

Keithley 在碳纳米管森林复合材料测试中的应用

碳纳米管森林由许多垂直生长的碳纳米管组成，看起来像一个“森林”，因此得名。每个碳纳米管 (CNT) 是由单层或多层石墨烯片卷曲形成的圆筒结构，其直径在纳米级别，长度可以达到数微米甚至数毫米。碳纳米管森林中的这些纳米管密集排列，垂直生长于基底上。

碳纳米管涂层纤维的特点

高比表面积：碳纳米管森林有巨大的表面积，有助于提高催化、传感、储能等方面的性能。

优异的力学性能：碳纳米管具有极高的强度和韧性。

电学与热学性能：它们表现出优异的导电性和导热性。

CNT 涂层纤维的应用

能源领域：用于锂离子电池、电容器、太阳能电池等。

传感器：制成高灵敏度的化学传感器、压力传感器等。

电子器件：用作场效应晶体管、导电材料等。

复合材料：增强聚合物、金属等材料的力学性能。

CNT 涂层纤维的关键参数

压阻 (Piezoresistance)

CNT 的压阻特性可以应用于高灵敏度传感器，用于制造高灵敏度的压力传感器和应变传感器。这些传感器可以检测微小的压力或形变变化；可以制成柔性薄膜，结合其压阻特性，可用于开发柔性触摸屏、可穿戴设备等柔性电子产品；在锂电池等能源存储设备中，碳纳米管可作为导电剂，其压阻特性可用于监测电池内部压力变化，提高电池安全性等。

压阻特性受到 CNT 的直径、密度、内部连通性和均匀性等参数的影响。例如 CNT(5-30 nm) 比较大直径

的 CNT(50-70 nm) 具有更高的柔韧性和更多的 CNT-CNT 接触，有利于提高压阻灵敏度。CNT 密度越高，CNT-CNT 接触越多，有利于形成更好的导电通路，从而提高压阻灵敏度。

接触电阻 (Contact Resistance)

接触电阻是影响 CNT 传感器灵敏度的主要因素。模拟结果表明，CNT-电极接触点的数量增加会显著降低整体电阻，这是导致灵敏度较高的主要原因。相比之下，CNT-CNT 内部接触点的增加对整体电阻的影响要小得多。

对于相对较短的碳纳米管森林，接触电阻和固有电阻的变化是平衡的，而对于较高的碳纳米管森林，响应主要由碳纳米管电极接触电阻主导。这些结果有望指导压阻式流量传感器和触觉传感器的设计。

光热电压 (Photothermoelectric, PTE)

