

氧化物基忆阻型神经突触器件

刘益春 林亚 王中强 徐海阳

Oxide-based memristive neuromorphic synaptic devices

Liu Yi-Chun Lin Ya Wang Zhong-Qiang Xu Hai-Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 168504 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20191262

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191262>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米级尺寸参数对钛氧化物忆阻器的特性影响

Influence of length parameter on the characteristics of nanoscale titanium oxide memristor

物理学报. 2015, 72(10): 108502 <https://doi.org/10.7498/aps.64.108502>

基于蒙特卡洛方法的钛氧化物忆阻器辐射损伤研究

Research on radiation damage in titanium oxide memristors by Monte Carlo method

物理学报. 2015, 72(7): 078401 <https://doi.org/10.7498/aps.64.078401>

基于二维材料MXene的仿神经突触忆阻器的制备和长/短时程突触可塑性的实现

Fabrication of synaptic memristor based on two-dimensional material MXene and realization of both long-term and short-term plasticity

物理学报. 2019, 68(9): 098501-1 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182306>

具有突触特性忆阻模型的改进与模型经验学习特性机理

Modification of memristor model with synaptic characteristics and mechanism analysis of the model's learning-experience behavior

物理学报. 2016, 73(12): 128503 <https://doi.org/10.7498/aps.65.128503>

一种改进的WO_x忆阻器模型及其突触特性分析

An improved WO_x memristor model with synapse characteristic analysis

物理学报. 2015, 72(14): 148501 <https://doi.org/10.7498/aps.64.148501>

嵌入Ag纳米颗粒层的DNA忆阻器

Organic memristive devices based on DNA embedded in silver nanoparticles layer

物理学报. 2015, 72(4): 048402 <https://doi.org/10.7498/aps.64.048402>

专题: 纪念黄昆先生诞辰百年

氧化物基忆阻型神经突触器件

刘益春[†] 林亚 王中强 徐海阳

(东北师范大学, 紫外光发射材料与技术教育部重点实验室, 长春 130024)

(2019年8月15日收到; 2019年8月19日收到修改稿)

忆阻器具有高密度、低功耗和阻值能够连续可调的特性, 被认为是模拟神经突触最具潜力的候选者. 而金属氧化物, 因其氧离子可迁移, 组分易于调控, 与传统 CMOS 兼容等优点, 是发展高性能忆阻器件的理想材料. 本文首先介绍了氧化物基忆阻器件阻变行为及其运行机制, 包括数字型和模拟型忆阻器. 主要综述了基于模拟型忆阻器实现的突触器件认知功能模拟, 包括非线性传输特性、时域突触可塑性、经验式学习和联合式学习等. 然后进一步介绍了忆阻型突触器件在模式识别、声音定位、柔性可穿戴和光电神经突触方面的潜在应用. 最后总结展望氧化物基忆阻神经突触在相关领域的可能发展方向.

关键词: 氧化物, 忆阻器, 忆阻机理, 突触仿生**PACS:** 85.35.-p, 73.40.Rw, 85.25.Hv, 84.32.-y**DOI:** 10.7498/aps.68.20191262

1 引言

随着大数据时代的来临, 传统的“冯·诺依曼”计算机架构中处理器与存储器之间数据传输面临着高能耗和低效率问题. 人脑能够将信息存储与处理合二为一, 在进行大规模并行运算和深度学习时, 极大程度降低功耗. 因而发展类脑智能器件, 构建类脑型计算系统, 是人工智能领域的重要突破方向. 新兴的非线性电子元件——忆阻器, 其阻值可随流经电荷而发生动态变化, 同时具备整合存储和处理的特性, 被认为是发展人工神经突触的理想选择. 忆阻器是继电阻、电容、电感之后的第四种无源电子元件^[1]. 1971年, 美国加州大学伯克利分校的蔡少棠教授首次提出了忆阻器的概念, 直至2008年, 惠普实验室在《Nature》杂志上报道了首个可行的忆阻器原型器件^[2]. 忆阻器的阻态变化源于电介质内部离子迁移所诱导的导电细丝通断或界面移动, 按电阻演变行为, 可划分为阻值突变的“数字型”忆阻器和阻值渐变的“模拟型”忆阻器,

前者以其非易失的特性被广泛应用于信息存储, 而后者离子迁移/扩散过程和与生物突触中 Ca^{2+} 离子动力学过程高度匹配, 被广泛应用于人工突触模拟.

目前, 忆阻器因其新颖特性成为材料、信息、电子等领域的研究前沿, 并在非线性电路、新型非易失存储、逻辑运算、存算一体化技术和人工神经突触方向展现出巨大的应用潜力. 研究人员已开发出具有速度快(读写时间 < 100 ps)^[3,4]、循环耐受好 ($> 10^{12}$ 次)^[5]、读写功耗低 (< 60 fJ)^[6,7] 的忆阻器件, 能够实现数据存储和逻辑运算的整合, 为开发体积更小、更节能的计算系统提供了新设计思路^[8]. 另一方面, 忆阻器的电学特性和神经突触的传输特性高度相似, 使其具备自主学习能力, 利用单个忆阻器能够模拟一个神经突触的基本功能. 与传统的集合多个晶体管及电容来模拟一个突触相比, 减少了能耗, 降低了电路设计的复杂性; 而纳米尺度的忆阻器件具有高集成度, 使得在单一芯片中实现与人脑容量想比拟的神经网络成为了可能. 同时, 忆阻器与神经突触电学特性的相似性源自于

[†] 通信作者. E-mail: ycliu@nenu.edu.cn

忆阻器本身的电学行为, 这样弱化了传统突触仿生过程中引入外部信号设计的主观因素, 有利于更准确地模拟神经突触. 因此, 利用忆阻器模拟神经突触的学习功能更是成为研究热点, 备受国内外研究者的广泛关注. 多种神经突触功能已被忆阻器模拟, 如放电时间依赖可塑性 (STDP)^[9]、长/短时突触可塑性^[10]、大脑经典条件反射功能^[11]等, 并能够利用忆阻器创建神经网络芯片实现模式分类功能^[12].

忆阻器可以看做为一种离子-电子耦合型器件, 其电阻转变行为伴随着电子输运、离子迁移及其氧化还原反应. 无论两端型还是三端型忆阻器件, 其内部离子迁移/扩散的二阶动力学过程能够与生物突触中 Ca^{2+} 离子迁移高度匹配, 有助于精确模拟神经突触功能^[13]. 为了满足忆阻器的性能和功能需求, 研发高性能忆阻材料体系, 一直以来是关键的科学问题. 目前, 有多种材料相继被提出构筑忆阻神经突触, 包括无机金属氧化物、硫族化合物、碳材料、有机材料等. 近几年来, 二维材料也因其新奇的物理特性被证实功能材料器件领域具有重要的应用潜力, 一些研究团队将二维材料引入到忆阻器成功实现逻辑运算和突触仿生功能^[14-16]. 相比其他忆阻材料, 金属氧化物具有优异的光、电、磁等多功能特性, 是电子、信息、能源等技术领域的重要基础材料. 特别是低维氧化物半导体, 具有易于调控氧离子缺陷态, 且其费米能级和电阻可以通过氧缺陷态含量进行调控, 被认为是当下发展高性能忆阻器件的理想材料. 本文综述了目前基于氧化物材料的忆阻行突触器件物理机制、功能模

拟、应用方向, 并展望了忆阻器件在超低功耗器件、存算一体化技术和光遗传学模拟方面的应用前景.

2 氧化物忆阻器件行为及运行机制

2.1 忆阻器分类: 数字型与模拟型

忆阻器, 按工作模式, 可分为数字型忆阻器和模拟型忆阻器. 数字型忆阻器的阻态随着电压的扫描呈离散型的变化, 具有能够相互转换的两个电阻态: 高阻态和低阻态. 若以二者分别对应计算机中的“0”和“1”两个状态, 可以将该类型忆阻器应用于非易失性存储^[17,18]. 如图 1(a) 所示为一个典型的 Pt/TiO₂/Pt 结构的阻变式存储器的 $I-V$ 特性, 器件能够在正向 (负向) 扫描电压下, 实现高 (低) 阻态向低 (高) 阻态的转变^[2]. 阻变存储器其结构简单, 可集成度高, 被认为是下一代非易失存储器的重要候选之一.

模拟型忆阻器的阻态能够随着电压扫描呈连续型变化, 器件阻值可以随施加电压而发生变化, 并能够记住改变后的状态. 如图 1(b) 为 Pd/WO_x/W 结构的模拟型忆阻器 $I-V$ 特性^[19]. 其独特的电学性质和神经突触的传输特性相似, 即两者传递信息的能力被外界刺激动态调制. 在结构上, 两端型忆阻器和突触相似: 忆阻器的顶电极、中间绝缘层和底电极与生物突触的突触前膜、突触间隙和突触后膜相对应. 具有纳米尺度的忆阻器, 其高的集成度有望达到生物神经系统中突触的密度. 因此, 基于模拟型忆阻器能够模拟人工神经突触, 进而应用在新

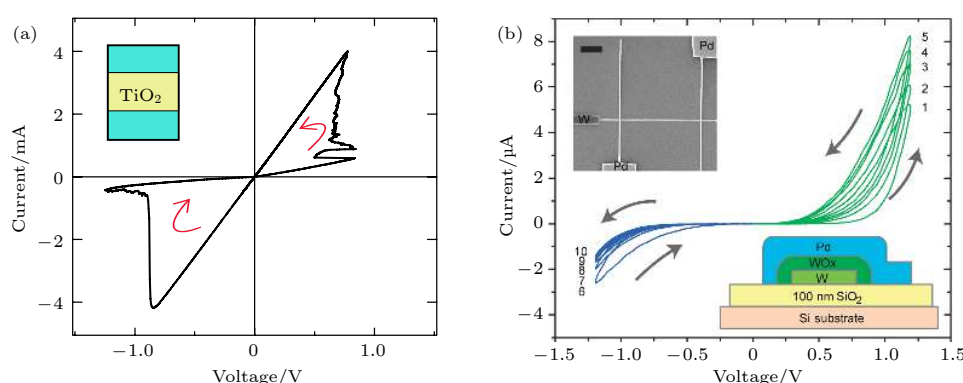


图 1 (a) 基于 Pt/TiO₂/Pt 结构的数字型忆阻器行为, 插图为器件结构示意图^[2]; (b) 基于 Pd/WO_x/W 结构的模拟型忆阻器行为, 插图为器件结构示意图^[19]

Fig. 1. (a) The digital memristive behavior obtained in Pt/TiO₂/Pt memristor. The insert is the corresponding structure diagram of the device.^[2] (b) the analog memristive behavior obtained in Pd/WO_x/W memristor. The insert is the corresponding structure diagram of the device^[19].

型神经网络以及人工智能等领域.

2.2 数字型忆阻器模型

导电细丝机制是大多数氧化物薄膜忆阻器发生阻变行为的原因. 该模型认为在 SET 过程中, 氧化物绝缘层内部形成能够连接顶底电极的导电细丝并且这种细丝具有金属特性, 使得器件由高阻态转变为低阻态; 当 RESET 时低阻态向高阻态转变则归因于这种导电细丝的断裂. 而根据导电细丝的组成成分可以将该模型进一步分类为金属离子迁移模型和氧离子迁移模型.

金属离子迁移: 在该模型中, 忆阻器以活性金属 (Ag、Cu 等) 为顶电极, 以惰性金属 (Pt、Au 等) 为底电极. 如图 2 所示, 中科院微电子所 Liu 研究组在 Ag/ZnO:Mn/Pt 忆阻器中原位观测到了金属导电通道^[20]. 在 Ag 一侧施加正电压时, 活性金属被氧化成离子状态, 在电场下迁移至底电极. Ag 离子在底电极被注入的电子还原成 Ag 原子, 并逐步堆积成 Ag 导电通道贯穿整个 ZnO:Mn 薄膜, 器件从高阻态转变为低阻态; 当施加反向电压时, 氧化还原反应会导致 Ag 导电细丝断裂, 器件从低阻态转变为高阻态. 美国密歇根大学 Lu 实验组总结发现, 导电细丝的形状与金属离子在电介质中的迁移率 (μ) 和氧化还原速率 (Γ) 有关^[21]: 当高的 μ 和高的 Γ 时, 导电细丝从负极开始生长, 形成倒锥形; 当低的 μ 和低的 Γ 时, 导电细丝从正极开

始生长, 形成正锥形; 当低的 μ 和高的 Γ 时, 金属原子先在电介质中成核, 逐渐连接两端电极; 当高的 μ 和低的 Γ 时, 导电细丝负极开始生长, 形成树枝状结构.

