

等离子体处理对突触晶体管长程塑性的影响

邱海洋, 苗广潭, 李辉, 栾奇, 刘国侠, 单福凯

(青岛大学 微纳技术学院, 青岛 266071)

摘要: 作为神经形态计算系统的基本组成单元, 人工突触器件在高性能并行计算、人工智能和自适应学习方面具有巨大的应用潜力。其中, 电解质栅突触晶体管(Electrolyte-gated synaptic transistors, EGSTs)以其沟道电导的可控性成为下一代神经形态器件被广泛研究的对象, 并用来模拟神经突触功能。EGSTs 因双电层的快速自放电效应, 导致其存在长程塑性持续时间较短和沟道电导不易调控等问题。本研究采用水诱导的 In_2O_3 薄膜作为沟道材料, 以壳聚糖作为栅电解质材料, 制备了基于 In_2O_3 的 EGSTs, 并对器件沟道层进行了氧等离子体处理。研究发现, 利用氧等离子体中的活性氧自由基在沟道层表面产生陷阱态, 使更多氢离子在电解质/沟道界面处被俘获, 器件性能表现为回滞窗口增大, 对 EGSTs 器件的长程塑性实现调控。基于双电层的静电耦合效应和电化学掺杂效应, 本研究利用 EGSTs 器件模拟了神经突触的兴奋性突触后电流(EPSC)、双脉冲易化(PPF)、短程塑性(STP)和长程塑性(LTP)等突触行为。同时, 基于该器件的 EGSTs 增强/抑制特性, 采用三层人工神经网络进行手写数字识别, 经过仿真训练后, 发现该器件可训练出较高的识别率(94.7%)。这些研究结果揭示: 表面等离子体处理是影响器件性能的一项关键技术, 并证明了该技术对调节 EGSTs 神经形态器件的突触功能具有较大的应用潜力。

关键词: 电解质栅突触晶体管; 突触塑性; 等离子体处理; 模式识别

中图分类号: TQ174 文献标志码: A

Effect of Plasma Treatment on the Long-term Plasticity of Synaptic Transistor

QIU Haiyang, MIAO Guangtan, LI Hui, LUAN Qi, LIU Guoxia, SHAN Fukai

(College of Microtechnology & Nanotechnology, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: As the basic and essential unit of neuromorphic computing system, artificial synaptic devices exhibit great potential in accelerating the high-performance parallel computation, artificial intelligence, and adaptive learning. Among them, electrolyte-gated synaptic transistors (EGSTs) have received increasing attention as the next generation neuromorphic devices owing to its controllable channel conductance. The devices exhibit the abilities of simulating the short-term plasticity (STP) and long-term plasticity (LTP) of the neural synapses. However, most of EGSTs exhibit short persistence for LTP and their channel conductance is difficult to be adjusted due to the rapid self-discharge of the electric double layer. In this work, the EGSTs based on water-induced In_2O_3 as the channel and chitosan as gate electrolyte were constructed and the O_2 plasma treatments were performed. The formation of traps on the channel

收稿日期: 2022-11-14; 收到修改稿日期: 2022-12-19; 网络出版日期: 2022-12-28

基金项目: 国家重点研发计划(2019YE0121800); 国家自然科学基金(51872149); 山东省自然科学基金(ZR2022MF246)

National Key Research and Development Program of China (2019YE0121800); National Natural Science Foundation of China (51872149); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2022MF246)

作者简介: 邱海洋(1997-), 男, 硕士研究生. E-mail: 17853260598@163.com

QIU Haiyang (1997-), male, Master candidate. E-mail: 17853260598@163.com

通信作者: 单福凯, 教授. E-mail: fkshan@qdu.edu.cn

SHAN Fukai, professor. E-mail: fkshan@qdu.edu.cn

surface is caused by the O₂ plasma treatments, which leads to capturing hydrogen ions at interface of the electrolyte/channel layer, and the device performance exhibits an enlarged hysteresis window, so as to regulate LTP of EGSTs. Biological synaptic functions, including excitatory postsynaptic current (EPSC), paired-pulse facilitation (PPF), STP, and LTP, were mimicked by electrochemical doping and electrostatic coupling effects. Meanwhile, based on the experimentally verified potentiation/depression characteristics of the EGSTs, a three-layer artificial neural network is applied for handwritten digit recognition, and simulation tests can obtain high recognition accuracy of 94.7%. These results reveal that surface plasma treatment is one of the key technologies to affect the device performance, which has great potential in regulating synaptic function of EGSTs.

