

明胶/羧化壳聚糖栅控氧化物神经形态晶体管

陈鑫力, 李岩, 王伟胜, 石智文, 竺立强

(宁波大学 物理科学与技术学院, 宁波 315211)

摘要: 模仿大脑感知信息处理方式对于仿生智能感知系统的设计具有重要意义, 而采用具有生物相容性和生物可降解特性的功能材料构建环境友好型神经形态器件是突触电子学研究的重要内容。本研究采用明胶/羧化壳聚糖(GEL/C-CS)复合电解质薄膜作为栅介质制作氧化物神经形态晶体管, 模仿了不同湿度下的突触响应行为, 包括兴奋性突触后电流和双脉冲易化。基于不同刺激数量下的突触塑性行为, 提出了一种触觉对物体识别程度的量化处理方式。进一步搭建人工神经网络, 实现了对 MNIST 手写数字的识别, 识别精度达 90% 以上。这种 GEL/C-CS 栅控神经形态器件对仿生智能感知和脑启发神经形态系统的设计具有一定的参考价值。

关键词: 氧化物神经形态晶体管; 明胶/羧化壳聚糖复合电解质; 触觉感知; 模式识别

中图分类号: TQ174 文献标志码: A

Gelatin/Carboxylated Chitosan Gated Oxide Neuromorphic Transistor

CHEN Xinli, LI Yan, WANG Weisheng, SHI Zhiwen, ZHU Liqiang

(School of Physical Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Mimicking of brain perceptual processing mode is of great importance for the design of bionic intelligent perceptual system. On the meantime, adopting functional materials with biocompatibility and biodegradability to construct environment-friendly neuromorphic devices is also an important aspect for synaptic electronics. Here, gelatin/carboxylated chitosan (GEL/C-CS) composite electrolyte film was adopted as gate dielectrics in oxide neuromorphic transistors. Synaptic plasticities, including excitory post synaptic current and paired pulse facilitation, were mimicked on the oxide neuromorphic transistor under different humidities. A quantitative processing method for tactile recognition of objects was proposed based on the spike number dependent synaptic plasticity. An artificial neural network was built in further. Recognition accuracy of MNIST handwritten digits is above 90%. Data from above evaluation show that the proposed GEL/C-CS gated neuromorphic device has a promising application potential in the design of bionic intelligent perceptual systems and brain inspired neuromorphic systems.

Key words: oxide neuromorphic transistor; gelatin/carboxylated chitosan (GEL/C-CS) composite electrolyte; tactile perception; pattern recognition

收稿日期: 2022-11-28; 收到修改稿日期: 2022-12-26; 网络出版日期: 2023-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(51972316, U22A2075); 宁波市重大科技攻关项目(2021Z116)

National Natural Science Foundation of China(51972316, U22A2075); Ningbo Key Technologies R&D Programme (2021Z116)

作者简介: 陈鑫力(1997-), 男, 硕士研究生. E-mail: 2111077006@nbu.edu.cn

CHEN Xinli (1997-), male, Master candidate. E-mail: 2111077006@nbu.edu.cn

通信作者: 竺立强, 教授. E-mail: zhuliqiang@nbu.edu.cn

ZHU Liqiang, professor. E-mail: zhuliqiang@nbu.edu.cn

人类在与外界进行信息交互时进化出多种感知系统,大量的感受器接收来自外界的刺激,受体便将无形的刺激转换成可被大脑解析的电学和化学脉冲信号,于是在大脑神经网络中建立起视觉、触觉、听觉、味觉和嗅觉等五官感知,从而有效地感知外部环境并进行复杂的互动。这种复杂的感知活动源自大脑复杂的神经网络系统,而作为神经网络的重要功能单元,神经元和突触结构在神经活动中扮演着基础性角色,并在不同调控机制作用下,突触权重值会发生变化,从而体现出突触的可塑性,这种特殊的能力有助于大脑在接收外界信息时作出必要的改变以适应新的环境。受人脑工作模式的启发,人们提出了神经形态计算以克服冯·诺依曼瓶颈问题^[1-4]。近年来,得益于人工智能技术、新材料技术和新器件技术的快速发展,结合微电子学与神经科学的交叉研究,科研人员提出了多种类型的神经形态器件用于模仿生物神经系统基本单元的功能,这类器件主要包括两端忆阻器^[5-6]、三端/多端晶体管^[7-10]。研究人员也开展了忆阻晶体管及其神经形态电子学应用^[11]。其中,神经形态晶体管可以同步进行信号的施加和权重的读取,并实现信号的并行传输和非线性时空整合,进而在器件结构上呈现出独特的优势。另外,神经形态晶体管通过材料和结构优化具备自我学习能力,并表现出可靠的塑性、容错性和鲁棒性^[9,12]。鉴于光电协同调控效应,研究人员也设计了光电神经形态晶体管,并实现了对突触塑性的调控和视觉响应行为的模仿^[13-14]。与此同时,突触可塑性是机器学习的重要基础,突触权重可调制是机器学习的关键。因此,基于神经形态器件而建立的人工神经网络(ANN)为神经形态计算在硬件上的执行提供了可能。在神经形态电子学中,用于 MNIST 手写数字识别的阵列化双端神经形态忆阻器在监督学习算法下识别率可达 90%以上^[15-16]。同样,神经形态晶体管也可实现突触权重的更新,并在构建 ANN 中, MNIST 手写数字识别精度也可达到 90%以上^[17-19]。然而,在突触权重更新过程中,保持权重更新的非线性参数对于识别精度和器件存储能力非常关键。因此,寻找一种有效的突触权重更新策略对于提升神经网络计算效率和稳定性至关重要。同时,信息技术的发展也对低成本便携式智能器件系统的设计提出了新的需求,因此构建环境友好型神经形态器件也显得尤为迫切。