氧离子迁移: 在该模型中, 忆阻器均以惰性电极为顶底电极. 如图 3 所示为 Pt/ZnO/Pt 结构忆阻器不同加电时间下的原位透射电镜 (TEM) 图, 电场在 SET 过程中, 电场能够诱导氧化物薄膜中氧离子发生迁移, 形成大量的氧空位缺陷态, 大量氧空位堆积贯穿整个薄膜, 使得器件从高阻态转变为低阻态; 施加反向电压时, 氧空位与氧结合, 导电细丝断裂, 器件从低阻态转变为高阻态^[22]. 除 ZnO 材料外, 格勒诺布尔大学 David Cooper 在 SrTiO₃ 忆阻器中, 利用 TEM 辅以电子能量损失谱观测到了高阻态和低阻态不同氧分布^[23]; 中科院物理研究所 Bai 研究组, 利用高分辨 TEM 证实萤石结构的 CeO₂ 单晶薄膜忆阻器, 在低阻态时形成了氧空位, 出现了空位超晶格^[24]. 国立首尔大学 Hwang 研究组在 TiO₂ 基忆阻器中观测到高低阻态的转变^[25]. 除了利用原位 TEM 技术之外, 研究人员往往采用变温测试离子扩散系数, 高低阻态的导电类型等手段, 间接证明氧离子迁移模型.

肖特基势垒调制模型: 金属与氧化物之间的肖特基势垒也是忆阻器实现电阻变化的位置. Stanley Williams 研究组提出通过调制 Pt/TiO₂

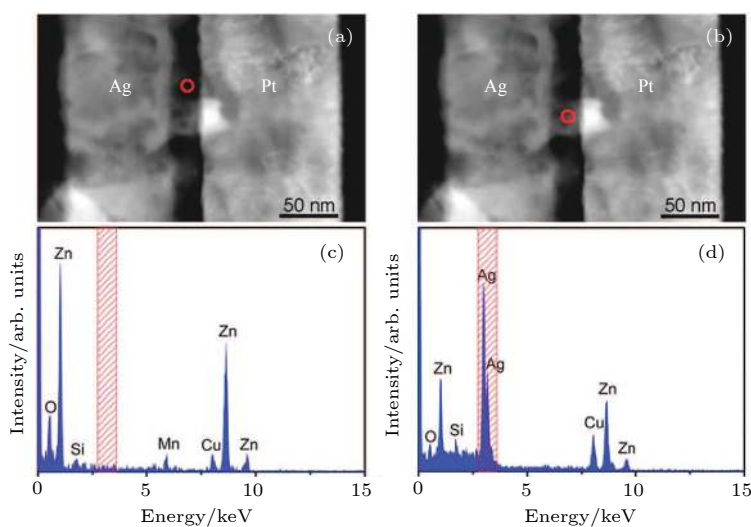


图 2 (a, b) Ag/ZnO:Mn/Pt 结构忆阻器原位透射电镜图; (c, d) 导电通道内部和外部的能谱图^[20]

Fig. 2. (a, b) The in situ TEM images of Ag/ZnO:Mn/Pt memristor. (c, d) EDX spectrum collected inside and outside of conductive channels^[20].

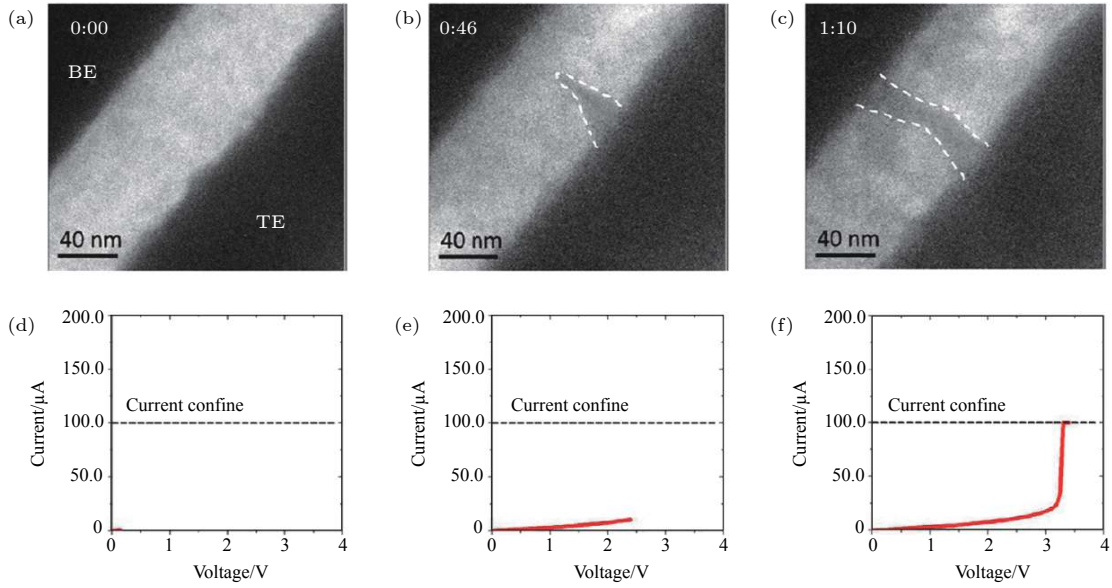


图 3 (a-c) Pt/ZnO/Pt 结构忆阻器不同加电时间下的原位透射电镜图; (d-f) 不同扫描时间下的 $I-V$ 曲线^[22]

Fig. 3. (a-c) The in situ TEM images of Pt/ZnO/Pt memristor under the voltage sweep with different time. (d-f) the corresponding $I-V$ measurements of Pt/ZnO/Pt memristor under the voltage sweep with different time^[22].

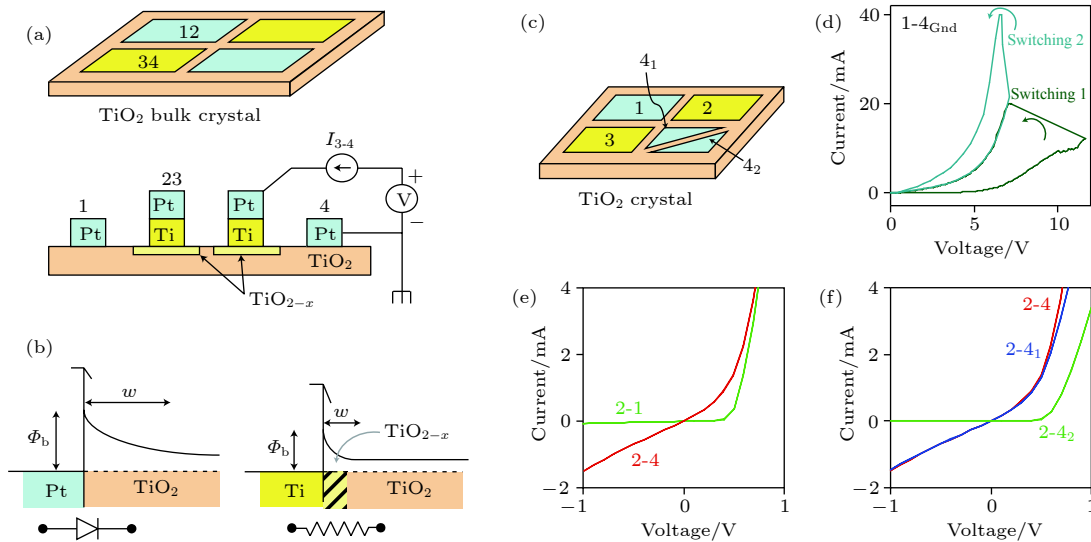


图 4 左侧 (a-b) Pt/TiO_{2-x}/Ti 器件结构示意图, 其中 Pt/TiO_{2-x} 界面为肖特基接触, Ti/TiO_{2-x} 界面为欧姆接触; 右侧 (a-d) 电极与 TiO_{2-x} 层势垒的变化^[26]

Fig. 4. In the left: (a, b) Structure diagram of Pt/TiO_{2-x}/Ti memristor, in which Pt/TiO_{2-x} presents Schottky contact and Ti/TiO_{2-x} is Ohmic contact. In the right: (a-d) the modulation of barrier between the electrode and TiO_{2-x} layer^[26].

界面的肖特基势垒高度能够实现高低阻态的转变^[26]. 如图所示, Williams 研究组设计了图 4 左侧的测试实验, 其中 Pt 和 Ti 分别与 TiO₂ 呈肖特基接触和欧姆接触. 实验发现 (图右侧所示) 如: 当器件处于低阻态时 Pt 和 TiO₂ 之间的肖特基势垒消失, 而高阻态时势垒重新恢复. 当底电极加正偏压时, 阳离子在电场作用下向 Ti 电极一侧迁移, Pt 与 TiO₂ 界面氧空位堆积进而降低肖特基势垒

高度, 降低器件电阻; 当反向施加电压时, 阳离子与氧空位复合, 肖特基势垒恢复, 电阻升高.

2.3 模拟型忆阻器机制

自 2008 年惠普团队基于 TiO₂ 材料首次制备了实体的忆阻器件以后, 多个研究小组在不同的氧化物材料中均发现了忆阻行为, 如 InGaZnO^[27]、WO_x^[19,28]、SrTiO₃^[29] 等. 忆阻行为出现具有普遍

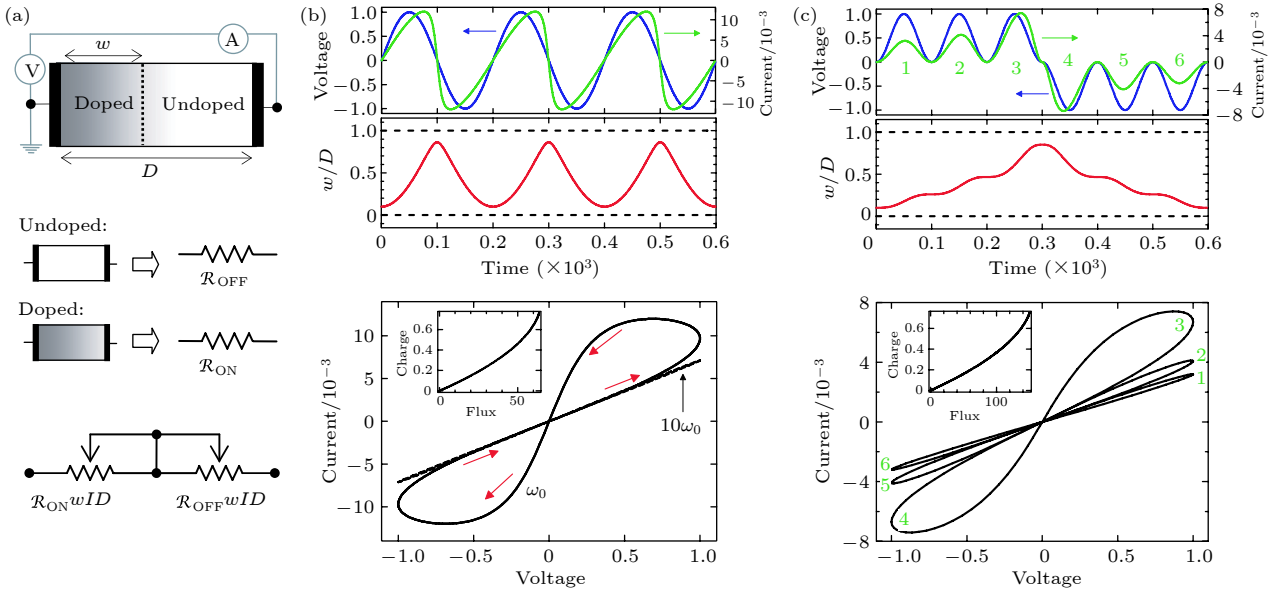


图 5 惠普实验室提出的忆阻模型 (a) 忆阻器结构示意图; (b, c) 计算机模拟忆阻器在电压作用下的电学响应^[2]
 Fig. 5. The memristive model proposed by HP's lab: (a) Schematic diagram of memristor, (b, c) computer simulated the electrical response of memristor under voltage sweep^[2].

