

柔性可穿戴电子设备 材料的导电测试



柔性可穿戴电子设备的重点测试

柔性可穿戴电子设备主要由柔性压阻传感器材料、柔性传感器框架、电极连接、信号采集和处理电路组成。其中最重要的部分就是对柔性压阻传感器材料的测试，对于用于制造压阻式传感器的材料，需要全面评估其电学、机械、动态响应和环境稳定性等多方面性能指标，以确保材料能够满足实际应用的需求。

对于柔性材料，其中电学需要测试其导电性能，测试材料的电导率和电阻率，和材料中导电填料的分散性和接触性能，材料的电导率和电阻率决定了传感器的基本电学特性，影响传感器的灵敏度和响应速度，导电填料的分散性和接触性能决定了材料的整体导电性能。

对于柔性设备，还需要循环测试材料在不同弯曲程度下的输出电压，查看其结果是否为一个稳定值，以此来评价其是否稳定。

柔性可穿戴电子设备的测试方案

Keithley 吉时利提供静电计用于精确的高电阻和低电流测量。5 位半 6514 型和 6517B 型静电计提供 1fA 灵敏度、>200TΩ 电压测量输入阻抗和低至 10fC 的电荷测量。其低噪声和漂移性能使其成为研究柔性材料及其设备应用测试的理想选择。

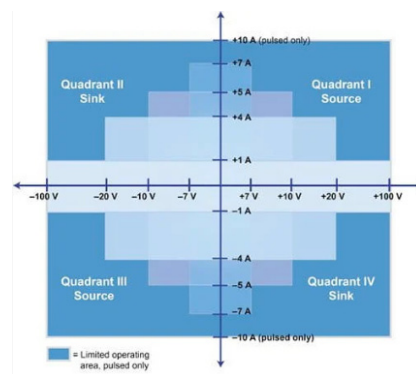
双通道 2182A 型纳米电压表经过优化，可进行稳定、低噪声的 nA 级别电压测量，并可靠、可重复地表征低电阻材料和器件。与其他低压测量解决方案相比，它提供更高的测量速度和明显更好的噪声性能。它提供简化的 delta 模式，可用于与反向电流源（如 6220 或 6221 型）结合进行电阻测量。

6220 型直流电流源和 6221 型交流直流电流源兼具易用性和极低电流噪声的特点。低电流源对于从研发到

生产的测试环境中的应用至关重要。6220 和 6221 型具有高源精度和内置控制功能，非常适合霍尔测量、使用增量模式的电阻测量、脉冲测量和差分电导测量等应用。

SMU 源表系列从 2400 到 2600 系列具有高精度 10nV 电压 0.1fA 电流测试，具备分析仪、曲线追踪仪和 I-V 系统功能，成本更低。它提供高度灵活的 4 象限电压和电流源 / 载荷，以及精密的电压和电流仪器。这个一体化仪器可以用作：精密电源，具有电压和电流回读功能；真正电流源；数字多用表、测量直流电压、电流、电阻和功率，分辨率 6½ 数位；精密电子载荷；触发控制器。

Tektronix 吉时利作为小信号领域的测试专家，提供丰富的产品助力柔性可穿戴电子设备的研究。



热门应用案例

案例一：基于天然橡胶的软质可穿戴压阻式传感器采用定制的增材制造工艺^[1]

