

## 基于氧化物基电解质栅控晶体管突触的关联学习

方仁瑞<sup>1,2</sup>, 任宽<sup>1</sup>, 郭泽钰<sup>1,2</sup>, 徐晗<sup>1,2</sup>, 张握瑜<sup>1,2</sup>,  
王菲<sup>1,2</sup>, 张培文<sup>1,2</sup>, 李悦<sup>1,2</sup>, 尚大山<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院微电子研究所, 微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 电解质栅控晶体管(Electrolyte-gated transistors, EGTs)的沟道电导连续可调特性使其在构建神经形态计算系统中具有巨大应用潜力。本工作以非晶态 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 作为沟道材料, Li<sub>x</sub>SiO<sub>2</sub> 作为栅电解质材料, 制备了一种具备低沟道电导(~120 nS)的 EGT 器件。该器件利用 Li<sup>+</sup>嵌入/脱出 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 晶格导致的沟道电导连续可逆变化, 模拟了神经突触的短程可塑性(Short-term plasticity, STP)、长程可塑性(Long-term plasticity, LTP)以及 STP 向 LTP 的转变等功能。基于这种 EGT 突触特性, 本工作设计了关联学习电路, 实现了突触权重的负反馈调节, 并模拟了“巴普洛夫的狗”经典条件反射行为。这些结果展现出 EGT 作为神经突触器件的巨大潜力, 为实现神经形态计算硬件提供了器件参考。

**关键词:** 电解质栅控晶体管; 神经突触; 突触可塑性; 关联学习

中图分类号: TQ174 文献标志码: A

## Associative Learning with Oxide-based Electrolyte-gated Transistor Synapses

FANG Renrui<sup>1,2</sup>, REN Kuan<sup>1</sup>, GUO Zeyu<sup>1,2</sup>, XU Han<sup>1,2</sup>, ZHANG Woyu<sup>1,2</sup>, WANG Fei<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Peiwen<sup>1,2</sup>, LI Yue<sup>1,2</sup>, SHANG Dashan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Microelectronic Devices and Integrated Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The analog channel conductance modulation of electrolyte-gated transistors (EGTs) is a desirable property for the emulation of synaptic weight modulation and thus gives them great potential in neuromorphic computing systems. In this work, an all-solid-state electrochemical EGT was introduced with a low channel conductance (~120 nS) using amorphous Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Li-doped SiO<sub>2</sub> (Li<sub>x</sub>SiO<sub>2</sub>) as the channel and gate electrolyte materials, respectively. By adjusting the applied gate voltage pulse parameters, the reversible and nonvolatile modulation of channel conductance were achieved, which was ascribed to reversible intercalation/deintercalation of Li<sup>+</sup> ions into/from the Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> lattice. Essential functionalities of synapses, such as the short-term plasticity (STP), long-term plasticity (LTP), and transformation from STP to LTP, were simulated successfully by conductive channel modulation of the EGTs. Based on these characteristics, a simple associative learning circuit was designed by parallel a resistor between the gate and the source terminals. The Pavlovian dog classical conditioning behavior was simulated based on associative learning circuit, where the resistor represented the unconditioned synapse and shared the gate voltage with EGT according to

收稿日期: 2022-09-04; 收到修改稿日期: 2022-09-30; 网络出版日期: 2022-10-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2018YFA0701500); 国家自然科学基金(61874138)

National Key Basic Research Development Program of China (2018YFA0701500); National Natural Science Foundation of China (61874138)

作者简介: 方仁瑞(1994-), 男, 博士研究生. E-mail: fangrenrui@ime.ac.cn

FANG Renrui (1994-), male, PhD candidate. E-mail: fangrenrui@ime.ac.cn

通信作者: 尚大山, 研究员. E-mail: shangdashan@ime.ac.cn

SHANG Dashan, professor, E-mail: shangdashan@ime.ac.cn

the proportion of its resistance, and the resistance between gate and source for negative feedback regulation of synaptic weights. These results demonstrate the potential of EGT for artificial synaptic devices and provide an insight into hardware implementation of neuromorphic computing systems.

**Key words:** electrolyte-gated transistor; synapse; synaptic plasticity; associative learning

信息技术的快速发展引发了需要处理的数据量的指数式增长。但是随着摩尔定律发展减缓, 存储与计算分离的冯·诺依曼架构愈发难以满足人们对海量数据处理的需求。如何快速、高效地处理海量数据已成为一个重要问题。人脑中庞大的神经网络不仅具有很高的计算效率, 而且能够调整神经元之间的突触连接强度或在以前没有连接的地方建立新的突触连接, 从而对外界环境具有良好的自适应性<sup>[1]</sup>。目前, 基于传统硅基电路的人工神经网络也重现了类似的特性, 但由于单个神经元或突触的功能电路的复杂性, 仍然存在一些巨大的可扩展性和能耗等挑战<sup>[2-3]</sup>。最近, 人们采用两端忆阻器模拟了如 STP、LTP、脉冲时间依赖可塑性和经典条件反射(“巴普洛夫的狗”实验)等突触功能, 但是两端器件的读取和写入过程都发生在同一个电流通路上, 因此读取过程中施加的读电压可能会改变器件的阻态, 影响器件工作的稳定性<sup>[4-6]</sup>。相比之下, 三端器件的写入过程发生在栅极, 读取过程发生在漏极, 这种读写分离的工作模式使其具有更好的调控能力和稳定性, 例如更好的线性和对称性开关行为以及更低的读写噪声<sup>[6-7]</sup>。因此, 为了模拟人脑的自适应性神经网络, 需要开发一种可以模拟综合突触功能的器件。