明胶(GEL)作为一种天然蛋白质大分子材料,具有很好的生物相容性和生物可降解特性,广泛用

于食品、医疗、化妆等领域。同时,明胶水凝胶展现出优质的修复性,也被应用于柔性电子器件和表皮组织工程。然而,固态明胶薄膜的机械强度较差,在应力作用下极易发生断裂^[20],因此不利于在真空条件下制备性能优异的电子器件。壳聚糖是一种多糖生物材料,借助自身的活性基团、氨基和羟基,在大分子链上可进行羧化反应。羧化壳聚糖(C-CS)具有很好的水溶性,优异的成膜性和机械性,将 GEL 和 C-CS 制成复合膜, GEL 中的氨基($-\text{NH}_2$)与 C-CS 中的羧基($-\text{COO}^-$)通过静电相互作用以及氢键的形成,可以有效提高薄膜的抗拉伸性和机械性能^[21-22]。本工作采用 GEL/C-CS 复合生物电解质作为栅介质制作 ITO 神经形态晶体管,通过界面质子调控效应来模仿重要的生物突触功能,并且多脉冲激发下的 EPSC 增量作为触觉识别程度的依据,该套方案可为今后设计可感知仿生电子皮肤提供借鉴。与此同时,采用电流脉冲策略来调控晶体管的电导变化,对高度对称的突触权重实现更新。借助多层感知机制对 MNIST 手写数字实现模式识别,且识别率在不同湿度下有极强的稳定性。

1 实验方法

首先,将质量分数为 4%的 GEL 和 4%的 C-CS 溶于 92%的去离子水,温度设置为 50 °C,用磁力搅拌器搅拌 2 h,转速为 300 r/min,可得到 GEL/C-CS 生物基水凝胶,如图 1(a)所示。然后,在具有导电层的玻璃基底上滴加上述水凝胶进行旋涂,旋涂后立即放入 40 °C干燥箱内干燥处理 0.5 h,得到 GEL/C-CS 固态生物基电解质薄膜。采用扫描电子显微镜(SEM)表征生物凝胶膜截面和表面形貌(如图 1(b)下插图所示),可以看出薄膜厚度约为 2.28 μm ,并且薄膜中存在纳米尺寸的微孔结构,这种结构有助于薄膜对大气中水分子的吸收。补充材料图 S1 给出了电解质膜的表面原子力显微镜形貌(AFM),可以看出薄膜的表面粗糙度仅为 1.32 nm。最后,采用磁控溅射技术,结合单步掩膜工艺在 GEL/C-CS 电解质薄膜上沉积图案化的 ITO 膜作为晶体管的源、漏电极,设置的工作压强、Ar 流量和射频功率分别为 0.5 Pa、14 sccm 和 100 W,溅射时间为 15 min。图 1(b)为器件工艺示意图,ITO 沟道层的长度和宽度分别为 80 和 1000 μm 。将 GEL/C-CS 电解质栅控氧化物晶体管看成神经形态器件,其底栅视为突触前膜用于接收信息,电解质膜中的质子视为神经递质用于传递信息,而沟道视为突触

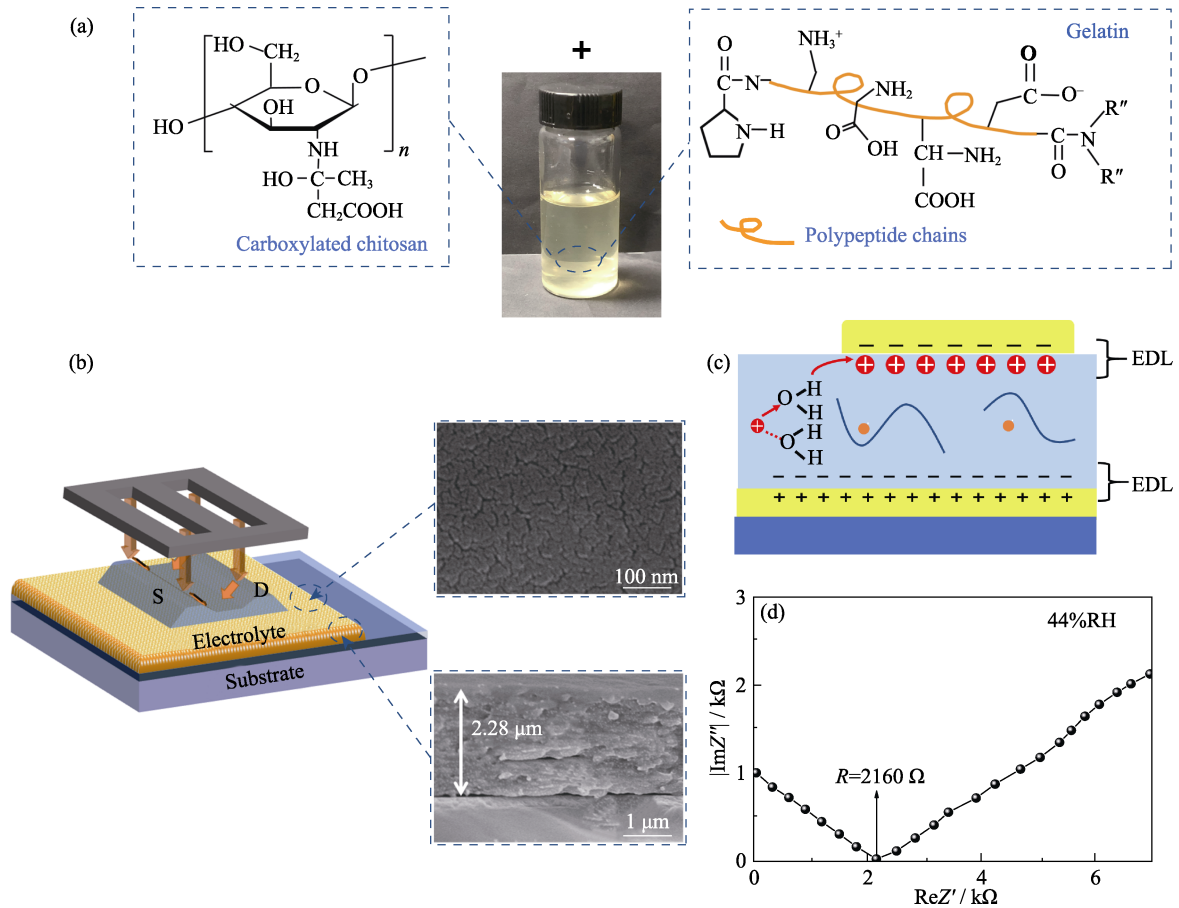


图 1 GEL/C-CS 栅控 ITO 神经形态晶体管的器件工艺及 GEL/C-CS 电解质表征

Fig. 1 Device processing for GEL/C-CS gated ITO neuromorphic transistor and characterization of GEL/C-CS composite electrolyte film

