

刚柔并济的“三维水凝胶晶体管”开辟生物电子融合新途径

长期以来,电子器件与生物组织之间存在着难以跨越的“物理鸿沟”:传统的硅基晶体管坚硬、平整且以二维形式存在,而生物体(如大脑)则是柔软、立体且复杂的。为了解决这一“模量与维度失配”难题,香港大学张世明教授团队成功研发出一种具有毫米级调控厚度的三维水凝胶晶体管。该研究突破了有机电化学晶体管长期面临的“厚度-性能”制约,通过增加器件的维度,使其在保持生物组织般柔软特性的同时,具备了强大的电子信号处理能力。2025年11月20日,相关研究成果发表于《Science》。

研究核心在于一种独特的“双网络水凝胶”策略。传统的导电水凝胶一旦增厚,离子便难以渗透至材料深层,导致器件性能急剧下降。为此,团队在微观层面构建了“电子骨架”与“离子隧道”协同的复合结构:利用辅助聚合物网络引导导电聚合物(PEDOT:PSS)形成连续的三维电子通路,同时通过精确控制孔隙率构建离子高速公路。这种设计如同将实心的“砖头”转化为吸满水的“海绵”,使得离子能够瞬间渗透至毫米级厚度的材料内部,实现了真正的三维体积调控。

得益于这种材料突破,新型三维水凝胶晶体管展现出了卓越的电化学性能。实验表明,该器件在厚度达到1 mm时仍能保持极高的跨导,其开关比高达 10^4 ,



三维毫米级厚度的半导体水凝胶纤维,可用于构建与细胞交织的活体晶体管,从而模拟大脑中真实的神经元连接
(图片来源:《Science》封面)

且电荷存储能力与体积呈完美的线性关系。更关键的是,该材料的机械模量低至千帕(kPa)级别,与生物脑组织高度匹配,从根本上解决了植入式器件因硬度差异引起的免疫排斥和胶质疤痕问题,为长期稳定的神经接口提供了理想的材料基础。

在应用层面,该技术展示了令人振奋的神经形态计算潜力。团队将这种三维半导体加工成纤维状晶体管,并在物理空间上编织成模仿大脑神经连接的互穿电路阵列。结合团队自主研发的硬币大小读出芯片(PERfECT系统),该系统在“储备池计算”演示中实现了对受损手写数字91.93%的高准确率识别,即便在拉伸变形30%的情况下仍能稳定工作。

这一成果标志着生物电子学正从“薄膜时代”迈向“三维实体时代”,未来有望催

生出能与人体组织无缝融合的智能义肢、植入式治疗芯片及“电子皮肤”等革命性技术。

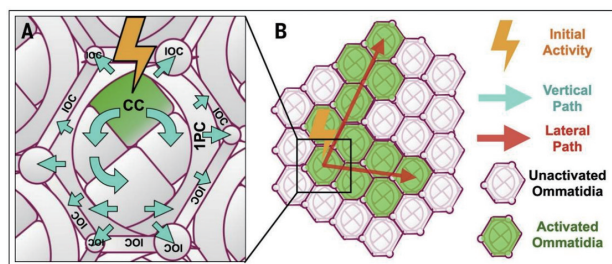
(来源:《Science》)

钙离子波可“校准”果蝇复眼的蜂巢光学结构

在生物发育过程中,细胞不仅需要读取DNA(脱氧核糖核酸)获得正确的身份,还必须精准地排列成特定的几何形状才能行使功能。对于节肢动物复杂的复眼而言,数以百计的小眼(ommatidia)如何克服个体大小差异,组装成完美均匀的六边形晶格结构,一直是发育生物学中的未解之谜。

纽约大学等研究团队发现在果蝇复眼发育的关键期,非神经支持细胞中会产生自发的、同步化的钙离子波,这些钙波如同“指挥棒”一般,协调了整个视网膜组织的形态发生,确保了光学结构的均匀性。2025年11月20日,相关研究成果发表于《Science》。

果蝇的复眼由约800个小眼组成,每个小眼包含8个光感受器神经元,周围包裹着视锥细胞(cone cells)和色素细胞(pigment cells)等非神经支持细胞。与以



视网膜钙波塑造区域性钙信号,协调复眼单元重塑

(图片来源:《Science》)