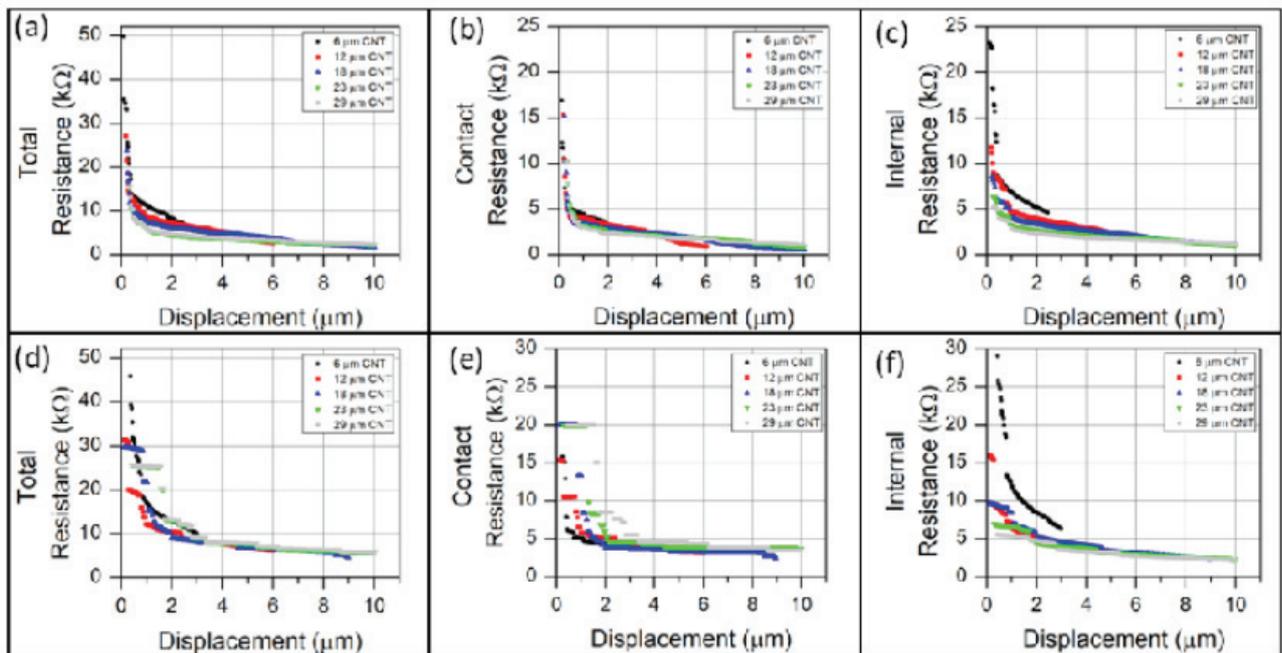
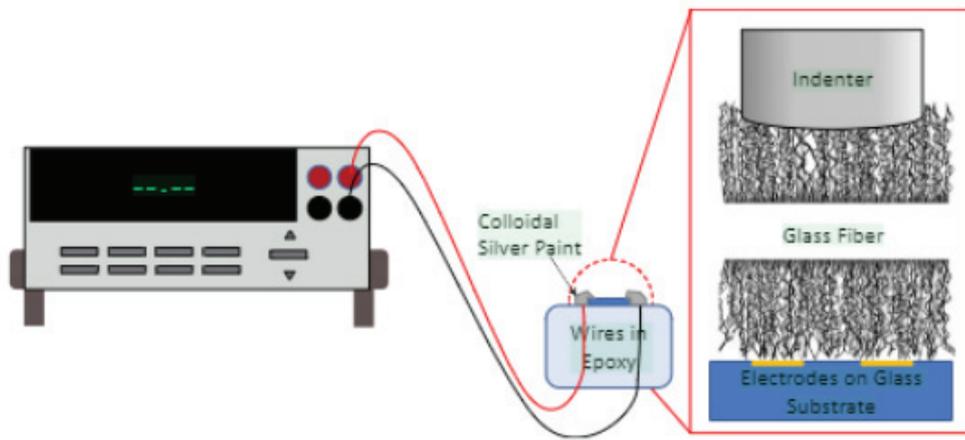
光热电压是指当材料受到光照时产生的热电压。碳纳米管薄膜 (CNT Film) 由于其独特的一维结构和优异的光学、热学和电学性质，可能表现出显著的光热电效应，可以产生光热电效应，即当受到光照时会产生温度差，进而产生热电压。这种光热电转换特性可以用于开发自供电的中红外探测器。这种基于光热电效应的探测器具有宽频带、自供电等优点，为工业监测和可穿戴传感器等应用提供了新的机会。

案例一：如何测试碳纳米管森林的接触电阻和内在电阻^[1]

将 CNT 涂层纤维放置在具有交错电极的基板上，使用纳米压痕仪施加 10 mN 的最大压力。使用数字万用表同时记录纤维的位移、力和电阻。通过测量电极间的电压差和电流，可以得到总电阻。总电阻是接触电阻和内在电阻的综合体现。总电阻随着 CNT- 电极接触点的增加而近乎线性增加，表明接触电阻是主导因素。

通过设置与电极接触的 CNT 节点的电压等于电极的电压，可以计算出接触电阻。这种计算方式考虑了 CNT- 电极接触的影响。内阻是由 CNT-CNT 接触数量决定的。通过设置与电极接触的 CNT 节点的电压等于电极电压，可以计算出内在电阻。短 CNT 森林的内在电阻在压缩过程中会快速下降，这一变化速度可能大于接触电阻的变化。