近年来, 电解质栅控晶体管(EGT)作为一种极具潜力的突触器件, 在神经形态计算中得到了广泛的应用<sup>[8-10]</sup>。其利用含有可移动离子(如  $H^+$ 、 $Li^+$  或  $O^{2-}$ )的电解质代替栅介质, 通过在栅极施加电压将活性离子嵌入/脱出可渗透的沟道, 改变其掺杂水平, 从而可以灵活地调节沟道电导。同时, EGT 的记忆特性与电解质/沟道界面上的离子吸附和电化学反应密切相关, 即沟道电导状态的变化和保持主要取决于栅极偏压, 栅极偏压决定了 EGT 工作过程中离子动态过程的主导形式。EGT 的这种物理特性可以自然地应用于模拟 STP、LTP 和经典条件反射等突触功能, 构成自适应神经网络的基础突触单元。目前, 国内外研究人员利用不同电解质/沟道材料的 EGT 如  $HfO_2/WO_3$ <sup>[11]</sup>、 $hBN/WO_3$ <sup>[12]</sup> 和 Sodium alginate/ITO<sup>[13]</sup> 成功模拟了突触的基本功能。Lee 等<sup>[14]</sup> 利用  $ZrO_{1.7}/WO_{2.7}$  型 EGT 构建  $2 \times 2$  交叉阵列, 成功实现

了 MINIST(Mixed National Institute of Standards and Technology)数据集中的手写数字图像识别。此外, Cheng 等<sup>[15]</sup> 构建 Ion gel/(0D-CsPbBr<sub>3</sub>/2D-MoS<sub>2</sub>)型 EGT 模拟了经典的条件反射行为。但是, 这些器件通常具有较高的沟道电导值(10~1000  $\mu S$ ), 并且需要借助复杂的功能电路才能实现综合的突触功能。

本研究以非晶态 Li 掺杂的  $SiO_2(Li_xSiO_2)$  作为栅电解质材料, 非晶态  $Nb_2O_5(a-Nb_2O_5)$  作为沟道材料构建了具有低电导(~120 nS)的全固态体系的 EGT。沟道电导作为突触权重, 可以通过栅压诱导  $Li^+$  在  $Nb_2O_5$  沟道中可逆地嵌入和脱出来调控。我们在前期工作中构建了  $32 \times 32$  EGT 交叉阵列, 实现了脉冲神经网络功能, 可用于处理时序信息, 并提出一种 1T1E (one transistor one EGT) 结构的突触单元解决了 EGT 的自放电问题, 同时利用  $SiO_2$  插入层改善了 EGT 的保持特性<sup>[16-18]</sup>。本工作利用 EGT 成功地实现了生物突触的基本功能, 如兴奋性突触后电流(Excitatory post-synaptic current, EPSC), 脉冲对增强(Paired-pulse facilitation, PPF)以及 STP 向 LTP 的转变。进一步利用 EGT 的三端结构设计了一个简单的关联学习电路, 物理上实现了经典条件反射行为及其消失。本研究提出的氧化物基 EGT 为实现具有高效学习能力的自适应神经网络提供了一个极具应用潜力的突触范式。

## 1 实验方法

首先, 依次用丙酮、乙醇和去离子水清洗 2 英寸  $SiO_2/p-Si(300 \text{ nm}/500 \mu m)$  衬底, 并用氮气气枪吹干待用。接着, 利用标准光刻工艺包括旋涂负光刻胶  $1500 \rightarrow 150 \text{ }^\circ C$  下前烘 2 min  $\rightarrow$  光刻机中曝光 11 s  $\rightarrow 120 \text{ }^\circ C$  下后烘 2 min  $\rightarrow$  显影液中显影 45 s 等步骤进行源、漏电极的图形化, 通过电子束蒸发沉积 Cr/Au(5 nm/35 nm) 到衬底上, 并利用剥离工艺, 即将沉积金属或氧化物薄膜后的样品浸入丙酮中使光刻胶和上面的薄膜一起脱离衬底, 从而制备出源极和漏极。然后, 通过光刻工艺进行套刻对准, 进行沟道和栅电解质层的图形化, 再利用磁控溅射工艺依次沉积  $a-Nb_2O_5(20 \text{ nm})$  和  $Li_xSiO_2(80 \text{ nm})$ , 并利用剥

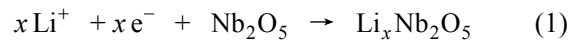
离工艺制备出沟道和栅电解质层。最后, 利用光刻工艺进行栅电极的图形化, 并利用电子束蒸发沉积 Cr/Au(5 nm/35 nm)之后, 再通过剥离工艺制备出栅电极。