(a) GEL/C-CS composite hydrogel at room temperature with inset showing molecular structures of GEL and C-CS; (b) Schematic diagram of fabricating ITO neuromorphic transistors with insets showing SEM images for cross-sectional and surface morphologies of the electrolyte film; (c) Schematic diagram of the mechanism of electric-double-layer formation; (d) Impedance spectroscopy data of the electrolyte film

后膜用于检测突触后电流响应。

采用 Solartron 1260A 阻抗分析仪测试 GEL/C-CS 电解质薄膜的阻抗频谱, 采用 Keithley 4200 半导体参数分析仪测试器件的基本电学性能参数, 并测试其仿生突触响应行为和高级神经形态功能。所有电学测试均在室温暗箱内进行。

2 结果与讨论

在外电场的作用下, GEL/C-CS 复合电解质薄膜中的质子将按照格罗特斯机理(Grothuss mechanism)在电场方向上作定向移动, 最终在电解质/电极界面或电解质/沟道界面处积累并形成双电层(Electric-double-layer, EDL), 如图 1(c)所示。由于固态电解质中离子偶极极化时间较长, 在低频区可以在电极或沟道一侧静电耦合出大量载流子, 此时凝胶/电极界面处的单位面积电容较大。图 1(d)给出了 GEL/C-CS 电解质薄膜 MIM 电容结构的复阻抗图, 其在

实轴的截距为 2160Ω , 由此获得 44%湿度(44%RH)下的室温质子电导率约为 $7.1 \times 10^{-5} S/cm$ 。

补充材料图 S2(a)为室温条件下($\sim 25^\circ C$)测试的不同湿度下的输出特性曲线, 图 2(a)为器件转移特性曲线。图 S2(b, c)给出了器件的开关比和洄滞窗口, 当湿度低于 60%时, 由于质子迁移滞后于栅压施加, 转移特性曲线表现出较大的洄滞现象; 当湿度增大时, 转移特性曲线的洄滞窗口开始缩小, 这是因为电解质中的水分子增加, 从而使得质子迁移的路径增多。电解质薄膜的双电层电容(C_{EDL})随湿度的变化情况如图 2(b)所示, C_{EDL} 随着湿度增大而逐渐增大。当湿度为 80%时, C_{EDL} 快速增大到 $\sim 7.3 \mu F/cm^2$, 这是由较高湿度下电解质薄膜中水分子含量的增加造成。图 2(c)为不同湿度下的器件载流子迁移率(μ), 在湿度逐渐增大的过程中, μ 逐渐增加。当湿度达到 80%时, μ 增大到 $\sim 5.5 cm^2/V \cdot s$, 这种行为也与电解质/沟道界面上积累的质子有关。电解质中质子在界面处的积累会与沟道中电子发生

静电耦合, 随着 C_{EDL} 增大, 沟道电子浓度增大, 导致沟道处电子云的交叠程度加强, 进而提高了 μ 值。图 2(d) 为器件的亚阈值摆幅(SS)随湿度的变化关系, 可以看出 SS 在不同湿度下并不呈现逐渐增大或减小的趋势, 表明晶体管的界面特性保持基本稳定。

在神经形态系统中, 短程突触可塑性对于瞬态外界刺激的响应有着重要作用。图 3(a) 为 40%RH、单个前突触脉冲下的兴奋性突触后电流(EPSC), 源漏读取电压(V_{ds})为 0.2 V, 脉冲大小为 1 V, 脉冲

宽度为 10 ms。当施加突触前脉冲时, 电解质中的质子向电解质/沟道界面积累, 使沟道电流增大, 检测到的 EPSC 峰值为 100 nA。而当撤掉突触前脉冲后, 积累的质子回迁至初始平衡位置, 使沟道电流减小。采用拉伸指数函数对该瞬态电流响应的衰减行为进行拟合, 得到特征弛豫时间为 18.0 ms。图 3(b) 为不同湿度下的 EPSC 峰值电流大小, 电流随着湿度增大而快速增大, 当湿度从 40% 增加到 80% 时, EPSC 峰值也从 100 nA 增大到 586 nA。

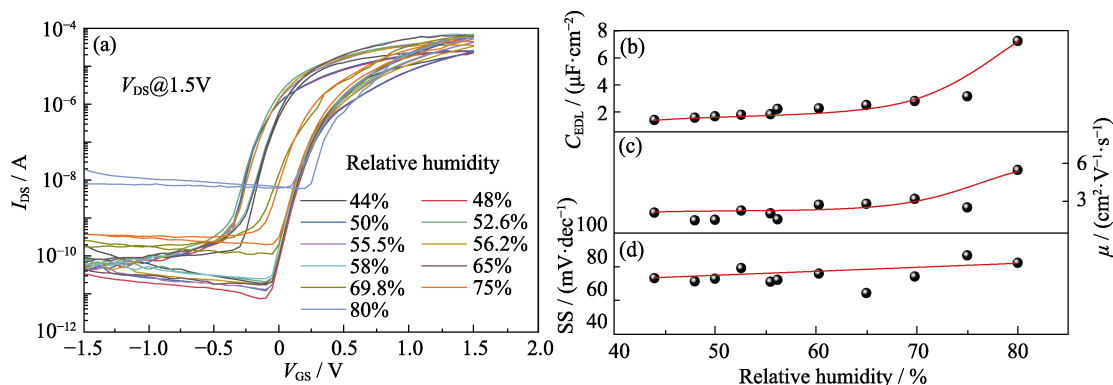


图 2 GEL/C-CS 栅控 ITO 神经形态晶体管在不同湿度下的电学性能

Fig. 2 Electrical performances for GEL/C-CS gated ITO neuromorphic transistor at different relative humidities