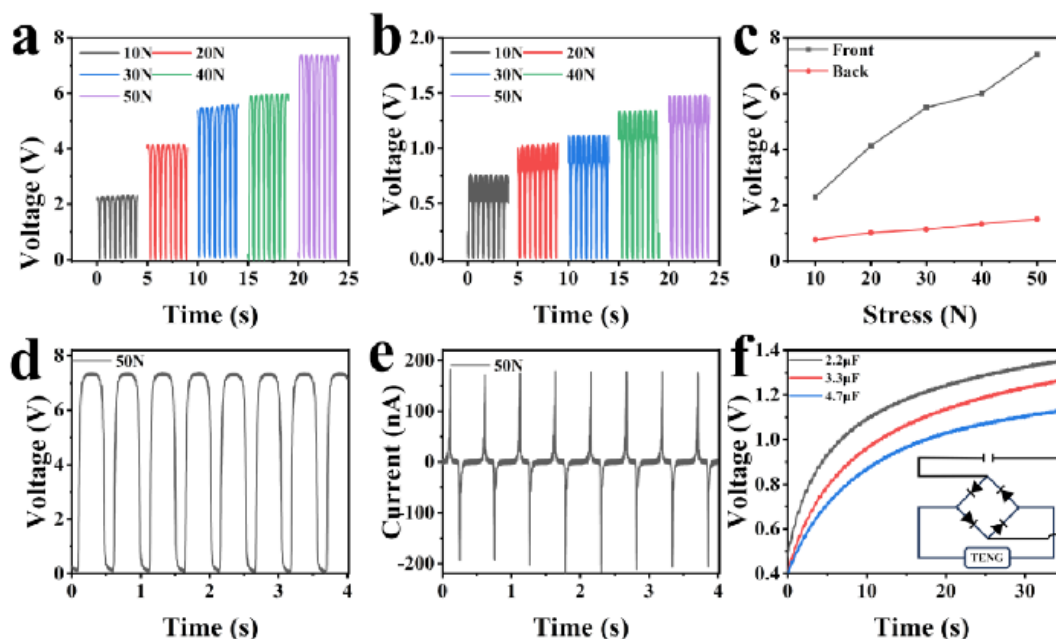
本案例基于天然橡胶制造的软质可穿戴压阻传感器，采用定制的基于浸渍的增材制造工艺进行制造。该研究强调了压阻传感器在监测人体运动以预防和治疗伤害方面的重要性。通过将天然橡胶与乙炔黑相结合，并利用基于立体光刻的增材制造，传感器能够成功检测到微小应变。该研究比较了模具铸造和增材制造生产的传感器，结果显示后者提供了更均匀的导电填料分布。这些传感器表现出良好的灵敏度、广泛的检测范围和灵活性，使其适用于监测人体关节运动。使用可再生材料天然橡胶以及增材制造工艺，可以拓展软性柔性电子在生物医学设备中的应用。



在动态拉伸实验中，研究人员使用 Keithley 2450 源表 测量了电阻的变化。在准静态拉伸实验中，同样使用了 Keithley 2450 源表测量了电信号响应。此外，在手指运动监测实验中，研究人员将传感器条件在 3D 打印的柔性 TPU 原型上，并测量了手指弯曲和伸展时的电信号响应。

案例二：用于可穿戴、自供电 TENG 的鱼鳞^[2]

