



铝基薄膜忆阻器作为感觉神经系统的习惯化特性

朱玮 郭恬恬 刘兰 周荣荣

Al-based memristor applied to habituation sensory nervous system

Zhu Wei Guo Tian-Tian Liu Lan Zhou Rong-Rong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 068502 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201961

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201961>

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

具有感觉记忆的忆阻器模型

Mathematical model of memristor with sensory memory

物理学报. 2019, 68(1): 018501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181577>

新型忆阻器神经形态电路的设计及其在条件反射行为中的应用

Design of novel memristor-based neuromorphic circuit and its application in classical conditioning

物理学报. 2019, 68(23): 238501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191023>

蛋白质基忆阻器研究进展

Research progress of protein-based memristor

物理学报. 2020, 69(17): 178702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200617>

氧化物基忆阻型神经突触器件

Oxide-based memristive neuromorphic synaptic devices

物理学报. 2019, 68(16): 168504 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191262>

基于忆阻器的多涡卷混沌系统及其脉冲同步控制

Memristor-based multi-scroll chaotic system and its pulse synchronization control

物理学报. 2018, 67(11): 110502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180025>

基于忆阻器的时滞混沌系统及伪随机序列发生器

A memristor-based time-delay chaotic systems and pseudo-random sequence generator

物理学报. 2017, 66(3): 030502 <https://doi.org/10.7498/aps.66.030502>

铝基薄膜忆阻器作为感觉神经系统的习惯化特性*

朱玮[†] 郭恬恬 刘兰 周荣荣

(长安大学电子与控制工程学院, 西安 710064)

(2020年11月20日收到; 2020年11月27日收到修改稿)

感觉神经系统可在外界刺激与生物体反应之间建立联系. 感觉神经系统中的最小单位神经元可直接将外界刺激传递至中枢神经, 再由中枢神经通过控制和调节生物体对外界刺激作出反应. 神经突触连接了相邻神经元进行脉冲信息传递功能. 习惯化是神经突触在信息传递中过滤外界无关信息时的一个基本特性, 可以让感觉神经系统更快速地适应外界环境变化. 忆阻器模拟神经突触功能在近年获得进展, 然而针对以忆阻器为基础的具有习惯化特性的神经突触以及完整神经系统的研究相对匮乏. 本文利用磁控溅射技术制备了厚度约为 40 nm 且含铝纳米颗粒的氮化铝薄膜忆阻器, 并发现这种结构忆阻器对于重复的外界刺激有明显的习惯化行为, 该行为与感觉神经系统的习惯化特性极为相似. 若将这种具有习惯化的神经突触与感觉神经元串联, 可形成 LIF (leaky integrate-and-fire) 生物模型模拟完整的神经系统行为, 也为忆阻器在第三代神经网络 (脉冲神经网络) 中的应用提供理论参考.

关键词: 铝基薄膜忆阻器, 习惯化, 感觉神经系统**PACS:** 85.35.-p, 72.15.Eb, 07.50.-e**DOI:** 10.7498/aps.70.20201961

1 引言

感觉神经系统是人类生物系统的基础, 它将生物体与外界环境紧密相连. 外界信息首先被人体各种感官感知, 例如视觉、触觉和嗅觉等, 再将这些信号传递到大脑或中枢神经, 最终人体可以根据这些外界信息作出不同的反应. 但外部环境通常是复杂多变的, 即使是简单的生物体, 都可以快速区分那些需要作出反应的刺激和与自身行为无关的刺激, 而神经系统的习惯化特性正好满足了这一要求. 习惯化特性的定义是生物体针对单一重复的刺激会降低自身反应频率, 使生物体更快地适应外部环境并过滤掉无关的重复信息. 因此具有习惯化特性的神经系统会具有更强的信息处理能力^[1-5]. 神经突触和神经元是构成神经系统的基础, 利用忆阻器模拟神经突触或神经元功能成为近年的研究热