性, 目前具有代表性的忆阻模型主要有以下三种:

导电前端移动模型: 该模型是由惠普团队最早所提出的忆阻模型, 如图 5(a) 所示, 其结构为两端类型: 顶、底电极和中间绝缘层. 绝缘层由一层为未掺杂 (undoped) 的 TiO_2 薄膜和一层掺杂 (doped) 的 TiO_2 薄膜组成^[2]. 符合化学计量比的 TiO_2 薄膜为低导电性 (R_{OFF}), 而掺杂后的 TiO_2 薄膜内部氧空位增多, 薄膜呈现高导电性 (R_{ON}), 器件相当于高低阻值的电阻串联. 当对器件施加电场的时候, 氧空位在两层之间迁移, 压缩 undoped 区域的宽度, 从而改变器件的电阻. 其数学表达关系式为:

$$v(t) = \left(R_{\text{on}} \frac{w(t)}{D} + R_{\text{OFF}} \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right) i(t), \quad (1)$$

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu_{\nu} \frac{R_{\text{ON}}}{D} i(t), \quad (2)$$

其中 $i(t), v(t)$ 分别表示电流和电压, D 为整体器件的宽度, $w(t)$ 为掺杂区域所占整体器件宽度的比例. 从以上关系式可以得出: 当 $w(t)$ 减小时, 整体器件阻值增大; 当 $w(t)$ 增加时即掺杂区域增大时, 整体器件阻值降低;

惠普团队提出的导电前端移动模型具有普适性, 在不同的材料体系中均能实现稳定的忆阻行为. 然而在现有的模型中, 电阻的减小和增大均由外电场驱动完成, 而电场诱导电阻减小后对器件内

部自发动力学过程描述, 对模拟神经突触的遗忘过程具有重要意义. 东北师范大学 Liu 研究组利用非晶氧化物同质结界面对氧离子漂移和定向扩散过程 (如图 6(a)), 证实了器件内部氧离子的迁移和扩散过程与器件电阻减小和自发增大之间的关系, 并以此来模拟突触的学习和遗忘过程^[27]. 如图 6(b) 所示, 单一脉冲激励器件时, 随着电压的施加, 电流增大; 而当电压脉冲撤去时, 电流随着时间推移逐渐衰减至零, 这一现象和突触的兴奋性后电流相似. 其物理机制可以描述为: 利用材料中连续分布的氧离子缺陷态漂移过程, 实现电场激励动态响应的“记忆”功能; 利用退激励下界面自建电场和浓度梯度的差异调控氧离子定向扩散过程, 准确模拟神经突触通道内的“遗忘”功能. 为了证实这种浓度差异引起的氧离子扩散现象, Liu 研究组引入了氧离子的一维扩散方程:

$$\sigma(t) \approx \sigma_e + (64/\pi^2)(\sigma_0 - \sigma_e) \exp(-t/\tau'(T)), \quad (3)$$

其中 $\sigma(t), \sigma_0$ 和 σ 为时间为 t 时, $t = 0$ 时和平衡状态时的电导率. 通过结合弛豫时间 $\tau'(T)$ 和扩散系数 $D(T)$ 之间的关系 $\tau'(T) = 4L^2/\pi^2 D(T)$ 和 $D(T) = D_0 \exp(-E/kT)$, 可以得到:

$$\ln \frac{4L^2}{\pi^2 D_0} + \ln \frac{1}{\tau'(T)} = -\frac{E}{kT}, \quad (4)$$

其中 E, L 和 D_0 分别代表氧扩散的激活能、扩散长

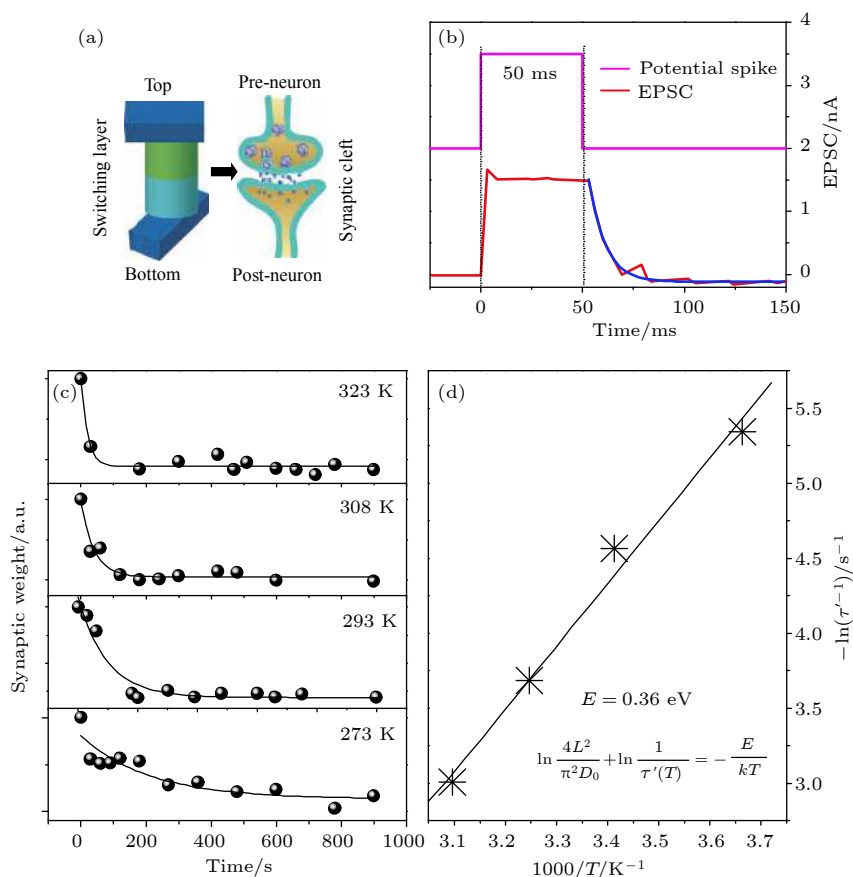


图 6 (a) 非晶 InGaZnO 基忆阻器件与神经突触结构对应图; (b) 单一脉冲在忆阻器中诱导产生的兴奋性后电流; (c) 不同温度下突触权重的衰减行为, 实现为单 e 指数拟合曲线; (d) 基于方程 3 拟合 $-\ln(\tau^{-1})$ 与 $1000/T$ 之间的关系^[27]

Fig. 6. (a) The structural diagram of the bilayer α -InGaZnO memristor and a schematic illustration of the synapse between neurons. (b) the EPSC induced by a single pulse. (c) memory decay curves recorded after different numbers of stimuli (dots), the data was fitted by single exponential function. (d) plot of $-\ln(\tau^{-1})$ against $1000/T$ following equation 3^[27].

度和扩散常数. 通过图 6(c) 中不同温度下的弛豫过程获得弛豫时间 $\tau'(T)$, 并得出 $-\ln(\tau'^{-1})$ 与 $1000/T$ 之间的关系. 由方程 3 拟合得出, 激活能 $E = 0.36 \text{ eV}$ 和室温下扩散系数 $D(T)$ 为 $2.1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$. 以上数据和文献报道氧扩散激活能和扩散系数接近^[30], 证实了氧离子的扩散和弛豫过程的关系.

导电细丝数量调控模型: 除了双层结构的忆阻器之外, 单层氧化物材料也能实现忆阻行为. 美国密歇根大学 Lu 实验组构筑了基于 WO_x 薄膜的忆阻器, 同样实现了器件阻态的连续调节^[31]. 研究者认为, 构建双层结构并不是实现忆阻行为的必要条件, 且导电前端模型并不适合于解释其忆阻行为. 相对应的, 该忆阻器的忆阻机理是通过增加或减少 WO_x 薄膜内部氧空位导电细丝的数目来实现对阻态的调控. 如图 7(a) 所示, 忆阻器结构为 Pd/ WO_x /W, 对其进行正负电压扫描时, 电阻的逐渐降低和

增加证实了器件的忆阻特性. 图 7(b) 给出了相应的机理解释: 在外加电压作用下, 氧离子的迁移改变了氧空位导电通道数目或者有效横截面积. 由于氧空位导电通道电阻低, 当其数目增加时, 器件电阻降低; 当其数目减少时, 器件电阻增大.

肖特基势垒调制模型: 基于单一材料体系构筑的忆阻器件, 除了调节阻变层本身电阻之外, 电极与绝缘层之间势垒的调制也是一种实现忆阻行为的有效方法. 如图 8(a) 所示, 在金属-绝缘体-金属结构的忆阻器中, 左侧金属与绝缘体为肖特基接触, 右侧为欧姆接触. 当右侧加正电压时, 氧离子向右侧电极迁移, 使得势垒区氧空位增加, 降低肖特基势垒高度, 从而降低器件电阻; 当反向时, 电场驱动氧离子向左侧迁移, 中和势垒区氧空位, 增加肖特基势垒高度, 从而增加器件电阻. 基于该理论模型, 华中科技大学 Guo 研究团队构筑了 Pt/ SrTiO_3 /Nb- SrTiO_3 结构的势垒调制型忆阻器^[29],

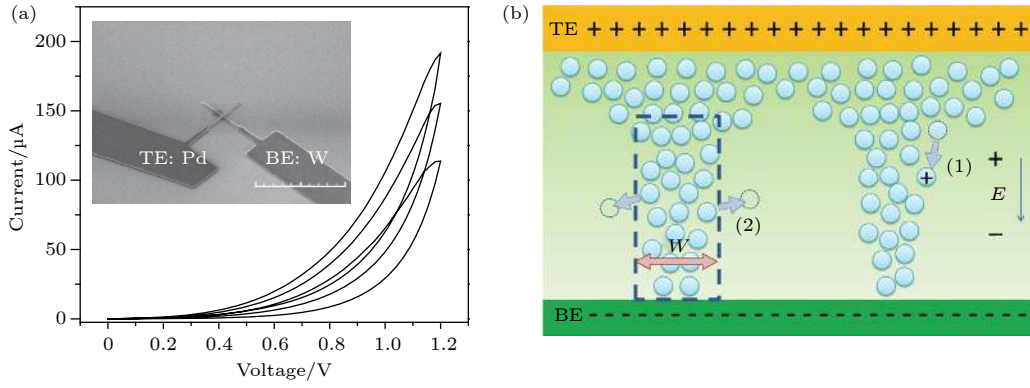


图 7 (a) 基于 Pd/WO_x/W 结构忆阻器的电学特性; (b) 导电细丝数目模型机制图^[31]

Fig. 7. (a) The I-V characteristic of Pd/WO_x/W memristor. (b) memristive mechanism diagram of modulating conductive filaments^[31].

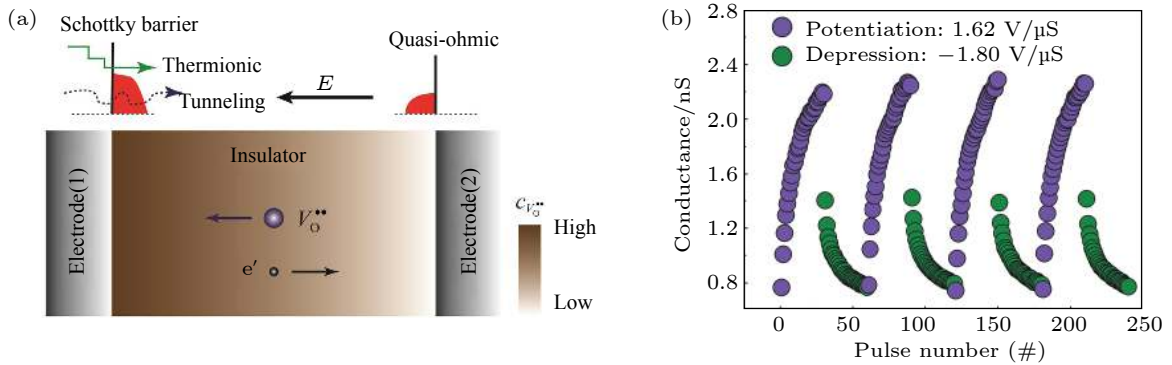


图 8 (a) 界面肖特基势垒调制忆阻模型示意图; (b) 基于 Pt/SrTiO₃/Nb-SrTiO₃ 结构忆阻器在脉冲模式下的阻变行为^[29]

Fig. 8. (a) Schematic diagram of the memristive model by modulating Schottky barrier. (b) the potentiation and depression of Pt/SrTiO₃/Nb-SrTiO₃ memristor obtained under positive and negative pulses, respectively^[29].

如图 8(b) 所示, 器件的电导值能在正向脉冲下连续增加, 负向脉冲下连续减小, 具有稳定的忆阻行为。

3 忆阻型突触器件认知功能模拟

3.1 基本传输特性

神经突触作为神经元之间相互接触部位, 具有独特的非线性传输特性. 神经突触的连接强度决定着信息传递的效率, 能够动态地随刺激信号的训练而改变, 并保持连续变化的状态. 而忆阻器的阻值能够随流经电荷量发生变化并能记住该变化量. 如图 9(a, b) 所示, 对忆阻器连续地施加正向/负向扫描电压时, 器件电流会随之连续的增加/减少^[27]. 在脉冲模式下, 器件的连接强度可以通过连续的施加脉冲而发生改变, 如图 9(c): 和 I-V 曲线一致, 连续的正(负)脉冲施加时, 电流增加(减小). 这种非线性传输不仅和生物突触具有相似的特性, 而且为忆阻器模拟生物突触的学习功能提供了重要基础。

3.2 突触可塑性

神经突触的重要特性之一是其具有突触可塑性: 突触传递效率发生增强或减弱的变化现象, 按记忆的时间长短可以分为短时程突触可塑性(short-term plasticity, STP) 和长时程突触可塑性(long-term plasticity, LTP)^[32-34]. STP 对应于突触的连接受刺激后的短暂增强或减弱; 而 LTP 则对应于突触连接持久的改变. 前者往往对短时记忆有重要作用, 被认为能够帮助大脑过滤掉不必要的信息, 而后者能在短时记忆的基础上经过反复训练形成永久性记忆, 这两者已被公认为是学习记忆活动的细胞水平的生物学基础。

3.2.1 短时可塑性 (STP)

生物突触在接受刺激后, 会在突触前神经元瞬时积累 Ca²⁺, 这些 Ca²⁺能够影响突触活动中神经递质的释放, 进而影响突触权重的变化. 当相同强度的两个刺激连续施加时, 第二个刺激产生的兴奋

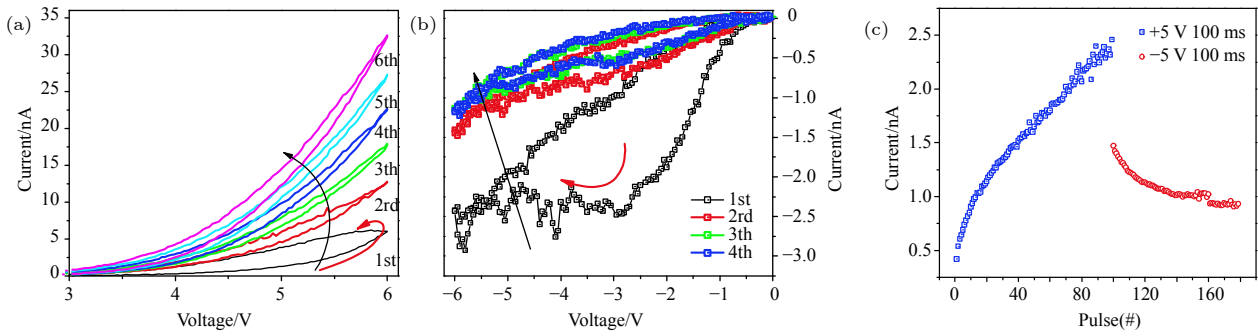


图9 忆阻器的非线性传输特性 (a), (b) 器件电流-电压特性曲线; (c) 在连续的增强/抑制脉冲下, 器件电导上升/下降^[27]
 Fig. 9. The nonlinear transmission characteristic of memristor. (a), (b) I - V characteristic of the device measurement under positive and negative voltage sweep, respectively. (c) the continuously increase/decrease of device conductance under positive/negative pulse^[27].