Key words: electrolyte-gated synaptic transistor; synaptic plasticity; plasma treatment; pattern recognition

近几年来, 人工智能(AI)得到迅猛发展, 相比于存算分离的冯·诺依曼架构, 存算一体的硬件级人工智能系统, 以其高度互联的信息通道、大规模并行性、超低功耗和极高的容错率等特性, 在数据处理和模式识别等方面都具有绝对优势。人类大脑的自主学习是通过调控突触连接的短时程和长时程塑性来实现的^[1-2]。受人类大脑工作模式的启发, 基于薄膜晶体管的人工突触器件得到广泛研究, 如浮栅突触晶体管、铁电突触晶体管和电解质栅突触晶体管(EGSTs)等^[3-4]。其中, EGSTs 的电学性能出色, 并且其沟道电导可以通过改变栅极电脉冲或光脉冲的大小进行调节, 从而成为一种很有前途的构建硬件级神经网络的候选器件^[5-7]。目前, 国内外研究人员利用不同电解质/沟道材料构建的人工突触器件如 Ion-gel/InZnO^[8]、Ion-gel/In₂O₃^[9]和 DEME-TFSI/WO₃^[10]成功模拟了突触的基本功能。同时, 使用不同类型电解质材料(如聚合物、离子液体、凝胶等固态电解质)作为栅极电解质也引起了广泛关注。由于电解质/沟道界面处存在双电层, 在电场作用下电解质中的离子会在界面处发生静电耦合及电化学反应, 引起沟道电导的变化^[11]。

在神经突触中, 长程可塑性来源于突触的长期记忆功能。与短程塑性相比, 它可以在相对较长的时间内保持调节后的电导。由于可塑性具有非易失性行为, 因此它具有神经形态计算中图像识别和记忆应用的重要功能^[12]。但传统 EGSTs 在实现长程可塑性方面仍存在一些困难, 例如: 撤去栅极电压后, 电解质与沟道界面处的双电层会瞬间消散, 难以调控器件的增强/抑制特性。为了解决离子的快速消散问题, Nikam 等^[13]采用一种原子厚度的石墨烯作为固态电解质与 WO₃ 沟道层之间的夹层, 但经测试发现其长程塑性仅有 10 s。Sun 等^[14]也采用石墨烯作为离子凝胶与 IGZO 沟道层之间的电荷俘获层, 其突触后电流得到显著增强。Haeyeon 等^[15]用紫外线

臭氧(Ultraviolet ozone, UVO)处理界面, 改善了器件的长程塑性。可移动的离子在离子浓度梯度下会迅速扩散回平衡位置, 导致双电层发生快速自放电现象, 使 EGSTs 在长程塑性增强方面极具有挑战性。另外, 离子液体的生物降解性和高毒性也限制了其在神经形态器件中的应用。

本研究利用水诱导形成的非晶态氧化铟薄膜作为沟道, 壳聚糖作为电解质材料, 制备了 EGSTs。利用氧气等离子体处理工艺, 对沟道层表面进行改性处理, 研究了等离子体处理对突触晶体管长程塑性的影响, 并利用 EGSTs 探究了生物突触的基本功能, 如: 兴奋性突触后电流(Excitatory post-synaptic current, EPSC), 双脉冲易化(Paired-pulse facilitation, PPF), 短程塑性(Short-term plasticity, STP)和长程塑性(Long-term plasticity, LTP)等。

1 实验方法

1.1 电解质栅突触晶体管的制备

称取 0.5 g 的壳聚糖溶于 10 mL 的去离子水中, 加入适量的乙酸调节溶液 pH 加速壳聚糖溶解, 再将该混合溶液放置在磁力搅拌器上, 室温下搅拌 12 h 形成离子液。

称取 0.3008 g 的 In(NO₃)₃·9H₂O 溶于 10 mL 的去离子水中, 将溶液置于磁力搅拌器上, 室温下搅拌 12 h 得到澄清透明的溶胶凝胶的前驱体溶液。

依次利用丙酮、乙醇和去离子水对衬底 SiO₂/p-Si(100 nm/500 μm)进行清洗, 并用氮气枪吹干备用。取 5 mL 装医用注射器抽取适量前驱体溶液, 经聚四氟乙烯滤嘴过滤后均匀滴注到洁净的衬底表面, 先以 500 r/min 低速旋转 5 s, 将液体均匀覆盖于硅片表面, 再用 5000 r/min 高速旋涂 15 s 得到凝胶薄膜, 并在 150 °C 热板上固化 10 min, 然后置于马弗炉中, 以 5 °C/min 的升温速率升温至 280 °C 并保温

2 h, 最后形成金属氧化物薄膜。

将镂空掩模板覆于样品表面后, 将样品置入真空热蒸发系统蒸镀图形化的金属 Al 电极(源极和漏极)。选择部分样品作为实验组, 其余作为对照组, 实验组样品经功率为 20 W, 持续时间为 5 min 的氧等离子体处理; 对照组不做任何处理。最后, 利用移液枪将离子液覆盖到两组样品的沟道区域上方, 完成 EGSTs 的制备。

1.2 分析测试方法

在电场被屏蔽的黑箱中进行电学测量。采用 Keithley 2634B 型半导体性能测试仪分析器件的突触特性, 采用 TongHui 2828S 型阻抗分析仪分析电解质材料的电容-频率特性, 采用 Park-XE7 型原子力显微镜观察半导体薄膜表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 沟道层薄膜的表面形貌

图 1(a, b)分别展示了未经处理和经过等离子体处理样品的 AFM 图片, 扫描范围是 $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$, 测得均方根粗糙度分别为 0.352 和 0.394 nm。所得到样品的粗糙度均较小, 说明表面平整, 没有观察到大的孔洞和凸起。