点^[6-13]. 它被验证具有功耗低、运行高速、电路简单以及处理信息高效等特点, 被认为是与单个神经突触或神经元特性最接近的、体积最小的硬件实现^[14]. 然而, 针对具有习惯化特性的忆阻器和具有习惯化行为的完整神经系统研究却相对匮乏. 近年, 报道的可制备忆阻器阻变层的材料种类丰富, 主要包括金属氧化物、氮化物和有机材料等^[15-22], AlN 作为常见高介电常数材料 (high- k) 具有耐高温特性以及良好的绝缘性, 是电子器件制备常见材料之一, 其阻变特性的研究具有实际的应用意义^[23-26]. 本文报道的铝基薄膜利用磁控溅射技术沉积再经过退火处理后, 可在 AlN 薄膜中生成均匀分布的直径 5—10 nm 的铝纳米颗粒. 制备完整结构的忆阻器后, 该忆阻器在连续脉冲电压刺激下展示了明显的习惯化特性. 再将这种具有习惯化特性的忆阻器接入 LIF (leaky integrate-and-fire) 模型电路, 可对完整神经系统的习惯化特性进行模

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61704010) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2020JQ-341) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wzhu@chd.edu.cn

拟. 因而得到与习惯化定义中, 机体应对外界重复刺激降低自身反应频率相符的结果.

2 器件制备

忆阻器选用 p 型硅片作为衬底, 在衬底上利用离子束蒸发法制备 300 nm 厚度的铝膜作为底电极. 由于铝金属具有强氧化性, 完成制备的铝电极应及时放入磁控溅射设备进行镀膜. 富含铝的氮化铝薄膜制备可通过反应溅射实现. 本文采用纯度为 99.99% 的铝靶材, 在射频溅射过程中通入流量比为 45:15 的纯净氩气和氮气. 溅射功率为 150 W, 溅射时间约 15 min, 溅射前腔内压强为 1×10^{-6} Pa. 溅射过程中, 铝会与氮气发生反应生成 AlN 薄膜, 再将器件进行 400 °C 的退火处理, 会在 AlN 薄膜内部形成直径为 5—10 nm 的铝纳米颗粒, 最终制备了富含铝元素的厚度约为 40 nm 的 AlN 薄膜. 同样利用离子束蒸发法将 300 nm 厚度的银材料作为顶电极沉积在退火的 AlN 薄膜上, 形成完整的三明治结构忆阻器. 银作为活跃金属, 常用于忆阻器电极制备, 在较强电场作用下银离子可在阻变层内发生迁移. 利用 Keithley 4200 在室温下对忆阻器电学特性, 包括电流-电压 ($I-V$) 和脉冲电压进行测试, 可分析和验证其在神经系统中习惯化的行为特性.

3 实验结果和分析

对含有铝纳米颗粒的 AlN 薄膜进行了表征测试. 首先对薄膜进行 X 射线光电子谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 检测, 发现薄膜中的铝含量较高, 如图 1(a) 所示. 图 1(a) 插图

简单的三明治型器件结构. 在图 1(b) 的透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 测试结果中还可以观察到, AlN 薄膜经过退火形成的铝纳米颗粒直径在 5—10 nm 之间, 在 AlN 薄膜中呈现均匀分布状态, 这也与最初实验设定符合.