利用光学显微镜表征器件的表面形貌, 并利用半导体参数分析仪(Agilent B1500A)测试器件在室温下的电学特性。

## 2 结果与讨论

图 1(a)显示了 EGT 的典型输出特性曲线, 即漏源电流( $I_d$ )随漏源电压( $V_d$ )的变化关系。在测试过程中, 先进行  $0\text{ V} \rightarrow V_g \rightarrow 0\text{ V}$  的扫描, 扫描速率为  $20\text{ mV/s}$ , 然后撤去栅压, 再测量  $I_d-V_d$  曲线。随着栅压( $V_g$ )从  $0\text{ V}$  增大到  $5\text{ V}$ ,  $I_d$  逐渐增大。在低  $V_d$  下,  $I_d$  随  $V_d$  线性增大, 表明器件具有良好的欧姆接触; 在高  $V_d$  下,  $I_d$  逐渐达到饱和值。图 1(b)显示了扫描速率为  $20\text{ mV/s}$ 、 $V_d$  为  $0.1\text{ V}$  时器件的转移特性曲线, 即  $I_d$  随  $V_g$  的变化关系。器件表现出明显的逆时针回滞现象, 表明沟道电导具有非易失性变化, 这对于模拟突触功能至关重要。图中的回滞行为与电位诱导  $\text{Li}^+$  嵌入  $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$  有关, 对应的变化过程如图 1(d~f)所示。当施加一个正的栅压时(步骤①),  $\text{Li}_x\text{SiO}_2$  中可移动的  $\text{Li}^+$  在电场驱动下向沟道移动并先聚集在  $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$  沟道的表层, 随着栅压增大进一步嵌入到  $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$  的

晶格中。嵌入的  $\text{Li}^+$  在  $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$  沟道中充当掺杂剂的作用, 贡献额外的自由电子载流子, 使得沟道发生电化学还原反应, 将  $\text{Nb}^{5+}$  还原为  $\text{Nb}^{4+}$ , 从而导致沟道电导增大。发生的电化学反应如下<sup>[19]</sup>:



当栅压从最大值  $5\text{ V}$  降低时(步骤②), 电解质中由于  $\text{Li}^+$  浓度梯度而建立的内部电场逐渐起主导作用, 并驱动聚集在沟道表面的  $\text{Li}^+$  扩散回电解质中。由于  $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$  具有热力学稳定性, 因此需要施加负的栅压, 才能将  $\text{Li}^+$  全部从沟道中提取出来, 使电导逐渐恢复初始值(步骤③)。图 1(c)显示了 EGT 的栅极泄漏电流( $I_g$ )随  $V_g$  的变化情况, 可以看出, 在正、负电压区域出现了两个峰, 分别对应  $\text{Li}_x\text{SiO}_2/\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$  界面处发生电化学还原和氧化反应时产生的还原峰和氧化峰。如前所述, 正的栅压下发生反应(1)所示的还原反应, 将  $\text{Nb}^{5+}$  还原为  $\text{Nb}^{4+}$ 。相反, 在负的栅压下,  $\text{Li}^+$  从沟道中析出, 发生反应(1)的逆反应, 将  $\text{Nb}^{4+}$  氧化为  $\text{Nb}^{5+}$ , 并使沟道电导逐渐减小至初始值<sup>[20]</sup>。

EGT 中  $\text{Li}^+$  移动导致的沟道电导的连续可调行为与突触连接强度在神经递质移动下发生的改变极为相似。图 2(a)给出了生物突触和 EGT 的对照示意图。EGT 的栅极和沟道分别模拟突触的前神经元和后神经元。在栅极上施加一个动作电位(Pre-spike)时, 电解质中的  $\text{Li}^+$  在电场作用下会移动, 类似于突

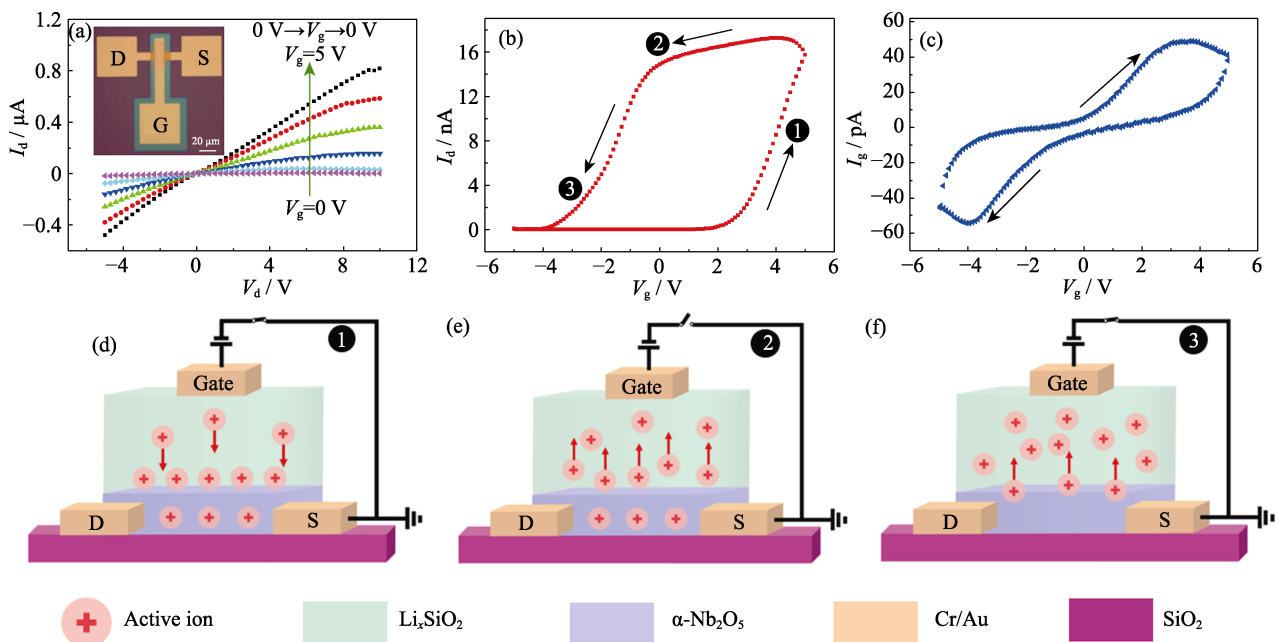


图 1 经历不同栅压范围扫描后 EGT 的输出特性曲线(插图为器件的光学图像)(a), 转移特性曲线(b), 栅极泄漏电流曲线(c)及其工作机理(d~f)