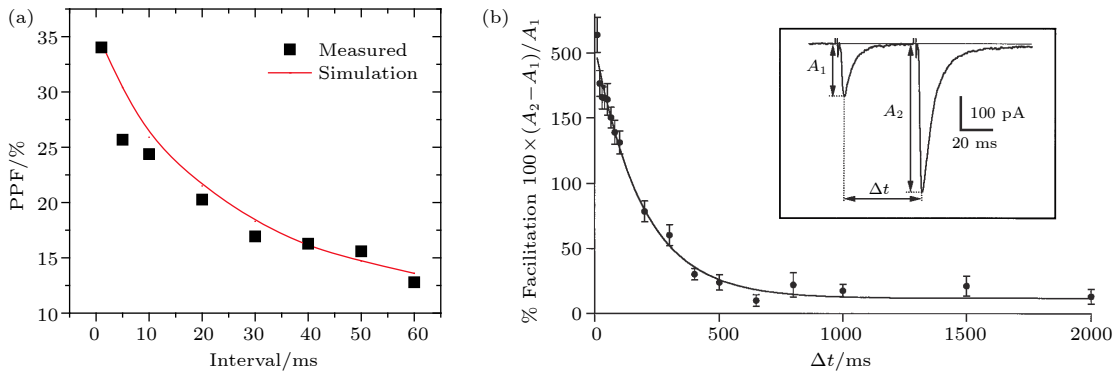


图10 (a) 在忆阻器中实现的 PPF 现象: PPF 变化量和时间间隔的关系^[31]; (b) 浦肯野细胞 (Purkinje cell) 和颗粒细胞 (granule cell) 之间神经突触的双脉冲易化行为; 插图为连续两个胞外刺激引起的兴奋性后电流变化^[35]
 Fig. 10. (a) PPF behaviors obtained in memristor: the change of PPF as the function of the time interval.^[31] (b) the PPF measured in the synapse between Purkinje cell and granule cell. The insert is the EPSC induced by two extracellular stimuli^[35].

性后电流 (幅值为 A_2) 明显会大于第一个刺激产生的兴奋性后电流 (幅值为 A_1), 这种电流明显增强的现象在生命科学领域被称为双脉冲易化 (PPF). PPF 是典型的短时可塑性表现形式之一. 如图 10(b) 插图所示, 两个刺激的时间间隔为 Δt , PPF 的计算方式为 $PPF = 100\% \times (A_2 - A_1)/A_1$. 图 10(b) 给出了颗粒细胞 (granule cell) 和浦肯野细胞 (Purkinje cell) 之间神经突触的双脉冲易化行为: 易化增益的百分比随脉冲对时间间隔的变化^[35]. 从图中可以发现: 当第二个刺激越靠近第一个刺激时, 易化的程度越明显; 当第二个刺激远离第一个刺激时, 易化效果不明显.

美国密歇根大学 Lu 研究组基于 WO_x 忆阻器实现了神经突触的双脉冲易化行为^[31]. 当一个脉冲施加在器件上时, 形成一定数量的氧空位导电细丝会增强器件的电导. 撤去电压后, 随着时间推移氧空位由于浓度梯度的动力会向周围扩散, 导电细丝数目减少 (即有效面积减小), 进而降低器件的电

导. 如果第二个电压刺激紧接着第一个电压刺激施加时, 第一次形成的导电细丝并没有完全消失, 第二次形成的导电细丝会在此基础上形成更多的导电细丝 (即更大的有效面积), 进而会得到更高的电导态. 图 10(a) 给出了实际测试得到的 PPF 现象. 可以看到, 当双脉冲时间间隔越小时, PPF 变化量越大; 反之, PPF 变化量越小. 利用忆阻器不仅成功模拟出了突触的 PPF 行为, 而且实验结果在时间量级和变化率上均和神经突触相符合.

3.2.2 长时可塑性 (LTP)

作为长时可塑性的表现形式之一, 放电时间依赖可塑性 (STDP) 规则是学习和记忆的基本机制: 突触权重能够随着突触前/后刺激在下发生较为持久的改变. 突触前刺激先于突触后刺激施加时, 突触的连接会增强, 即长时程增强. 突触前刺激后于突触后刺激施加时, 突触的连接会减弱, 即长时程减弱^[36,37]. 模拟 STDP 是神经突触仿生的重要环

节, 目前多种氧化物基忆阻器被报道能够模拟 STDP 行为, 如 InGaZnO ^[27]、 TiO_2 ^[38]、 TaO_x ^[39]、 HfO_2 ^[40]、 SrTiO_3 ^[29] 等. 以 InGaZnO 为例, 图 11(a) 给出了利用忆阻器模拟 STDP 的结果, 器件的突触权重的变化 (ΔW) 和脉冲刺激相对时序 (Δt) 呈现指数的关系: $\Delta t < 0$ 时, 突触权重增大, 增强的效果随着时间差越小而变强; $\Delta t > 0$ 时, 突出权重减小, 减弱的效果随着时间差越小而变强. 这样的变化和图 11(b) 中老鼠海马体神经元的兴奋性后电流和刺激的相对时序关系一致^[41].

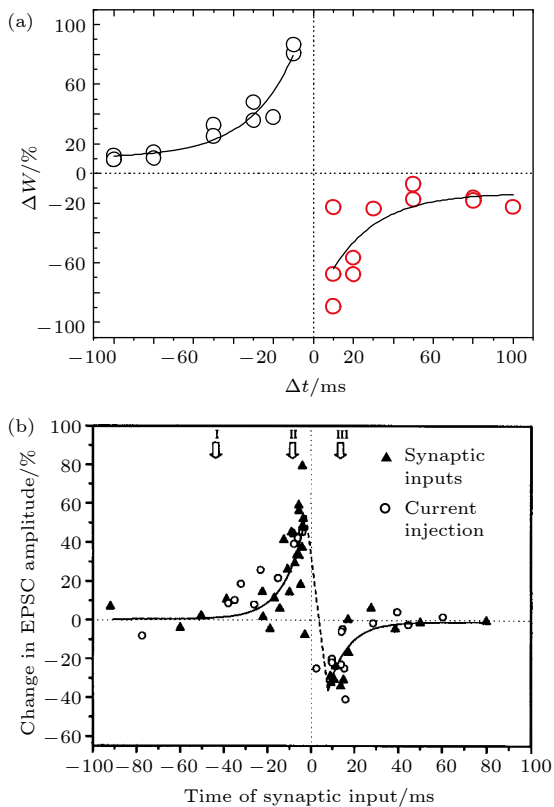


图 11 (a) 基于忆阻器模拟放电时间依赖可塑性(相对突触权重和相对刺激时间的依赖性)^[27]; (b) 老鼠海马体神经元中相对刺激时间的依赖性^[41]
 Fig. 11. (a) STDP behaviors obtained by the memristor.^[27] (b) STDP behaviors measured in hippocampal neurons of the rats^[41].

3.2.3 短时记忆向长时记忆转化

脑学习时的短时记忆 (short-term memory, STM)^[42-44] 和长时记忆 (long-term memory, LTM)^[45,46] 与神经突触的 STP/LTP 相对应. STP 对应的短时记忆在时间层面上只能维持几分钟左右, 而 LTP 对应的长时记忆能够保持几个小时甚至更长时间. 虽然短时记忆在很快的时间以内

遗忘了, 但是通过反复的学习和训练短时记忆会向长时记忆转变 (如图 12(a) 所示). 从微观机制上来说, 反复的学习刺激造成了突触的连接程度的变强, 是短时记忆向长时记忆转变的原因.

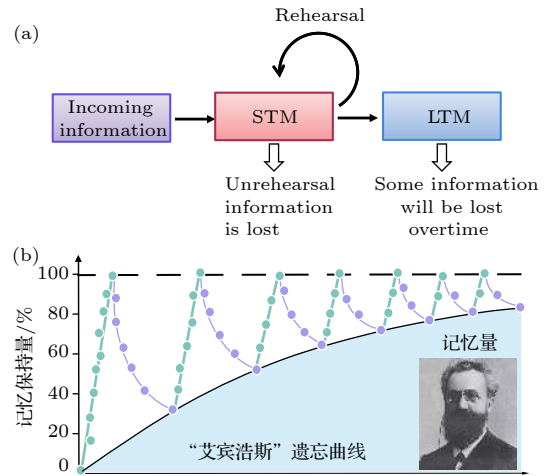


图 12 (a) 短时记忆向长时记忆转变示意图; (b) 艾宾浩斯遗忘曲线
 Fig. 12. (a) Schematic diagram of the transition from short-term memory (STM) to long-term memory (LTM). (b) the Ebbinghaus Forgetting Curve.

美国密歇根大学 Lu 实验组基于导电通道有效面积 (导电通道数目) 调制的 $\text{Pd}/\text{WO}_x/\text{W}$ 忆阻器件, 通过增加刺激次数, 实现了 STM 向 LTM 的转化^[49]. 如图 13(a, b), 当对器件施加 5 个 1.3 V, 持续时间 1 ms, 间隔 200 ms 的电压脉冲时, 随着脉冲电压的逐次施加, 器件电导先增加随后自发衰减, 但随着脉冲电压施加多次后, 器件的电导总体提高, 这是由于两个刺激的时间间隔较短, 不足以使器件回到初始状态, 产生永久的电导变化. 除了电导提高之外, 在重复刺激下, 器件电导的维持时间也显著延长. 对器件施加相同的振幅、持续时间和脉冲时间间隔的脉冲序列时, 随着刺激数量 N 的增加, 电流衰减的越来越慢 (如图 13(c) 所示). 从图 13(d) 可以看到: 弛豫时间 τ 随着刺激数量的增加, 明显增加; 并且当 τ 较短, 对施加的刺激较为敏感, 而当 τ 较长, 则对施加的刺激不敏感. 这是由于重复刺激使得氧空位向电极与中间层的交界处迁移, 并且侧向的氧空位扩散达到平衡, 使得导电通道很难被破坏. 图 13(e) 给出了经过大量刺激之后薄膜内部导电分布状态示意图. 这种通过对忆阻器件施加重复刺激可以使得其内部结构发生变化, 很好的模拟了 STM 向 LTM 的转化. 此外, 中山大