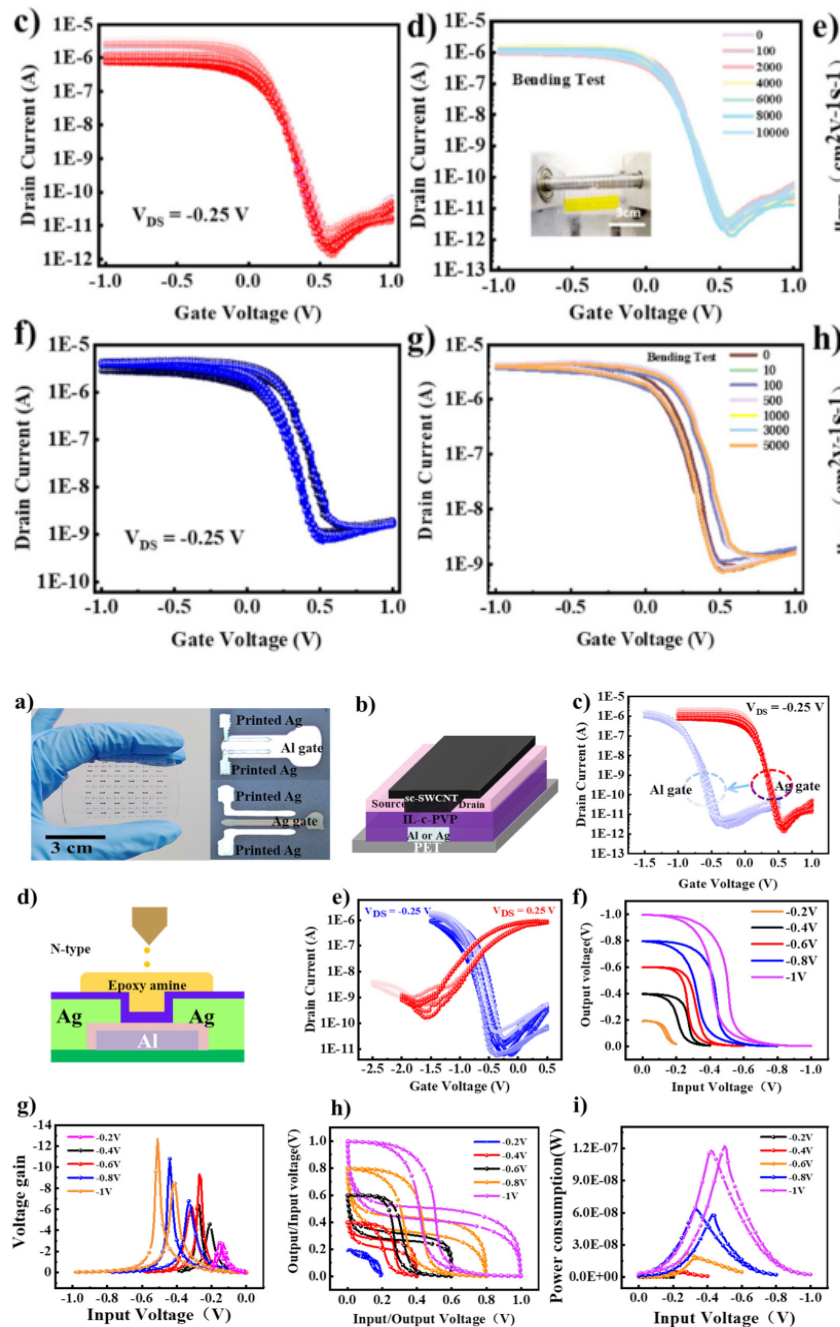
本案例是一项基于鱼鳞的自供电三摩擦纳米发电机 (TENG) 的研究。鱼鳞是一种生物质材料,具有良好的生物相容性,使 TENG 成为一种灵活、可穿戴和自供电的设备,在医疗保健和身体信息监测应用中具有巨大潜力。该研究突出了使用天然和可降解材料鱼鳞开发自供电 TENG 的优势,解决了某些基于聚合物的可穿戴设备产生的电子垃圾问题。



本案例使用 Keithley 6517B 静电计测量了鱼鳞 TENG 在不同压力下的输出电压特性,以及鱼鳞 TENG 在恒定压力下的输出电压和电流稳定性,在 50 N 恒定压力下,TENG 的输出电流保持稳定,约为 0.18 μ A。这一项测试需要测试仪器具有很高的电流分辨率以及极低的仪器底噪,才能测到这极小的稳定值。

案例三：用于柔性碳基电子产品的大面积卷对卷印刷半导体碳纳米管薄膜^[3]

本案例介绍了一种通用的卷对卷 (R2R) 印刷方法, 用于在柔性基底 (如聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)、纸和铝箔) 上制造大面积 ($8\text{ cm} \times 14\text{ cm}$) 半导体单壁碳纳米管 (sc-SWCNT) 薄膜。采用高浓度的 sc-SWCNT 墨水和交联聚-4-乙烯基酚 (c-PVP) 作为粘附层制备 sc-SWCNT 薄膜。基于 sc-SWCNT 薄膜制造的 p 型薄膜晶体管 (TFTs) 具有优异的电学性能, 包括高载流子迁移率、高开关比、小迟滞和小亚阈值摆幅, 工作电压低。