Fig. 1 Output characteristic curves under different gate voltages with inset showing the optical pattern (a), transfer characteristic curve (b), gate leakage current curve (c), and working mechanism (d-f) of EGT

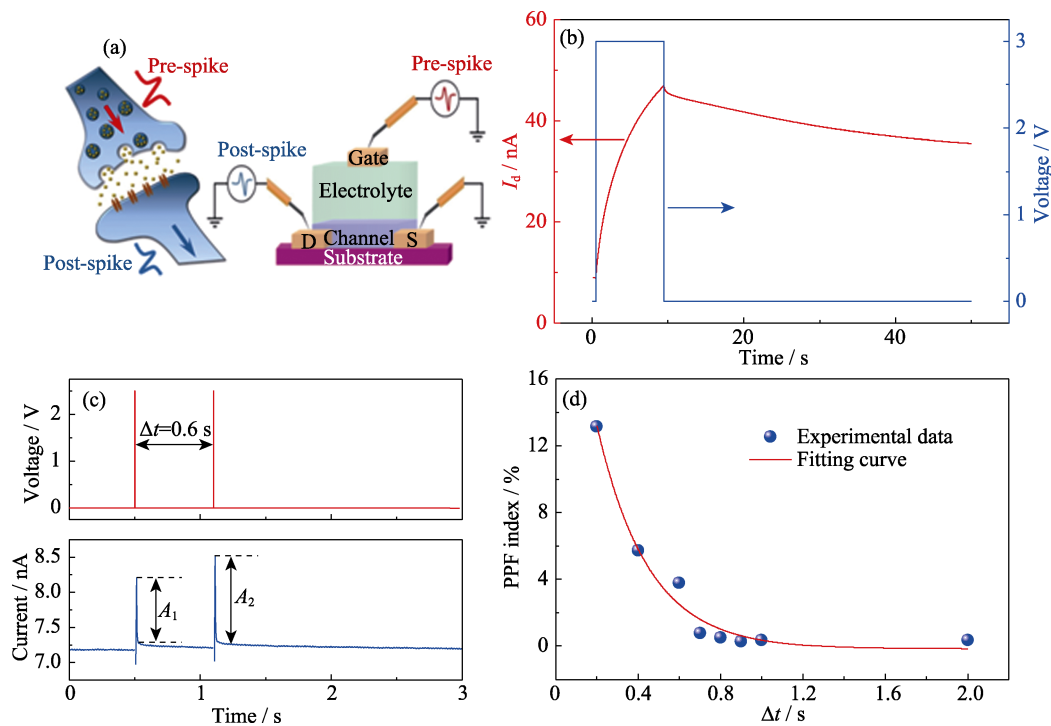


图 2 EGT 和生物突触的类比(a), (3 V, 9 s)脉冲刺激下的 EPSC(b), 一对间隔 0.6 s 的栅极电压脉冲刺激下的 PPF 行为(c), PPF 指数随脉冲间隔的变化(d)

Fig. 2 Analogy between EGT and biological synapse (a), EPSC under (3 V, 9 s) pulse (b), PPF stimulated by a pair of gate voltage pulses spaced 0.6 s apart (c), PPF index as a function of pulse interval (d)

触间隙中的神经递质, 通过与突触后膜上的受体结合可以引起兴奋性突触后电流(EPSC)。突触间的连接强度即突触权重可以通过突触后电流的大小来反映, 并通过栅压进行调控。突触权重受神经活动调控的行为, 即突触可塑性包括短程可塑性(STP)和长程可塑性(LTP)两种类型, 是生物实现记忆和学习功能的基础。

图 2(b)中通过在 EGT 的栅极施加一个(3 V, 9 s) 的电压脉冲, 并通过 0.1 V 的  $V_d$  进行监测, 器件的沟道电流在脉冲施加时间内连续上升, 产生 EPSC, 从而模拟了突触权重的增强过程。此外, 脉冲对增强(PPF)是 STP 的另一种典型行为, 对生物系统中的时序信息的解码非常重要<sup>[21]</sup>, 也可以通过 a-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 基 EGT 来模拟。如图 2(c)所示, 在栅极连续施加两个脉冲间隔( $\Delta t$ )为 0.6 s 的(2 V, 10 ms)的电压脉冲时, 第二个脉冲引起的峰值电流( $A_2$ )大于第一个脉冲( $A_1$ )。造成这一现象的原因是第一个脉冲引起的  $\text{Li}^+$  尚未扩散回平衡位置, 第二个脉冲就来到了, 从而引起  $\text{Li}^+$  的累积效应。这种易化行为可以用 PPF 指数 (PPF index) 进行量化。PPF 指数定义为  $((A_2 - A_1)/A_1) \times 100\%$ 。图 2(d)给出了 PPF index 随  $\Delta t$  的变化情况, 曲线可以利用以下公式进行拟合:

$$\text{PPF index} = 1 + C_1 \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_1}\right) + C_2 \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_2}\right) \quad (2)$$