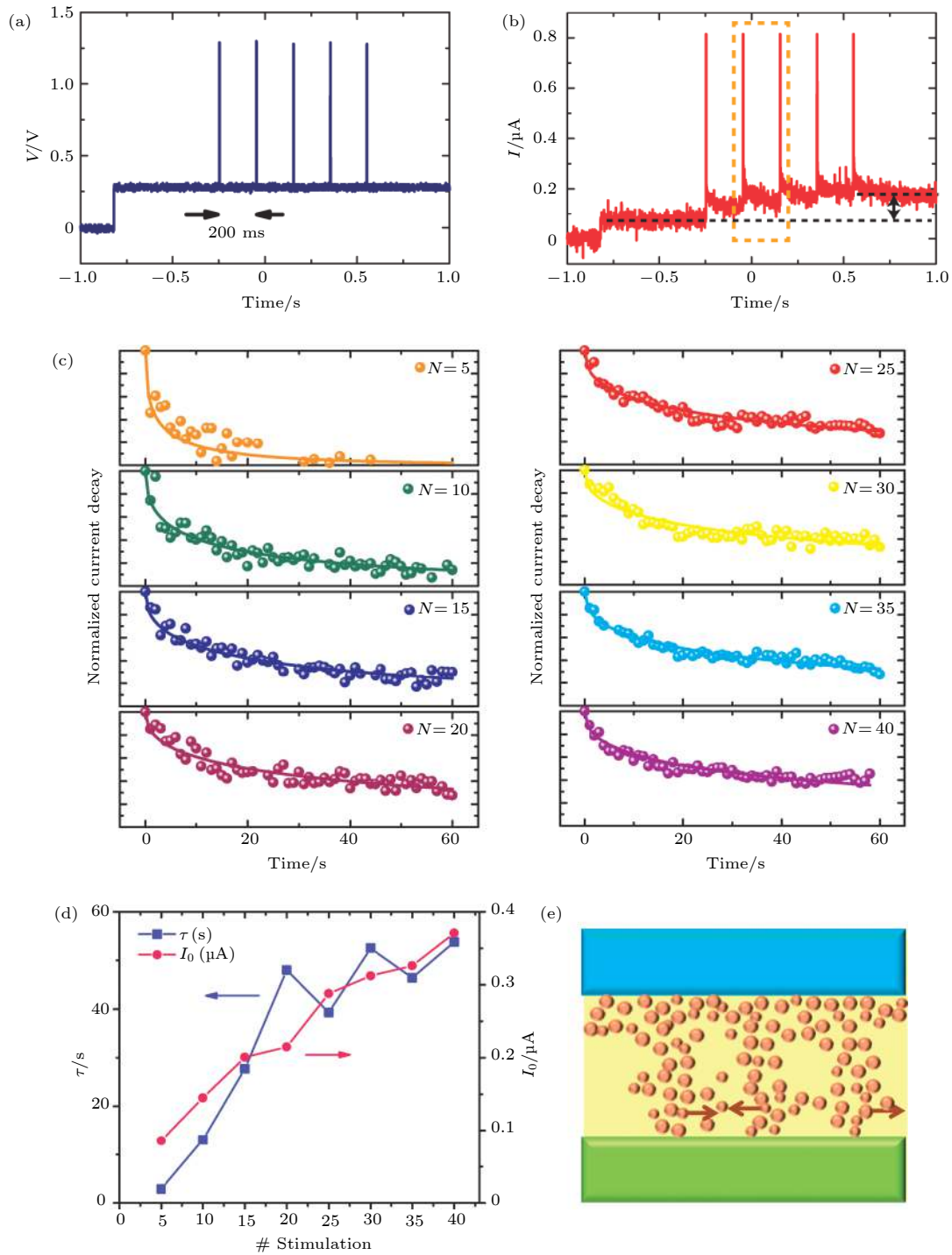


图 13 Lu 研究组模拟短时可塑性向长时可塑性的转变 (a, b) 施加的脉冲信号和器件的响应电流; (c) 不同数量刺激后, 记忆的保持量; (d) 弛豫过程的初始电流及拟合时间参数随刺激次数的变化; (e) 长短时转变过程中, 器件内部结构变化示意图^[19]

Fig. 13. STM-to-LTM transition obtained by Lu's group. (a, b) the response current of the device under pulse stimulus. (c) memory retention data recorded after different numbers of identical stimuli (dots) and fitted curves using the SEF (solid lines). (d) characteristic relaxation time (τ) plotted with respect to the number of stimulations (N). (e) schematic of the structural change to the memristor during the transition^[19].

学 Pei 研究组、印度 Shivaji 大学 Dongale 研究组和山东大学 Jiang 研究组同样利用 NiO ^[47]、 ZnO ^[48] 和 InGaZnO-HfO_2 ^[49] 基忆阻器实现了 STM 向 LTM 的转化。

3.3 经验式学习

德国心理学家艾宾浩斯 (H. Ebbinghaus) 在研究人类的记忆认知行为时发现, 不仅仅 STM 能

够随着学习刺激的增加而转化成 LTM, 而且第二次学习需要更少的时间/重复次数, 就能达到与第一次学习相同的程度^[50], 这种易化过程被称为经验式学习. 之前的研究部分完成了艾宾浩斯记忆曲线中 STM 向 LTM 转化的过程, 东北师范大学 Liu 研究组基于 InGaZnO 忆阻器进一步模拟了具有 STM 向 LTM 转化和经验式学习行为的完整艾

宾浩斯曲线^[27]. 如图 14 所示, 对双层 a-InGaZnO 结构的忆阻器施加 70 个刺激脉冲时, 突触权重逐渐增强, 撤去激励脉冲后, 会出现突触权重自发遗忘过程. 紧接着, 当突触器件接受第二次刺激的时候, 学习到和第一次的相同的程度只需要相对少的 4 个刺激脉冲. 器件行为表明有学习经验的记忆单元要比没有经验的更容易再次获得信息.

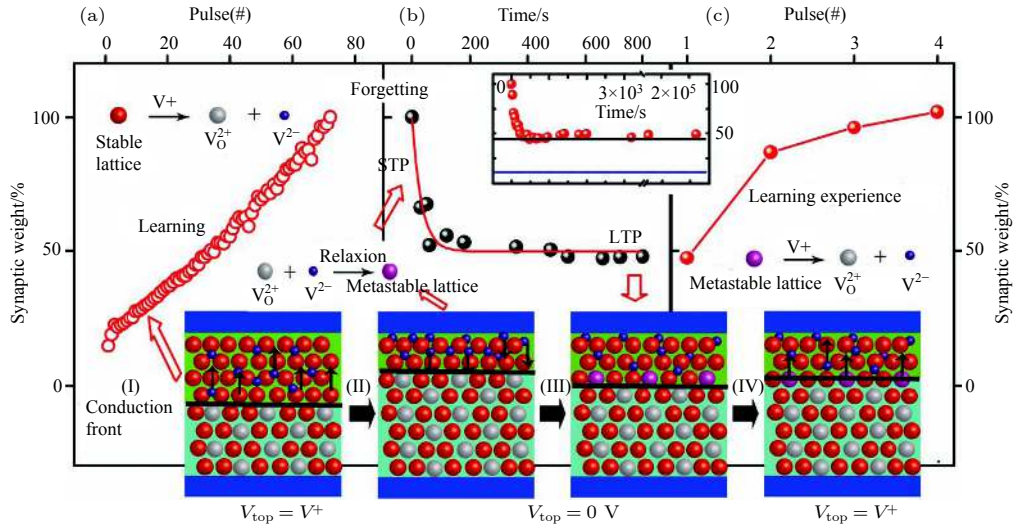


图 14 突触仿生器件的“经验式行为”和器件运行动力学模型 (a) 突触权重随脉冲刺激近线性增加; (b) 电导自发弛豫过程; (c) 基于中间态的再次学习过程; 插图为器件运行的氧离子迁移扩散机制^[27]

Fig. 14. The “learning-experience” behaviors, and the dynamic model of device operation. (a) Nearly linear increase of the synaptic weight with consecutive stimuli. (b) the spontaneous decay of the conductivity. (c) re-stimulation process from the mid-state. The inset illustrates an oxygen ion migration/diffusion model of device operation^[27].

3.4 非联合式/联合式学习

非联合和联合式学习均属于高阶学习行为, 前者不需要在刺激和反应之间形成某种明确的联系^[51,52]; 而后者会在刺激和反应之间形成一定的联系^[53]. 习惯化属于典型的非联合式学习 (如图 15(a) 所示): 当相同的刺激反复使用后, 突触的行为反应强度会下降. 通过习惯化, 动物和人类学会忽视那些已经丧失了新奇性或无意义的刺激, 而将注意力转向更重要的刺激. 而已经习惯化的动物或人类一旦接受到了新的刺激, 又会引起它们的注意, 这一过程叫去习惯化. Yang 等人基于 HfO_x 忆阻器实现了习惯化和去习惯化的模拟^[54]. 如图 15(b) 所示, 器件接受连续的负脉冲时 (幅值 -1 V, 脉冲间隔 30 ms), 器件电流逐渐减弱. 该突触器件呈现习惯化, 即对不强烈的刺激逐渐熟悉, 不产生相应的响应; 而对习惯化的器件施加新的正向刺激 (幅值 0.45 V, 脉冲间隔 30 ms), 器件电流明显增加, 新

的刺激引起了强烈的反应, 呈现去习惯化.

著名的巴普洛夫经典条件反射属于典型的联合式学习. 图 16(a) 巴普洛夫条件反射的原理: 实验中, 给狗喂食物 (非条件刺激, UCS), 狗会分泌唾液; 对狗摇铃 (中性刺激, NS), 狗不会有反应; 但经过同时对狗进行喂食和摇铃以后, 单独的摇铃 (条件刺激, CS) 也会让狗分泌唾液. 铃声从原来的中性刺激变成了条件刺激. 巴普洛夫狗实验让原本不产生反射的刺激经过和产生反射的刺激联合后, 最终也能产生一定的条件反射^[55-57]. 华中科技大学 Guo 研究组以 Ni/Nb-SrTiO₃/Ti 忆阻器为基础, 图 16(b) 给出了模拟巴普洛夫狗实验的简单电路, 包括一个忆阻器、一个定值电阻 (10 KΩ) 和一个示波器^[58]. UCS 为一个脉冲序列, 幅值从 4 V 逐渐增加到 5.5 V; CS 为一个脉冲序列, 包含一个正向的 5.5 V 脉冲和一个负向的 3.5 V 脉冲. 每次施加完刺激后, 紧跟着一个幅值为 300 mV 的读取

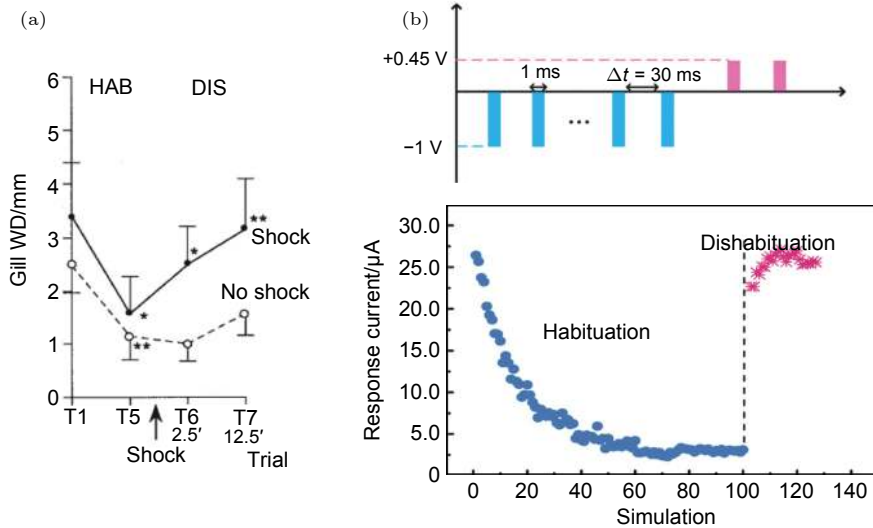


图 15 (a) 生物系统中的习惯化和去习惯化行为; (b) 基于 HfO_2 忆阻器实现的习惯化和去习惯化行为^[54]

Fig. 15. (a) Habituation and dishabituation behaviors in biological systems. (b) schematic of stimulus trains used for the measurement of habituation/dishabituation and the measured device current changes under the application of stimulus trains^[54].

脉冲. 单独施加 UCS 时, 示波器分压为 300 mV (> 45 mV), 此时分泌唾液; 当单独施加 CS 时, 由于忆阻器属于高阻态, 示波器分压远小于 45 mV, 此时不分泌唾液; 当共同施加 UCS 和 CS 时, 叠加的脉冲逐渐将忆阻器开启; 此时单独施加 CS, 忆阻器属于低阻态, 示波器分压将会大于 45 mV, 此

时分泌唾液. 通过联合学习, 成功地将铃声由原来的不产生反射的中性刺激变成产生反射的条件刺激. 此外, 随着 UCS 和 CS 施加的时间间隔越小, 出现条件反射的现象时间越长, 展现出学习频率对联合式学习的影响.

除了以上的突触功能以外, 基于氧化物忆阻突触还能模拟一些其他的学习行为, 比如脉冲频率依赖突触可塑性 (spike-rate-dependent plasticity, SRDP) 等. 利用氧化物基忆阻器模拟神经突触, 被多方面证实是一种有效的方式, 有望通过忆阻器实现人工神经网络的构筑, 进而模拟人脑复杂的学习功能. 虽然利用忆阻器目前仅能对神经突触进行简单的仿生, 但随着科学技术的发展, 未来有望通过忆阻神经突触来模拟更加复杂人工神经网络.

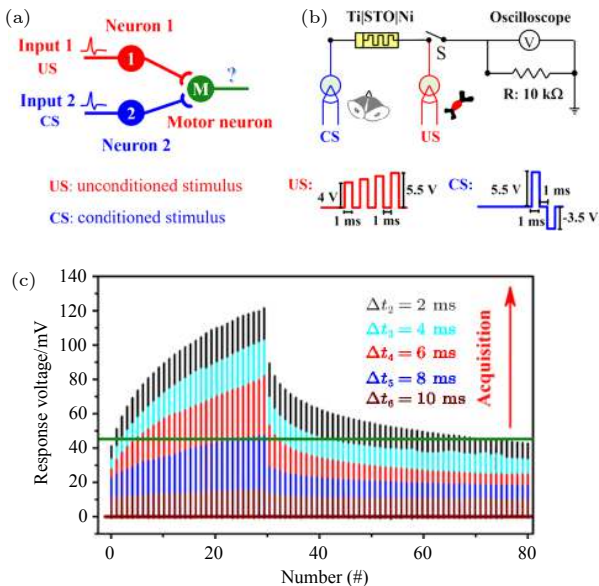


图 16 (a) 巴普洛夫条件反射的原型; (b) 基于忆阻器构建的巴普洛夫条件反射模拟电路; (c) 在不同时序关系的条件和非条件刺激下实验测量结果^[58]

Fig. 16. (a) Prototype of the Pavlovian conditioning. (b) memristive circuit with electrical US and CS to mimic the Pavlovian conditioning. (c) the experimental results under the conditions of different intervals between conditioned and unconditioned stimulus^[58].

