木质分离膜及负载二氧化锰( $\text{MnO}_2$ )的木基碳正极,充分利用了木材沿生长方向的多孔通道结构,实现了低弯曲率、高电导率 and 高质量负载<sup>[57]</sup>。该设计在保持良好倍率性能的同时,实现了极高的面电容和优异的能量/功率密度,展现出在绿色、可再生、高安全性储能领域的巨大应用潜力。

## 4 木基电子微系统

随着木基电子器件在传感、能量采集与能量储存等领域的不断进步,单一功能器件已无法满足复杂应用环境中对多功能集成、智能响应与自主运行的更高要求。为实现更广泛的应用场景,如环境智能监测、可穿戴健康系统及智能包装,亟需将多种功能器件有机整合,形成具备自主能量管理、信息传感处理和无线传输能力的系统。因此,木基电子微系统应运而生,成为推动木基电子学向高集成度与智能化方向发展的重要趋势。本节将围绕木基微系统的概念、关键特性及相关应用进行系统阐述,为后续探讨木基电子技术的应用拓展与未来发展奠定基础。

### 4.1 木基电子微系统特性

木基电子微系统相较于单一木基器件,展现出更高层次的系统集成与智能化特性。通常,木基电子器件指的是具备单一功能的电子单元,例如前文介绍的具有传感、能量采集、能量储存的木基电子器件,主要实

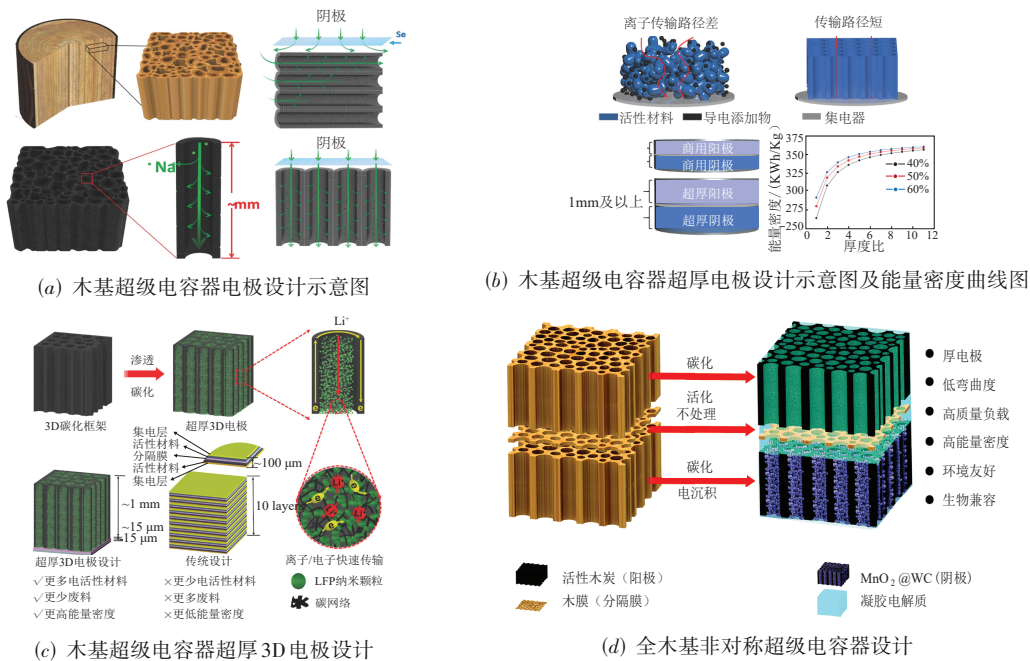


图7 木基电子器件在能量存储领域的应用<sup>[57,136-138]</sup>

现特定物理信号或化学信号的感知与转换;而木基电子微系统则通过多器件功能集成与协同设计,突破单一器件的性能局限,实现像传统微系统类似的在复杂环境下的信号感知、信号处理、能量管理及无线通信的一体化<sup>[139]</sup>。例如构建的木基柔性印刷微系统集成了湿度传感和RFID通信模块,可在无需外部电源的情况下监测环境湿度并远程无线传输数据<sup>[140]</sup>。相较于传统无机微系统,木基微系统兼具可再生性、生物可降解性、优异的机械柔性和良好的环境友好性。这种系统级集成的发展趋势,是推动木基电子学从基础材料研究迈向实际应用的重要途径。

制备木基电子微系统往往需要结合多种制备工艺,赋予材料本体功能化,同时连接电学导电网络,实现多功能在木基材料上的有效集成。木基电子微系统的设计通常围绕材料的天然多孔结构、力学性能和可再生特性展开,结合功能需求进行结构优化与多尺度功能集成。设计策略既包括对木材本身的结构调控(如纤维排列、孔隙率调节),也涵盖对功能模块(如传感器单元、导电网络、能源模块等)的空间布局与互联方式规划。加工工艺方面,木基微系统制备广泛采用自上而下与自下而上技术协同的策略:一方面,通过激光微加工、等离子体处理、软光刻等方法,对木基材料进行局部改性和精细结构构建,具备高空间分辨率、结构可控性强、适配现有微纳制造流程的优势;另一方面,利用自组装、化学沉积、渗透涂覆等手段引入导电材料、活性组分或功能纳米颗粒,具有材料分布均匀、反应条件

温和、适用于天然通道功能化的特点,赋予系统多种物理或化学响应特性。此外,丝网印刷、模板复制与3D打印等柔性制造技术被用于实现复杂器件的批量化制备与功能集成,具有工艺简单、成本低、适用于大面积柔性衬底和异形结构构建的显著优势,从而推动木基微系统在可穿戴传感、智能监测与绿色能源等领域的应用发展。

在木基电子微系统中,导电互联结构及后端电路的构建是实现系统功能集成的关键环节。通过在木基薄膜或衍生材料表面印刷导电线路,如喷墨打印、丝网印刷或激光直写等工艺,可以精确制备微型线圈、传感器电极等功能单元。Jia等人<sup>[47]</sup>利用导电油墨在木基基底上制备接收与发射线圈,可实现无线能量传输与信息交换,为RFID标签、无线传感器节点等应用提供基础支撑。此外,后端电路模块通常集成信号采集、处理与分析功能,可对环境参数(如温度、湿度、气体浓度)或人体生理信号(如脉搏、汗液成分)进行实时监测与智能响应<sup>[141]</sup>。导电互联网络与信号处理电路的有效集成,极大地拓展了木基微系统在柔性电子、可穿戴设备和物联网领域的应用前景。