(a) Transfer curves; (b) Electric double layer capacitors (C_{EDL}) for GEL/C-CS based electrolyte; (c) Carrier mobility (μ); (d) Subthreshold swing (SS); Colorful figures are available on website

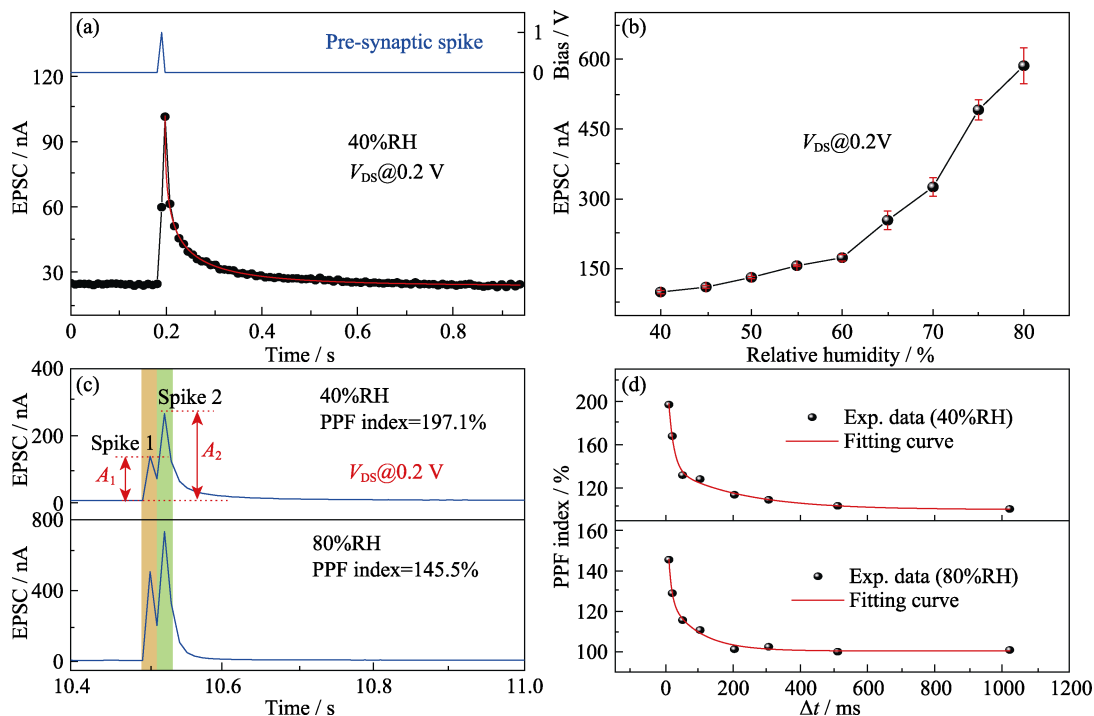


图 3 ITO 神经形态晶体管的突触响应行为

Fig. 3 Synaptic responses of ITO neuromorphic transistor

(a) EPSC responses triggered by a presynaptic spike (1 V, 10 ms) at relative humidity of 40%; (b) Peak EPSC value at different humidities; (c) EPSC responses triggered by two successive presynaptic spikes (1 V, 10 ms) at humidities of 40% and 80%; (d) Δt dependent PPF indexes at humidities of 40% and 80%

本研究在类似器件上施加不同脉冲刺激, 检测到的 EPSC 电流也随着脉冲宽度或高度增加而增大, 如图 S3 所示。双脉冲易化(Paired-pulse facilitation, PPF)是典型的短程突触塑性行为, 在神经信息处理和传递领域有着重要应用。GEL/C-CS 栅控神经形态晶体管也对该行为进行了模仿, 图 3(c)所示为连续两个前突触刺激下的 EPSC 响应行为, 脉冲间隔 (Δt)为 10 ms。当湿度为 40%时, 第二个脉冲触发的绝对 EPSC 值(A_2)明显大于第一个脉冲触发的绝对 EPSC 值(A_1), 分别约为 266 和 139 nA, 相应的双脉冲易化因子(PPF index= $A_2/A_1 \times 100\%$)约为 197%; 当湿度为 80%时, PPF index 约为 145.5%。这种差异可以解释如下, 电解质膜内吸附的水分子是质子跳跃的通道, 当吸附的水分子增多时, 质子更容易在电解质膜内迁移; 而当吸附的水分子减少时, 质子迁移通道减少, 即第一个脉冲施加结束后第二个脉冲施加前, 质子来不及返回平衡位置, 便在第二个脉冲作用下继续向沟道界面处堆积。因此 40%RH 下的 PPF index 高于 80%RH 下的 PPF index。图 3(d)是 PPF index 随 Δt 的变化关系, 可以看出, 随着 Δt 不断增大, PPF index 逐渐减小至~100%。借鉴生物突触的 PPF 效应, 可以采用双相指数函数对 PPF index 曲线进行非线性拟合:

$$\text{PPF index} = 1 + C_1 \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_1}\right) + C_2 \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_2}\right) \quad (1)$$

其中, C_1 和 C_2 是初始易化率, τ_1 和 τ_2 是双相特征弛豫时间。在 40%RH 下, 相应数值分别约 112.4%、39.5%、15.0 ms 和 212.0 ms。而在 80%RH 下, 相应数值分别约 59.8%、27.2%、9.0 ms 和 90.9 ms。由此可以看出, 各个参数在高湿度下均有不同程度的减小。

触觉感知通过机械感受器与外界环境进行信息交互, 接触物体时, 遍布全身的触觉机械感受器将形成一张并行的神经网络, 将感受到的信息传入大脑, 并在大脑中心神经系统中进行高级神经处理, 最终对物体信息实现感知、识别甚至产生触觉记忆。此处, 研究手指在不同湿度环境下产生褶皱状况时对物体感知和识别的行为进行模仿。设定 GEL/C-CS 电解质在 40%RH 和 80%RH 环境中的性能分别代表手指皮肤处于无褶皱和有褶皱两种状态下的情况。图 4(a)是无褶皱手指触摸物体的示意图, 在高湿度环境中, 水分子通过汗管进入指内引起电解质紊乱, 诱导交感神经系统控制指腹内的血管收缩, 收缩后的血管会降低真皮层组织的腹压, 进而减小组织体积, 表现为皮肤褶皱, 机械感受器