以含有铝纳米颗粒的 AlN 薄膜为基础的忆阻器 $I-V$ 测试结果如图 2(a) 所示. 第一次测试施加 0—1.2 V 正向电压时, 忆阻器电流在约 1.1 V 时瞬间从约 10^{-7} A 增大到约 10^{-2} A, 器件同时从高阻态 (high resistance state, HRS) 向低阻态 (low resistance state, LRS) 转变, 这一过程称为忆阻器开启 (switch on); 第二次测试在同一个器件上再次施加 0—1.2 V 正向电压时, 忆阻器电流在约 0.3 V 时瞬间从约 10^{-2} A 降低到约 10^{-7} A, 器件则从 LRS 向 HRS 转变, 这一过程称为忆阻器关闭 (switch off). 第三次和第四次进行反向电压 $I-V$ 测试可以得到类似的电学特性结果. 由于忆阻器打开和关闭过程都发生在同极电压测试中, 这符合单极忆阻器 (unipolar memristor) 特性. 图 1(b) 是忆阻器在电压低于 0.3 V 时对电流进行幂律拟合的结果. 可以看出, 无论器件处于 LRS 还是 HRS 幂律拟合的 n 值都近似等于 1, 表明器件内部低电压时的电流更符合欧姆传导机制. 导电丝原理就更适合解释本文忆阻器的阻变特性 [27–30]. 图 2(c) 所示为忆阻器在 HRS 和 LRS 状态下导电丝的不同分布情况. 忆阻器 HRS 时导电丝呈现断开状态, LRS 则对应导电丝连接状态. 铝基薄膜忆阻器中的导电丝性质更近似于金属, 主要由薄膜内部缺陷、活跃金属离子和铝纳米颗粒构成. 当测试电压升高至约 0.3 V 以上, 电流线性拟合发生偏离, 处于 HRS 的器件电荷传导机制不再符合欧姆传导, 而更接近于肖特

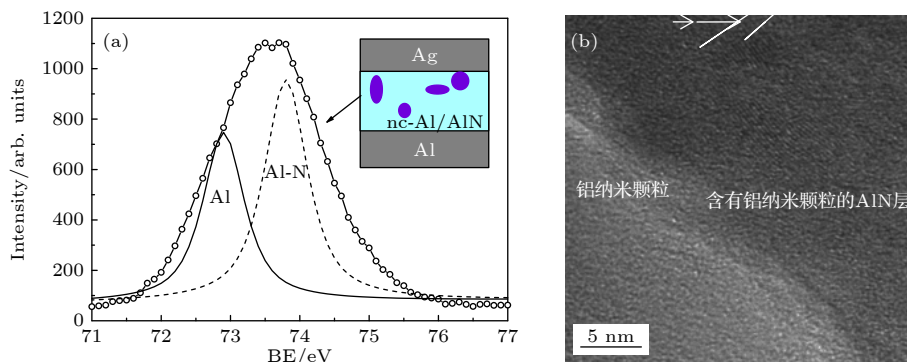


图 1 铝基薄膜的 TEM 和 XPS 测试 (a) XPS 测试 (BE, 结合能); (b) TEM 测试

Fig. 1. The TEM and XPS results of nc-Al embedded AlN thin film: (a) XPS result (BE, binding energy); (b) TEM result.