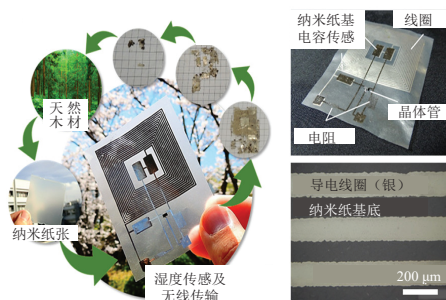
#### 4.2 木基电子微系统应用

近年来,大量环境传感器被广泛应用于制造业、农业及天气预测等领域,然而传感器设备数量的急剧增长带来了维护与回收难题。因此,开发使用后可完全降解、无残留和无有害物质的传感及处理系统成为亟需解决的问题。Kasuga等人<sup>[140]</sup>通过自下而上工艺制备纳

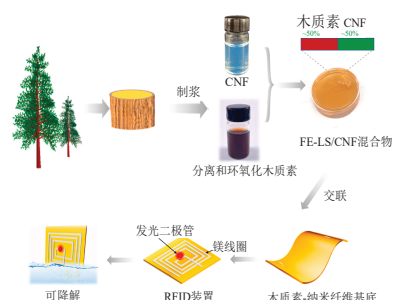
米纸作为基底、介电层与传感元件的核心材料,构建兼具无线通信、环境感知与可降解性能的柔性传感器件,如图8(a)所示. 制备得到的纳米纸由3~15 nm的纤维素纳米纤维组成,具有良好的热稳定性、机械柔性及可印刷性,并可在土壤中降解. 该研究通过在纳米纸上印刷并集成电容、电阻和线圈三类无源元件,实现了环境湿度的传感,以及MHz频段的无线信号传输. 在20%~80%RH下,纳米纸的含水率从2.5%变化到14.3%,电容随湿度的增加呈指数级增加,采集到的数据通过丝网印刷于纳米纸上的振荡电路发送. 该研究为构建绿色、低环境负担、可降解的无线传感系统提供了全新思路和技术路径. 类似地, Jia 等人<sup>[47]</sup>将木材中的两种主要成分——CNFs与木质素结合,通过对木质素进行分级和环氧化改性增强其与CNFs的相容性,制备出性能优异、可降解且成本低的绿色复合基底材料. 该复合材料兼具塑料般的力学性能与纸张般的环境友好性,可以用作柔性绿色电子器件的理想基底,在其表面印刷RFID线圈即可实现信息的传输,如图8(b)所示. 鉴于该木质基底良好的柔韧性、机械稳定性及耐高温的特性,可以在表面印刷导电墨水电路用于制备组装成多功能的木基微系统. 图8(c)展示了一种集成供电与传感功能的木基自供能无线氨气检测微系统,基于摩擦纳米发电机和无线通信电路,实现对食品腐败标志性气体(如氨气)的实时监测<sup>[96]</sup>. 首先将木材浸泡在氢氧

化钠和亚硫酸钠混合溶液中进行去木质素处理,保留其三维多孔结构并提升柔性;随后将其浸泡在碳纳米管溶液中,使碳纳米管均匀嵌入木材的微通道中,赋予其导电性. 可用作摩擦纳米发电机的摩擦电层和电极层,实现机械能到电能的转换. 导电木中的碳纳米管对氨气敏感,在空气中可吸附氧分子形成电子耗尽层,而氨气的引入会使氧阴离子与其反应,释放电子回到导电木表面降低电阻,从而实现了氨气的灵敏检测. 该系统结构简单、稳定性高、可实时传输数据,为食品安全领域的自供能传感系统发展开辟了新路径.

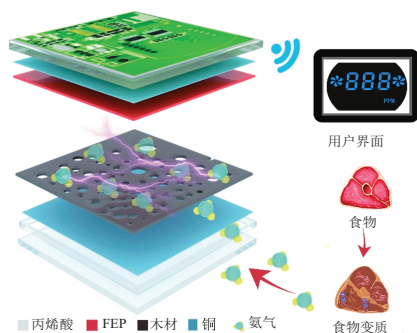
木基微系统除了可以用于环境监测,还可以用作柔性可穿戴微系统,解决人体运动监测、假肢控制、智能机器人、人机交互及自供能的需求. Song 等人<sup>[141]</sup>以轻质多孔的椴木为原料,通过自上而下的化学处理方式获得各向异性的弹性海绵骨架,并引入具有优异导电性的MXene(过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物)材料,制备出兼具导电性与弹性的MXene/木基海绵,如图8(d)所示. 该材料不仅表现出高灵敏度和宽线性检测范围,还可作为超级电容器电极实现能量存储,并兼作肌电电极,实现对肌电信号和触觉压力的同时监测,从而构建了一个集感知、供能和反馈于一体的多功能集成系统. 此外,在系统层面,也有工作探索了基于机器学习的能量采集认知通信方法,为能量管理与资源分配提供了新思路<sup>[142]</sup>.



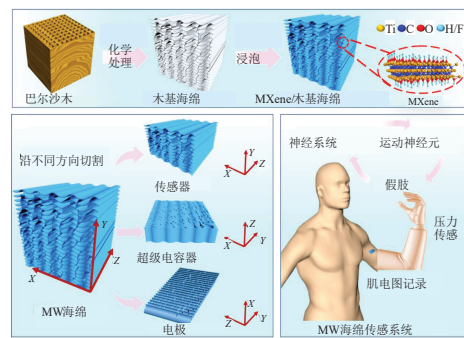
(a) 环境感知柔性木基微系统



(b) 无线通信柔性木基微系统



(c) 木基氨气监测微系统



(d) 可穿戴多功能木基集成微系统及材料

图8 木基电子微系统<sup>[47,96,140,141]</sup>

综上所述,木基电子微系统作为绿色、可持续电子系统的重要发展方向,具有广阔的应用前景.通过进一步优化木材的结构功能特性与器件集成策略,实现了从单一器件到系统级应用的跨越,展现出绿色、柔性、可持续发展的独特优势.在制备工艺方面,既依赖自上而下的精细结构构建,也利用自下而上的功能化策略,并辅以丝网印刷与3D打印等柔性工艺,实现大面积、低成本

本集成.在应用层面,木基微系统已在环境监测、食品安全、可穿戴传感、人机交互等领域展现出良好前景,为绿色电子学的实际落地提供了新思路.未来,随着木材结构功能特性的进一步优化与器件集成策略的持续完善,木基电子微系统有望在可穿戴设备、智能家居及生物医疗等领域实现更加广泛和深入的应用,如表3所示.

