

碳纳米管薄膜器件的电学表征测试

碳纳米管薄膜器件的重点测试

碳纳米管薄膜是一种新兴的二维纳米材料，具有优异的力学、电学和热学性能，在柔性电子器件、能源存储等领域有着广阔的应用前景。

碳纳米管薄膜的材料特性：

- **导电性：**碳纳米管薄膜具有优异的电导率，可用于制备导电膜或电子器件。
- **透明性：**在可见光范围内具有良好的透明性，可用于制备透明电子器件，如触摸屏和智能窗户。
- **柔韧性：**具有较高的柔韧性和弹性，可用于制备柔性电子器件。
- **热传导性：**具有良好的热传导性能，可用于散热和热管理应用。
- **机械性能：**具有较高的机械强度和韧性，可用于增强材料的机械性能。

同时也因为碳纳米管的以上特性，产生了电学表征测试难点：

- 物性调控中电流变化范围大，可达 8~9 个数量级，最低电流测试亚皮安级；
- 碳纳米管器件通常具有极高电导率，测试中极易引入接触电阻误差，需要四线法并高效自动化的完成测试，减小人为干预。

碳纳米管薄膜器件的测试解决方案

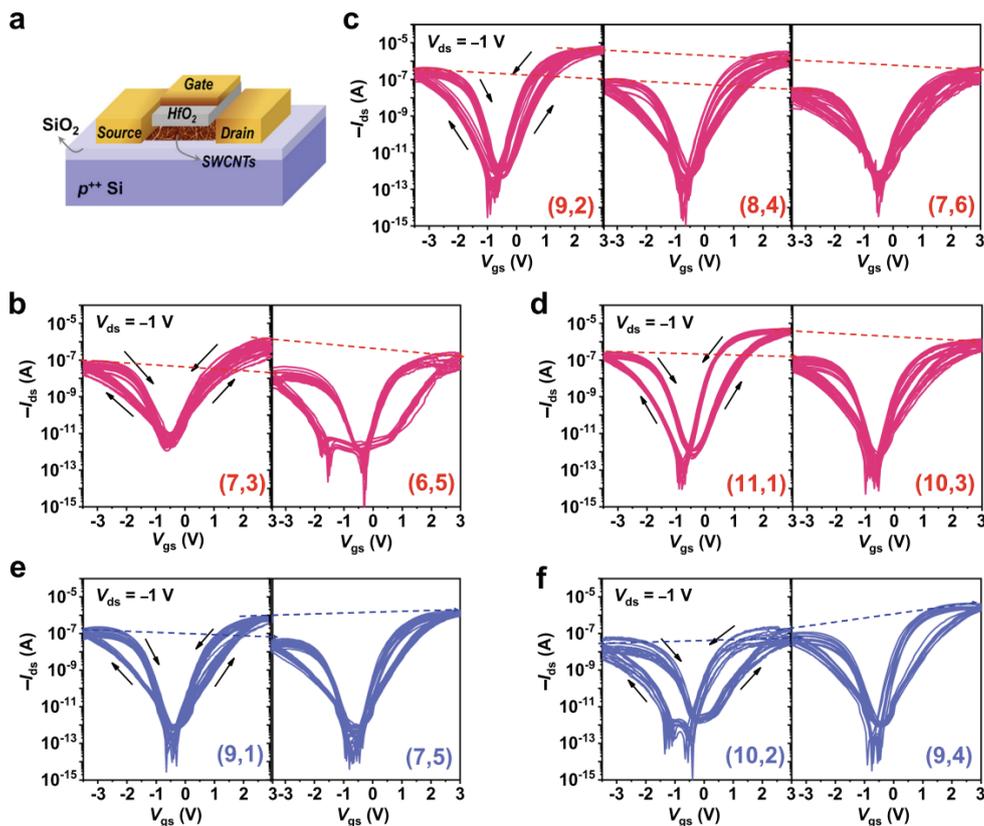
Keithley 吉时利提供 SMU 源表系列从 2400 到 2600 系列具有高精度 10nV 电压 0.1fA 电流测试，具备分析仪、曲线追踪仪和 I-V 系统功能，成本更低。它提供高度灵活的 4 象限电压和电流源 / 载荷，以及精密的电压和电流仪器。这个一体化仪器可以用作：精密电源，具有电压和电流回读功能；真正电流源；数字多用表、测量直流电压、电流、电阻和功率，分辨率 6½ 数位；精密电子载荷；触发控制器。