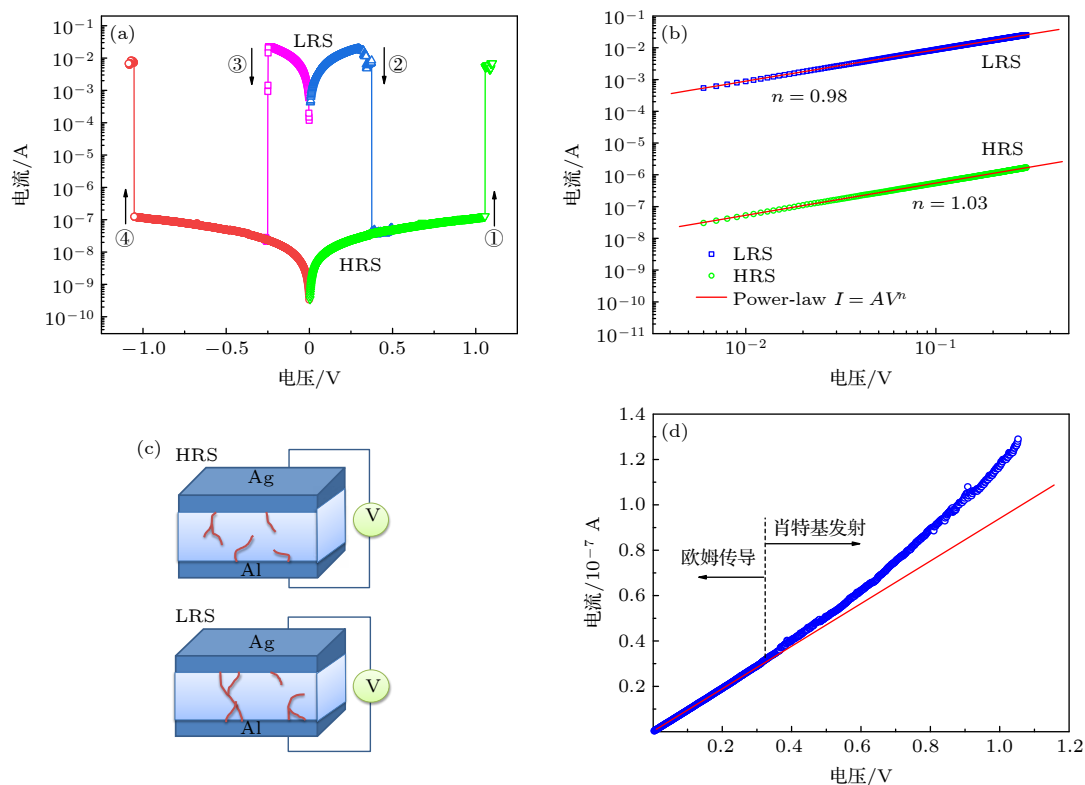


图 2 忆阻器的电学特性和阻变原理 (a) 铝基薄膜忆阻器 I - V 测试显示单极 (unipolar) 特性; (b) 忆阻器的 I - V 测试在低电压时的幂律拟合; (c) HRS 下器件内导电丝处于断开状态, LRS 下器件内导电丝处于连接状态; (d) 器件 HRS 下的电荷传导机制

Fig. 2. Electrical and resistive switching theory of memristor: (a) The I - V characteristic of memristor shows unipolar property; (b) the power-law fitting of memristor I - V measurement at low voltage region; (c) conductive filaments broken at HRS and connected at LRS; (d) conduction mechanisms of memristor at HRS.

基发射机制, 如图 2(d) 所示. 这是由于逐渐增加的电场会引起器件内电荷传输倾向于能量更高的传输形式 [27].

在神经系统中, 脉冲信号测试更贴近实际的神经系统活动, 而神经突触是连接各神经元进行信息传递的枢纽, 主要接受的是脉冲信号的传递. 具有习惯化特性的神经突触可以排除重复信号的干扰, 让主体更快适应外部环境的变化. 神经突触的权值越大代表信息传递越紧密. 忆阻器在模拟神经突触功能中, 其电导率对应了神经突触的权值, 即电导率越高, 流经器件的电流越大, 对应了神经突触在信息传递中; 若电导率下降, 则意味流经电流降低, 神经突触就没有进行信息传递 [31,32]. 将制备的铝基薄膜忆阻器进行脉冲电压测试, 可明显观察到器件表现出跟神经突触很相近的习惯化特性. 本文将忆阻器的电导率用测量值除以最大值, 即 G_0/G 表达器件权值, 可以更清楚展示忆阻器模拟神经突触的特性, 并设定该值应在 0—1 中变化.