表3 木基电子微系统的特性与应用总结

维度	主要内容	典型示例
系统特性	多功能集成、系统级协同;兼具可再生性、生物可降解性、柔性与环境友好性.	木基柔性印刷微系统(兼具环境湿度检测及无线通信功能) <sup>[140]</sup> .
设计策略	结构调控(纤维排列、孔隙率)、功能模块布局与互联方式规划.	木基薄膜表面导电网络、信号处理电路集成.
制备工艺	自上而下:激光微加工、软光刻、等离子体处理; 自下而上:自组装、沉积、渗透、丝网印刷、3D打印.	激光直写电极;丝网印刷/喷墨打印无线电路 <sup>[140]</sup> .
环境监测	可完全生物降解、绿色低环境负担的环境参数实时监测微系统.	可降解纳米纸基无线传感系统 <sup>[47]</sup> ;木基自供能氨气检测系统 <sup>[96]</sup> .
可穿戴应用	多功能感知-供能-反馈集成系统,适用于人机交互、运动监测.	MXene/木基海绵多功能系统 <sup>[141]</sup> .
应用前景	可穿戴设备、环境监测、食品安全、智能家居、生物医疗.	木基 RFID、无线传感节点、自供能检测平台.

## 5 未来与展望

木基电子器件及微系统作为绿色电子学的重要分支,凭借其可再生性、生物相容性及优异的机械性能,在环境监测、食品安全、生物医疗及智能穿戴等领域展现出广阔的应用前景.随着木基电子技术不断向实用化、产业化迈进,国际社会,特别是欧美国家,日益重视其核心技术的知识产权保护与专利布局.近年来,欧美团队在木基柔性电子材料与器件领域积极开展专利申请与技术部署,充分体现木质资源在可持续电子学中的应用潜力与技术成熟度.例如,Zhang等人<sup>[143]</sup>设计了一种基于天然木质贴面的柔性电路基底,通过将超薄木材层与纤维素基衬底复合,实现了导电图案的直接构建与电子功能集成,适用于触控、人机交互与柔性传感等场景.此外,欧洲科研机构和企业也围绕木基柔性电路关键技术进行了多项国际专利布局,涵盖了导电图形的喷墨印刷技术、仿生结构构建策略、蜂窝状天然木材的力学增强方法,以及柔性电路与木质材料的复合制造工艺等方向<sup>[142,143]</sup>.这些专利不仅反映了相关技术从实验室研究向工程化与规模化生产的加速推进,也标志着木基电子器件在结构设计、制造工艺及功能集成等方面,正在逐步建立起系统性的知识产权保护体系.这一趋势为未来木基电子技术在绿色电子、智能包装、可降解物联网终端等领域的产业化应用奠定了坚实的技术与政策基础.

面向未来,随着物联网(Internet of Things, IoT)、人工智能(Artificial Intelligence, AI)及软体机器人等新兴技术的发展,木基电子系统将不仅局限于材料替代与

结构仿生,更有望演进而具备智能感知、边缘计算与自供电能力的绿色信息系统.例如,构建集成木基能量收集、环境传感与低功耗通信的自供能森林火灾监测微系统,可实现对生态区域的实时监控与智能预警;融合木基柔性传感器与AI辅助分析算法的可穿戴健康监测平台,亦有望在个体健康管理及生物医学研究中发挥重要作用.尽管近年来取得了显著进展,但要实现其规模化、智能化及产业化应用,仍面临诸多挑战与发展空间,如图9所示.

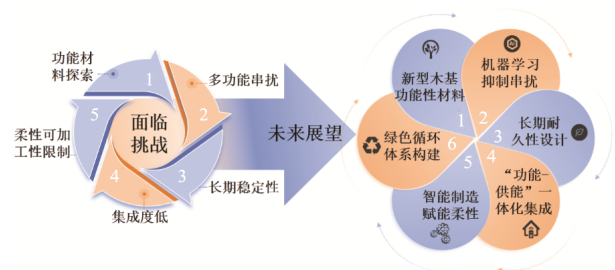


图9 木基电子器件及微系统现阶段面临的挑战及未来发展方向

首先,在材料层面,天然木材本身不具备导电性,需依赖功能材料(如碳纳米管、MXene、导电聚合物等)修饰,但功能材料的分布均匀性、黏附牢固性和长期稳定性仍有待提升.而且集成多种感应功能(如压力、湿度、温度、气体等)需要将多种材料或功能模块集成于同一木质结构中,但易出现性能干扰、稳定性下降等问题.结合机器学习人工智能技术,提取特征向量,可抑制不同信号之间的串扰.其次,在器件结构设计方面,如何充分利用木材的天然各向异性和三维多孔网络结

构,实现对复杂多维信号(如温度、湿度、压力、气体、生物信号等)的高效协同感知与处理,是未来发展的重要方向.同时,要考虑到木材的湿度高度敏感特性,易发生膨胀或变形,可能影响器件的电学和机械性能,因此增强器件的环境适应能力是提高长期稳定性的关键.系统集成与智能化是推动木基电子微系统实际应用的必要措施.然而,目前木基微系统仍面临集成度不足、柔性加工受限等问题.为此,结合智能制造技术(如微纳加工、3D打印等),并整合自供能单元(如摩擦纳米发电机、柔性电池)、传感模块、无线通信模块与机器学习等功能模块,有望构建具备数据采集、分析与远程传输

能力的一体化系统.通过这一策略,可加速木基电子微系统在环境监测、健康监测及可穿戴终端等领域的实用化进程,最终推动绿色循环体系的建立与发展.

综上所述,木基电子微系统作为融合天然材料与先进功能电子的交叉前沿领域,具备广阔的发展潜力.随着材料科学、微纳加工技术及多学科融合的不断进步,木基电子有望在新型供能材料、智能制造技术、机器学习技术的加持下,实现“功能-供能”一体化的集成,为实现“碳中和”目标与生态文明建设提供新思路与技术支撑.其未来的发展方向、研究热点、存在问题与挑战归纳如表4所示.