2.2 突触晶体管的器件性能

图 2(a, b)分别为生物突触和 EGSTs 的对照示意图。通常, 一个简单突触由突触前膜、突触间隙和突触后膜构成。当动作电位作用在突触前膜时会刺激突触前膜释放神经递质, 而神经递质越过突触间隙并特异性地作用于突触后膜的受体, 受刺激的突触后膜产生动作电位, 完成信息传递。这一抽象化动作模型可以利用突触晶体管器件得以重构, 即以栅极作为突触前膜, 源极到漏极的沟道作为突触后膜, 离子液以及可移动离子视为突触间隙和神经递质。

图 2(c)为壳聚糖电解质的电容-频率曲线。在频率为 20 Hz 时, 器件的电容值高达 $1.76\ \mu\text{F}/\text{cm}^2$; 但在低频区($f < 10^3\ \text{Hz}$), 壳聚糖电解质的电容随频率增大而缓慢下降, 这是因为低频区电解质中的质子在电场作用下有足够的时间进行迁移, 从而使其表面极化。而在高频区($f > 10^3\ \text{Hz}$), 壳聚糖电解质的电容随频率的增大而迅速减小, 这是由于质子的迁移率受到极化响应时间变短的限制, 使表面的极化现象随频率的增大而逐渐减弱, 电容趋于稳定, 其中高频区的电容主要为本征电容^[16]。

为了探究氧等离子体处理对器件性能的影响, 实验对不同器件的迟滞特性进行了分析。图 2(d)是经等离子体处理和未经等离子体处理器件的传输特性曲线, 测试中源漏电压为 0.3 V, 栅极电压从 -0.5 V 扫描到 1.5 V 并回扫至 -0.5 V, 得到接近 10^3 的电流开/关比。此外, 与对照组样品相比, 经氧等离子体处理的器件表现出明显的逆时针回滞, 并且具有较宽的记忆窗口(0.65 V), 表明沟道电导具有非易失性变化, 这对于模拟神经突触功能至关重要。大回滞归因于高能等离子体处理在沟道表面引发了较多的缺陷态, 在界面处引入了更多的离子俘获中心^[17], 当撤去栅极电压后, 双电层中受到外部电场驱动的可移动离子将比未经处理的更难通过扩散作用返回到初始位置, 因此, 离子的弛豫行为被增强, 致使正反扫描窗口增大, 从而更易于调控沟道电导。图 2(e, f)分别显示了两组实验样品的典型输出特性曲线, 即源漏电流(I_{ds})随源漏电压(V_{ds})的变化关系。随着栅极电压(V_{g})从 1.5 V 减小到 0 V, I_{ds} 逐渐减小。在小 V_{ds} 下, I_{ds} 随 V_{ds} 线性增大; 在大 V_{ds} 下, I_{ds} 逐渐饱和; 并且两组实验样品均具有良好的欧姆接触。

在神经形态器件中, 突触的连接强度可以通过突触后电流的大小来反映, 并可通过栅极电压来调控。利用 EPSC 分析描述的是生物突触完成一次兴奋性动作的过程中突触后膜的电流响应^[18]。连接强

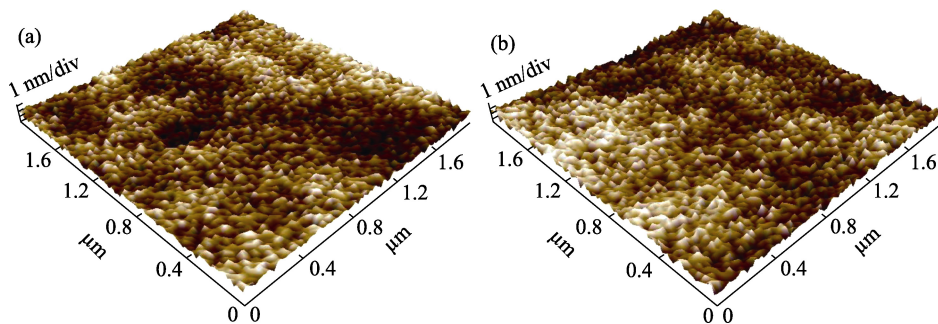


图 1 未经处理(a)和经过等离子体处理(b) In_2O_3 薄膜的 AFM 图片
Fig. 1 AFM images of (a) untreated and (b) plasma-treated In_2O_3 films