4 忆阻型突触器件的应用

4.1 模式识别

目前, 基于忆阻型人工神经网络实现多种神经形态学习的模拟得到了研究人员的广泛关注^[59–61]. 其中, 开发具有模式识别 (如语音识别、人脸识别、指纹识别等) 功能的计算机系统能够帮助人类充实自动运输和邮件分拣等繁琐的任务, 也因此实现模式识别被认为是信息科学和人工智能的一个重要应用领域. 近年来, 基于氧化物忆阻器阵列, 研究人员成功实现了模式识别功能. 米兰理工大学 Ielmini 实验组基于两个晶体管和一个 HfO_2 数字

型忆阻器 (2T1R) 模拟单个神经突触, 并通过构筑 8×8 突触阵列实现了图像“X”的识别^[62]. 近年来, 通过使用数字型和模拟型共存的忆阻器件, 一种学习精度和速度可调的模式识别的方法被提出^[63]. 如图 17(a) 所示, 在经历形成过程 (forming process) 之前/后, 器件呈现出模拟型/数字型阻变行为. 由于模拟型忆阻器的 STDP 突触权重变化的波动性更小, 导致其图像识别精度更高; 而数字型忆阻器的 STDP 突触权重变化的变化率更大, 导致其图像识别速度更快. 更重要的是, 通过在忆阻神经网络中混合使用数字型和模拟型器件 (如图 17(b) 所示), 获得了精度和速度连续可调的图像识别过程: 通过改变神经网络中模拟型 (数字型) 器件的比例, 学习精度 (速度) 可以从 75% 提高到 95% (提高两倍) (如图 17(c) 所示).

4.2 声音定位

声音定位是指大脑利用环境中的声音刺激能够确认声音方位和距离. 哺乳动物由于两耳间隔较

大, 往往是利用感知声音的时间差别 (interaural time difference, ITD) 进行声音定位^[64–66]. 近年来, 科学家利用简单的氧化物忆阻器阵列实现了对声音定位的模拟. 米兰理工大学 Daniele Ielmini 研究组构筑了 2×2 HfO₂ 忆阻器阵列, 包含两个突触前端 (相当于两只耳朵中的声音传感器) 和两个突触后端 (如图 18(a, b))^[67]. 内部电势 (V_{int}) 的不同代表了能够指示声音的定位, 即声音来源的方向角度. 如图 18 (c-f) 所示, 当一个音频信号触发左右前神经元时, 内部电势的差值 ($\Delta V_{\text{int}} = V_{\text{int}1} - V_{\text{int}2}$, 其中 $V_{\text{int}1}$ 为左耳信号引起的电势变化, $V_{\text{int}2}$ 为右耳信号引起的电势变化) 大于零时, 右耳声音先到达, 表明声源在接受者的右侧; 反之, 声源在接受者左侧. 该研究认为忆阻器脉冲时序/频率依赖特性使其能够进行时空模式学习.

4.3 逻辑运算

忆阻器独特的阻变特性使其在逻辑运算领域有着重要的应用. 通过忆阻器在高低阻态之间的转

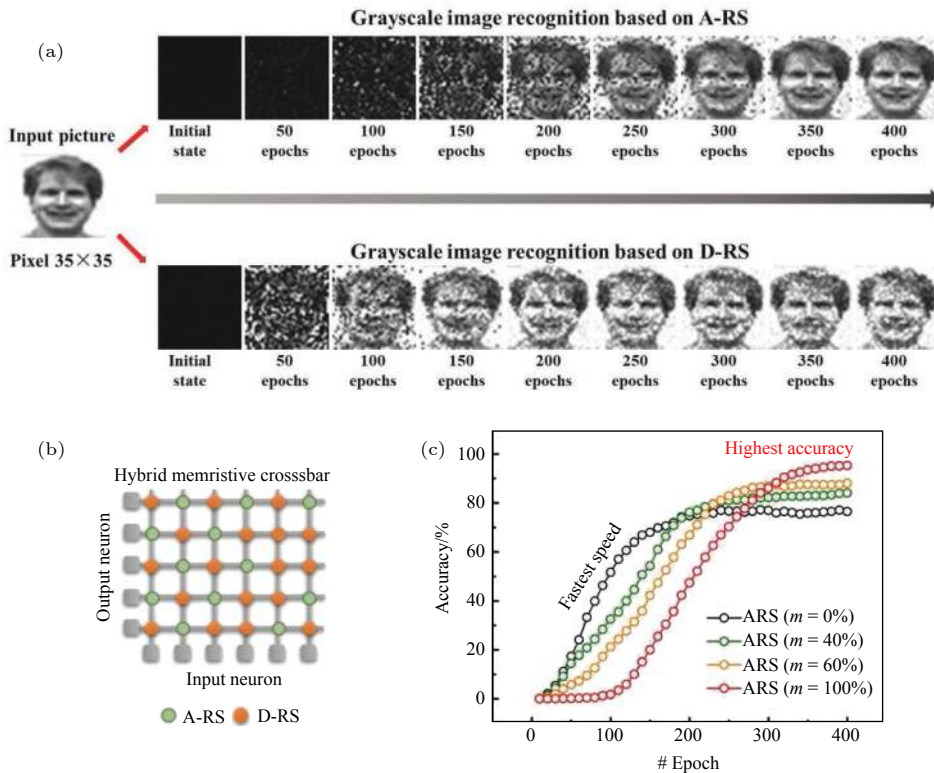


图 17 (a) 分别基于数字型和模拟型行为的图像演变过程; (b) 由数字型和模拟型忆阻器构成的混合人工神经网络; (c) 人工神经网络中数字型比例对图像识别准确性的影响^[63]

Fig. 17. (a) Evolution of images during the learning process for the initial, intermediate, and final states based on Digital resistive switching (D-RS) and analog resistive switching (A-RS) behaviors, respectively. (b) hybrid ANN composed of A-RS memristors and D-RS memristors. (c) accuracy as a function of number of epochs for the hybrid ANN at four different A-RS proportions^[63].

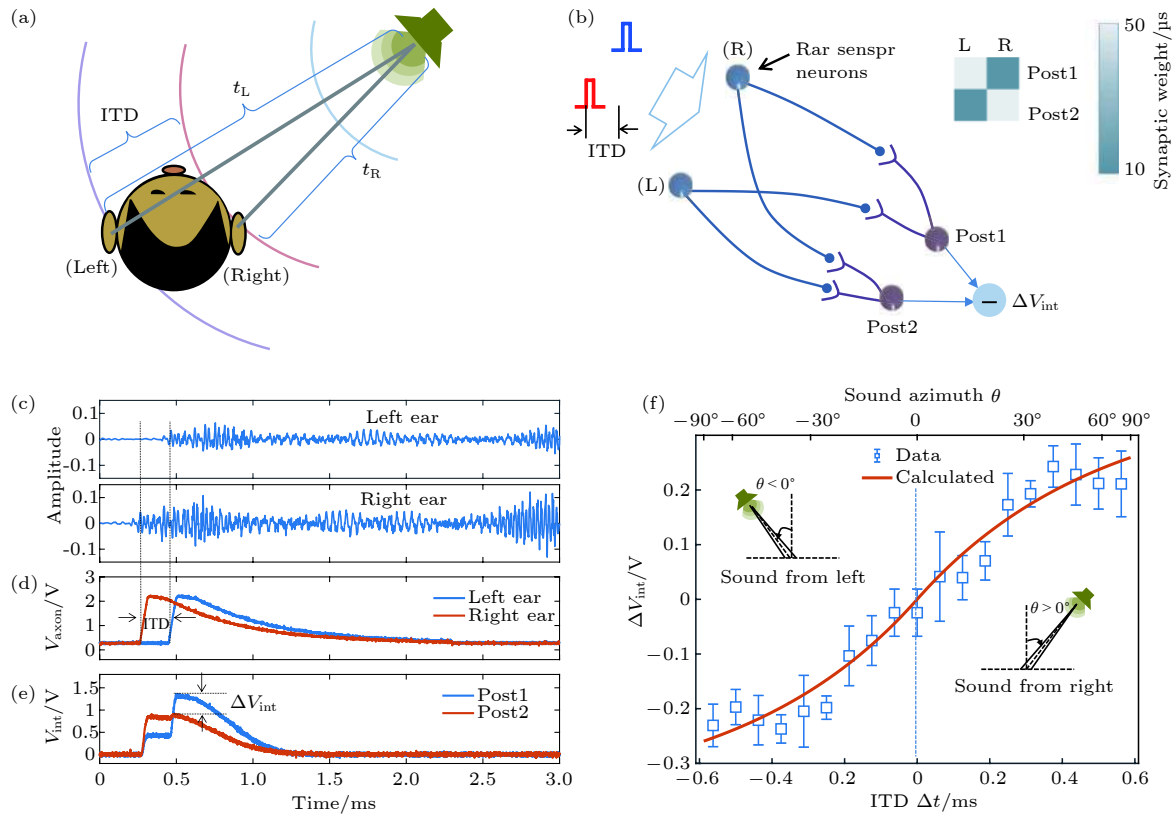


图 18 基于时空处理的声定位 (a) 双耳效应示意图; (b) 2×2 神经网络通过双耳时差进行声音定位; (c) 实验用到的左右耳声音波形; (d) 对应突触前神经元的轴突电位; (e) 不同时差信号引起的突触后神经元电位; (f) 不同声音方位下突触后神经元电位的测量和计算结果^[67]

Fig. 18. Sound localization based on space-time processing. (a) Schematic illustration of binaural effect. (b) schematic structure of a 2×2 SNN to detect the sound direction from the ITD. (c) experimental sound waveforms of left and right ears, (d) corresponding axon potential of the two PREs, and (e) vint for the two POSTs with their corresponding difference. (f) measured and calculated V_{int} as a function of sound azimuth revealing analog information about the sound propagation direction^[67].

换, 能够实现逻辑运算^[68-71]. 2010年, Stanley Williams 研究组基于 Pt/TiO₂/Pt 忆阻器实现了状态逻辑运算^[8]. 如图 19(a) 所示为交叉结构的忆阻器电路, 基于该电路物理实现了蕴含 (IMP) 逻辑 (如图 19(b) 所示), 并替代传统的晶体管实现了与非门 (NAND) 逻辑运算 (图 19(c)), 同时逻辑状态以电阻态的形式非易失地存储在忆阻器中. 进一步, 将 IMP 逻辑与 FALSE 逻辑构成一组完备集, 基于该完备集能够进行任意的布尔函数逻辑运算.

此后, 基于氧化物忆阻器被应用于实现复杂和高阶逻辑功能. 传统的冯诺依曼计算体系中逻辑电路的输入和输出是高低电平. 由于高低电平逻辑状态易失, 即断电无法保存, 需要额外的存储器进行数据信息的记忆. 而基于忆阻器的逻辑电路中输入和输出是高低阻态, 能够在数据存储的位置进行逻辑运算, 实现了计算与存储的融合. 这样的融合能够有效降低信息处理的功耗, 提高信息处理的效率.

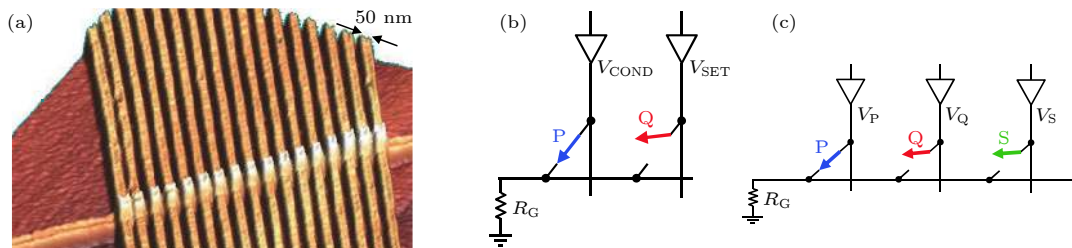


图 19 (a) 实现逻辑电路的交叉阵列; (b) IMP 逻辑运算电路; (c) NAND 逻辑运算电路^[8]

Fig. 19. (a) The memristors crossbar for logical circuit. (b) IMP logical circuit. (c) NAND logical circuit^[8].