处于真皮层用于感知外部对手指的压力。图 4(b)是在 40%RH 和 80%RH 下, 施加 500 个连续前突触刺激后测得的 EPSC 响应, 脉冲大小为 1 V, 脉冲宽度约为 10 ms, 脉冲间距为 10 ms, 将每一个前突触刺激下得到的 EPSC 值视作 A_n ($1 \leq n \leq 500$), 背底电流记为 A_0 , 相邻的 A_{i-1} 和 A_i 之差可以得到相邻突触权重的增量, 如式(2)所示:

$$\begin{cases} \Delta W_1 = A_1 - A_0 \\ \Delta W_2 = A_2 - A_1 \\ \dots\dots \\ \Delta W_n = A_n - A_{n-1} \end{cases} \quad (1 \leq n \leq 500) \quad (2)$$

从而得到 ΔW_n 与 n 的关系曲线, 如图 4(c)所示, 随着 n 增加, ΔW_n 逐渐减小。理论上, 在电解质/沟道界面聚集的质子数在一定幅值大小前突触刺激下是有限的, 所以 ΔW_n 随着 n 增大而无限接近于 0。上述突触权重递增的动态过程与指尖感受物体的过程非常相似, 因此该器件在触觉感知领域具有一定的应用潜力。

将栅极电压(1 V)看成是手指对物体接触时施加的压力, 栅极脉冲数随着接触时长增加而增多。此时, 手指对物体的感知度可以用式(3)表达:

$$P_n = \sum_{m=1}^n \Delta W_m \quad (3)$$

理论上, $P_n > P_{n-1} > \dots > P_m > \dots > P_1$, 经归一化处理得到对物体的识别程度为 $R = \frac{P_m}{P_n} \times 100\%$ 。

图 4(d, e)分别模仿了手指未褶皱和褶皱时对物体的识别程度, 内插图为初始识别程度的局部放大图。未褶皱时, 识别程度达到 90%以上所需时长为 0.12 s; 褶皱时, 所需时长为 0.14 s。另外, 刚接触物体时, 手指的识别程度分别约 74%和 45%。手指起皱后真皮层连同表皮同时褶皱, 当手指刚接触物体的瞬间, 未褶皱的手指接触物体面积大于褶皱的手指接触物体的面积, 所以未褶皱状态下的初始识别程度更高。随着手指对物体的挤压, 两者的接触面积逐渐增大, 识别程度迅速提高, 最后完成对物体属性的确认。由于器件本身的问题, 识别程度会产生一定的浮动, 误差分别为 $\pm 7.3\%$ (40%RH) 和 $\pm 5.0\%$ (80%RH)。根据前期报道^[23], 手指的褶皱与否不会对触觉敏感度产生明显影响。这说明该神经形态晶体管可以较好地模仿手指的触觉响应行为, 显示出其在仿生电子皮肤方面的应用潜力。