图 3(a) 所示为器件权值在脉冲数量和不同脉

冲间隔 (脉冲频率) 影响下的变化, 以及器件权值达到最大值所需脉冲数量与脉冲电压幅值的关系. 在器件上施加幅值为 1.2 V, 宽度为 5 ms, 脉冲间隔为 5 ms 的脉冲电压, 仅需要 12 个脉冲器件权值就可以达到最大值; 当脉冲间隔增加到 50 ms 时, 器件权值就需要 23 个脉冲刺激才可以达到最大值; 当脉冲间隔增加到 500 ms 时, 器件权值几乎无法在有限量程内达到最大值. 这是由于脉冲间隔的实质是反映了外界刺激的频率, 由此可见频率过小的外界刺激难以将权值激励到最大值, 若权值不够高可能在神经网络的应用中就不够形成有效输出. 因此在进行脉冲电压测试时, 脉冲间隔应选择在 50 ms 以下. 图 3(a) 插图部分给出了脉冲电压幅值和引起器件电导率最大值所需脉冲数量的关系, 幅值越大所需脉冲数量越少. 图 3(b)—(d) 给出了在不同脉冲间隔下, 器件的感知和习惯化过程. 如图 3(b) 所示, 当测试脉冲幅值为 1.2 V, 宽度为 5 ms, 脉冲间隔为 2 ms 时, 忆阻器在感知过程中电导率很快达到最大值 ~ 1 . 继续施加脉冲时,

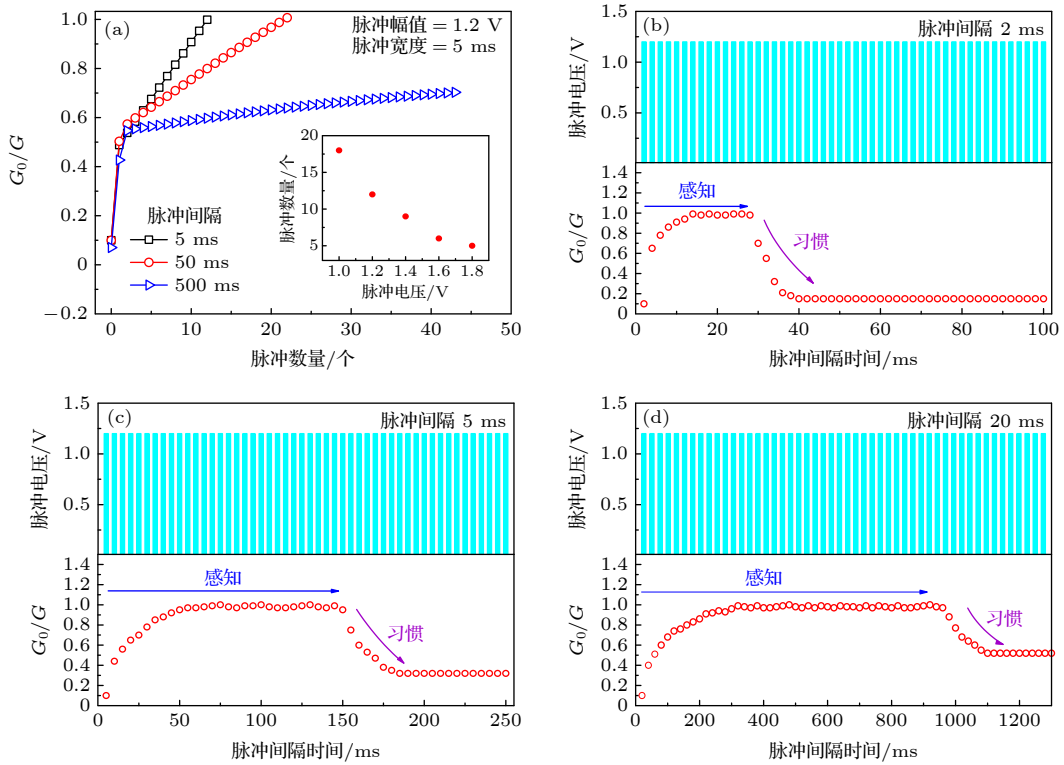


图 3 忆阻器的脉冲电压测试显示了习惯化特性 (a) 间隔越大导电率到达最大值所需的脉冲数量越多; 脉冲电压越大导电率到达最大值所需的脉冲数量越少, 如插图所示; (b) 脉冲电压 1.2 V, 间隔 2 ms 时器件感知和习惯化测试; (c) 脉冲电压 1.2 V, 间隔 5 ms 时器件感知和习惯化测试; (d) 脉冲电压 1.2 V, 间隔 20 ms 时器件感知和习惯化测试