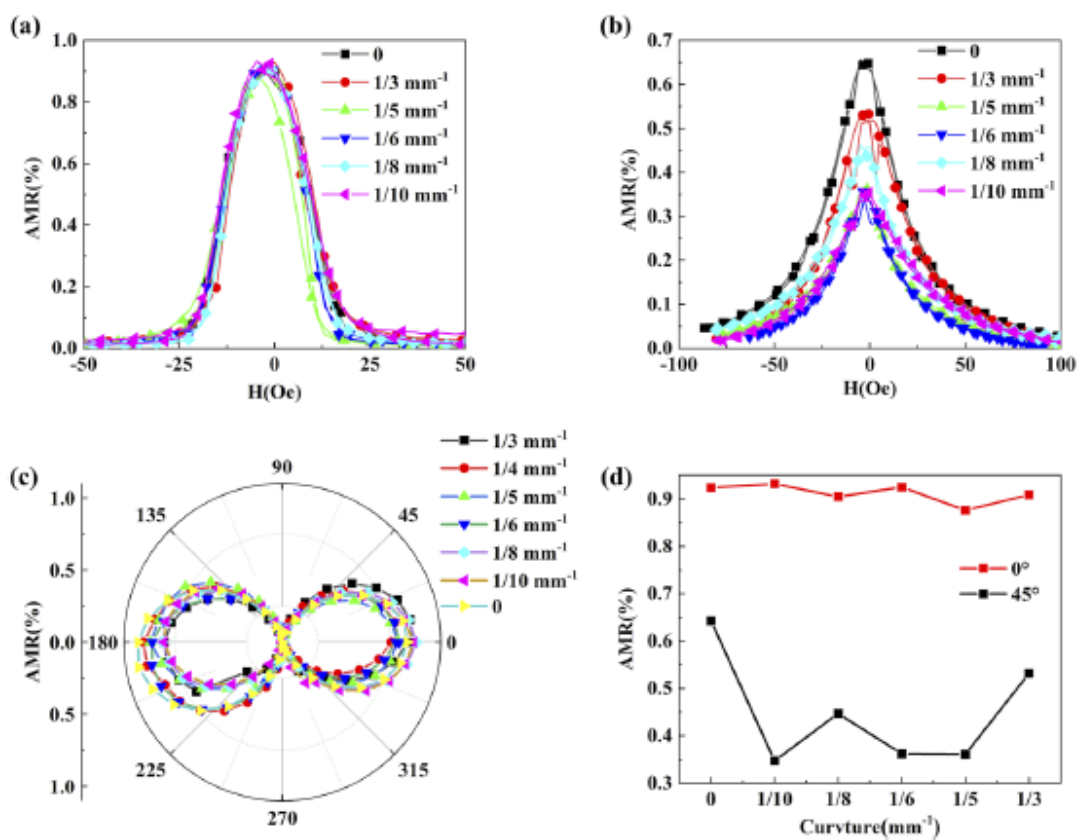


本案例通过使用 Keithley 2636B 和 Keithley 4200 分析仪在空气中进行了 SWCNT TFT 和 CMOS 反相器的所有电气测量, 偏压 (V_{DS}) 为 -0.25 V (或 0.25 V), 扫描步长为 -0.01 V (或 0.01 V)。使用上述仪器来测量制备的 SWCNT 薄膜晶体管的电学特性, 如载流子迁移率、开关比、迟滞和亚阈值摆幅等, 来评估材料在柔性电子器件中的应用潜力。

案例四：高柔性各向异性磁阻传感器，用于可穿戴电子产品^[4]

本案例介绍了一种用于可穿戴电子设备的高度柔性各向异性磁阻 (AMR) 传感器的研究。研究人员在 Kapton 基板上沉积磁性金属层，开发了一种柔性 AMR 传感器。该传感器表现出优异的抗疲劳性能，即使经过 500 次弯曲循环，其灵敏度仍保持在 0.25 Oe^{-1} 。该传感器在不同弯曲曲率 (从 $1/3$ 到 $1/10 \text{ mm}^{-1}$) 下表现出稳定的磁阻性能。该传感器在平坦状态下具有约 1% 的 AMR 比和 0.25 Oe^{-1} 的灵敏度，展示了其在可穿戴电子应用中的潜力。