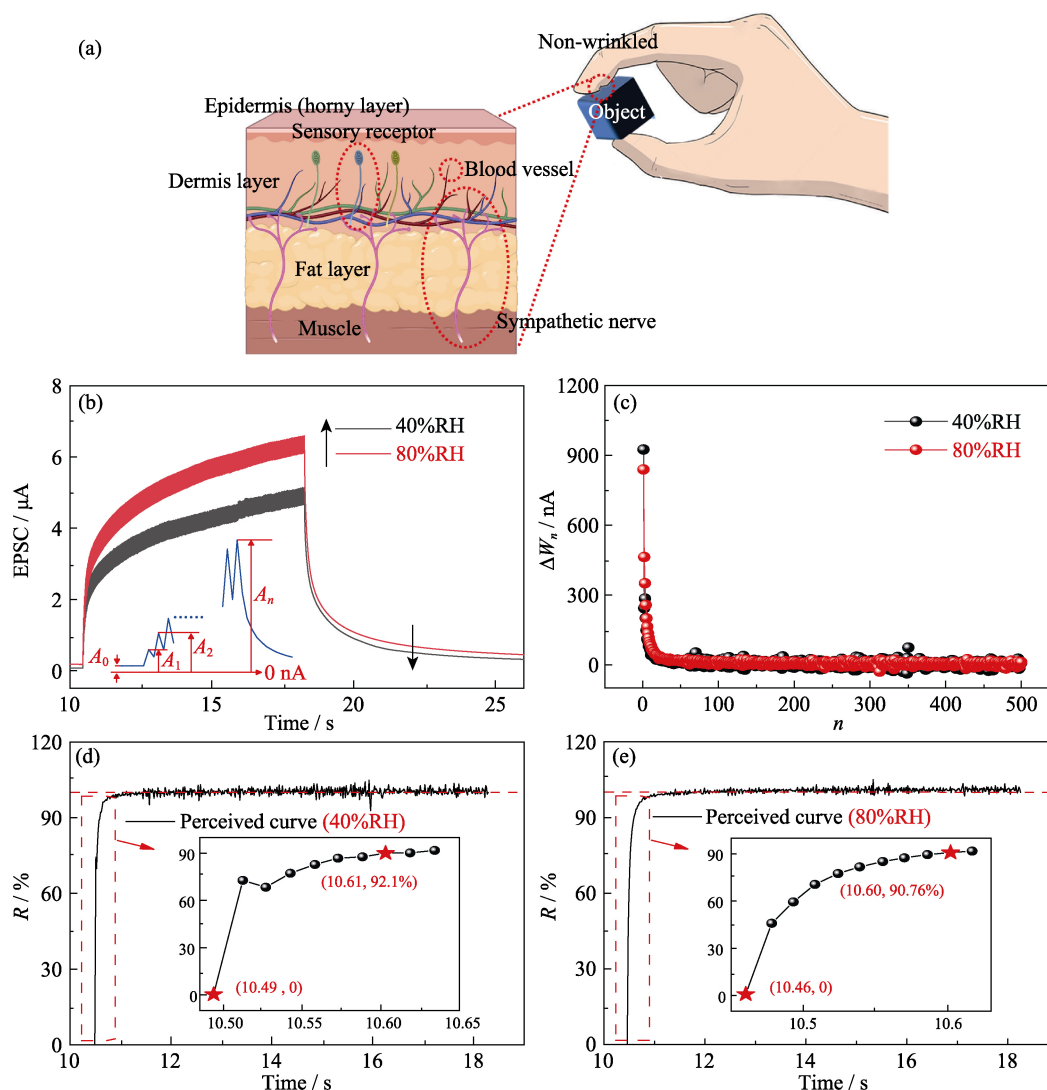


图 4 手指触觉对物体识别程度的仿生量化处理

Fig. 4 Bionic quantitative processing of finger tactile to object recognition

(a) Cross sectional sketch of skin tissue for unfolded fingers when touching objects; (b) EPSC triggered by pre-synaptic spike train at humidities of 40% and 80% with inset showing the definition of A_n ; (c) ΔW_n as a function of n ; (d, e) Degrees of recognition (R) at humidities of (d) 40% and (e) 80%, respectively

在硬件上执行类脑神经形态算法时,需要对固态电子器件的突触权重进行非易失性调制。本研究对 ITO 神经形态晶体管连续施加正向/负向电流脉冲来评估长时程增强/长时程抑制(LTP/LTD)特性,图 S4 为器件脉冲施加和读取方案示意图,先后设置 64 个正向电流脉冲(20 nA, 10 ms)和 64 个负向电流脉冲(-19 nA, 10 ms)对器件突触权重进行调节,在脉冲之间采用漏极电压脉冲(0.1 V, 10 ms)读取突触权重值,电流脉冲和读取电压脉冲的间隔时长 ΔT 为 10 ms。在该方案下,将器件置于 40%和 80%湿度环境中,得到的权重增加(P)和抑制(D)曲线分别如图 5(a, b)所示。在 40%RH 和 80%RH 下的权重比 G_{\max}/G_{\min} 分别为 40.8 和 61.0。在 40%RH 下,非线性参数 A_P 和 A_D 分别为-0.51 和-0.45; 在

80%RH 下, A_P 和 A_D 分别为-0.55 和-0.60。基于 ITO 神经形态晶体管的 P/D 数据,使用 MNIST(Modified National Institute of Standards and Technology)数据库进行监督学习,并在构建的人工神经网络上执行多层感知器(Multilayer Perceptron, MLP)模拟,以实现模式识别。通过误差反向传播在前馈神经网络中更新突触权重,从而验证该器件在神经形态计算方面的应用价值。两层 MLP 模拟器结构示意图如图 5(c)所示,其输入层包含的 400 个神经元对应于手写数字图像的 20×20 个像素点,隐含层作为解决线性不可分问题的网络内部结构,设置有 100 个神经元,而输出层的 10 个神经元则对应于 10 个数字(0~9)。每次模拟时,MLP 模拟器从 MNIST 数据库的 60000 个样本图像中随机抽取 8000 个图像进

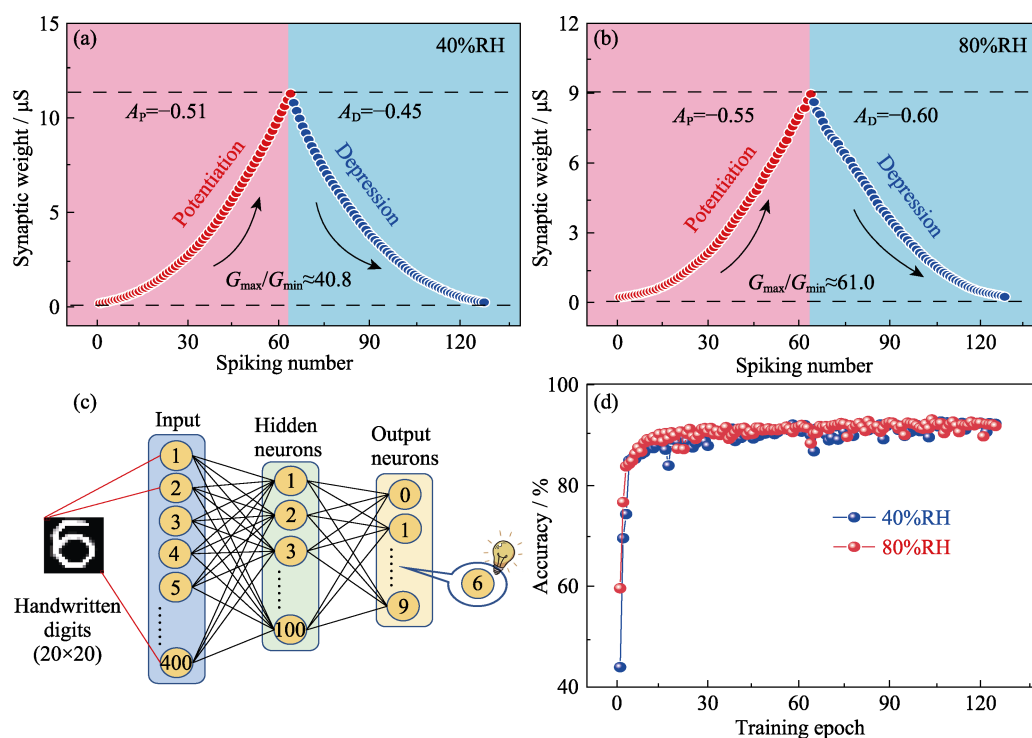


图 5 MNIST 模式识别

Fig. 5 MNIST pattern recognition

(a, b) Synaptic weights updating obtained at humidities of (a) 40% and (b) 80%, respectively; (c) Schematic diagram of the two-layer MLP simulator; (d) Recognition accuracies at humidities of 40% and 80%; Colorful figures are available on website