表4 木基电子器件与微系统未来发展趋势、研究热点、存在问题与挑战

发展方向	研究热点	存在问题与挑战
材料功能化	1. 新型功能材料(如碳纳米管、MXene、导电聚合物)与木材基体的复合技术; 2. 功能材料在木材三维多孔结构中的均匀分布、强黏附与长期稳定性控制.	1. 功能材料分布均匀性不足; 2. 多种功能材料集成时易出现性能干扰与稳定性下降; 3. 木材对湿度高度敏感,易发生形变,影响器件电学与机械性能的长期可靠性.
器件结构设计	1. 充分利用木材的各向异性和三维结构,实现多维信号(如温度、湿度、压力、气体、生物信号)协同感知; 2. 开发环境自适应(如抗膨胀、耐形变)的器件结构.	1. 如何将木材的天然结构与复杂信号感知需求高效结合仍需深入探索; 2. 根据所需性能并基于自下而上工艺设计新型器件结构; 3. 增强器件在复杂多变环境下的适应能力和鲁棒性是一大挑战.
系统一体化集成	1. 将自供能单元(如TENG、柔性电池)、传感、通信与机器学习模块一体化集成; 2. 结合微纳加工、3D打印等智能制造技术实现高集成度、柔性化制造.	1. 当前集成度不足; 2. 柔性加工技术仍有局限; 3. 规模化制造难度较大.
新型应用拓展	1. 融合AI与机器学习算法,用于多模态信号处理、特征提取和干扰抑制,提升系统智能; 2. 发展面向森林生态监测、智慧农业、人机交互等应用的“感知-供能-计算”一体化系统.	1. 如何将前沿算法与木基系统的特性深度融合仍需研究; 2. 实现从实验室概念验证到规模化、低成本、高可靠产业应用的跨越面临巨大挑战.

## 6 结束语

本文结合文献分析了木基电子器件及微系统作为绿色电子技术的发展现状.首先介绍了木材经结构改性与功能化处理后的优异性能,如良好的导电性、柔性与环境适应性,为电子应用提供了天然平台.随后围绕典型木基电子器件的设计展开,包括能量采集器件、柔性传感器、木基储能器件等,展示出木基材料在可穿戴电子、环境监测与健康管理的巨大应用潜力.然后进一步探讨了木基电子微系统的构建与应用.通过对不同功能木基器件的有机集成,研究者成功构建了“能量采集-信号感知-数据传输”一体化多功能微系统.这些微系统不仅验证了木基器件的集成兼容性与应用可行性,也为绿色、可持续电子系统的实用化铺平了道路.最后对木基电子器件及微系统的发展现状及存在的挑战进行了总结与展望.

总而言之,在材料层面,通过去木质素、化学修饰、

碳化及功能材料复合等手段,研究者显著提升了木材的导电性、柔性、光学透过性及环境适应性,使其在保持天然三维多孔结构与优异力学性能的同时,具备了多维可调控的功能特性,从而成为绿色电子器件的理想基底.在器件层面,基于功能化木材构建的传感器、能量采集器件和储能单元展现出优异的性能,例如在压力、湿度、气体及生理信号检测中表现出高灵敏度和可靠性,在摩擦电、蒸发电与碳化木电极中实现了高效的能量收集与存储.这些成果不仅证明了木基材料在多物理场耦合下的应用潜力,也为低功耗、可穿戴及环境友好型电子系统的构建提供了可能.进一步地,在系统层面,木基电子微系统通过多功能器件的有机集成,实现了“能量采集-信号感知-数据处理与传输”的一体化运行模式,展现出绿色、可降解、自供能和智能化的独特优势,标志着木基电子技术正逐步完成从单一器件研究向系统级应用的跨越.总体来看,木基电子学不仅在材料-器件-系统层面取得了系列突破,也为绿色可

持续电子技术的发展开辟了新路径。未来,随着功能材料的精准修饰、器件多维信号的协同感知以及系统级智能集成的不断推进,木基电子器件及微系统有望在可穿戴医疗、智能物联网及绿色能源等领域实现规模化应用,为实现“碳中和”目标和构建可持续信息社会提供有力支撑。

#### 参考文献

- [1] SHI Q F, DONG B W, HE T, et al. Progress in wearable electronics/photronics: Moving toward the era of artificial intelligence and Internet of Things[J]. *InfoMat*, 2020, 2(6): 1131-1162.
- [2] ZHANG Q, JIN T, CAI J G, et al. Wearable triboelectric sensors enabled gait analysis and waist motion capture for IoT-based smart healthcare applications[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(4): 2103694.
- [3] JIN L, XIAO X, DENG W L, et al. Manipulating relative permittivity for high-performance wearable triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(9): 6404-6411.
- [4] ZHANG Q, XIN C F, SHEN F, et al. Human body IoT systems based on the triboelectrification effect: Energy harvesting, sensing, interfacing and communication[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(9): 3688-3721.
- [5] HAGHI KASHANIM, MADANIPOUR M, NIKRAVAN M, et al. A systematic review of IoT in healthcare: Applications, techniques, and trends[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2021, 192: 103164.
- [6] ZHU H L, LUO W, CIESIELSKI P N, et al. Wood-derived materials for green electronics, biological devices, and energy applications[J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(16): 9305-9374.
- [7] HUI Z Y, ZHANG L R, REN G Z, et al. Green flexible electronics: Natural materials, fabrication, and applications[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(28): e2211202.
- [8] FANG Z Q, ZHANG H L, QIU S Y, et al. Versatile wood cellulose for biodegradable electronics[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(2): 2000928.
- [9] WANG M, LI R N, CHEN G X, et al. Highly stretchable, transparent, and conductive wood fabricated by in situ photopolymerization with polymerizable deep eutectic solvents[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(15): 14313-14321.
- [10] WANG Z X, ZHOU Z J, WANG S J, et al. An anti-freezing and strong wood-derived hydrogel for high-performance electronic skin and wearable sensing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 239: 109954.
- [11] WANG Z G, ZHANG X F, SHU L, et al. MOF-regulated flexible wood carbon aerogel for pressure sensing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 947: 169446.
- [12] SONG L, ZHANG X F, WANG Z G, et al. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/polyvinyl alcohol decorated delignified wood evaporator for continuous solar steam generation[J]. *Desalination*, 2021, 507: 115024.
- [13] CHEN Q H, JIANG Z Y, PEI X X, et al. Bio-inspired, epoxy-based lamellar composites with superior fracture toughness by delignified wood scaffold[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 207: 108739.
- [14] LENGGER S K, NEUMAIER L, HAIDEN L, et al. Laser-induced graphene formation on different wood species: Dependence of electronic performance on intrinsic features of certain types of wood[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2024, 40: e00936.
- [15] DREIMOL C H, GUO H Z, RITTER M, et al. Sustainable wood electronics by iron-catalyzed laser-induced graphitization for large-scale applications[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3680.
- [16] YE R Q, CHYAN Y, ZHANG J B, et al. Laser-induced graphene formation on wood[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(37): 1702211.
- [17] XU Y D, FEI Q H, PAGE M, et al. Laser-induced graphene for bioelectronics and soft actuators[J]. *Nano Research*, 2021, 14(9): 3033-3050.
- [18] HAN X, YE R Q, CHYAN Y, et al. Laser-induced graphene from wood impregnated with metal salts and use in electrocatalysis[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2018, 1(9): 5053-5061.
- [19] DAI Z H, HU C S, WEI Y Y, et al. Highly anisotropic carbonized wood as electronic materials for electromagnetic interference shielding and thermal management[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2023, 9(7): 2300162.
- [20] ZHANG Z M, ZHENG Y R, JIANG N, et al. Electricity generation from water evaporation through highly conductive carbonized wood with abundant hydroxyls[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2022, 6(9): 2249-2255.
- [21] MA X F, PAN J J, GUO H T, et al. Ultrathin wood-derived conductive carbon composite film for electromagnetic shielding and electric heating management[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(16): 2213431.
- [22] OHZAWA Y, MITANI M, LI J L, et al. Structures and electrochemical properties of pyrolytic carbon films infiltrated from gas phase into electro-conductive substrates derived from wood[J]. *Materials Science and Engineering:*