其中,  $C_1$  和  $C_2$  是施加两个脉冲阶段的初始易化幅值,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  是相应的特征弛豫时间。通过拟合可以得到两个时间常数  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别约为 56 和 327 ms, 与生物突触中的情况接近<sup>[22]</sup>。

为了进一步调控沟道电导的非易失性, 本工作探究了在连续脉冲作用下 EGT 沟道电导的变化情况。图 3(a)显示了一系列不同幅值的栅极电压脉冲对沟道电导的影响。低电压下( $V_g \leq 2$  V),  $I_d$  瞬间上升到一个峰值, 之后迅速衰减回初始值, 导致沟道电导的净变化量为 0, 表现出易失性调节。而高电压下( $V_g \geq 2$  V),  $I_d$  会逐渐稳定在一个更高的电导态, 且经过较长时间也不会回到初始状态, 表现出非易失性调节。为了量化这种变化趋势, 进一步探究了沟道电导变化比(Conductance change ratio)随栅压脉冲幅值的变化关系, 如图 3(d)所示。沟道电导变化比

定义为  $\left(\frac{G_1 - G_0}{G_0}\right) \times 100\%$ , 其中  $G_0$  为脉冲施加前的

沟道电导,  $G_1$  为脉冲引起的峰值电流对应的电导(易失性部分)或结束 40 s 后对应的电导(非易失性部分)。随着脉冲幅值由 1 V 提高到 6 V, 非易失性部分的电导变化比由 0 逐渐提高到了 50%, 表明沟道电导经历了易失性到非易失性的转变。脉冲宽度对沟道电导的影响如图 3(b, e)所示, 通过增大脉冲宽度, 也可以实现沟道电导由易失性向非易失性的转

变。沟道电导在脉冲幅值和宽度调节下发生的易失性和非易失性变化分别与聚集在  $a\text{-Nb}_2\text{O}_5$  表层和嵌入到  $a\text{-Nb}_2\text{O}_5$  晶格中的  $\text{Li}^+$  密切相关。当施加较小幅值或较小脉宽的脉冲时,  $a\text{-Nb}_2\text{O}_5$  表层积累的  $\text{Li}^+$  会在浓度梯度作用下反向扩散, 使得沟道电导逐渐衰减至初始状态, 形成对沟道电导的易失性调节。而当施加较大幅值或较大脉宽的脉冲时,  $\text{Li}^+$  会嵌入  $a\text{-Nb}_2\text{O}_5$  晶格中达到稳定状态, 形成对沟道电导的非易失性调节。此外, 脉冲频率对沟道电导的调节也有重要影响, 如图 3(c) 所示。随着脉冲频率增大,  $I_d$  也迅速提高。这些结果表明, 通过调节脉冲参数,  $a\text{-Nb}_2\text{O}_5$  基 EGT 的沟道电导可以实现易失性向非易失性的转变, 从而模拟突触的 LTP。

突触权重的 LTP 分为长程增强和长程抑制两种类型, 对于实现神经形态计算功能至关重要。连续施加 64 个间隔为 10 s 的正栅压脉冲 (3.6 V, 10 ms) 或负栅压脉冲 (-3.4 V, 10 ms) 后, 沟道电导都衰减到一个不同于初始值的稳定值, 表现为非易失性行为 (图 4(a, b))。这种沟道电导的增加和减小可分别视为突触的长程增强和长程抑制。此外, EGT 在 64 个 (3.6 V, 10 ms) 脉冲和 0.1 V 漏端电压作用下仍然保持低的沟道电导值 (~120 nS)。根据能耗的计算公式  $E=I_d \times V_d \times t$ , 读取时间为 1 ms 时, 器件的工作功耗为 ~1.2 pJ。交替施加相同脉冲 (+3.6 V/-3.4 V, 10 ms) 后沟道电导在高、低电导状态间切换, 从而获得双向

模拟开关特性 (图 4(c))。长程增强和长程抑制间这种近线性和对称的权重更新行为对于实现高精度的神经形态应用尤为重要<sup>[23-24]</sup>。

值得注意的是, 突触的 LTP 是生物大脑进行学习和记忆的关键<sup>[25-26]</sup>。经典条件反射 (Classical conditioning) 是一种典型的关联学习行为, 可以将发生在周围的两个不相关的事件联系起来, 对其最常见的验证便是“巴普洛夫的狗”实验<sup>[27-28]</sup>。在这个实验中, 食物被记为非条件刺激 (Unconditioned stimulus, US), 狗见到食物后本能地分泌唾液被记为非条件反射 (Unconditioned response, UR), 而摇铃则被记为条件刺激 (Conditioned stimulus, CS)。在训练之前, 单独摇铃并不会引起狗分泌唾液。在摇铃的同时提供食物进行训练后, 单独摇铃就会引起狗分泌唾液, 说明经过学习后铃声和食物关联到了一起。

基于 EGT 的三端结构和突触可塑性, 研究模拟了经典条件反射行为。实验将一个电阻连接在栅极与源极之间, 使外加电阻与器件的栅极-源极电阻构成串联回路, 并按电阻比例分配栅压, 如图 5(a) 所示。当施加一定大小的栅压使栅极-源极电阻逐渐减小时, 其分压也会逐渐减小, 而剩余的电压则加载到外加电阻上。外加电阻支路构成负反馈调节电路, 稳定电路性能, 如图 5(b) 所示。定义源极电流 > 20 nA 代表 UR 发生, 否则不会对信号产生响应。训练之前, 对电路施加  $V_g$  时, 电流通过外加电阻流出,