行训练。训练结束后, 抽取 10000 个图像样本作为测试集对训练的权重更新进行测试。如图 5(d)所示, 在 40%和 80%两种湿度下, 经过 125 次学习, 识别准确率分别为 92.67%和 93.08%, 该识别精度与文献报导的 MNIST 识别精度类似^[24-25]。这些结果表明, GEL/C-CS 电解质栅控 ITO 神经形态晶体管在高精度神经形态计算中具有极强的应用潜力, 并在不同湿度环境下具有很好的稳定性。

3 结论

采用溶液法将亲水性明胶(GEL)和水溶性羧化壳聚糖(C-CS)交联, 制备了一种具有超强质子调控效应的固态电解质薄膜, 并以此作为栅介质制作了 ITO 神经形态晶体管。该神经形态晶体管在低工作电压下表现出极强的质子栅控效应, 能够模仿一些重要的突触响应行为。设计了一种触觉识别程度的方法, 成功模拟了手指在水致褶皱状态和未褶皱状态的触觉敏感度。并采用电流脉冲刺激实现器件突触权重的更新。在此基础上, 搭建了人工神经网络, 对 MNIST 手写数字实现了模式识别, 在 40%RH 和 80%RH 下的识别准确率分别为 92.67%和 93.08%。综上所述可以看出, 这种 GEL/C-CS 栅控 ITO 神经形态

晶体管对仿生智能感知器件和脑启发神经形态系统的设计具有一定的参考价值。

补充材料:

与本文相关补充材料请登陆 <https://doi.org/10.15541/jim20220709> 查阅。

参考文献:

- [1] PARK H L, LEE Y, KIM N, *et al.* Flexible neuromorphic electronics for computing, soft robotics, and neuroprosthetics. *Advanced Materials*, 2020, **32(15)**: 1903558.
- [2] HASEGAWA T, OHNO T, TERABE K, *et al.* Learning abilities achieved by a single solid-state atomic switch. *Advanced Materials*, 2010, **22(16)**: 1831.
- [3] BURGT Y, MELIANAS A, KEENE S T, *et al.* Organic electronics for neuromorphic computing. *Nature Electronics*, 2018, **1(7)**: 386.
- [4] HONG X T, HUANG Y L, TIAN Q L, *et al.* Two-dimensional perovskite-gated AlGaIn/GaN high-electron-mobility-transistor for neuromorphic vision sensor. *Advanced Science*, 2022, **9(27)**: 2202019.
- [5] CHANG T, JO S H, LU W. Short-term memory to long-term memory transition in a nanoscale memristor. *ACS Nano*, 2011, **5(9)**: 7669.
- [6] ZHOU G, WANG Z, SUN B, *et al.* Volatile and nonvolatile memristive devices for neuromorphic computing. *Advanced Electronic Materials*, 2022, **8(7)**: 2101127.
- [7] YANG J T, GE C, DU J Y, *et al.* Artificial synapses emulated by

- an electrolyte-gated tungsten-oxide transistor. *Advanced Materials*, 2018, **30(34)**: 1801548.
- [8] HE Y, NIE S, LIU R, *et al.* Spatiotemporal information processing emulated by multiterminal neuro-transistor networks. *Advanced Materials*, 2019, **31(21)**: 1900903.
- [9] ZHU L Q, WAN C J, GUO L Q, *et al.* Artificial synapse network on inorganic proton conductor for neuromorphic systems. *Nature Communications*, 2014, **5**: 3158.
- [10] JIN C X, LIU W R, HUANG Y L, *et al.* Printable ion-gel-gated In_2O_3 synaptic transistor array for neuro-inspired memory. *Applied Physics Letter*, 2022, **120(23)**: 233701.
- [11] QIU W J, SUN J, LIU W R, *et al.* Multi-gate-driven In-Ga-Zn-O memtransistors with a Sub-60 mV/decade subthreshold swing for neuromorphic and memlogic applications. *Organic Electronics*, 2020, **84**: 105810.
- [12] ZHONG G, ZI M, REN C, *et al.* Flexible electronic synapse enabled by ferroelectric field effect transistor for robust neuromorphic computing. *Applied Physics Letters*, 2020, **117(9)**: 092903.
- [13] KWON S M, CHO S W, KIM M, *et al.* Environment-adaptable artificial visual perception behaviors using a light-adjustable optoelectronic neuromorphic device array. *Advanced Materials*, 2019, **31(52)**: 1906433.
- [14] JIN C X, LIU W R, XU Y C, *et al.* Artificial vision adaption mimicked by an optoelectrical In_2O_3 transistor array. *Nano Letter*, 2022, **22(8)**: 3372.
- [15] JANG J T, KIM D, CHOI W S, *et al.* One transistor-two memristor based on amorphous indium-gallium-zinc-oxide for neuromorphic synaptic devices. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, **2(9)**: 2837.
- [16] PENG Z, WU F, JIANG L, *et al.* HfO_2 -based memristor as an artificial synapse for neuromorphic computing with tri-layer $\text{HfO}_2/\text{BiFeO}_3/\text{HfO}_2$ design. *Advanced Functional Materials*, 2021, **31(48)**: 2107131.
- [17] REN Z Y, KONG Y H, AI L, *et al.* Proton gated oxide neuromorphic transistors with bionic vision enhancement and information decoding. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, **10(18)**: 7241.
- [18] ZHU Y X, PENG B C, ZHU L, *et al.* IGZO nanofiber photoelectric neuromorphic transistors with indium ratio tuned synaptic plasticity. *Applied Physics Letters*, 2022, **121(13)**: 133502.
- [19] DENG X, WANG S Q, LIU Y X, *et al.* A flexible Mott synaptic transistor for nociceptor simulation and neuromorphic computing. *Advanced Functional Materials*, 2021, **31(23)**: 2101099.
- [20] TANIOKA A, TAZAWA T, MIYASAKA K, *et al.* Effects of water on the mechanical properties of gelatin films. *Biopolymers: Original Research on Biomolecules*, 1974, **13(4)**: 753.
- [21] SIONKOWSKA A, WISNIEWSKI M, SKOPINSKA J, *et al.* Molecular interactions in collagen and chitosan blends. *Biomaterials*, 2004, **25(5)**: 795.
- [22] HAIDER S, PARK S Y, LEE S H. Preparation, swelling and electro-mechano-chemical behaviors of a gelatin-chitosan blend membrane. *Soft Matter*, 2008, **4(3)**: 485.
- [23] HASELEU J, OMERBASIC D, FRENZEL H, *et al.* Water-induced finger wrinkles do not affect touch acuity or dexterity in handling wet objects. *PLOS One*, 2014, **9(1)**: e84949.
- [24] LI H, DING Y N, QIU H Y, *et al.* Flexible and compatible synaptic transistor based on electrospun In_2O_3 nanofibers. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, **69(9)**: 5363.
- [25] QIU H Y, HAO D D, LI H, *et al.* Transparent and biocompatible In_2O_3 artificial synapses with lactose-citric acid electrolyte for neuromorphic computing. *Applied Physics Letters*, 2022, **121(18)**: 183301.