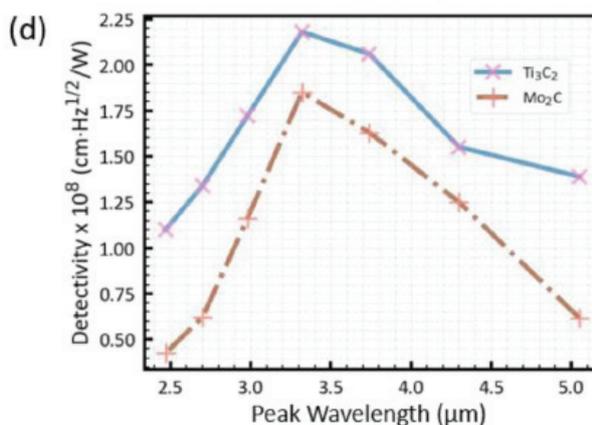
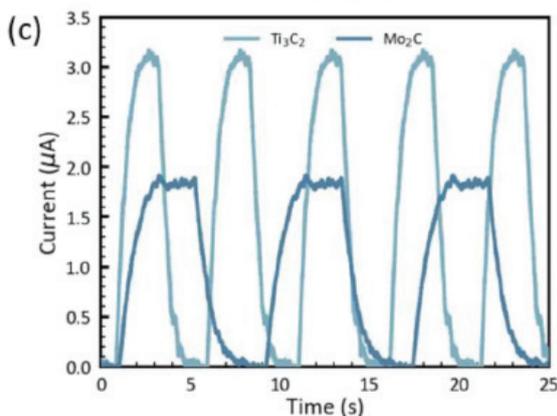
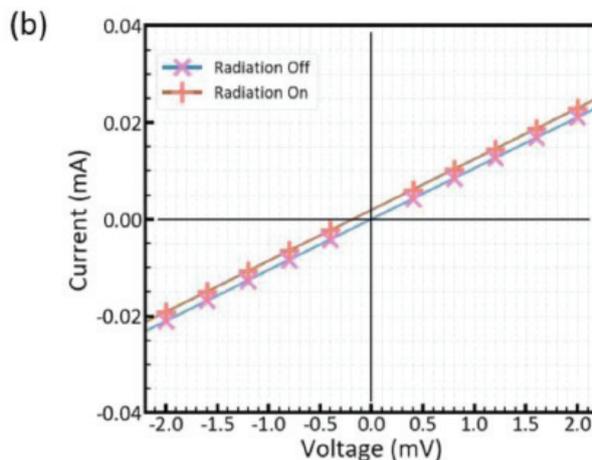
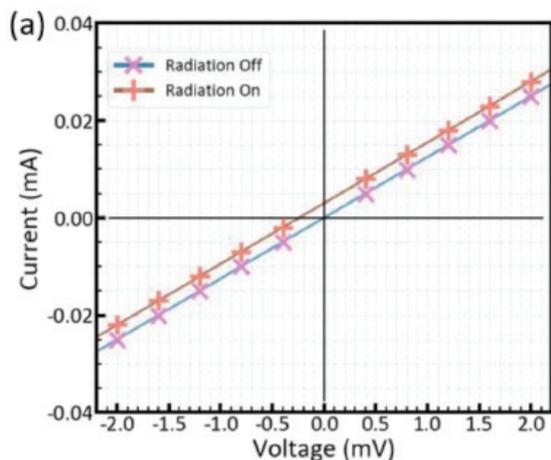
实验和模拟结果表明，CNT- 电极接触是导致最大电阻变化的机制。相对于 CNT-CNT 接触，CNT- 电极接触对总电阻的影响更为显著。



案例二：基于 MXene 电子的碳纳米管森林大面积立式光热电探测器系统设计^[2]

如何进行基于碳纳米管森林和 MXene 电极的大面积垂直光热电 (PTE) 探测器的系统设计？PTE 探测器结合光热和热电转换，实现有效的红外检测，克服了带隙限制。该研究提出了利用碳纳米管森林和 MXene 作为顶部电极的垂直 PTE 探测器，展示了敏感的红外检测和快速响应。

该测试使用 Keithley 6487 和 Keithley 6500 测量 I-V 曲线，使用 Keithley 6500 测量电阻。测量 I-V 曲线可以用于表征器件的电学性能；测量电阻可以用于评估器件的导电性能。这些测量有助于理解器件的工作机理，并优化器件的性能，测量电阻还可以用于监测器件在使用过程中的稳定性。

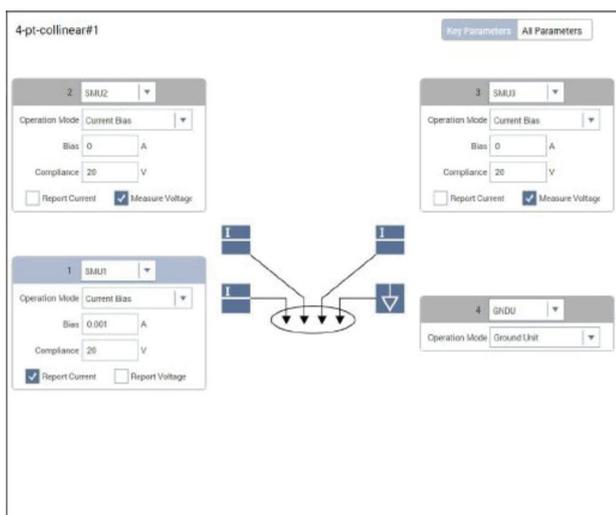


案例三：基于致密化碳纳米管森林和生物生物的导电 3D 纳米生物杂化系统^[3]