Keithley 吉时利 4200A-SCS 参数分析仪可以进行精确的电流 - 电压 (I-V) 测量：可以在宽电流和电压范围内准确测量 CNT 薄膜的导电性。这对于研究 CNT 薄膜的导电机理、电子传输特性和电阻特性至关重要。能够检测到皮安 (pA) 级别的电流，这对于研究具有极低漏电流或非常高电阻的 CNT 薄膜特别关键。支持半导体器件参数的提取，能够分析 CNT 薄膜在场效应晶体管 (FET) 中的表现，提取迁移率、阈值电压、亚阈值摆幅等关键参数。并具备高级建模功能，可进行时间相关电学测量，长时间稳定性测试。能够检测到低至飞法级 (fF) 的电容，对于研究薄膜材料在电容器和存储器中的应用至关重要。

热门应用案例

案例一：Chirality-dependent electrical transport properties of carbon nanotubes obtained by experimental measure^[1]

手性角对单壁碳纳米管的电学性能有显著影响。研究表明，即使是直径相同但手性角不同的单壁碳纳米管，其通态电流或载流子迁移率的差异可达一个数量级。对于相同家族的单壁碳纳米管，随着手性角的增加，Type I 单壁碳纳米管的通态电流和迁移率增加，而 Type II 单壁碳纳米管则呈相反趋势。这种电学性能的差异可以归因于它们不同的电子能带结构，这些结构影响了电极与单壁碳纳米管之间的接触势垒、固有电阻和管间接触电阻。因此，手性角的变化会直接影响单壁碳纳米管的电学性能，这为优化性能和拓展基于单壁碳纳米管的电子和光电器件的应用提供了重要的物理基础。该论文的突破性在于系统地研究了单壁碳纳米管的手性结构对其电学传输特性的影响，通过实验测量了构建在十一个不同手性单壁碳纳米管薄膜上的薄膜晶体管的性能。此外，研究还发现单壁碳纳米管的电学传输特性与其类型和家族有很强的相关性，不同手性角的单壁碳纳米管在晶体管中的电学性能存在显著差异，这与其类型和手性角度有关。



上图展示了不同单一手性单壁碳纳米管薄膜构建的晶体管的电学特性。通过图中的转移曲线可以看出，根据其家族分类，Type II 单壁碳纳米管（红色）和 Type I 单壁碳纳米管（蓝色）在导通状态下的电流进行了比较。箭头表示了门极电压 V_{gs} 的正向和反向扫描方向，虚线用于比较相同家族单壁碳纳米管的导通状态电流。这些结果表明，不同手性角的单壁碳纳米管在晶体管中的电学性能存在显著差异，这与其类型和手性角度有关。

在测试中 V_{gs} 控制栅极，测量 I_{ds} 导通电流，开关比达到 7 ~ 8 个数量级，而且在关断时测试的稳定度和一致性对多组不同手性材料的器件提供了可对比的基础参考，使得不同器件之间的差异性能能够被灵敏的测量表征出来。

案例二：Large area roll-to-roll printed semiconducting carbon nanotube thin films for exible carbon-based electronics^[2]

该工作开发了一种通用的构造方法在柔性表面制备大面积高质量 SC-SWCNT 薄膜可使用的基材 (PET、纸张和铝基材)，采用 R2R 凹印使用高浓度 SC-SWCNT 油墨和 c-PVP 进行印刷薄膜作为附着层。该项工作克服了性能、成本、尺寸和性能方面的问题传统材料和印刷的效率限制方法，充分促进其发展印刷成本低、面积大、产量高、碳面灵活基于电子产品。满足凹版 R2R 印刷的要求重点发展可直接定型的 SC-SWCNT 油墨采用高粘度、高极性和低毒溶剂优化 R2R 凹版印刷工艺。

在工作中所有的电 SWCNTs TFT 和 CMOS Invertor 的测量使用 Keithley 2636B 或 Keithley 4200 分析仪进行 VDS 为 -0.25 V (或 0.25 V)，扫频步长为 -0.01 V (或 0.01 V)