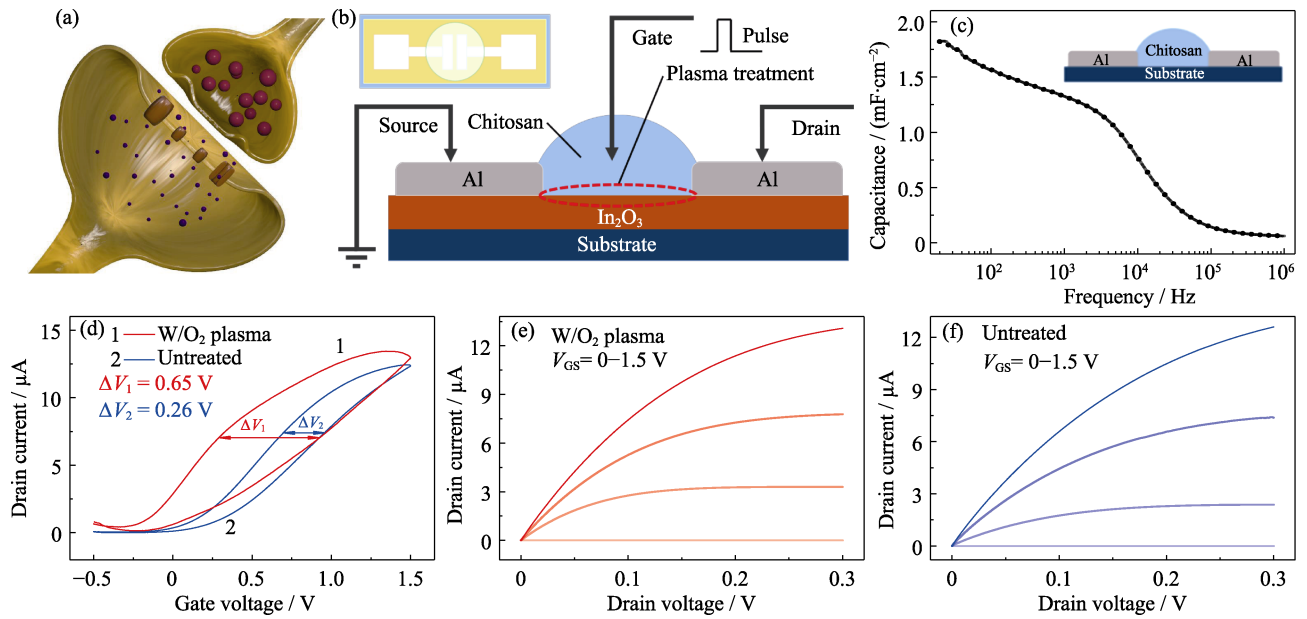


图 2 突触晶体管的示意图和器件性能

Fig. 2 Schematic illustration and properties of synaptic transistor

(a) Schematic illustration of a synapse; (b) Device structure; (c) Frequency-dependent characteristics of chitosan electrolyte with inset showing device configuration for C-F measurement; (d) Transfer curves of untreated and O_2 plasma-treated (W/O_2 plasma) device; (e) Output curves of untreated device; (f) Output curves of O_2 plasma treated device

度(突触权重)调控的过程即为短程塑性和长程塑性,是生物突触实现自学习和记忆的前提^[19]。

在 EGSTs 栅极施加一个电压脉冲(0.5 V, 10 ms),如图 3(a)所示,无脉冲信号时突触后电流始终保持在相对稳定的低电位的静息态。脉冲信号持续作用下,突触后电流产生响应动作并以非突变的形式缓增。撤除栅极电压后,突触后电流在一段时间内缓慢恢复至初始静息态。产生该现象主要归因于静电耦合效应^[20]。对比分析有无氧等离子体处理的不同样品的 EPSC 测试结果,发现在同一脉冲刺激下经等离子体处理的突触晶体管的 EPSC 的幅值可达 $1.24 \mu A$, 弛豫时间约 100 ms;而未处理的突触晶体管的 EPSC 幅值为 $1.75 \mu A$, 弛豫时间约为 30 ms。可见等离子体处理后器件的弛豫时间显著增大,其 EPSC 幅值减小,这是由于等离子体处理使沟道层表面陷阱态增加,沟道层中的载流子在源漏电压作用下迁移时被更多缺陷中心俘获或散射;而弛豫时间延长则归因于可移动离子通过扩散作用返回到初始位置的阻力变大,此时表现为对脉冲响应的弛豫增强。

与短程塑性不同的是,长程塑性则是能以更长时间保持其非易失状态。产生长程塑性需要足够强度的脉冲刺激,激发形式包括更高的脉冲幅度、更长的脉冲时间、更多的脉冲数量和更快的脉冲频率等^[21]。在 EGSTs 中,长程塑性的本质是外部刺激提供了足够大的电场驱动力,可使界面处耦合的离子

以电化学掺杂的形式嵌入沟道层,改变沟道的低电位静息态。通过对等离子体处理的 EGSTs 施加大幅度的单脉冲,模拟生物突触的长程塑性,结果如图 3(b)所示,器件读取电压为 0.3 V,单脉冲幅度为 2 V,持续时间为 100 ms,响应结束后有明显的静息态电流无法复位,表明该器件在此刺激条件下出现了长程塑性。对比发现,未处理的器件在同一脉冲刺激下无长程塑性。由此可见,利用等离子体处理在双电层沟道界面处制造缺陷态,可降低 EGSTs 长程塑性的模拟难度,器件在长程塑性模拟中表现出明显的优势。

在神经形态器件中,多脉冲易化是一种常见的突触塑性的表现形式,双脉冲易化(PPF)是最简单的一种易化表现行为,即在间隔一定时间内施加两个连续脉冲所激发的响应强度不同,后脉冲触发的响应强度受到前脉冲的影响而增强^[22]。如图 3(c)所示,在读取电压为 0.3 V,双脉冲幅度为 0.3 V,脉冲持续时间为 10 ms,脉冲间隔为 30 ms 条件下,前脉冲响应幅度约为 $1.07 \mu A$,后脉冲响应幅度约为 $1.21 \mu A$, PPF 指数约为 113%。该结果显示出明显的后脉冲响应增强的现象,这是由于前脉冲引起的质子尚未扩散回初始位置时再次施加后脉冲而引起的质子累积效应。图 3(d)描述了 PPF 指数与脉冲间隔时间的关系,图中公式中 C_1 和 C_2 是两个阶段的初始幅值, τ_1 和 τ_2 是特征弛豫时间^[23]。分析拟合数据, τ_1 和 τ_2 分别为 ~ 72 和 ~ 130 ms,该数值与生物突触