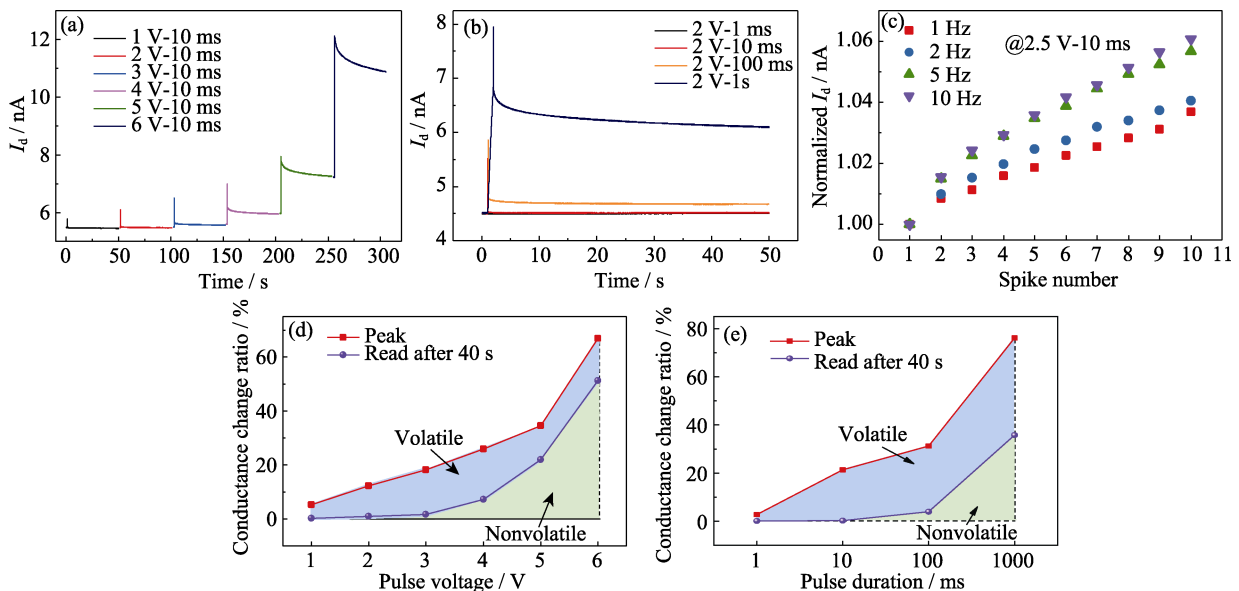


图 3 EGT 对不同的脉冲幅值(a)、脉冲宽度(b)和脉冲频率(c)的栅压脉冲的响应, 与脉冲幅值(d)和脉冲宽度(e)依赖的电导变化比

Fig. 3 Response of EGT to a series of gate voltage pulses of different pulses amplitude (a), pulses width (b), and pulses frequency (c), dependence of conductance change ratio on pulses amplitude (d) and pulses width (e)

Colorful figures are available on website

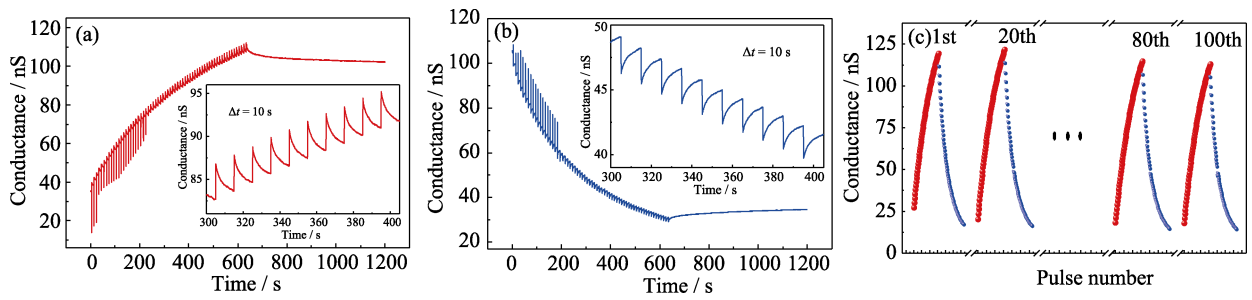


图 4 长期增强突触权重对神经形态计算功能的影响

Fig. 4 Effect of long-term enhanced synaptic weights on neuromorphic computational function

(a) Long-term potentiation induced by 64 positive gate voltage pulses (3.6 V, 10 ms); (b) long-term depression induced by 64 negative gate voltage pulses (-3.4 V, 10 ms) and taking points 10 s after pulses; (c) cyclic change results for 100 cycles of alternately applied 64 pulses (+3.6 V/-3.4 V, 10 ms) and taking points 10 s after pulses

