

SPM 在超低电压丝素纳米纤维忆阻器研究中的应用

SPM-035

摘要：生物忆阻器因其在逻辑运算、非易失性存储及突触模拟器中的潜在应用而受到广泛关注，亟需提升其忆阻性能。本研究报道了一种基于丝素蛋白（SF）的忆阻器，兼具低功耗与低工作电流。通过扫描探针显微镜（SPM）高分辨率形貌表征、导电模式（C-AFM）及开尔文探针力显微镜（KPFM）技术，揭示了丝素纳米纤维（SNFs）的纳米级结构特性及电荷捕获机制，为解析丝素纳米纤维忆阻器的物理机制提供了不可替代的实验证据。

关键词：超低电压 丝素纳米纤维 忆阻器 SPM

技术特点：

- ❖ 可以快速准确的对样品的电流分布、表面电势进行表征。
- ❖ 通过仪器自带的软件可以将二维信息转化为 3D 图，可以更直观观察样品表面的信息。

忆阻器的电阻状态随电荷量变化，断电后可保持状态，与突触结构高度相似，是模拟神经网络的理想器件。忆阻器的性能高度依赖于功能层的纳米级形貌、电荷传输机制及界面特性。相比无机 / 有机材料，丝素蛋白具有优异的生物相容性、可降解性及柔性，适用于可植入生物电子。然而，现有 SF 忆阻器仍面临高工作电流（ 10^{-4} – 10^{-2} A）导致的功耗与发热问题。生物忆阻器因其在逻辑运算、非易失性存储及突触模

拟器中的潜在应用而受到广泛关注，亟需提升其忆阻性能。

本研究提出通过 Ag 掺杂 + 乙醇后处理调控 SF 微晶结构，构建低功耗、低电流且性能可调的忆阻器。利用 SPM 技术，不仅揭示了丝素纳米纤维（SNFs）的纳米级结构特性，还直接验证了忆阻器的局部电阻切换行为及电荷捕获机制，为解析器件超低工作电压的物理机制提供了不可替代的实验证据。

■ 实验部分

1.1 仪器

岛津扫描探针显微镜 SPM-9700HT



图 1 扫描探针显微镜 SPM-9700HT（带环境控制舱）

1.2 测试条件

功能模式：电流模式、表面电势模式
探针：2.8 N/m
像素：256 x 256
扫描器：10 m x 10 m x 1 m (扫描范围、深度)

1.3 样品及前处理

用导电碳胶将样品固定到不锈钢片样品托上，测试面朝上，如图 2 所示。

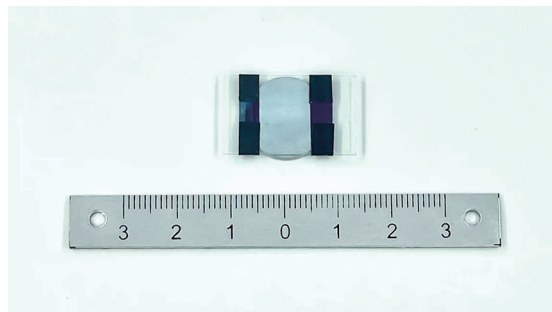


图 2 固定后的样品图片

■ 结果与讨论

2.1 样品高 - 低阻态的观测

如图 3 所示制作了一个纳米级的 SF/Ag 忆阻器，其上电极为 10 nm 厚度的超薄 Ag 膜，通过导电 AFM 表征了 SF/Ag 复合膜的局域开关特性。超薄 Ag 顶电极用于更好地与导电 AFM 尖端导电，同时不掩盖 SF/Ag 复合膜的局域开关行为（图 4）。当在针尖施加 0 ~ 0.8 V 的偏压时，电流图像清晰地表示 500 nm x 500 nm 扫描区域内的局部导电点，与低阻态相对应（图 4 (a)）。随后，在原位施加 0 ~ -2 V 的偏压，局部导点逐渐消失，这表明 SF/Ag-2.5E 忆阻器切换到 HRS 状态（图 4 (b)）。这就是观察到 SF/Ag 忆阻器在“读”、“写”、“读”、“擦除”、“读”过程中的电阻状态变化。