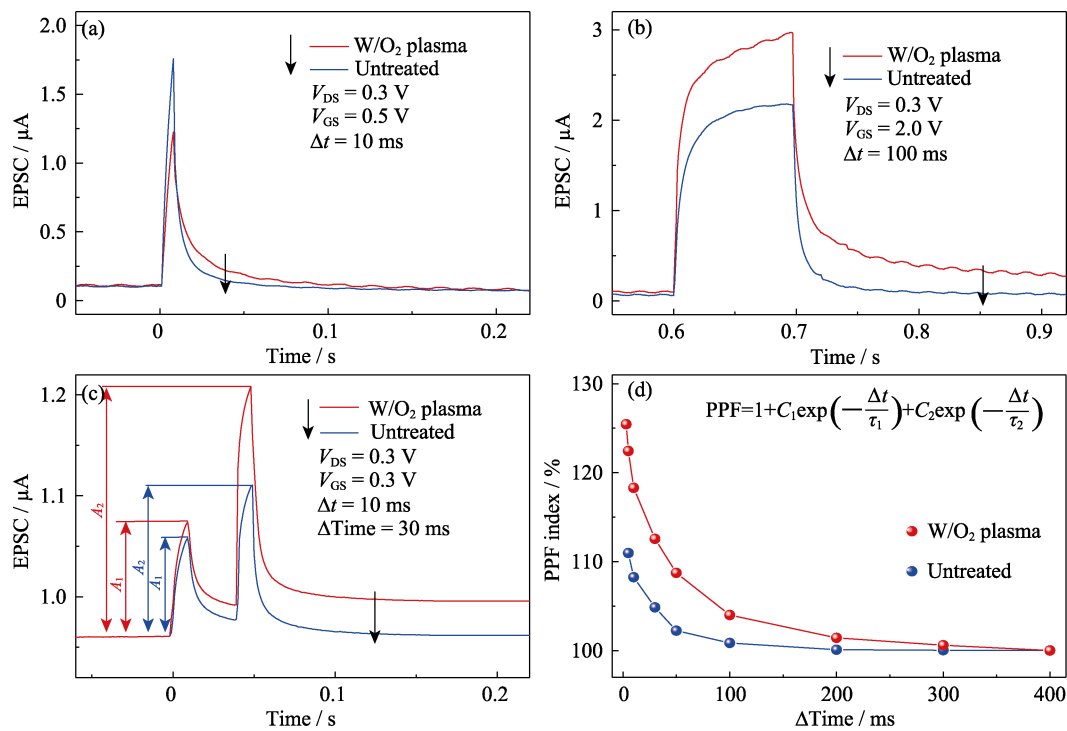


图 3 未经处理和经氧等离子体处理的器件短程塑性(a)和长程塑性(b), 处理前后器件的 PPF 曲线(c)及 PPF 指数随脉冲间隔的变化(d)

Fig. 3 STP (a) and LTP (b) characteristics of untreated and O_2 plasma-treated (W/ O_2 plasma) device, (c) paired-pulse facilitation curves for device with and without O_2 plasma treatment and (d) PPF index as a function of pulse interval
Colorful figures are available on website

中的实际测量值相当, 表明该器件在神经形态计算中具有实际应用潜力^[24]。

通常长程突触塑性包括长程增强和长程抑制两种类型^[25]。图 4(a, c)分别显示了未经处理和氧等离子体处理后的器件的增强/抑制特性, 在 $V_{DS}=0.3$ V 的恒定偏置下, 分别对器件施加幅值为 2 和 -1 V、宽度为 10 ms、间隔为 200 ms、数量为 30 的系列脉冲。结果表明, 氧等离子体处理后的器件长程增强/抑制特性曲线都表现出较高的线性度, 处理前后的长程增强曲线的线性度分别为 0.62 和 0.95, 长程抑制曲线的线性度分别为 0.68 和 0.92。未处理器件的长程增强/长程抑制特性曲线呈指数形式变化、线性度较差等现象在 EGSTs 中普遍存在, 这是由于电解质中离子的弛豫过程难于控制^[26]。处理后器件的增强/抑制曲线表现出较高的线性度, 这是由于界面处的陷阱位点影响了质子的俘获和释放过程(电化学掺杂效应), 即通过相同脉冲可以进行逐级调控, 沟道电导不会出现突变或饱和现象。根据输入脉冲的极性不同, 质子可以嵌入或脱出电解质与沟道界面处的缺陷态, 可见, 电化学掺杂效应会直接影响沟道的电导值。为了进一步探究器件的操作重复性和循环稳定性, 在 50 个循环周期内, 对处理前后的器件进行了连续电导调制测试, 结果如图 4(b, d)所示,