往发现的指导神经连接的神经元钙波不同,这种钙波完全起始于非神经细胞,并呈现出高度的规律性。

研究团队深入解析了这一现象的分子机理。钙波的起始由一种名为 Cad96Ca 的受体酪氨酸激酶触发。Cad96Ca 激活磷脂酶,进而促使内质网通过受体释放钙离子。更有趣的是,钙波的传播并非随机扩散,而是遵循严格的“垂直”和“横向”路径。研究发现,不同类型的视网膜支持细胞表达特定的间隙连接蛋白(Innexins),形成了一套独特的“连接蛋白密码”。垂直路径上,钙信号首先在视锥细胞中启动,随后传递给初级色素细胞,最后到达小眼间细胞(IOC),在单个小眼内部纵向传播。横向路径上,钙波随后通过小眼间细胞横向扩散至邻近的小眼,形成席卷整个视网膜的波动。

该研究最引人注目的发现是钙波在组织重塑中的“智能”调节功能。果蝇复眼存在区域性的结构差异:腹侧的小眼通常比背侧的大,以便更好地感知地面的低光环境。然而,为了保证视觉成像的清晰度,整个复眼的晶格排列必须保持均匀。研究人员发现,钙波的强度与小眼的尺寸成正比:较大的腹侧小眼会产生更强的钙信号。这些钙信号激活了非肌球蛋白 II(Myosin II),驱动小眼间细胞的顶端收缩。由于大尺寸的小眼原本具有更宽的细胞边界,更强的钙波引发了更强力的收缩,从而抵消了初始的尺寸差异。这种“按需定制”的收缩机

制,最终使得视网膜上所有小眼的排列间距达到高度一致,修正了早期的不规则性。

(来源:《Science》)

国产脑机接口跨过声调这座大山,实现汉语音节解码

对于渐冻症或脑卒中患者而言,当身体被禁锢,大脑却依然活跃时,脑机接口(BCI)是其与世界重建联系的唯一希望。英语 BCI 飞速进步,但中文——这门拥有复杂声调和庞大数据集的语言,始终是横亘在神经解码领域的一座高山。

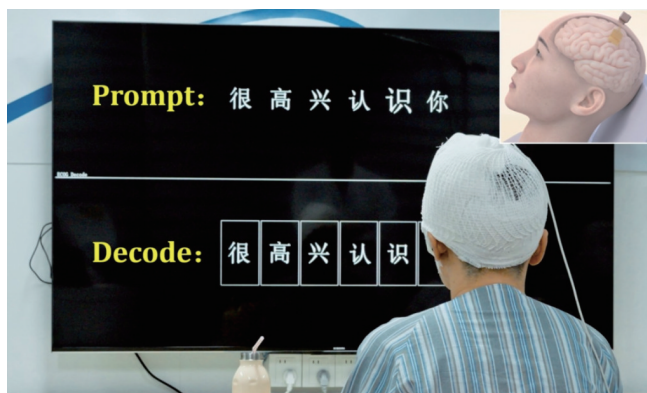
2025 年 11 月 5 日,《Science Advances》上的一项研究宣告了这一僵局的打破。来自中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感器技术国家重点实验室周志涛研究员与复旦大学附属华山医院吴劲松主任医师、上海脑虎科技有限公司陶虎研究员的联合团队,成功研发出一种能够实时解码“全谱系”中文的脑机接口系统。

目前,英语 BCI 主流方案是解码“音素”(Phonemes),就像拼乐高一样把单词拼出来。但在中文里,这条路很难走通。中文是单音节语言,且严重依赖声调——同一个发音,声调不同,意思天差地别(例如“妈”和“马”)。如果只解出音素,会面临海量的同音字干扰,

稍有偏差,输出的句子就会南辕北辙。

研究团队另辟蹊径,放弃了西方的“音素”路线,转而抓住了中文的灵魂——带声调的音节。他们提出,音节比音素更稳定,也包含更完整的语义。为了验证这一思路,团队招募了一位 43 岁的女性癫痫患者,在她的大脑左侧颞上回、运动皮层等关键语言区域,植入了一块拥有 256 个通道的高密度柔性皮层脑电(EEG)电极阵列。当这位受试者看着屏幕上的汉字并在脑中尝试朗读时,电极阵列精准捕捉到了神经元的每一次“高频脉冲”。研究人员设计了一套精巧的“双流解码器”:一路专门识别音节(是什么音),另一路专门识别声调(是第几声)。这 2 路信号在毫秒间汇合,转化为汉语拼音,再通过类似手机输入法的语言模型,结合上下文联想,最终敲定屏幕上显示的汉字。

仅经过 9 天训练,系统性能便显示出优势:对 394 个常用汉语音节(覆盖汉语总音节 98% 以上,未覆盖者均为受试者不认识的生僻音节)的纯神经解码平均



实时汉语言解码

(图片来源:上观新闻)