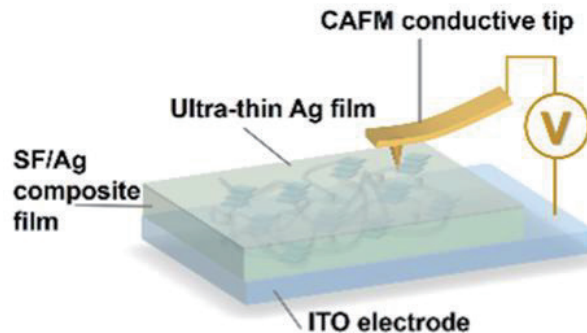


图 3 样品结构示意图

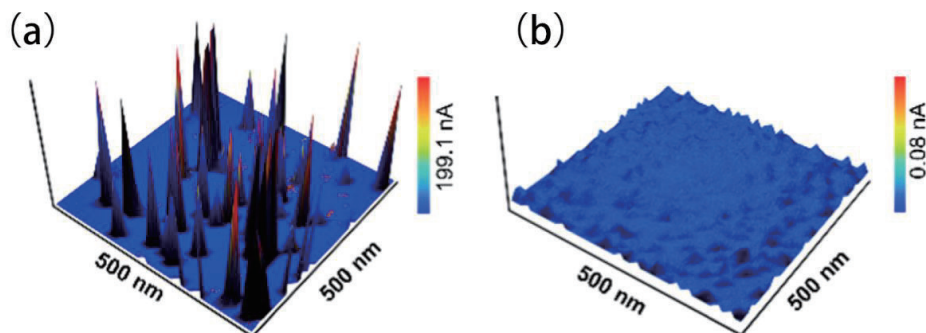


图4 样品的电流分布图

2.2 样品电荷捕获 / 去除行为的观测

为了观测 SF/Ag 复合膜对电荷捕获 / 去除行为，使用 KPFM 模式对样品进行测试。在导电尖端施加 5V 或 -5V 的偏置电压，在接触模式下扫描 $1 \mu\text{m}^2$ 的区域，将载流子注入到 SF/Ag 复合膜中。在负偏压下，电子被困在 SF/Ag 薄膜中，导致表面电位降低。相反，在正偏压处扫描注入后，另一区域的表面电位增加。随后，为了评估 SF/Ag 复合膜的载流子捕获和保留能力，在 KPFM 模式下对 $100 \mu\text{m}^2$ 的区域进行原位扫描，以测量表面电位随时间的演变（图 5）。从 0 min 到 120 min 间隔 30 min 观测样品的表面电势分布，观测到空穴注入区（红色区域）和电子注入区（蓝色区域）之间的电位差随着时间的演变有缓慢减小的趋势，且整体数值在变小，但电子注入区的电位变化值要小于空穴注入区的电位变化值，这表明 SF/Ag 层对电子的维护比空穴更好，这可能是由于 SF/Ag 膜中电子的触点更深。综上所述，SF/Ag-2.5E 忆阻器的忆阻机制应该是载流子捕获 / 去捕获机制。

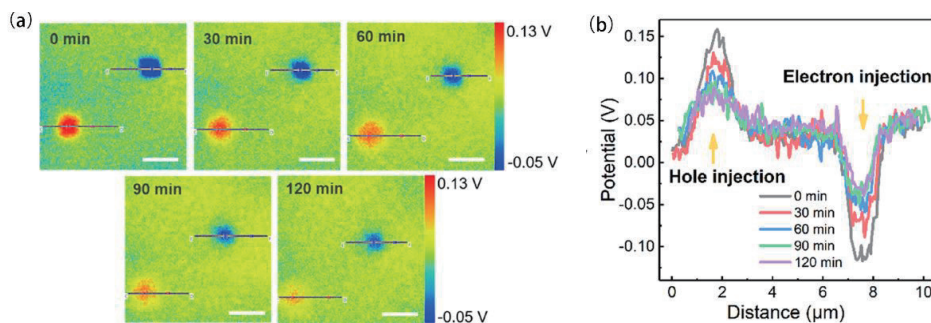


图5 样品表面的电势随时间的变化图：（a）表面电势分布图，（b）表面电势的数值变化图

■ 结论

使用岛津 SPM-9700HT 导电模式和 KPFM 技术，不仅揭示了丝素纳米纤维（SNFs）的纳米级结构特性及电荷捕获机制，为解析丝素纳米纤维忆阻器的物理机制提供了不可替代的实验证据。直接验证了忆阻器的局部电阻切换行为及电荷捕获机制，为解析器件超低工作电压的物理机制提供了不可替代的实验证据。

岛津应用云