氧等离子体处理后的器件性能没有显著衰减, 具有高稳定性, 且比未处理的器件具有更高的线性度。

为了测试 EGSTs 在神经形态计算中的应用, 基于实验测量的增强/抑制特性, 搭建了人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN), 利用 CrossSim 平台和反向传播算法检验了三个数据集的监督学习结果: 来自修改后的国家标准与技术研究所(Modified National Institute of Standards and Technology, MNIST)数据集中的小图像版本(8×8 像素)手写数字数据集(Small digits)、大图像版本(28×28 像素)手写数字数据集(Large digits)和文件类型分类数据集(256 个字节对, 可分为 9 种文件类型, File types)^[27]。从图 5(a)中可以看出, 网络由 784 个输入神经元(V_0-V_{783})、150 个隐藏神经元和 10 个输出神经元组成。在模拟过程中, 每个神经元接收与输入层中的图像像素对应的值, 将其分配给输入向量(V_m), 然后通过权重矩阵($W_{m,n}$)将其转换为 10 个输出值^[28-30]。图 5(b)表明在硬件级阵列网络中, EGSTs 可以作为交叉阵列中的存储单元, 且阵列中每个器件的权重值可以利用反向传播算法精确调控。基于 EGSTs 的增强/抑制循环曲线, 三种数据集的识别率可通过 CrossSim 平台训练得到。图 5(c, d)和图 5(e)分别是处理前后的 EGSTs 作为突触连接层进行神经网络

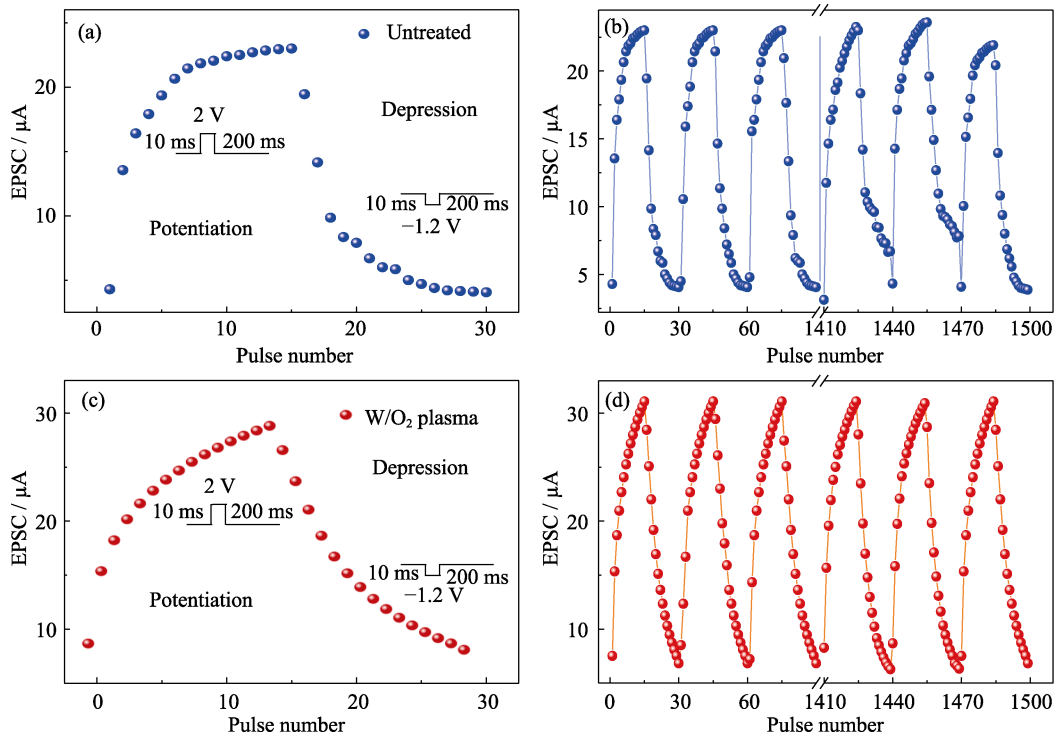


图 4 未经处理(a)和经氧等离子体处理(c)器件增强/抑制特性。经过 50 次循环后, 未经处理 (b)和经氧气等离子体处理(d)器件 P-D 曲线的循环稳定性

Fig. 4 Potentiation/depression characteristics of untreated (a) and O₂ plasma-treated (c) devices, repeatability, and stability of P-D curves after 50 cycles of untreated (b) and O₂ plasma-treated (d) devices

