

科研动态 中山大学谢曦教授在《Nature sensors》上发表

射频辅助植入柔性微电极技术重要突破

近日，中山大学电子与信息工程学院（微电子学院）谢曦教授团队在柔性电极植入与组织电生理监测领域取得重要进展。团队创新性地提出了一种基于“尖端聚焦射频穿孔”的柔性微电极“软植入”策略，实现了无需手术或针头辅助，即可将柔性电极丝直接植入高密度生物组织（如皮肤与肌肉）内部。

长期以来，人类一直靠刚性针头插入生物组织，这极易造成组织损伤。本研究首次实现了将柔性微电极在无针辅助下自主式植入。该方法在动物模型验证了其良好相容性与稳定的电耦合性能，为半植入式可穿戴电生理设备、神经肌肉康复治疗及智能假肢控制提供新的技术路径。相关研究成果以“Soft implantation of flexible electronic hairs via tip-focused radiofrequency perforation for in-tissue electrophysiology”为题，发表于Nature子刊Nature sensors（《自然-传感》）。谢曦教授为本论文的唯一通讯作者，黄爽博士、黄新烁博士以及姚传捷为共同第一作者。

柔性植入式微电极具有出色的机械顺应性，能适应生物组织和肌肉活动，有望实现长期、高质量深层组织电生理信号（如肌电图）记录与刺激。然而，柔性微丝电极的植入通常需要侵入性手术或尖锐刚性针头辅助插入，存在出血、微电极与组织耦合松动、以及微电极侧壁粘合剂固定不相容等问题。尤其对于肌肉等高模量组织，传统柔性电极难以直接插入，需借助刚性针管辅助，这与柔性材料的本征顺应性相矛盾。

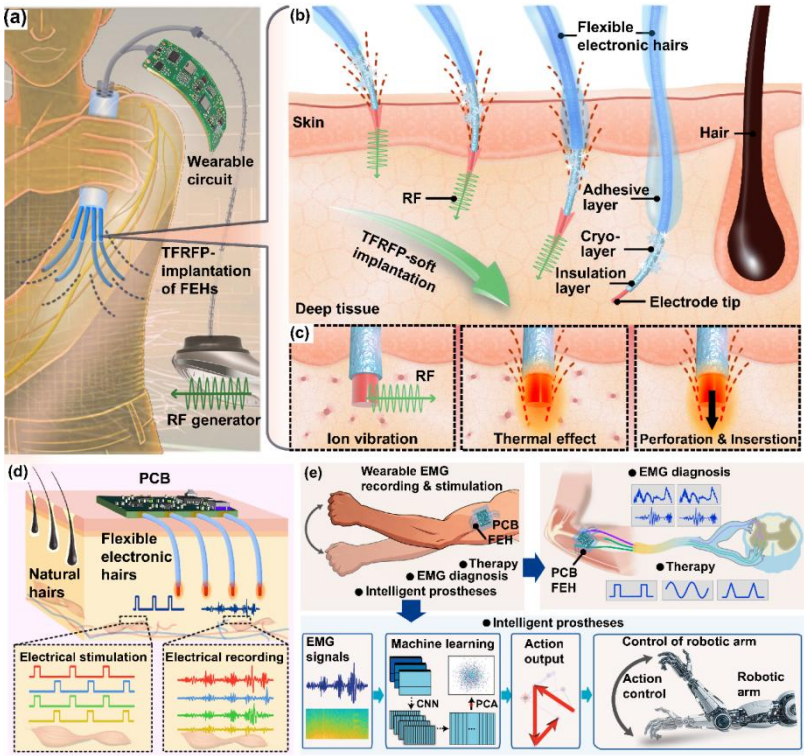
针对上述难题，谢曦团队提出了一种射频热穿孔辅助柔性电极微丝直接插入生物组织的新技术。其原理是通过在柔性电子丝尖端施加局部化射频电场，在组织中形成仅数十微米范围的瞬时热穿孔，使柔性微电极能够以极微创的方式便捷地插入组织内部。此外，射频效应还能避免电极插入引起出血，具有良好的生物相容性和紧密的生物电耦合效应，适用于活体深部组织的电信号记录或者电刺激应用。由于植入后的微电极丝直径细、柔性高，其形态与生物毛发相似，因此研究团队将其形象地命名为“柔性电子毛发”。

研究团队基于可控射频耦合系统，实现了对柔性电子毛发尖端射频功率与穿

孔能量的精确调控。实验结果显示，局部电场诱导的热效应高度局限化，仅在组织表层产生暂态微孔并能若干小时内恢复组织完整性。通过进一步在电极侧壁修饰可溶性支撑层与生物黏附涂层，柔性电子毛发可在组织内实现稳固锚定和紧密电信号耦合。

与传统针式电极相比，尖端聚焦射频技术赋予柔性电子毛发以下突出优势：
1) 无出血、低损伤：射频穿孔形成的微热通道有效避免机械撕裂；2) 高顺应性与长期稳定性：柔性电丝可与组织协同运动，减少电极位移与界面松动；3) 即插即用的半植入应用：无需缝合或固定即可实现稳定记录与电刺激；4) 良好的可扩展性：可兼容多通道阵列与多种柔性电极材料体系。

团队在大鼠、兔子、猪和青蛙等动物模型中验证了尖端聚焦射频技术的可行性与生物安全性。植入后的柔性电子毛发能够稳定采集高信噪比的肌电信号，并在机器学习辅助解码下实现肢体运动预测及假肢控制。组织学、分子生物学及行为学分析均表明，尖端聚焦射频技术植入过程对组织损伤极小、炎症反应轻微，且长期植入后电极-组织界面阻抗稳定。这种“射频辅助软植入”方法，为柔性电极在高模量组织中的直接植入提供了通用技术平台，具有在可穿戴电生理监测、智能康复及人机交互等方向的潜在应用前景。



图一： 柔性电子毛发尖端聚焦射频穿孔生物组织的技术示意图

谢曦教授简介：

谢曦教授是中山大学电子与信息工程学院（微电子学院）二级教授、国家杰出青年科学基金获得者，智能生物传感方向带头人。谢教授博士毕业于斯坦福大学，随后在麻省理工学院从事博士后研究。回国后率领团队发展交叉学科研究，致力于研制高性能、多功能的微介入式生物传感芯片与电路系统，为新一代高精密生物科研仪器与可穿戴智能设备提供重要技术支持。其以通讯作者在 Nature Sensors, Nature Materials, Nature Nanotechnology, Nature Communications, Science Advances 等期刊发表论文>100 篇。

论文链接：<https://doi.org/10.1038/s44460-025-00004-0>