本文使用 Keithley 6221 提供了 $10 \mu\text{A}$ 的直流电流，通过两个电极 "I+" 和 "I-" 沿着易轴方向传递电流。使用 Keithley 2182A 则连接到另外两个电极 "U+" 和 "U-"，用于测量由于外部磁场作用而产生的电压变化。这样可以得到 AMR 比率。



柔性可穿戴电子设备的基础知识部分：

什么是柔性可穿戴电子设备？

柔性可穿戴电子设备是一种具有柔性结构和可穿戴特性的电子设备。它采用柔性材料作为基底，通过灵活电子组件和连接方式，可以贴合在人体表面，如手腕、头部、衣物等，实现与人体的紧密结合和自由移动。这种器件可以用于监测和追踪身体健康数据、提供实时反馈和控制、实现可穿戴显示等功能。柔性可穿戴电子器件正逐渐应用于医疗、健身、时尚和娱乐等领域，具有更加舒适、便携、个性化的特点。

柔性可穿戴电子设备的特点？

柔性可穿戴设备采用柔性材料和结构设计，如柔性压阻传感器、柔性电路和互连、柔性外壳等，使得整体设备具有良好的柔韧性和贴合性。设备通常采用纳米材料，如金属纳米颗粒、碳纳米管等，使得其具有高灵敏度和高分辨率的特点，能够提高传感器的灵敏度和分辨率，实现对微小压力变化的精确检测。并且它具有出色的抗振动、抗冲击和抗动态压力变化的性能，能够承受各种机械应力，保证长期稳定工作。柔性可穿戴设备通常采用低功耗设计，并集成能量收集和存储模块，为设备提供持续的电力供给，满足可穿戴应用的需求。柔性可穿戴设备可用于健康监测、人机交互、运动监测等多个领域，具有广泛的应用前景。

柔性可穿戴电子设备的常见应用？

柔性可穿戴设备可用于健康监测、人机交互、运动监测等多个领域，具有广泛的应用前景。

在医疗方面，柔性可穿戴电子设备可以用于监测用户的健康状况，如心率、血压、血氧等指标的监测。这些设备可以通过传感器和智能算法实时监测用户的健康数据，并提供相应的反馈和建议。

在运动方面，柔性可穿戴电子设备可以用于追踪用户的运动数据，如步数、运动距离、消耗的卡路里等。这些设备可以帮助用户了解自己的运动状况，并提供个性化的运动建议。它也可以用于制造智能手表，可以显示时间、接收来电、短信等通知，还可以提供计时、闹钟、天气预报等功能。并且还可以用作智能衣服，将柔性可穿戴电子设备嵌入到衣物中，实现智能化的功能。例如，智能衣服可以通过传感器监测用户的姿势和身体活动，用于运动训练或者健康状况的监测。还可以用于制造智能眼镜，可以显示信息、导航、拍照等功能。这些设备可以帮助用户更方便地获取信息，并提供增强现实等体验。

- [1] Ploymers, Antonia Georgopoulou , Sasitorn Srisawadi, Panithi Wiroonpochit and Frank Clemens, Soft Wearable Piezoresistive Sensors Based on Natural Rubber Fabricated with a Customized Vat-Based Additive Manufacturing Process, 2023,15,2410
- [2] Liwei Zhao, Jin Han, Xing Zhang and Chunchang Wan, Fish Scale for Wearable, Self-Powered TENG;
- [3] Jiaqi Li,a,b,c Min Li,b,c Zhaofeng Chen,c Shuang shuang Shao,b,c Weibing Gu, Ying Gu,a,b,c Yuxiao Fang*b,c and Jianwen Zhao; Large area roll-to-roll printed semiconducting carbon nanotube thin films for flexible carbonbased electronics; Nanoscale, 2023, 15, 5317
- [4] Yanning Chen; Dongyan Zhao; Jin Shao; Zhen Fu ; Chenying Wang ; Shuaipeng Wang; Jian Du;Mingchen Zhong; Junbao Duan; Yang Li; Zhongqiang Hu, Highly flexible anisotropic magnetoresistance sensor for wearable electronics, Instrum. 94, 045005 (2023)