Fig. 3. Memristor exhibit habituation property in voltage pulse measurement: (a) The longer pulse interval need more pulse number to cause memristor conduction maximized and the larger pulse amplitude need less pulse number to cause memristor conduction maximized, as shown in inset figure; (b) learning and habituation measurement of memristor with pulse voltage 1.2 V and pulse interval 2 ms; (c) learning and habituation measurement of memristor with pulse voltage 1.2 V and pulse interval 5 ms; (d) learning and habituation measurement of memristor with pulse voltage 1.2 V and pulse interval 20 ms.

权值在第 9 个脉冲开始从最大值逐渐降低至 0.15. 此后继续施加脉冲不能引起器件电导率的明显变化, 呈现了类似神经突触的习惯化特性. 若将脉冲幅值保持不变, 将信息传递频率降低, 也就是将脉冲间隔提高到 5 和 20 ms 时, 器件电导率分别在第 19 个和第 34 个脉冲开始逐渐下降到 0.32 和 0.52 左右, 继续施加脉冲电压并未引起器件电导率的明显变化. 从结果可知, 频率较高的脉冲刺激可以让器件更快速地进入习惯化过程, 而频率较低的脉冲刺激则需要更久的时间才能引起器件的习惯化特性.

在之前的测试中明确了脉冲频率会对器件的习惯化产生影响, 其关系如图 4(a) 所示. 若固定脉冲幅值和宽度为 +1.2 V 和 5 ms, 脉冲间隔分别为 2, 5, 10, 20 和 50 ms 时, 器件发生习惯性行为所需脉冲分别为 9, 19, 26, 34 和 85 个; 若固定脉冲幅值和宽度为 -1.2 V 和 5 ms, 脉冲间隔分别为 2, 5, 10, 20 和 50 ms 时, 器件发生习惯性行为所需脉

冲分别为 30, 48, 66, 90 和 220 个. 可见频率越低的刺激能够引起器件习惯化行为所需的时间越长, 与之前的推论符合. 图 4(b) 所示为脉冲幅值和器件发生习惯性行为所需脉冲之间的关系. 若固定脉冲宽度和间隔都为 5 ms, 正向脉冲幅值从 1.2 V 逐渐增大到 1.6 V 时, 器件引起习惯化行为所需的脉冲数量从 19 个降低至 4 个左右; 若固定脉冲宽度和间隔都为 5 ms, 负向脉冲幅值从 -1.2 V 逐渐增大到 -1.6 V 时, 器件引起习惯化行为所需的脉冲数量从 45 个降低至 10 个左右. 可见脉冲幅值越高, 会更快地引发器件的习惯化特性. 这一现象的本质原因与含有铝纳米颗粒的 AlN 薄膜阻变特性相关: 导电丝在电压影响下可以由断开变为连接, 以提高器件导电率; 但持续较高的电压刺激又会在导电丝上产生过多热量导致其熔断, 导电率因此而下降, 即观察到的忆阻器习惯化特性显现. 另外, 活跃金属银作为顶电极, 也会在电场作用下迁移进入或者离开阻变层, 参与到导电丝的连接和断开过