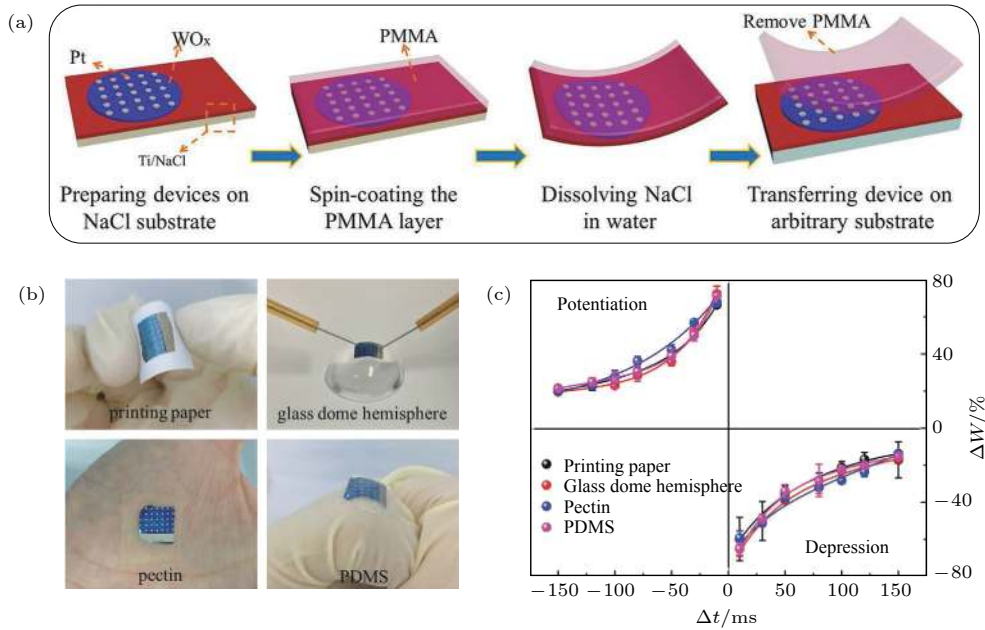


图 20 (a) 利用水溶方法制备可转移的 Pt/WO_x/Ti 忆阻神经突触器件示意图; (b) 转移至打印纸、3D 玻璃半球、果胶和 PDMS 衬底上的器件实物图; (c) 转移至不同衬底上的忆阻器件 STDP 学习功能^[73]

Fig. 20. (a) Schematic diagrams of the fabrication process for the transferable Pt/WO_x/Ti synaptic devices using water-dissolution method. (b) the pictures of devices that are transferred on flexible printing paper, glass dome hemisphere with 3D surface, pectin and PDMS substrate. (c) the obtained STDP behaviors of the devices on different substrates^[73].

4.4 柔性可穿戴

近年来, 柔性电子吸引着研究人员的兴趣, 而开发柔性电子突触器件有助于在未来实现可穿戴计算机、可植入芯片和人工皮肤等应用. 为了使忆阻器件具备延展、可拉伸、和生物兼容等特点, 需要将其制备在一些非传统的衬底上, 如 PET (聚对苯二甲酸乙二醇酯) 和 PDMS (聚二甲基硅氧烷) 等. 然而, 氧化物材料由于需要高温处理, 因而限制了氧化物基忆阻神经突触在柔性可穿戴领域的发展. 为了解决以上问题, 河北大学 Yan 研究组采用柔软的云母作为衬底, 制备出了具有柔性的 TiN/Zr_{0.5}Hf_{0.5}O₂/InGaZnO 忆阻突触器件^[72]. 为构筑柔性可转移的氧化物基忆阻神经突触, 一个具有普适性水溶 NaCl 方法被提出: 如图 20(a) 所示, 将 Pt/WO_x/Ti 忆阻器件制备在表面抛光 NaCl 衬底上, 由于 NaCl 衬底的高耐热性, 忆阻器件的制备不会损坏衬底^[73]. 利用水溶解 NaCl 衬底之后, 自支撑的忆阻器件可以转移到不同的衬底上. 图 20(b) 给出了分别转移至打印纸、3D 玻璃半球、果胶和 PDMS 衬底上的器件实物图, 器件展现出柔性、随形可贴附和生物兼容性等应用潜力. 更重要地是, 转移至以上四种衬底的器件, 依然能够模拟神经突

触 STDP 学习功能 (如图 20(c) 所示), 器件在转移过程中并没有被破坏.

4.5 光电忆阻神经突触

发展新型的光电耦合忆阻器有望突破基于传统 CMOS 工艺的图形处理器 (GPU) 在容量、集成度、速度等方面的技术瓶颈, 实现新一代集探测、存储与处理于一体的图像处理器. 中科院半导体所 Shen 研究组和香港理工大学 Cai 研究组, 分别提出了基于 Al₂O₃ 和 MoO_x 材料的忆阻器, 与光探测器相结合, 实现了模拟人工视觉系统的图像信息探测/存储功能^[74,75]. 韩国成均馆大学 Kim 研究组基于 InGaZnO 薄膜的忆阻器, 利用光刺激代替电刺激, 实现了光电混合调制的忆阻神经突触^[76]. 中科院宁波物理所 Li 研究组基于 ITO/Nb:SrTiO₃ 异质结, 构筑了人工光电神经突触, 模拟了视觉感知系统对外部环境光学信号的自适应检测、处理和记忆^[77]. 如图 21(a) 所示, ITO/Nb:SrTiO₃ 肖特基结电阻能够被光信号调制: 在光照下, 氧空位中捕获的电子被释放, 留下一些带正电荷的空位, 降低/缩窄肖特基势垒高度/宽度, 增加电子的隧穿几率, 进而降低肖特基结电阻. 进一步地, 利用光脉冲代替电脉冲, 成功模拟了神经突触的短时可塑性 (双

脉冲易化, 如图 21(b, c)), 经验式学习及人类视觉短时记忆向长时记忆转变功能, 为光电神经突触模拟视觉神经提供了可能。

人类视觉系统是一个复杂的神经网络, 因而模拟视觉系统则需要多个忆阻神经突触的联合. 为了

实现图像的感知和记忆, Li 研究组构建了九个 ITO/Nb:SrTiO₃ 异质结人工光电神经突触, 来记忆像素为 3 × 3 的图像 [77]. 如图 22 所示, 该突触网络能够感知不同光波长和强度的刺激: 图 (a) 显示了对用波长编码输入图像的感知和记忆过程, 通

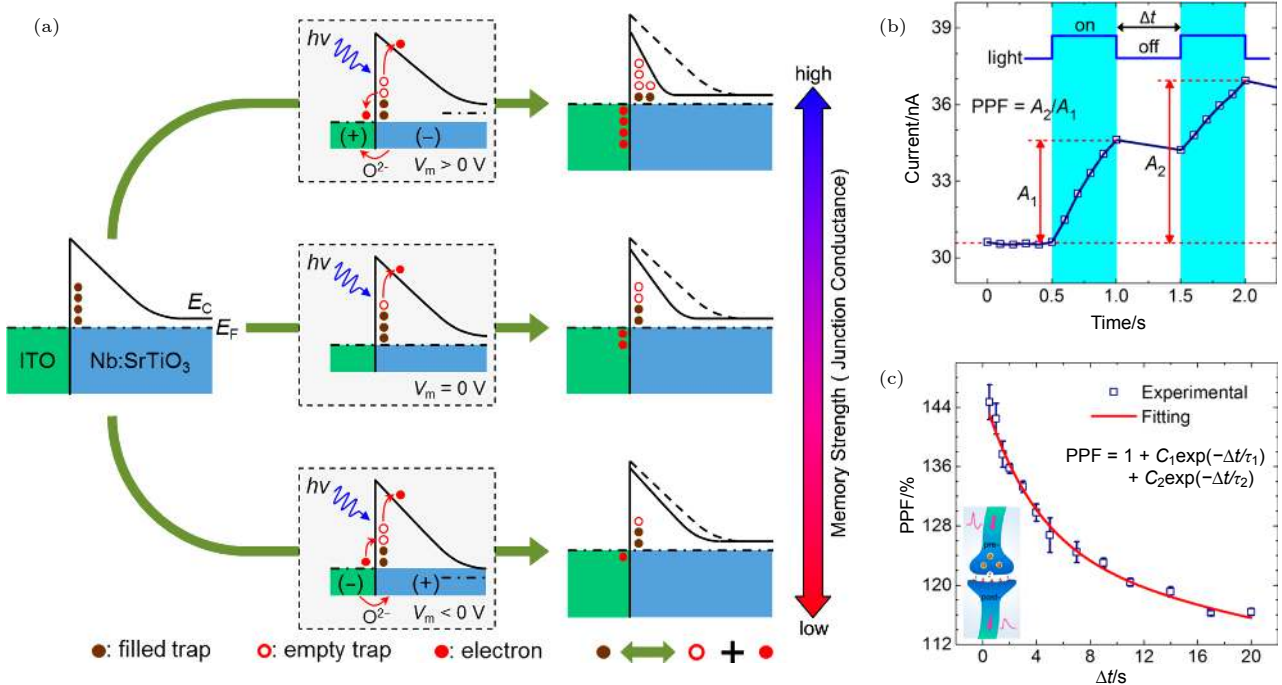


图 21 (a) 光激励下 ITO/Nb:SrTiO₃ 基光电神经突触器件运行机理示意图; (b) 在光脉冲对下异质结的典型光响应特性; (c) 对脉冲易化程度随脉冲间隔变化规律 [77]

Fig. 21. (a) Photoresponsive characteristics of the ITO/Nb:SrTiO₃ heterojunction artificial optoelectronic synapse under pulsed light stimuli. (b) photoresponsive characteristic of the heterojunction under a light pulse pair. (c) the variation of PPF index with the interval of light pulse pairs [77].

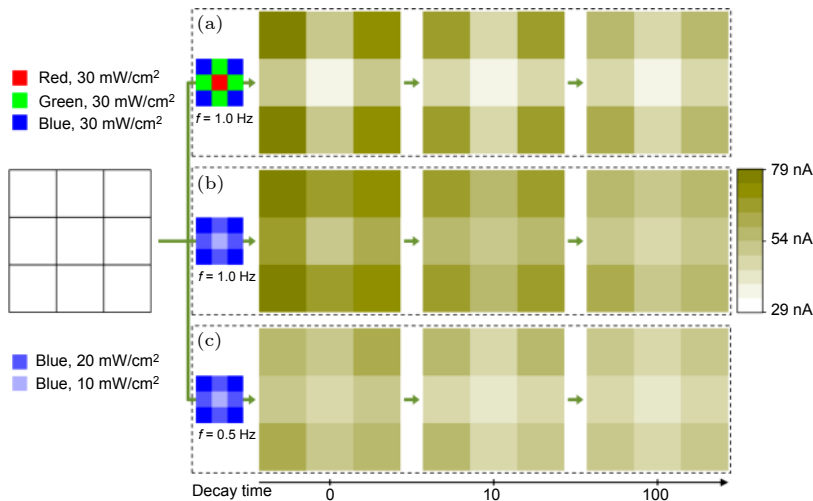


图 22 基于 ITO/Nb:SrTiO₃ 异质结人工光电神经突触模拟视觉神经系统 (a) 用波长编码输入图像的感知和记忆过程. (b) 用强度编码输入图像的感知和记忆过程. (c) 低频率刺激下的图像感知和记忆过程 [77]

Fig. 22. Mimicry of human visual memory using the ITO/Nb:SrTiO₃ heterojunction artificial optoelectronic synapse. (a) The detection and memory process of image encoded by light wavelength. (b) the detection and memory process of image encoded by light intensity. (c) the detection and memory process of image with low stimulating frequency.

过测量经过光信号刺激后的突触后电流, 该突触网络很好的识别出了输入图像, 且识别的图像能够长时间被记忆; 图 (b) 则证实了利用强度编码输入图像的感知和记忆过程, 而图像的识别和刺激的频率有关, 频率越小, 学习和记忆的效果越弱 (图 (c)). 此外该研究组发现, 外加电场能调控异质结的光响应效率, 正、负电压分别引起增强和抑制效果. 基于此, 将光和电分别作为激励和调制信号, 实现了兴趣等因素调制的人类视觉记忆功能模拟.

5 结论与展望

忆阻器作为第四种无源电子元件, 具有阻值可随流经电荷而发生动态变化的特性, 和人脑中的突触具有高度相似性. 基于氧化物基忆阻器能够实现突触的学习和记忆行为: 包括非线性传输、长/短时可塑性、经验式学习和联合式学习均能用本文综述的氧化物忆阻神经突触来模拟. 未来忆阻器有望将其应用在模式识别、声音定位、柔性可穿戴、逻辑运算和光电神经突触中, 为实现神经形态计算系统提供了基础. 尽管目前氧化物基忆阻器经过了近十年的发展, 展现出了模拟神经突触的潜力. 但是仍有诸多问题有待进一步解决:

(1) 2016 年阿尔法狗采用了 1202 个 CPU 和 176 个 GPU 来模拟人脑的分析判断功能, 功率仍高达 10^5 W (按 CPU/GPU 每个 100W/200W 计算), 而人脑功率仅为 10—20 W^[78]. 虽然目前单一忆阻器的功耗能够维持在几十飞焦, 但当集成多个忆阻神经突触时, 高能耗问题依然有待解决. 随着后摩尔时代的到来, 发展具有超低功耗 (亚飞焦级) 的忆阻神经突触器件是首要目标.

(2) 传统的“冯·诺依曼”架构中处理器与存储器之间数据频繁的传输会带来高能耗和低效率, 因此目前计算机领域希望探索出不同于“冯·诺依曼”构架下的计算、存储及处理新方法. 忆阻器由于具备整合存储和处理的特性, 为发展非冯计算架构提供了基础. 但是目前, 忆阻突触仿生研究大多针对单一神经突触的模拟, 实现大规模神经突触联合, 模拟复杂神经功能的研究有限. 因此发展忆阻器大规模互联与集成的方法是未来忆阻神经突触器件走向应用的基础.