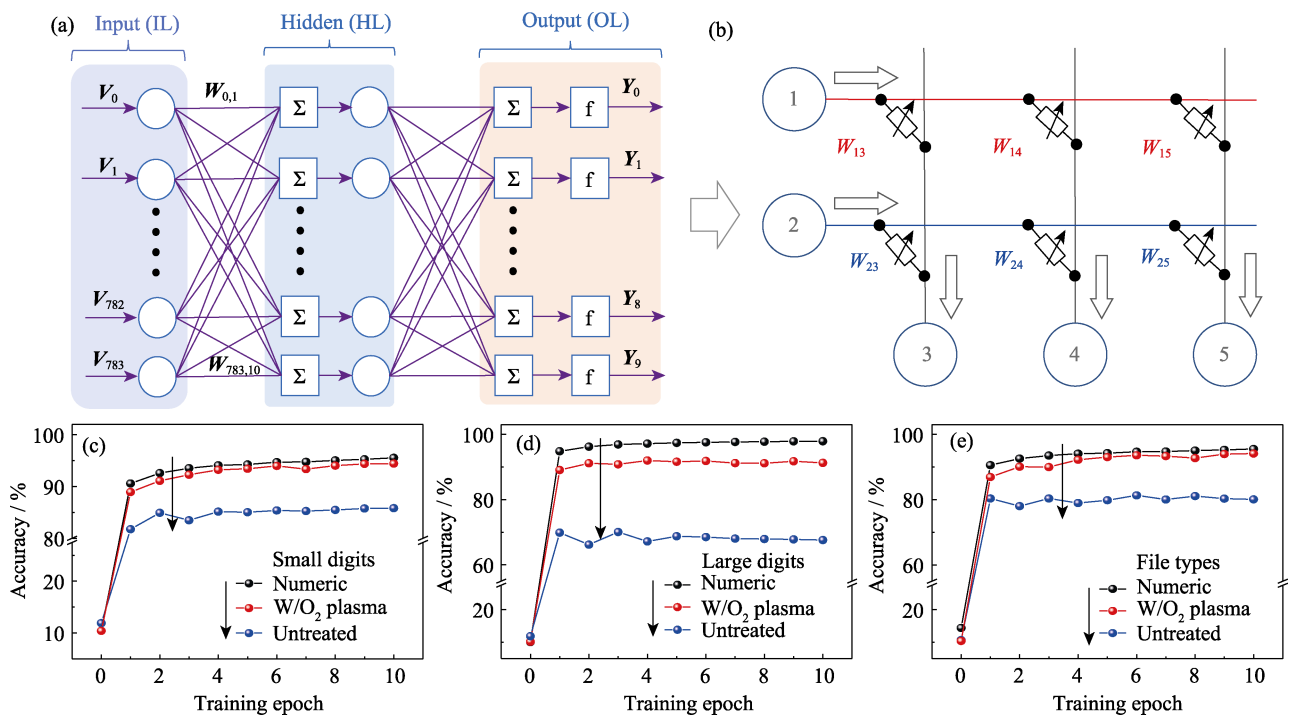


图 5 人工神经网络、突触权重交叉阵列的硬件和监督学习结果检验

Fig. 5 Artificial neural network, synaptic weight cross array of hardware and supervised learning outcome tests
 (a) Diagram of the ANN for pattern recognition; (b) Schematic diagram showing a hardware implemented synaptic weight cross-bar array with EGSTs with evolution classification accuracy as a function of training epochs for small digits (c), large digits (d), and file types (e), respectively
 Colorful figures are available on website

络仿真的结果,其中黑色数据点为理想数值精度(神经网络在电导线性分布和噪声作用下仿真的结果),红色数据点为氧等离子处理后的器件作为突触连接层的训练结果,蓝色数据点为未处理的器件作为突触连接层的训练结果。对于小数据集,EGSTs 的识别率在第二个周期可以超过 90%,10 个训练周期后识别率收敛 94.7%。值得注意的是,采用反向传播算法,小数据集的理想数值精度的理论极限是 96.8%。对于大数据集和文件类型分类数据集,经过氧等离子体处理后器件的训练结果分别为 90.2% 和 91.4%。通过提高电导更新的线性度和对称度,或者增加电导状态,可以进一步提高三类数据集的识别率。

3 结论

综上所述,通过对 EGSTs 沟道界面进行氧等离子体处理,可调控离子液中质子的弛豫过程,实现优异的长程塑性和理想的线性电导调制。利用制备的 EGSTs 成功地模拟了生物突触的基本功能,如:兴奋性突触后电流(EPSC)、双脉冲易化(PPF)、短程塑性(STP)和长程塑性(LTP)。并利用 CrossSim 平台,搭建了用于模式识别的人工神经网络,基于器件的增强/抑制特性对神经网络进行训练,采用氧等离子体处理的器件对于小图像版本手写数字数据集的识别率为 94.7%,文件类型数据集的识别率为 90.2%。该结果表明 LTP 增强的 EGSTs 在构筑硬件级神经网络阵列与优化模式识别功能等未来发展方向上具有实际应用前景。

参考文献:

- [1] SANGWAN V K, HERSAM M C. Neuromorphic nanoelectronic materials. *Nature Nanotechnology*, 2020, **15**: 517.
- [2] MURAT O, NICOLAS E, WANG B M, *et al.* Nanosecond protonic programmable resistors for analog deep learning. *Science*, 2022, **377(6605)**: 539.
- [3] HO V M, LEE J, MARTIN K C. The cell biology of synaptic plasticity. *Science*, 2011, **334(6056)**: 623.
- [4] ZHU Y X, WAN Q, SHAN F K, *et al.* Solution-processed electrolyte gated In₂O₃ flexible synaptic transistors for brain-inspired neuromorphic applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, **12(1)**: 1061.
- [5] ZHU Y X, LIU G X, SHAN F K, *et al.* Electrospun ZnSnO nanofibers for neuromorphic transistors with ultralow energy consumption. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, **40(11)**: 1776.
- [6] JIN C X, SUN J, YANG J L, *et al.* Artificial vision adaption mimicked by an optoelectrical In₂O₃ transistor array. *Nano Letters*, 2022, **22**: 3372.
- [7] KWON S M, KIM Y H, PARK S K, *et al.* Environment-adaptable artificial visual perception behaviors using a light-adjustable optoelectronic neuromorphic device array. *Advanced Materials*, 2019, **31(52)**: 1906433.
- [8] WANG J X, CHEN Y, SUN J, *et al.* Deep-ultraviolet-triggered neuromorphic functions in In-Zn-O phototransistors. *Applied Physics Letters*, 2018, **113(15)**: 151101.
- [9] JIN C X, LIU W R, SUN J, *et al.* Printable ion-gel-gated In₂O₃ synaptic transistor array for neuro-inspired memory. *Applied Physics Letters*, 2022, **120(23)**: 233701.
- [10] YANG J T, GE C, JIN K J, *et al.* Artificial synapses emulated by an electrolyte-gated tungsten-oxide transistor. *Advanced Materials*, 2018, **30(34)**: 1801548.
- [11] QIU H Y, HAO D D, SHAN F K, *et al.* Transparent and biocompatible In₂O₃ artificial synapses with lactose-citric acid electrolyte for neuromorphic computing. *Applied Physics Letters*, 2022, **121(18)**: 183301.
- [12] YU S M. Neuro-inspired computing with emerging nonvolatile memory. *Proceedings of the IEEE*, 2018, **106(2)**: 260.
- [13] NIKAM R D, KWAK M, LEE J, *et al.* Controlled ionic tunneling in lithium nanoionic synaptic transistor through atomically thin graphene layer for neuromorphic computing. *Advanced Electronic Materials*, 2019, **6(2)**: 1901100.
- [14] SUN J, OH S, PARK J H, *et al.* Optoelectronic synapse based on IGZO-alkylated graphene oxide hybrid structure. *Advanced Functional Materials*, 2018, **28(47)**: 1804397.
- [15] LEE H, JIN M, NA H J, *et al.* Implementation of synaptic device using ultraviolet ozone. *Advanced Functional Materials*, 2021, **32(15)**: 2110591.
- [16] YANG C S, SHANG D S, LIU N, *et al.* All-solid-state synaptic transistor with ultralow conductance for neuromorphic computing. *Advanced Functional Materials*, 2018, **28(42)**: 1804170.
- [17] WANG J J, DING Y N, SHAN F K, *et al.* Performance enhancement of field-effect transistors based on In₂O₃ nanofiber networks by plasma treatment. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, **42(2)**: 176.
- [18] FENG G D, JIANG J, WAN Q, *et al.* A sub-10nm vertical organic/inorganic hybrid transistor for pain-perceptual and sensitization-regulated nociceptor emulation. *Advanced Materials*, 2019, **32(6)**: 1906171.
- [19] GILLUND G, SHIFFRIN R M. A retrieval model for both recognition and recall. *Psychological Review*, 1984, **91(1)**: 1.
- [20] LI H, DING Y N, SHAN F K, *et al.* Flexible and compatible synaptic transistor based on electrospun In₂O₃ nanofibers. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, **69(9)**: 5363.
- [21] NIE S, HE Y L, WAN Q, *et al.* Low-voltage oxide-based synaptic transistors for spiking humidity detection. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, **40(3)**: 459.
- [22] ZHU Y X, PENG B C, WAN Q, *et al.* IGZO nanofiber photoelectric neuromorphic transistors with indium ratio tuned synaptic plasticity. *Applied Physics Letters*, 2022, **121(13)**: 133502.
- [23] LIU Y H, ZHU L Q, WAN Q, *et al.* Freestanding artificial synapses based on laterally proton-coupled transistors on chitosan membranes. *Advanced Materials*, 2015, **27(37)**: 5599.
- [24] WAN C J, ZHU L Q, WAN Q, *et al.* Laterally coupled synaptic transistors gated by proton conducting sodium alginate films. *IEEE Electron Device Letters*, 2014, **35(6)**: 672.
- [25] KE S, FU C Y, WAN Q, *et al.* BCM learning rules emulated by a-IGZO-based photoelectric neuromorphic transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, **69(8)**: 4646.
- [26] QIN W, KANG B H, KIM H J. Flexible artificial synapses with a biocompatible maltose-ascorbic acid electrolyte gate for neuromorphic computing. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, **13(29)**: 34597.
- [27] ZHU Y X, MAO H W, WAN Q, *et al.* Photoelectric synapse based on InGaZnO nanofibers for high precision neuromorphic computing. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, **43(4)**: 651.
- [28] CHEN C S, HE Y L, WAN Q, *et al.* A photoelectric spiking neuron for visual depth perception. *Advanced Materials*, 2022, **34(20)**: 2201895.
- [29] HE Y L, NIE S, WAN Q, *et al.* Indium-gallium-zinc-oxide Schottky synaptic transistors for silent synapse conversion emulation. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, **40(1)**: 139.
- [30] QIAN C, OH S, CHO J H, *et al.* Solar-stimulated optoelectronic synapse based on organic heterojunction with linearly potentiated synaptic weight for neuromorphic computing. *Nano Energy*, 2019, **66**: 104095.