- B, 2004, 113(1): 91-98.
- [23] FARID T, WANG Y Y, RAFIQ M I, et al. Porous flexible wood scaffolds designed for high-performance electrochemical energy storage[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(21): 7078-7090.
- [24] ZHANG W Y, WANG B B, DONG H L, et al. A strong, biodegradable, brush written all-wood-based flexible electronic device[J]. *Cellulose*, 2024, 31(4): 2571-2581.
- [25] LI J Y, LI R J, LENG W Q, et al. A new wood-based fluorescent hydrogel for strain sensing, Fe(III) ions detection and information storage[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 515: 163887.
- [26] YANG R, YANG X Q, QI L H, et al. Adhesive conductive wood-based hydrogel with high tensile strength as a flexible sensor[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 351: 122954.
- [27] MA H S, LIU C Z, YANG Z, et al. Programmable and flexible wood-based origami electronics[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 9272.
- [28] LIU H, QUAN J R, WANG J Y, et al. Low delay flexible paper-based electrode for capacitive sensor filled through carbon-based materials[J]. *Cellulose*, 2023, 30(2): 1225-1244.
- [29] ZHANG W, WANG X Y, WANG D R, et al. MoS<sub>2</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> modified spongy wood with micro-reaction cellulose channels and natural water transfer to enhance tetracycline removal[J]. *Cellulose*, 2022, 29(9): 5079-5101.
- [30] BANG J, MOON I K, JEON Y P, et al. Fully wood-based green triboelectric nanogenerators[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 567: 150806.
- [31] ZHANG C Y, MO J L, FU Q, et al. Wood-cellulose-fiber-based functional materials for triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2021, 81: 105637.
- [32] LIAO J Q, WANG Y Y, SHI S T, et al. Flexible wood-based triboelectric nanogenerator for versatile self-powered sensing[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2023, 38: e00771.
- [33] ZHANG P, DENG L, ZHANG H H, et al. High performance triboelectric nanogenerator based on bamboo fibers with trench structure for self-powered sensing[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 53: 102489.
- [34] SUN J G, GUO H Y, RIBERA J, et al. Sustainable and biodegradable wood sponge piezoelectric nanogenerator for sensing and energy harvesting applications[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(11): 14665-14674.
- [35] GAREMARK J, RITTER M, DREIMOL C, et al. Salt-Induced wood piezoelectric power generators with circular materials design for high-performance sustainable energy harvesting[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(25): 2418454.
- [36] DING Y F, LI S Y, TIAN J W, et al. CNTs/wood composite nanogenerator for producing both steam and electricity[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021, 3(12): 5287-5295.
- [37] WONG M Y, GAUTAM A, LIN K X, et al. Sustainable high-performance density: Nanoporous composite wood for water evaporation-induced electricity generation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 510: 161729.
- [38] LIN Z P, ZHONG H, LUO S Y, et al. Simple and accessible wood-based transpiration generator for energy harvesting[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2025, 8(12): 8169-8180.
- [39] ZHANG W L, LIU R T, HUANG Y M. Development and validation of a capacitor-current circuit model for evaporation-induced electricity[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(2): 664.
- [40] SHAN L, ZHANG Y, XU Y, et al. Wood-based hierarchical porous nitrogen-doped carbon/manganese dioxide composite electrode materials for high-rate supercapacitor[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2023, 6(5): 174.
- [41] YU Y, CHEN W H, WANG X, et al. Self-assembled MXene supported on carbonization-free wood for a symmetrical all-wood eco-supercapacitor[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(28): 36322-36332.
- [42] ZENG H D, ZHANG J, LIN L, et al. Enhanced electrochemical performance of wood derived carbon-based supercapacitor electrodes by freezing and thawing pretreatment salt template method[J]. *Industrial Crops and Products*, 2025, 225: 120546.
- [43] XIONG C Y, ZHENG C M, LI B B, et al. Wood-based micro-spring composite elastic material with excellent electrochemical performance, high elasticity and elastic recovery rate applied in supercapacitors and sensors[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 178: 114565.
- [44] ZHANG R Y, CHEN D B, HUMMELGÅRD M, et al. Engineering triboelectric paper for energy harvesting and smart sensing[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(22): 2416641.
- [45] HUANG F J, YANG P, LIU Z Q, et al. A hybrid nanogenerator for collecting both water wave and steam evaporation energy[J]. *Nano Energy*, 2023, 110: 108346.
- [46] CHEN H, CHEN J Q, MI R Y, et al. Toward recyclable, luminescent transparent wood film via synergistic light responses of lignocellulose and phosphors for plant growth