补充材料:

明胶/羧化壳聚糖栅控氧化物神经形态晶体管

陈鑫力, 李 岩, 王伟胜, 石智文, 竺立强

(宁波大学 物理科学与技术学院, 宁波 315211)

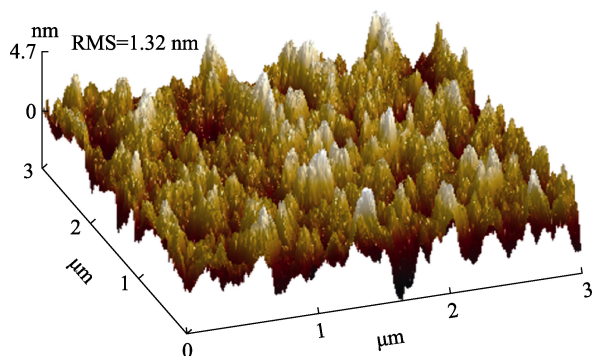


图 S1 GEL/C-CS 电解质薄膜的 AFM 表面形貌
Fig. S1 AFM surface morphology of GEL/C-CS electrolyte film

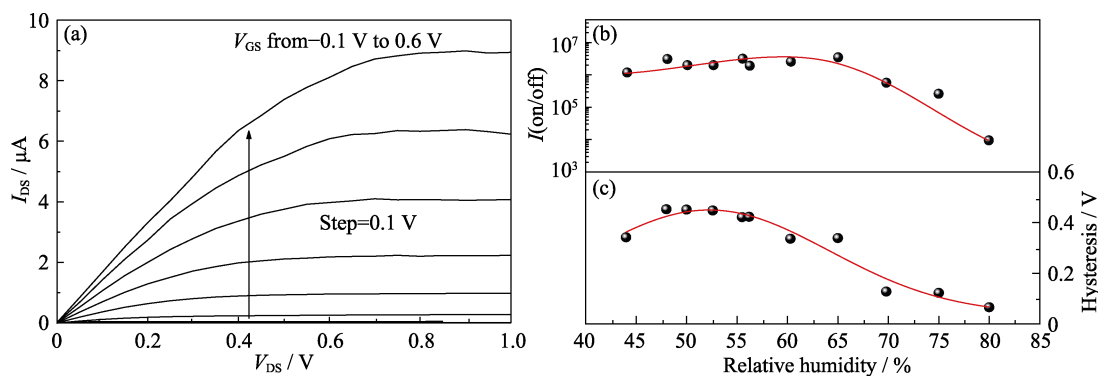


图 S2 ITO 神经形态晶体管在不同湿度下的电学性能
Fig. S2 Electrical performances for GEL/C-CS gated ITO neuromorphic transistor at different relative humidities
(a) Output curves; (b) On/off ratio; (c) Hysteresis

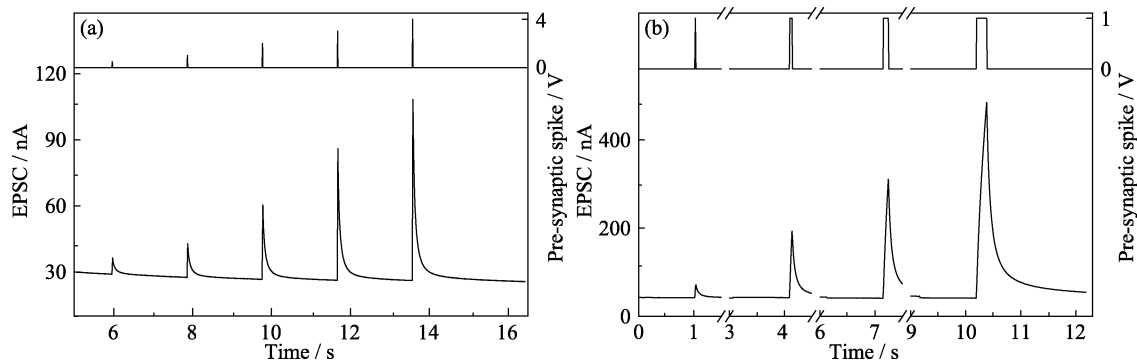


图 S3 ITO 神经形态晶体管的 EPSC 响应调节
Fig. S3 Modulation of EPSC responses for ITO neuromorphic transistor
(a) EPSC responses under different spike amplitude with spike duration time fixed at 10 ms; (b) EPSC responses under different spike duration time with spike amplitude fixed at 1 V

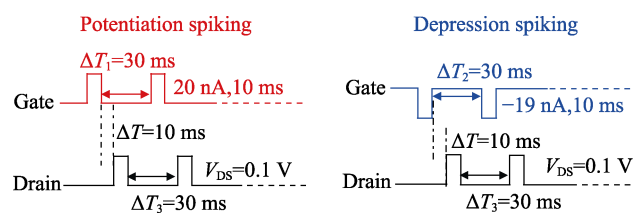


图 S4 突触权重更新所施加的脉冲设置示意图

Fig. S4 Schematic diagram of the spike trains for synaptic weight updating