(3) 拓展新型突触认知功能模拟将会极大促进忆阻器在人工智能领域的发展. 比如, 生物领域发

展了一种新兴的光遗传学技术: 在不同波长的光照刺激下, 光敏离子通道分别对阳离子 (Na^+ 、 H^+ 、 K^+) 或者阴离子 (Cl^-) 的通过产生选择性, 实现对细胞基因表达或大脑功能的调控^[79–81]. 因此发展光信号调控的人工神经突触, 模拟生物中的光遗传学技术, 有助于提升神经突触模拟的可调性及准确性. 综上所述, 随着科学技术的发展, 一些问题和挑战能被克服, 氧化物基忆阻器在神经突触仿生领域的一定会取得更大突破, 并会推动相关领域的快速发展.

参考文献

- [1] Chua L 1971 *IEEE Trans. Circuit Theory* **18** 507
- [2] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, Williams R S 2008 *Nature* **453** 80
- [3] Torrezan A C, Strachan J P, Medeiros-Ribeiro G, Williams R S 2011 *Nanotechnology* **22** 485203
- [4] Choi B J, Torrezan A C, Norris K J, Miao F, Strachan J P, Zhang M X, Ohlberg D A, Kobayashi N P, Yang J J, Williams R S 2013 *Nano Lett.* **13** 3213
- [5] Lee M J, Lee C B, Lee D, Lee S R, Chang M, Hur J H, Kim Y B, Kim C J, Seo D H, Seo S 2011 *Nat. Mater.* **10** 625
- [6] Shi K, Xu H, Wang Z, Zhao X, Liu W, Ma J, Liu Y 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 223505
- [7] Govoreanu B, Kar G, Chen Y, Paraschiv V, Kubicek S, Fantini A, Radu I, Goux L, Clima S, Degraeve R 2011 *International Electron Devices Meeting (IEDM)* p31.6.1
- [8] Borghetti J, Snider G S, Kuekes P J, Yang J J, Stewart D R, Williams R S 2010 *Nature* **464** 873
- [9] Jo S H, Chang T, Ebong I, Bhadviya B B, Mazumder P, Lu W 2010 *Nano Lett.* **10** 1297
- [10] Ohno T, Hasegawa T, Tsuruoka T, Terabe K, Gimzewski J K, Aono M 2011 *Nat. Mater.* **10** 591
- [11] Hu S, Liu Y, Liu Z, Chen T, Wang J, Yu Q, Deng L, Yin Y, Hosaka S 2015 *Nat. Commun.* **6** 7522
- [12] Prezioso M, Merrih-Bayat F, Hoskins B, Adam G C, Likharev K K, Strukov D B 2015 *Nature* **521** 61
- [13] Kim S, Du C, Sheridan P, Ma W, Choi S, Lu W D 2015 *Nano Lett.* **15** 2203
- [14] Liu C, Chen H, Hou X, Zhang H, Han J, Jiang Y G, Zeng X, Zhang D W, Zhou P 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 662
- [15] Wang M, Cai S, Pan C, Wang C, Lian X, Zhuo Y, Xu K, Cao T, Pan X, Wang B 2018 *Nat. Electron.* **1** 130
- [16] Wang S, Zhang D W, Zhou P 2019 *Sci. Bull.* **64** 1056
- [17] Vontobel P O, Robinett W, Kuekes P J, Stewart D R, Straznicky J, Williams R S 2009 *Nanotechnology* **20** 425204
- [18] Kim S, Choi Y K 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 223508
- [19] Chang T, Jo S H, Lu W 2011 *ACS Nano* **5** 7669
- [20] Yang Y C, Pan F, Liu Q, Liu M, Zeng F 2009 *Nano Lett.* **9** 1636
- [21] Yang Y, Gao P, Li L, Pan X, Tappertzhofen S, Choi S, Waser R, Valov I, Lu W D 2014 *Nat. Commun.* **5** 4232
- [22] Chen J Y, Hsin C L, Huang C W, Chiu C H, Huang Y T, Lin S J, Wu W W, Chen L J 2013 *Nano Lett.* **13** 3671
- [23] Cooper D, Baeumer C, Bernier N, Marchewka A, La Torre C, Dumin - Borkowski R E, Menzel S, Waser R, Dittmann R

- 2017 *Adv. Mater.* **29** 1700212
- [24] Gao P, Wang Z, Fu W, Liao Z, Liu K, Wang W, Bai X, Wang E 2010 *Micron* **41** 301
- [25] Kwon D H, Kim K M, Jang J H, Jeon J M, Lee M H, Kim G H, Li X S, Park G S, Lee B, Han S 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 148
- [26] Yang J J, Pickett M D, Li X, Ohlberg D A, Stewart D R, Williams R S 2008 *Nat. Nanotechnol.* **3** 429
- [27] Wang Z Q, Xu H Y, Li X H, Yu H, Liu Y C, Zhu X J 2012 *Adv. Funct. Mater.* **22** 2759
- [28] Yang R, Terabe K, Liu G, Tsuruoka T, Hasegawa T, Gimzewski J K, Aono M 2012 *ACS Nano* **6** 9515
- [29] Yang R, Huang H M, Hong Q H, Yin X B, Tan Z H, Shi T, Zhou Y X, Miao X S, Wang X P, Mi S B 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1704455
- [30] Nian Y, Strozier J, Wu N, Chen X, Ignatiev A 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 146403
- [31] Du C, Ma W, Chang T, Sheridan P, Lu W D 2015 *Adv. Funct. Mater.* **25** 4290
- [32] Dan Y, Poo M M 2004 *Neuron* **44** 23
- [33] Zhang Z, Li T, Wu Y, Jia Y, Tan C, Xu X, Wang G, Lv J, Zhang W, He Y 2019 *Adv. Mater.* **31** 1805769
- [34] Kim M K, Lee J S 2018 *ACS Nano* **12** 1680
- [35] Atluri P P, Regehr W G 1996 *J. Neurosci.* **16** 5661
- [36] Abbott L F, Nelson S B 2000 *Nat. Neurosci.* **3** 1178
- [37] Debanne D, Inglebert Y, Russier M 2019 *Curr. Opin. Neurobiol.* **54** 73
- [38] Yan X, Zhao J, Liu S, Zhou Z, Liu Q, Chen J, Liu X Y 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1705320
- [39] Wang Z, Yin M, Zhang T, Cai Y, Wang Y, Yang Y, Huang R 2016 *Nanoscale* **8** 14015
- [40] Covi E, Brivio S, Serb A, Prodromakis T, Fanciulli M, Spiga S 2016 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)* p393
- [41] Zhang L I, Tao H W, Holt C E, Harris W A, Poo M M 1998 *Nature* **395** 37–44
- [42] Todd J J, Marois R 2004 *Nature* **428** 751
- [43] Peterson L R 1966 *Sci. Am.* **215** 90
- [44] Jonides J, Lewis R L, Nee D E, Lustig C A, Berman M G, Moore K S 2008 *Annu. Rev. Psychol.* **59** 193
- [45] Abel T, Nguyen P V, Barad M, Deuel T A, Kandel E R, Bourtschouladze R 1997 *Cell* **88** 615
- [46] Bliss T V, Collingridge G L 1993 *Nature* **361** 31
- [47] Li Y, Chu J, Duan W, Cai G, Fan X, Wang X, Wang G, Pei Y 2018 *ACS appl. Mater. Inter.* **10** 24598
- [48] Dongale T, Mullani N, Patil V, Tikke R, Pawar P, Mohite S, Teli A, Bagade A, Pawar K, Khot K 2018 *J. Nanosci. Nanotechnol.* **18** 7758
- [49] Jiang R, Ma P, Han Z, Du X 2017 *Sci. Rep.* **7** 9354
- [50] Ebbinghaus H 2013 *Annals of neurosciences* **20** 155
- [51] Byrne J H, Hawkins R D 2015 *C. S. H. Perspect. Biology* **7** a021675
- [52] Cohen T E, Kaplan S W, Kandel E R, Hawkins R D 1997 *J. Neurosci.* **17** 2886
- [53] Hawkins R D, Byrne J H 2015 *C. S. H. Perspect. Biology* **7** a021709
- [54] Yang X, Fang Y, Yu Z, Wang Z, Zhang T, Yin M, Lin M, Yang Y, Cai Y, Huang R 2016 *Nanoscale* **8** 18897
- [55] Ziegler M, Soni R, Patelczyk T, Ignatov M, Bartsch T, Meuffels P, Kohlstedt H 2012 *Adv. Funct. Mater.* **22** 2744
- [56] Crow T 2004 *Learn. Memory* **11** 229
- [57] Hu S, Liu Y, Liu Z, Chen T, Yu Q, Deng L, Yin Y, Hosaka S 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 214502
- [58] Tan Z H, Yin X B, Yang R, Mi S B, Jia C L, Guo X 2017 *Sci. Rep.* **7** 713
- [59] Yu S, Gao B, Fang Z, Yu H, Kang J, Wong H S P 2012 *International Electron Devices Meeting (IEDM)* p10.4.1
- [60] Gao B, Bi Y, Chen H Y, Liu R, Huang P, Chen B, Liu L, Liu X, Yu S, Wong H S P 2014 *ACS Nano* **8** 6998
- [61] Kim S, Choi B, Lim M, Yoon J, Lee J, Kim H D, Choi S J 2017 *ACS Nano* **11** 2814
- [62] Wang Z, Ambrogio S, Balatti S, Ielmini D 2015 *Front. Neurosci.* **8** 438
- [63] Lin Y, Wang C, Ren Y, Wang Z, Xu H, Zhao X, Ma J, Liu Y 2019 *Small Methods* 1900160
- [64] Grothe B, Pecka M, McAlpine D 2010 *Physiol. Rev.* **90** 983
- [65] Middlebrooks J C, Green D M 1991 *Annu. Rev. Psychol.* **42** 135
- [66] Hofman P M, Van Riswick J G, Van Opstal A J 1998 *Nat. Neurosci.* **1** 417
- [67] Wang W, Pedretti G, Milo V, Carboni R, Calderoni A, Ramaswamy N, Spinelli A S, Ielmini D 2018 *Sci. Adv.* **4** eaat4752
- [68] Zhu X, Yang X, Wu C, Xiao N, Wu J, Yi X 2013 *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Exp. Briefs* **60** 682
- [69] Kvatinsky S, Satat G, Wald N, Friedman E G, Kolodny A, Weiser U C 2013 *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst.* **22** 2054
- [70] Kvatinsky S, Kolodny A, Weiser U C, Friedman E G 2011 *IEEE 29th International Conference on Computer Design (ICCD)*, p142
- [71] Lehtonen E, Laiho M 2009 *IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures* p33
- [72] Yan X, Zhou Z, Zhao J, Liu Q, Wang H, Yuan G, Chen J 2018 *Nano Res.* **11** 1183
- [73] Lin Y, Zeng T, Xu H, Wang Z, Zhao X, Liu W, Ma J, Liu Y 2018 *Adv. Electron. Mater.* **4** 1800373
- [74] Chen S, Lou Z, Chen D, Shen G 2018 *Adv. Mater.* **30** 1705400
- [75] Zhou F, Zhou Z, Chen J, Choy T H, Wang J, Zhang N, Lin Z, Yu S, Kang J, Wong H S P 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 776
- [76] Lee M, Lee W, Choi S, Jo J W, Kim J, Park S K, Kim Y H 2017 *Adv. Mater.* **29** 1700951
- [77] Gao S, Liu G, Yang H, Hu C, Chen Q, Gong G, Xue W, Yi X, Shang J, Li R W 2019 *ACS Nano* **13** 2634
- [78] Takeno Y 2016 *ECS Transactions* **75** 3
- [79] Deisseroth K 2011 *Nat. Methods* **8** 26
- [80] Yizhar O, Fenno L E, Davidson T J, Mogri M, Deisseroth K 2011 *Neuron* **71** 9
- [81] Pastrana E 2010 *Nat. Methods* **8** 24

SPECIAL TOPIC—In commemoration of the 100th anniversary of the birth of Kun Huang
Oxide-based memristive neuromorphic synaptic devices

Liu Yi-Chun[†] Lin Ya Wang Zhong-Qiang Xu Hai-Yang

(*Key Laboratory for UV Light-Emitting Materials and Technology, Northeast Normal University, Changchun 130024, China*)

(Received 15 August 2019; revised manuscript received 19 August 2019)

Abstract

Memristors are considered to be the potential candidate for simulating synapses due to their high density, low power consumption and continuously adjustable resistance. Metal oxide is an ideal choice for fabricating memristive devices with high performance due to its advantages of oxygen migration, easy adjustment of components and compatibility with traditional CMOS. In this review paper, the memristive behaviors and operation mechanism of oxide-based memristors including digital-type memristors and analog-type memristors are first introduced. We mainly summarize the cognitive functions simulated by analog-type memristive synapse, including nonlinear-transmission characteristic, synaptic plasticity, learning experience, and non-associative/associative learning. Then, the potential applications of memristive synapse in pattern recognition, sound localization, logic operation, flexibility/transferability and optoelectronic memristive synapse are introduced. Finally, we provide an outlook of the future possible studies of oxide-based memristive synapse in the relevant fields.

Keywords: oxide, memristor, memristive mechanism, synaptic emulation

PACS: 85.35.-p, 73.40.Rw, 85.25.Hv, 84.32.-y

DOI: 10.7498/aps.68.20191262

[†] Corresponding author. E-mail: yeliu@nenu.edu.cn