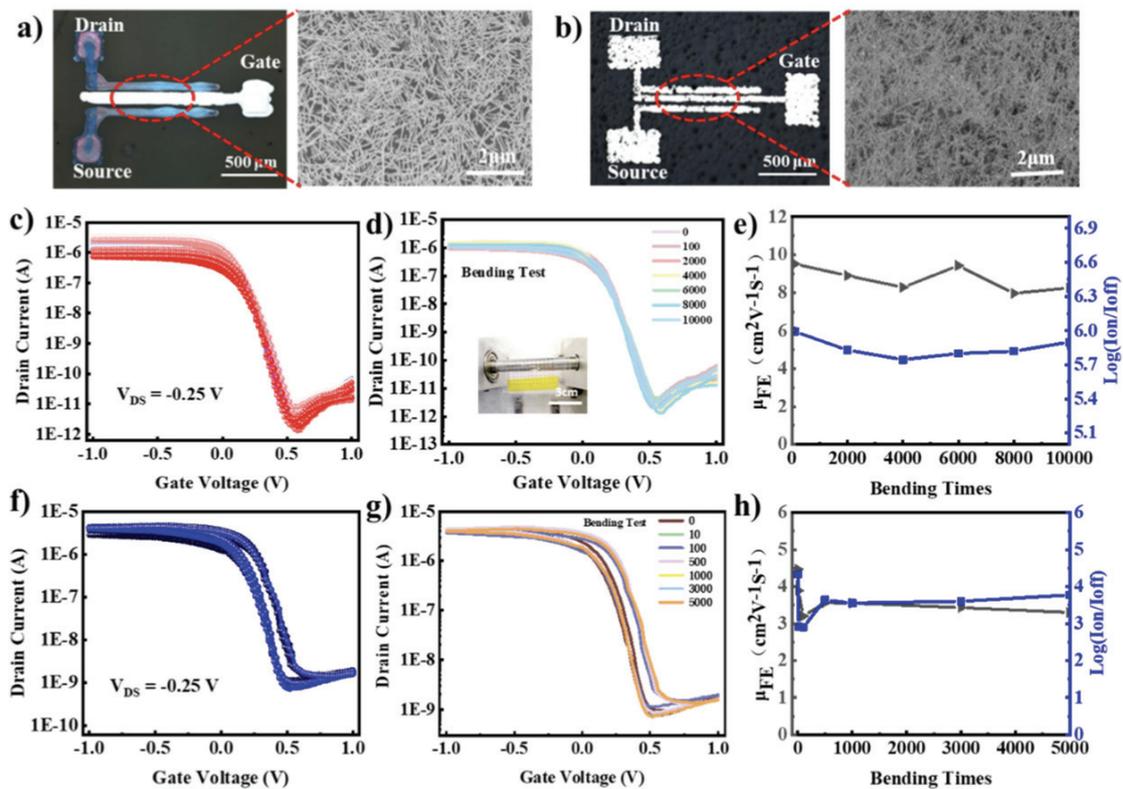
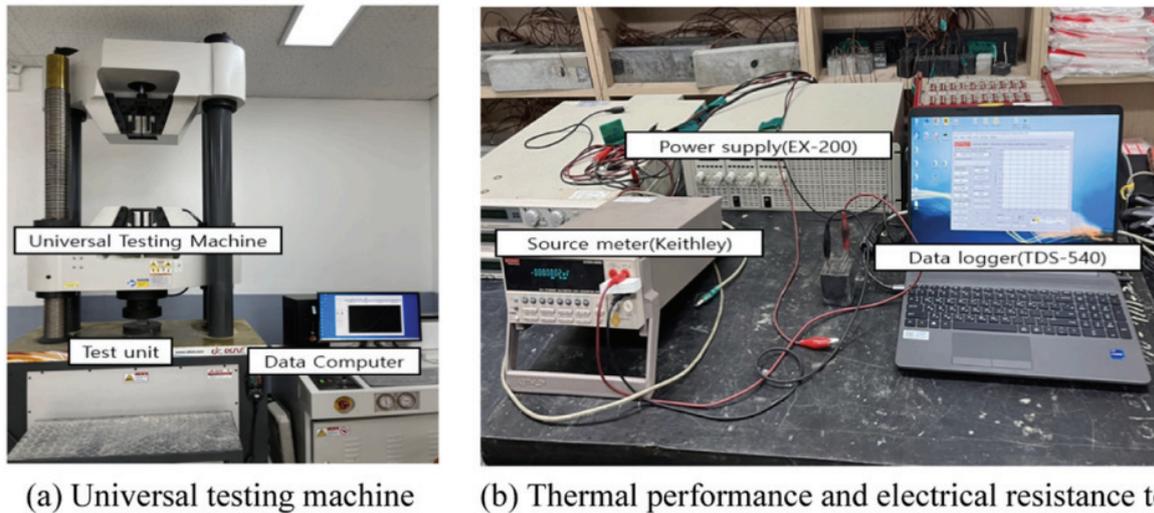