- lighting and optical thermometer[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(36): 2423874.
- [47] JIA D M, XIE J Y, DIRICAN M, et al. Highly smooth, robust, degradable and cost-effective modified lignin-nanocellulose green composite substrates for flexible and green electronics[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 236: 109803.
- [48] CHEN J, WU J Y, HUANG D F, et al. Eco-friendly color printing using transparent wood paper[J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(10): 2203093.
- [49] SRIYA AMBATI S, AMBATIPUDI R. Effect of infill density and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed PLA parts[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 64: 804-807.
- [50] FU Q L, CHEN Y, SORIEUL M. Wood-based flexible electronics[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 3528-3538.
- [51] KADUMUDI F B, TRIFOL J, JAHANSHAHI M, et al. Flexible and green electronics manufactured by origami folding of nanosilicate-reinforced cellulose paper[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(42): 48027-48039.
- [52] XING T, DONG C Q, HU X Y, et al. Cellulose membranes via a top-down approach from loofah for oil/water separation[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, 14(15): 17167-17175.
- [53] LIANG Y Q, XU J X, AHMED N, et al. Construction of biomass-based flame-retardant, antimicrobial and hydrophobic wood coatings with POSS organic-inorganic nanoparticles[J]. *European Polymer Journal*, 2024, 219: 113370.
- [54] WU X Y, KONG Z Q, YAO X Z, et al. Transparent wood with self-cleaning properties for next-generation smart photovoltaic panels[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 613: 155927.
- [55] ZHANG X L, MA X Y, LI X, et al. Comparative study on properties of different fibers (unmodified/modified) reinforced polylactic acid degradable composites under ultraviolet aging conditions[J]. *Polymer Composites*, 2025, 46(10): 9071-9086.
- [56] HUANG Y, CHEN Y, FAN X Y, et al. Wood derived composites for high sensitivity and wide linear-range pressure sensing[J]. *Small*, 2018: e1801520.
- [57] CHEN C J, ZHANG Y, LI Y J, et al. All-wood, low tortuosity, aqueous, biodegradable supercapacitors with ultra-high capacitance[J]. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10(2): 538-545.
- [58] HAO S F, JIAO J Y, CHEN Y D, et al. Natural wood-based triboelectric nanogenerator as self-powered sensing for smart homes and floors[J]. *Nano Energy*, 2020, 75: 104957.
- [59] ZHOU X B, ZHANG W L, ZHANG C L, et al. Harvesting electricity from water evaporation through microchannels of natural wood[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(9): 11232-11239.
- [60] JIANG F, LI T, LI Y J, et al. Wood-based nanotechnologies toward sustainability[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(1): 1703453.
- [61] CHEN C J, KUANG Y D, ZHU S Z, et al. Structure-property-function relationships of natural and engineered wood[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(9): 642-666.
- [62] LI J G, CHEN C J, ZHU J Y, et al. In situ wood delignification toward sustainable applications[J]. *Accounts of Materials Research*, 2021, 2(8): 606-620.
- [63] JIANG B, CHEN C J, LIANG Z Q, et al. Lignin as a wood-inspired binder enabled strong, water stable, and biodegradable paper for plastic replacement[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(4): 1906307.
- [64] JAKOB M, MAHENDRAN A R, GINDL-ALTMUTTER W, et al. The strength and stiffness of oriented wood and cellulose-fibre materials: A review[J]. *Progress in Materials Science*, 2022, 125: 100916.
- [65] SEDDIQI H, OLIAEI E, HONARKAR H, et al. Cellulose and its derivatives: Towards biomedical applications[J]. *Cellulose*, 2021, 28(4): 1893-1931.
- [66] RAO J, LV Z W, CHEN G G, et al. Hemicellulose: Structure, chemical modification, and application[J]. *Progress in Polymer Science*, 2023, 140: 101675.
- [67] WERNER K, POMMER L, BROSTRÖM M. Thermal decomposition of hemicelluloses[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, 110: 130-137.
- [68] HUANG C X, PENG Z W, LI J J, et al. Unlocking the role of lignin for preparing the lignin-based wood adhesive: A review[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 187: 115388.
- [69] TRIBOT A, AMER G, ABDOU ALIO M, et al. Wood-lignin: Supply, extraction processes and use as bio-based material[J]. *European Polymer Journal*, 2019, 112: 228-240.
- [70] YANG G X, GONG Z G, LUO X L, et al. Bonding wood with uncondensed lignins as adhesives[J]. *Nature*, 2023, 621(7979): 511-515.
- [71] SHI X, LUO J J, LUO J Z, et al. Flexible wood-based triboelectric self-powered smart home system[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(2): 3341-3350.
- [72] ZHU M W, JIA C, WANG Y L, et al. Isotropic paper di-

- rectly from anisotropic wood: Top-down green transparent substrate toward biodegradable electronics[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(34): 28566-28571.
- [73] LI H Y, GUO X L, HE Y M, et al. A green steam-modified delignification method to prepare low-lignin delignified wood for thick, large highly transparent wood composites[J]. *Journal of Materials Research*, 2019, 34(6): 932-940.
- [74] SONG J W, CHEN C J, WANG C W, et al. Superflexible wood[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(28): 23520-23527.
- [75] LIANG C B, QIU H, SONG P, et al. Ultra-light MXene aerogel/wood-derived porous carbon composites with wall-like "mortar/brick" structures for electromagnetic interference shielding[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(8): 616-622.
- [76] CAI C Y, WEI Z C, HUANG Y Z, et al. Wood-inspired superelastic MXene aerogels with superior photothermal conversion and durable superhydrophobicity for clean-up of super-viscous crude oil[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 421: 127772.
- [77] SUN M, YANG H Y, WANG X, et al. Wood-inspired anisotropic PU/chitosan/MXene aerogel used as an enhanced solar evaporator with superior salt-resistance[J]. *Desalination*, 2023, 555: 116462.
- [78] SALLAJ, PANDEY K K, SRINIVASK. Improvement of UV resistance of wood surfaces by using ZnO nanoparticles[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2012, 97(4): 592-596.
- [79] ZHANG Z, BESSERER A, ROSE C, et al. Microwave-assisted synthesis of Pd nanoparticles into wood block (Pd@wood) as efficient catalyst for 4-nitrophenol and Cr(VI) reduction[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(17): 2491.
- [80] XU K, JIAO Y, LI J, et al. FeP nanoparticle embedded in N, P-doped 3D porous wood-derived carbon aerogel for oxygen reduction reaction[J]. *Carbon*, 2024, 228: 119408.
- [81] BETLEJ I, ANDRES B, BORYSIK S, et al. Graphene oxide as a factor modifying the properties of wood[J]. *Coatings*, 2024, 14(3): 321.
- [82] BETLEJ I, SKRZECZANOWSKI W, NASIŁOWSKA B, et al. Application of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) as an attempt to determine graphene oxide incorporation on wood surfaces[J]. *Coatings*, 2025, 15(1): 34.
- [83] LIU K K, JIANG Q S, TADEPALLI S, et al. Wood-graphene oxide composite for highly efficient solar steam generation and desalination[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(8): 7675-7681.
- [84] SONG J W, CHEN C J, ZHU S Z, et al. Processing bulk natural wood into a high-performance structural material[J]. *Nature*, 2018, 554(7691): 224-228.
- [85] ZHOU Y, ZENG G D, ZHANG F D, et al. Design of tough, strong and recyclable plant protein-based adhesive via dynamic covalent crosslinking chemistry[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 460: 141774.
- [86] SONG J X, CHEN S, ZHANG Q Y, et al. Developing on the well performance and eco-friendly sucrose-based wood adhesive[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 194: 116298.
- [87] GUAN H, CHENG Z Y, WANG X Q. Highly compressible wood sponges with a spring-like lamellar structure as effective and reusable oil absorbents[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(10): 10365-10373.
- [88] YI L F, YANG J Y, FANG X, et al. Facile fabrication of wood-inspired aerogel from chitosan for efficient removal of oil from Water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 385: 121507.
- [89] WANG F, LEE J, CHEN L, et al. Inspired by wood: Thick electrodes for supercapacitors[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(10): 8866-8898.
- [90] XU W L, XIN B J, YANG X. Carbonization of electropun polyacrylonitrile (PAN)/cellulose nanofibril (CNF) hybrid membranes and its mechanism[J]. *Cellulose*, 2020, 27(7): 3789-3804.
- [91] HUANG W, LI H Q, ZHENG L Z, et al. Superhydrophobic and high-performance wood-based piezoresistive pressure sensors for detecting human motions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426: 130837.
- [92] LUO J J, LIU F H, YIN A, et al. Highly sensitive, wide-pressure and low-frequency characterized pressure sensor based on piezoresistive-piezoelectric coupling effects in porous wood[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 315: 120983.
- [93] WANG Y, HOU S J, LI T Y, et al. Flexible capacitive humidity sensors based on ionic conductive wood-derived cellulose nanopapers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(37): 41896-41904.
- [94] CHEN Y J, LIU C Z, LIANG Z L, et al. Hydrochromic wood biocomposites for humidity and moisture detection[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 465: 142890.
- [95] GAO L K, GAN W T, CAO G L, et al. Fabrication of biomass-derived C-doped Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> templated from wood fibers and its excellent sensing of the gases containing carbonyl groups[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 529: 487-494.
- [96] CAI C C, MO J L, LU Y X, et al. Integration of a porous wood-based triboelectric nanogenerator and gas sensor for