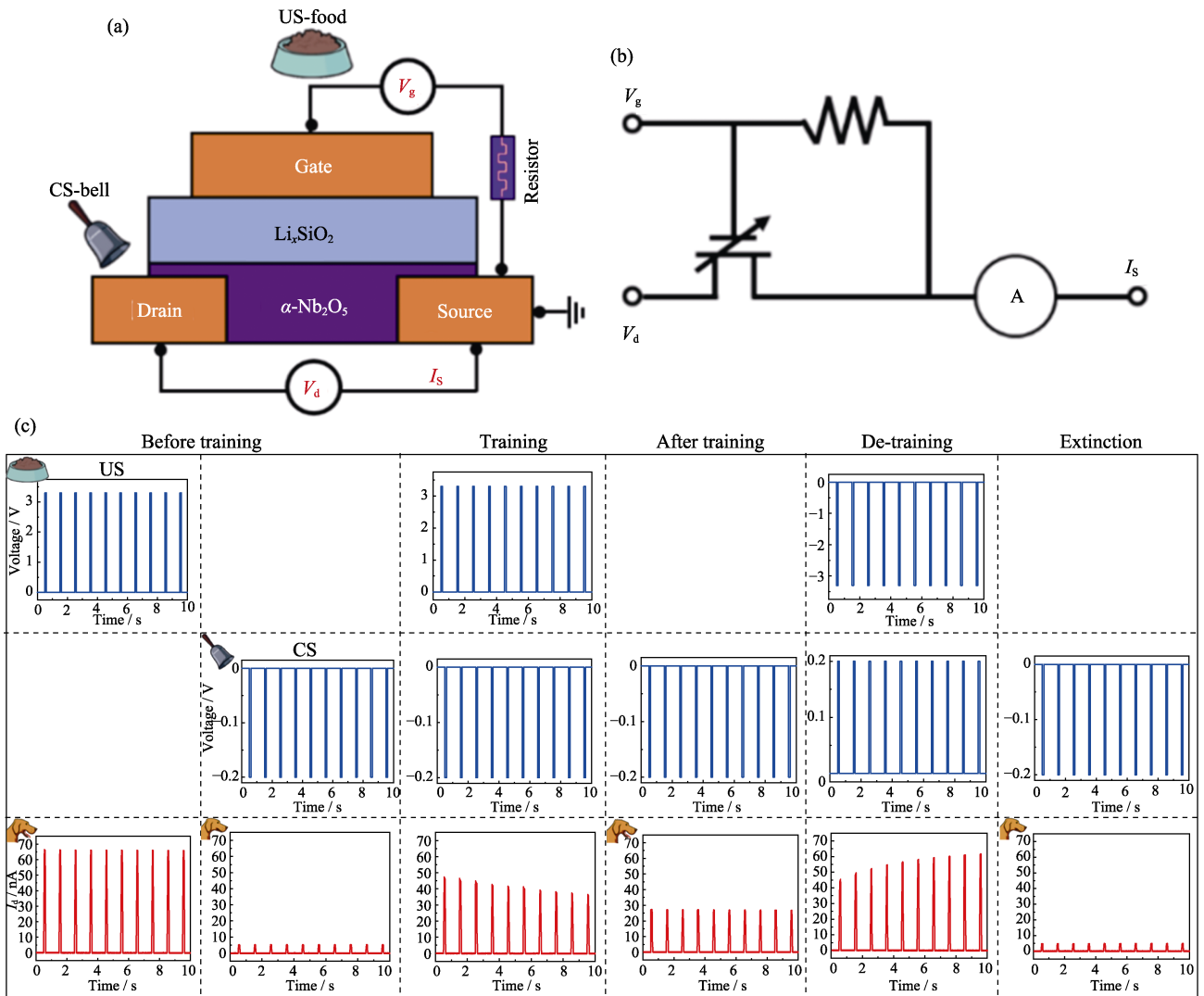


图 5 利用 EGT 实现经典条件反射示意图(a)和对应的等效电路(b), 生物经典条件反射模拟(c)

Fig. 5 (a) Schematic diagram of classical conditioning using EGT and (b) corresponding equivalent circuit, and (c) simulation of biological classical conditioning

产生明显的电流响应。而对电路施加  $V_d$  时, 由于源极和漏极之间尚未形成沟道, 因而不产生电流响应。训练时, 在施加  $V_d$  的同时施加  $V_g$ , 便可以形成

沟道并产生电流响应。训练后, 单独施加  $V_d$  的电流响应提高了几个数量级, 从而模拟了 US 和 CS 的关联过程。经过一定的训练后, 单独在漏极施加信号

再次引起低于阈值的电流响应, 表明 US 和 CS 之间的关联已被取消, 模拟的结果如图 5(c)所示。

### 3 结论

本工作研究了基于  $a\text{-Nb}_2\text{O}_5$  沟道和  $\text{Li}_x\text{SiO}_2$  栅电解质的 EGT 器件, 其沟道电导值低( $\sim 120$  nS), 并能够通过  $\text{Li}_x\text{SiO}_2$  层中的  $\text{Li}^+$  嵌入/脱出  $a\text{-Nb}_2\text{O}_5$  沟道而实现沟道电导连续、可逆的非易失性调控。研究利用该 EGT 器件成功模拟了生物突触的基本功能, 如 STP、LTP 以及 STP 向 LTP 的转变。同时, 利用该器件的特性设计了一个简单的学习电路, 嵌入一个电阻代表已建立的非条件反射突触并起到负反馈调节的作用, 更直观地模拟了经典条件反射行为。研究结果显示  $a\text{-Nb}_2\text{O}_5/\text{Li}_x\text{SiO}_2$  型 EGT 在神经形态应用中的巨大潜力, 为神经形态计算硬件实现提供了器件参考。