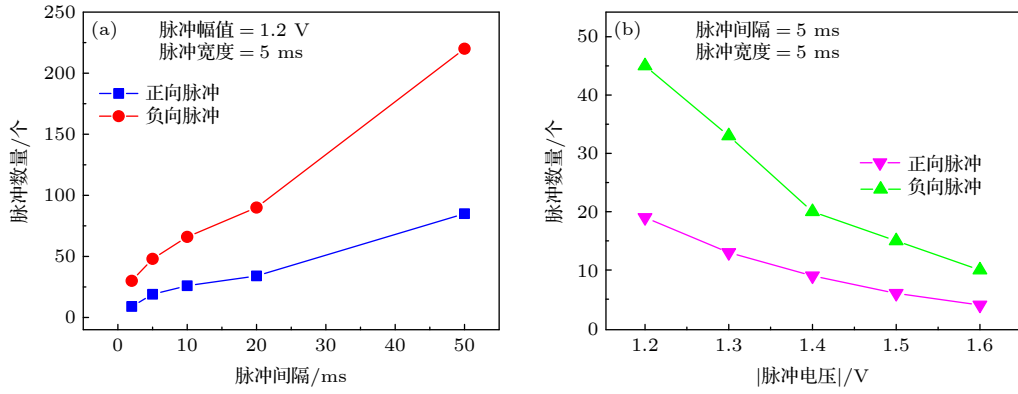


图 4 器件引起习惯化所需脉冲数量与脉冲间隔和脉冲电压幅值的关系 (a) 固定脉冲幅值和宽度, 脉冲间隔越大引起器件习惯化特性所需的脉冲数量越多, 负向脉冲比正向脉冲需要更多的脉冲数量引起器件习惯化; (b) 固定脉冲间隔和宽度, 脉冲电压越大引起器件习惯化特性所需的脉冲数量越少, 负向脉冲比正向脉冲需要更多的脉冲数量引起器件习惯化

Fig. 4. Relationship of the number of pulses required for device habituation to the pulse interval and pulse voltage: (a) The relationship between the number of pulses required for device habituation and pulse interval with fixed pulse voltage and width; (b) the relationship between the number of pulses required for device habituation and pulse voltage with fixed pulse interval and width.

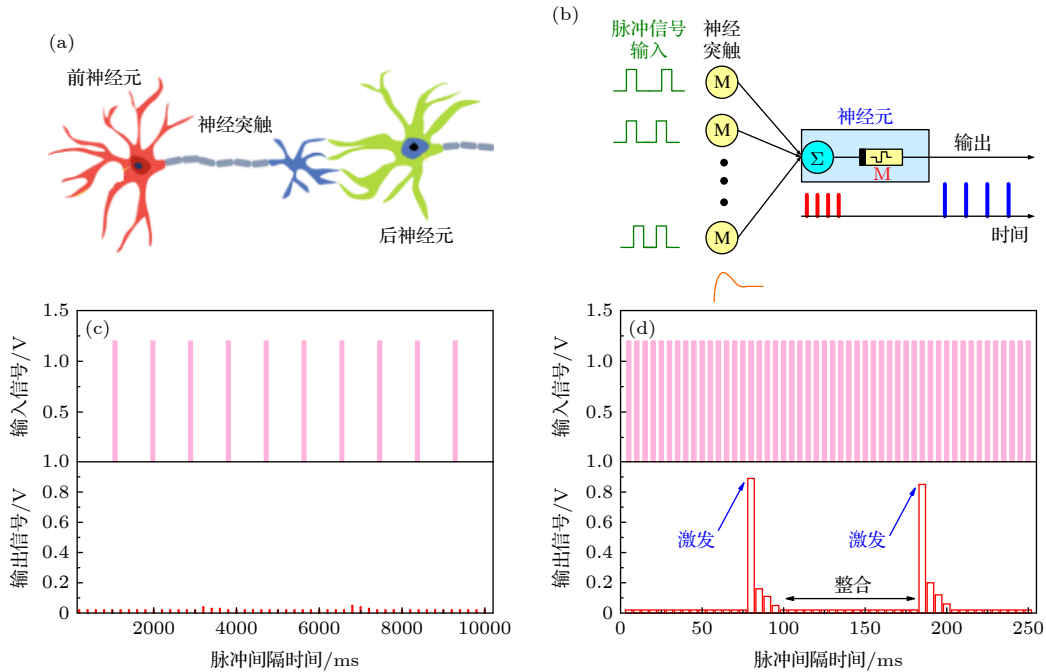


图 5 感觉神经系统的工作原理^[10] (a) 神经系统结构图; (b) 神经系统的 LIF 模型; (c) 频率较低的输入信号不能引起神经元的激发; (d) 频率较高的输入信号引起神经元激发

Fig. 5. Working principle diagram of sensory nervous system (SNS)^[10]: (a) Structure of SNS; (b) LIF model of SNS; (c) no firing observed with low frequency input pulse signal; (d) firing of neuron observed with high frequency input pulse signal.