- real-time wireless food-quality assessment[J]. *Nano Energy*, 2021, 83: 105833.
- [97] ZHANG H N, ZHANG Q C, LIANG J, et al. Pressure and temperature dual-parameter sensor based on natural wood for portable health-monitoring devices[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(45): 16194-16204.
- [98] WANG N, LIU S K, SHEN L, et al. Low hysteresis and high sensitivity TPU/carbonized wood cellulose sponge sensors for monitoring dynamic pulses[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 300: 140278.
- [99] GUAN H, MENG J W, CHENG Z Y, et al. Processing natural wood into a high-performance flexible pressure sensor[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(41): 46357-46365.
- [100] XU H Y, XIE Y Y, ZHU E W, et al. Supertough and ultrasensitive flexible electronic skin based on nanocellulose/sulfonated carbon nanotube hydrogel films[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(13): 6311-6318.
- [101] QU C K, LU M L, ZHANG Z Y, et al. Flexible microstructured capacitive pressure sensors using laser engraving and graphitization from natural wood[J]. *Molecules*, 2023, 28(14): 5339.
- [102] NIE K C, WANG Z S, ZHOU H, et al. Improved dielectricity of anisotropic wood slices and bioinspired micropatterned film electrodes for highly sensitive flexible electronic sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(45): 16113-16120.
- [103] DONG Y, PAN N N, ZHU M H, et al. An anti-swelling, strong and flexible wood-based composite hydrogel as strain sensor[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 187: 115491.
- [104] KOCOGLU O B, PRETSCHUH C, UNTERWEGER C, et al. Development of electrically conductive wood-based panels for sensor applications[J]. *Polymers*, 2024, 16(21): 3026.
- [105] LIU X Y, HU Y, WANG Q X, et al. Top-down approach making anisotropic, stable and flexible wood-based ionogels for wearable sensors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 487: 150472.
- [106] CHEN Y L, LI D Q, XU Y L, et al. Surface-microstructured cellulose films toward sensitive pressure sensors and efficient triboelectric nanogenerators[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 208: 324-332.
- [107] CHEN Z H, ZHUO H, HU Y J, et al. Wood-derived lightweight and elastic carbon aerogel for pressure sensing and energy storage[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(17): 1910292.
- [108] CHEN S, CHEN Y L, LI D Q, et al. Flexible and sensitivity-adjustable pressure sensors based on carbonized bacterial nanocellulose/wood-derived cellulose nanofibril composite aerogels[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(7): 8754-8763.
- [109] TENG Y C, ZHANG Z L, CUI Y Q, et al. High-sensitivity and flexible motion sensing enabled by robust, self-healing wood-based anisotropic hydrogel composites[J]. *Small*, 2025, 21(11): 2500944.
- [110] MENG X Z, ZHOU J, JIN X, et al. High-strength, high-swelling-resistant, high-sensitivity hydrogel sensor prepared with wood that retains lignin[J]. *Biomacromolecules*, 2024, 25(3): 1696-1708.
- [111] ZHENG H, ZENG X, WANG Y F, et al. Nanogenerator based self-powered motion monitoring for flapping wings of bio-inspired flying robots[J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 123(7): 074101.
- [112] LI X W, ZENG X, LI J W, et al. Biomechanical energy harvesting technologies for wearable electronics: Theories and devices[J]. *Friction*, 2024, 12(8): 1655-1679.
- [113] ZHOU Y K, SHEN M L, CUI X, et al. Triboelectric nanogenerator based self-powered sensor for artificial intelligence[J]. *Nano Energy*, 2021, 84: 105887.
- [114] ANTONY L, GIURI A, MASTRIA R, et al. Untreated natural wood-based triboelectric nanogenerator for floor charge energy harvesting[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2025, 9(1): 2400493.
- [115] MA W C, LIN Y, HUANG C X, et al. Fully wood-based high-performance triboelectric nanogenerator for smart home[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2024, 7(4): 126.
- [116] CHENG T, ZHANG H Q, CAO K L, et al. First development of transparent wood-based triboelectric nanogenerator (TW-TENG): Cooperative incorporation of transparency, aesthetic of wood, and superior triboelectric properties[J]. *Nano Energy*, 2024, 128: 109888.
- [117] PENG J, ZHANG H L, ZHENG Q F, et al. A composite generator film impregnated with cellulose nanocrystals for enhanced triboelectric performance[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(4): 1428-1433.
- [118] SHI K M, HUANG X Y, SUN B, et al. Cellulose/BaTiO<sub>3</sub> aerogel paper based flexible piezoelectric nanogenerators and the electric coupling with triboelectricity[J]. *Nano Energy*, 2019, 57: 450-458.
- [119] LUO J J, WANG Z M, XU L, et al. Flexible and durable wood-based triboelectric nanogenerators for self-pow-