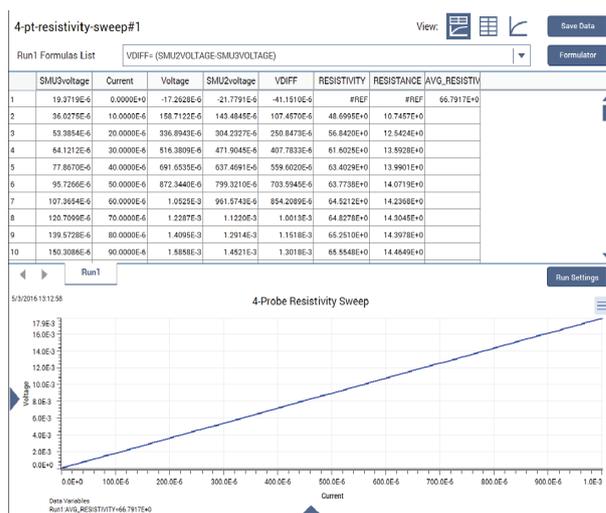
本文介绍了使用致密碳纳米管 (CNT) 森林与活细胞集成的导电 3D 纳米生物混合系统的发展, 应用于生物电子学和生物机器人领域。研究发现导电生物混合细胞 - 材料系统对于器官芯片系统和肌肉执行器等各种应用很重要。目前的导电支架在导电性或结构上受到限制, 突出了 3D 生物混合系统的需求。选择碳纳米管 (CNT) 森林是因为它们具有独特的性质, 包括高电导率和良好的机械适应性。该研究开发了具有增强细胞相容性的 CNT 森林支架, 并证明了细胞的存活和

功能。CNT 森林上的明胶涂层导致了密集化并形成了 3D 结构, 为细胞生长和扩散提供了合适的支架。这项研究有助于先进生物混合系统的发展, 并具有广泛的应用前景。

文中使用 Keithley 4200A-SCS 参数分析仪进行四探针测试法, 来测量 CNT 森林的电导率。通过测量两个内探针之间的电压降, 并结合电流的线性扫描, 计算出样品的电阻和电导率。这种四探针测试法可以准确测量材料的电导率, 不受电极接触电阻的影响, 以此来评估 CNT 森林的电学性能, 高精度高可靠的确保提高细胞与 CNT 之间的电子和离子传输能力。



四探针测试功能以及数据



测试方案

泰克吉时利作为小信号领域的测试专家，提供丰富的产品助力碳纳米管复合材料的研究。拥有集高精度、高分辨率数字万用表、图形触摸屏显示器和高速、高分辨率数字化器于一身的图形采样万用表。以及电流分辨率低至 1fA 的皮安表，其支持测量高达 20mA 的电流，比如测量 4-20mA 传感器回路。也支持高吞吐量生产测试需求，最高每秒 1,000 个读数。还有专业内性能领先的 4200A-SCS 电学特性参数分析仪，提供同步电流电压曲线测试 (I-V 曲线测试)、电容 - 电压曲线测试 (C-V 曲线测试) 和超快脉冲 I-V 曲线测量。



KEITHKEY 6500 系列 6 位半万用表



KEITHKEY 4200A-SCS 参数分析仪



KEITHLEY 6482 双通道 皮安计 / 电压源

- [1] Bellott, E.; Li, Y.; Gunter, C.; Kovaleski, S.; Maschmann, M.R. Investigating the Electromechanical Sensitivity of Carbon-Nanotube-Coated Microfibers. *Sensors* 2023, 23, 5190. <https://doi.org/10.3390/s23115190>
- [2] Jiaqi Wang, Zhemiao Xie, Jiayu Alexander Liu, Rui Zhou, Guanxuan Lu and John T. W. Yeow, System design of large-area vertical photothermoelectric detectors based on carbon nanotube forests with MXene electrodes †, *Nanoscale Adv.*, 2023, 5, 1133
- [3] Roya Bagheri, Alicia K. Ball, Masoud Kasraie, Aparna Chandra, Xinqian Chen, Ibrahim Miskioglu, Zhiying Shan, Parisa Pour Shahid Saeed Abadi, Conductive 3D nano biohybrid systems based on densified carbon nanotube forests and living cells, *Journal of Materials Research*, 2023, 10,

更多宝贵资源，敬请登录：WWW.TEK.COM.CN

© 泰克公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利和外国专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。本文中的技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有其它商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