### 参考文献:

- [1] MURAT O, NICOLAS E, WANG B M, *et al.* Nanosecond protonic programmable resistors for analog deep learning. *Science*, 2022, **377**: 539.
- [2] LIANG F X, WANG T, HOU T H. Progress and benchmark of spiking neuron devices and circuits. *Advanced Intelligent Systems*, 2021, **3**(8): 2100007.
- [3] ABU S, MANUEL L G, RIDUAN K A, *et al.* Memory devices and applications for in-memory computing. *Nature Nanotechnology*, 2020, **15**(7): 529.
- [4] YANG K, YANG J J, HUANG R, *et al.* Nonlinearity in memristors for neuromorphic dynamic systems. *Small Science*, 2021, **2**: 2100049.
- [5] ZHU J D, ZHANG T, YANG Y C, *et al.* A comprehensive review on emerging artificial neuromorphic devices. *Applied Physics Reviews*, 2020, **7**: 011312.
- [6] NGUYEN N A, SCHNEEGANS O, SALOT R, *et al.* An ultralow power  $\text{Li}_x\text{TiO}_2$ -based synaptic transistor for scalable neuromorphic computing. *Advanced Electronic Materials*, 2022, **8**(12): 2200607.
- [7] ZHANG W Q, GAO B, TANG J S, *et al.* Neuro-inspired computing chips. *Nature Electronics*, 2020, **3**: 371.
- [8] XU H, LU J K, LI Y, *et al.* Improvement of weight stability in Li-ion-based electrolyte-gated transistor synapse by silica protective process. *Applied Physics Letters*, 2022, **121**(11): 113505.
- [9] LEE H, RYU D G, LEE G, *et al.* Vertical metal-oxide electrochemical memory for high-density synaptic array based high-performance neuromorphic computing. *Advanced Electronic Materials*, 2022, **8**(8): 2200378.
- [10] NAYEON K, HEEBUM K, HYUN W K, *et al.* Understanding synaptic characteristics of nonvolatile analog redox transistor based on mobile ion-modulated-electrolyte thickness model for neuromorphic applications. *Applied Physics Letters*, 2022, **121**(7): 072105.
- [11] LEE J, NIKAM R D, KWAK M, *et al.* Improved synaptic characteristics of oxide-based electrochemical random access memory at elevated temperatures using integrated micro-heater. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, **69**: 2218.
- [12] REVANNATH D N, LEE J, CHOI W, *et al.* Ionic sieving through one-atom-thick 2D material enables analog nonvolatile memory for neuromorphic computing. *Small*, 2021, **17**(44): 2103543.
- [13] FENG G, JIANG J, ZHAO Y H, *et al.* A sub-10 nm vertical organic/inorganic hybrid transistor for pain-perceptual and sensitization-regulated nociceptor emulation. *Advanced Materials*, 2020, **32**(6): 1906171.
- [14] LEE J, NIKAM R D, KWAK M, *et al.* Strategies to improve the synaptic characteristics of oxygen-based electrochemical random-access memory based on material parameters optimization. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, **14**(11): 13450.
- [15] CHENG Y C, LI H, LIU B, *et al.* Vertical 0D-perovskite/2D-MoS<sub>2</sub> van der Waals heterojunction phototransistor for emulating photoelectric-synergistically classical pavlovian conditioning and neural coding dynamics. *Small*, 2020, **16**(45): 2005217.
- [16] LI Y, LU J K, SHANG D S, *et al.* Oxide-based electrolyte-gated transistors for spatiotemporal information processing. *Advanced Materials*, 2020, **32**(47): 2003018.
- [17] LI Y, XUAN Z H, LU J K, *et al.* One transistor one electrolyte-gated transistor based spiking neural network for power-efficient neuromorphic computing system. *Advanced Functional Materials*, 2021, **31**(26): 2100042.
- [18] LI Y, XU H, LU J K, *et al.* Electrolyte-gated transistors with good retention for neuromorphic computing. *Applied Physics Letters*, 2022, **120**(2): 021901.
- [19] AUGUSTYN V, COME J, LOWE M A, *et al.* High-rate electrochemical energy storage through  $\text{Li}^+$  intercalation pseudocapacitance. *Nature Materials*, 2013, **12**(6): 518.
- [20] GRIFFITH K J, FORSE A C, GRIFFIN J M, *et al.* High-rate intercalation without nanostructuring in metastable  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  bronze phases. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, **138**(28): 8888.
- [21] PRADEP P A, WADE G R. Determinants of the time course of facilitation at the granule cell to Purkinje cell synapse. *The Journal of Neuroscience*, 1996, **16**(18): 5661.
- [22] ROBERT S Z, REGEHR W G. Short-term synaptic plasticity. *Annual Review of Physiology*, 2002, **64**: 355.
- [23] WANG I T, CHANG C C, CHIU L W, *et al.* 3D Ta/TaO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub>/Ti synaptic array and linearity tuning of weight update for hardware neural network applications. *Nanotechnology*, 2016, **27**(36): 365204.
- [24] JANG J W, PARK S, BURR G W, *et al.* Optimization of conductance change in  $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ -based synaptic devices for neuromorphic systems. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, **36**(5): 457.
- [25] MCGANN J P. Associative learning and sensory neuroplasticity: how does it happen and what is it good for? *Learning & Memory*, 2015, **22**(11): 567.
- [26] TRAXLER J, MADDEN V J, MOSELEY G L, *et al.* Modulating pain thresholds through classical conditioning. *PeerJ*, 2019, **7**: 6486.
- [27] MAURICIO R P, BITTERMAN M E. The role of contingency in classical conditioning. *Psychological Review*, 1990, **97**(3): 396.
- [28] YU F, ZHU L Q, XIAO H, *et al.* Restickable oxide neuromorphic transistors with spike-timing-dependent plasticity and pavlovian associative learning activities. *Advanced Functional Materials*, 2018, **28**(44): 1804025.