- ered sensing in athletic big data analytics[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5147.
- [120] YAO L Q, ZHOU Z, ZHANG Z, et al. Dyeing-inspired sustainable and low-cost modified cellulose-based TENG for energy harvesting and sensing[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(12): 3909-3919.
- [121] ZENG X, LIU X T, SUN Z N, et al. Investigation of ionic and electronic mechanisms of nanogenerators based on multifunctional wood[J]. *Science China Technological Sciences*, 2025, 68(6): 1620101.
- [122] BA Y Y, BAO J F, DENG H T, et al. Single-layer triboelectric nanogenerators based on ion-doped natural nanofibrils[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(38): 42859-42867.
- [123] ZHANG Y, ZHANG Z J, PENG W Q, et al. Bionic wood-inspired structure enables aerogel film triboelectric material with humidity adaptation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 497: 154906.
- [124] YUN T G, BAE J, ROTHSCCHILD A, et al. Transpiration driven electrokinetic power generator[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(11): 12703-12709.
- [125] SINHA R K. *Modern Plant Physiology*[M]. Pangbourne: Alpha Science, 2004, 128-135.
- [126] HUANG Y X, CHENG H H, QU L T. Emerging materials for water-enabled electricity generation[J]. *ACS Materials Letters*, 2021, 3(2): 193-209.
- [127] XUE G B, XU Y, DING T P, et al. Water-evaporation-induced electricity with nanostructured carbon materials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(4): 317-321.
- [128] LIN J Y, ZHANG Z, LIN X M, et al. All wood-based water evaporation-induced electricity generator[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(30): 2314231.
- [129] ZHANG M, SHIL, DU X L, et al. Janus mesoporous wood-based membrane for simultaneous oil/water separation, aromatic dyes removal, and seawater desalination[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 188: 115643.
- [130] ZHU M W, LI Y J, CHEN F J, et al. Plasmonic wood for high-efficiency solar steam generation[J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(4): 1701028.
- [131] LI H T, LI X, LI X M, et al. Utilizing sugarcane as green transpiration-driven generator for efficient electricity harvesting from seawater[J]. *Nano Energy*, 2022, 99: 107378.
- [132] LIU Z, WU H R, LI Y, et al. Redox active coating on graphite surface of hierarchically porous wood electrodes for supercapacitor application[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 24: 101045.
- [133] VOLPERTS A, DOBELE G, ZHURINSH A, et al. Supercapacitor electrodes from activated wood charcoal[J]. *Bulgarian Chemical Communications*, 2016, 48: 337-341.
- [134] CAO J M, LIN L, ZHANG J, et al. Biological treatment as a green approach for enhancing electrochemical performance of wood derived carbon based supercapacitor electrodes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 422: 138659.
- [135] ZHANG S, WU C L, WU W, et al. High performance flexible supercapacitors based on porous wood carbon slices derived from Chinese fir wood scraps[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 424: 1-7.
- [136] SHEN F, LUO W, DAI J Q, et al. Ultra-thick, low-tortuosity, and mesoporous wood carbon anode for high-performance sodium-ion batteries[J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6(14): 1600377.
- [137] LU L L, LU Y Y, XIAO Z J, et al. Wood-inspired high-performance ultrathick bulk battery electrodes[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(20): 1706745.
- [138] CHEN C J, ZHANG Y, LI Y J, et al. Highly conductive, lightweight, low-tortuosity carbon frameworks as ultrathick 3D current collectors[J]. *Advanced Energy Materials*, 2017, 7(17): 1700595.
- [139] 刘勃豪, 谢光忠, 段再华, 等. 一体化摩擦电自供能气湿传感器研究进展[J]. *电子学报*, 2024, 52(2): 660-677.
- LIU B H, XIE G Z, DUAN Z H, et al. Research progress on integrated triboelectric self-powered gas and humidity sensors[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(2): 660-677. (in Chinese)
- [140] KASUGA T, YAGYU H, UETANI K, et al. "Return to the soil" nanopaper sensor device for hyperdense sensor networks[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(46): 43488-43493.
- [141] SONG D K, ZENG M J, MIN P, et al. Electrically conductive and highly compressible anisotropic MXene-wood sponges for multifunctional and integrated wearable devices[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 144: 102-110.
- [142] 许艺瀚, 田永波, 张扬刚, 等. 基于学习的能量采集认知 M2M 通信资源分配算法[J]. *电子学报*, 2023, 51(2): 467-476.
- XU Y H, TIAN Y B, ZHANG Y G, et al. A learning-inspired resource allocation for energy harvesting-powered cognitive M2M communications[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(2): 467-476. (in Chinese)
- [143] ZHANG H L, LI J H, LIU D, et al. Heterogeneously integrated flexible microwave amplifiers on a cellulose nanofibril substrate[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3118.

## 作者简介



曾 绪 女,2000年5月出生于河南省南阳市.现为电子科技大学集成电路科学与工程学院博士研究生.主要研究方向为木基电子器件及集成微系统.

E-mail: zengxu\_uestc@163.com



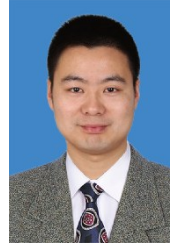
张 翼 男,1984年5月出生于四川省成都市.现为电子科技大学集成电路科学与工程学院教授、博士生导师.主要研究方向为增材制造.

E-mail: yi\_zhang@uestc.edu.cn



黄睿来 男,2000年8月出生于四川省广元市.现为电子科技大学集成电路科学与工程学院博士研究生.主要研究方向为印刷电子器件.

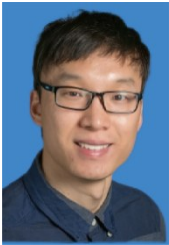
E-mail: 202511311141@std.uestc.edu.cn



张晓升 男,1984年10月出生于安徽省宿州市.现为电子科技大学集成电路科学与工程学院教授、博士生导师.主要研究方向为智能微纳电路与微系统集成.中国电子学会会员编号:

E190014289S.

E-mail: zhangxs@uestc.edu.cn



涂 程 男,1985年11月出生于湖南省株洲市.现为电子科技大学集成电路科学与工程学院副教授.主要研究方向为微机电系统.

E-mail: ctu@uestc.edu.cn