图 c-d: PET 基板上完全印刷 SWCNTs TFT 的转移曲线; 重复弯着 10000 次转移曲线的变化; 图 f-g: 纸基上全印刷 SWCNTs TFT 的转移曲线, 重复弯折 5000 次转移曲线的变化。最低电流测试精度 pA 量级, 有赖于 2636B 高精度的小电流采集能力, 精确表征该工作中器件的转移特性。

案例三: Thermal, electrical, and mechanical performances of ultrahigh-performance cementitious composites with multiwalled carbon nanotubes^[3]

本研究考察了多壁碳纳米管 (MWCNTs) 对胶凝性能的影响复合材料, 特别是专注于制造多功能胶凝复合材料即超高性能胶凝 (UHPC) 复合材料。关键属性包括抗压强度, 热性能和电阻进行了不同的测试 MWCNT 含量、固化方法、固化时间、电源电压。



该工作利用 Keithley DMM 进行电阻测量, 不同组分的 MWCNT 阻值差异非常大。有赖于 6 位半 DMM 采集, 精确的分析了 MWCNT - UHPC 复合材料的热学性能与电阻的关系。

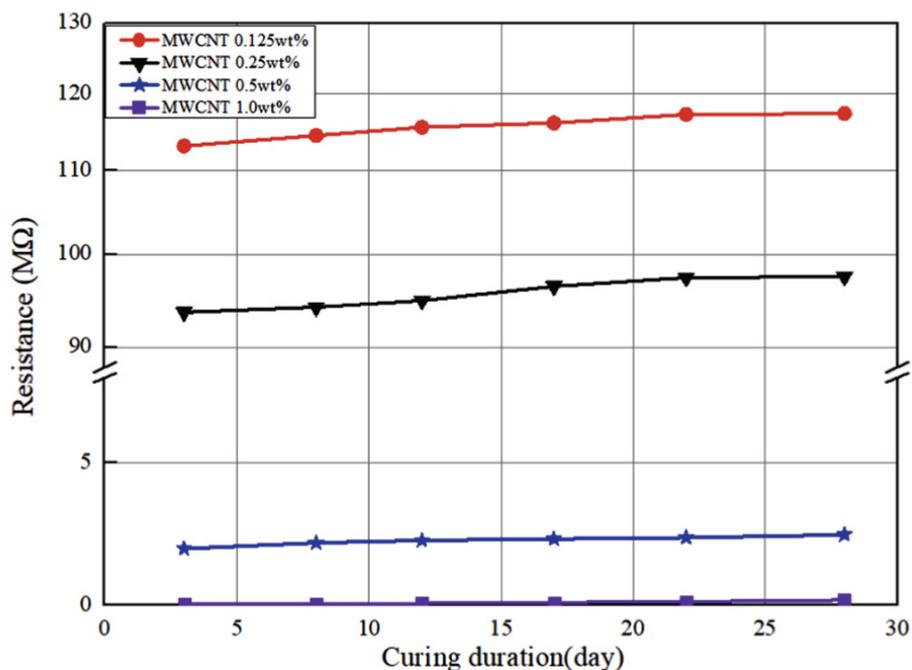


Fig. 9. Electrical resistance of MWCNT UHPC composites according to curing duration.

碳纳米管薄膜材料的基础知识部分：

碳基薄膜材料由于其优异的力学、电学、热学和化学性质，在多个领域具有广阔的应用前景。根据给定的搜索结果，碳基薄膜的主要应用领域包括：

先进制造

碳基薄膜可用作高性能功能防护材料，应用于先进制造领域。

通过结构优化设计和工艺调控，可制备出具有优异力学、摩擦学和电化学性能的碳基功能薄膜。

这些薄膜可用于提高制造设备的耐磨、防腐蚀和润滑等性能。

电子器件

碳纳米管薄膜是一种重要的碳基薄膜材料，在电子器件领域有着广阔的应用前景。

碳纳米管薄膜的电学性能与其手性结构密切相关，可用于设计和构建高性能碳基电子器件。

例如可用作柔性电极、晶体管等器件的关键组分。

智能穿戴

碳纳米管薄膜已在智能穿戴行业得到应用。

利用其优异的电学和力学性能，可制作柔性可穿戴电子产品。

[1] doi.org/10.1038/s41467-023-37443

[2] doi.org/10.1039/d2nr07209b

[3] doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03691

更多宝贵资源，敬请登录：www.tek.com.cn