程中^[33,34]. 同时从图 4(a) 和图 4(b) 可知, 负向脉冲需要更多的脉冲数量才能引起器件习惯化, 主要是由器件的非对称结构, 即上电极为银, 下电极为铝而引起的. 在负向脉冲刺激下, 顶电极的银离子在该电场方向下无法迁移到阻变层参与导电丝连接或断开, 因此器件需要更多的脉冲刺激才能实现阻变特性.

根据忆阻器特性, 习惯化行为产生后, 器件不

会永久处于高阻值状态; 若重新施加高电压或高频率刺激, 导电丝可能再次重新连接使器件回到高导电状态, 这一过程也被称为去习惯化过程. 习惯化和去习惯化行为都属于神经系统的基本功能.

在神经系统中, 神经元之间由神经突触相连, 结构如图 5(a) 所示, 信息以脉冲序列的方式通过神经突触由前神经元传递给后神经元. 每个神经元在接收到固定的输入脉冲信号后, 都可发出与

自身相关的幅值相等但频率略低的输出脉冲信号. 感觉神经系统的信号处理过程可以用 LIF 模型模拟^[35,36], LIF 模型结构如图 5(b) 所示. 和神经元相连的各个神经突触可接收到不同频率和幅值的脉冲信号, 这类信号在脉冲神经网络中称为时空信号. 不同幅值和频率的时空信号传递到神经元时, 神经元接收后可根据自身属性发出特有频率的输出脉冲信号. 这里的神经元可用阈值忆阻器实现, 即阈值忆阻器接受足够信号刺激并超过自身阈值时, 才会释放出一个自身特有幅值的脉冲信号. 当刺激信号持续时, 阈值忆阻器就可以释放出一连串特有频率的信号, 通常频率会低于输入信号. 只有足够高频率的输入信号才可以引起阈值忆阻器的激发. 这一过程可通过图 5(c) 和图 5(d) 展示, 当输入信号频率过低时并不能引起阈值忆阻器激发, 即神经元不对此类信号作出反应, 如图 5(c) 所示. 当输入信号频率增加时, 阈值忆阻器才可被激发, 发出更低频率的输出信号, 如图 5(d) 所示. 此时, 神经元开始进行信息传递.

为了验证具有习惯化特性忆阻器作为神经突触在 LIF 模型中的优势, 本文将含有铝纳米颗粒的铝基薄膜忆阻器 M 接入图 6(a) 所示的电路中. 比较器可以设定阈值电压为 0.5 V, 电容 C (约 120 pF) 提供存储电荷的功能, 电阻 R_1 (约 2 k Ω) 和 R_2 (约 150 Ω) 承担分压功能可以将输出脉冲电压幅值稳定在目标范围内, 另外还需一个接地 N 型金属-氧化物-半导体晶体管提供放电功能. 在整个电路中, 具有习惯化特性忆阻器提供输入端的输入信号. 输入脉冲电压统一幅值为 1.2 V, 宽度和间隔都为 5 ms 的 500 个连续脉冲电压.

输出信号如图 6(b) 所示, 连续的脉冲刺激通过习惯化忆阻器传递到神经元, 在最初的感知过程中, 输出脉冲频率几乎与输入脉冲频率一致, 约为 200 Hz. 这是由于忆阻器对脉冲刺激的实时传递直接将输入信号传递给神经元, 在强烈脉冲刺激下神经元给出了频率较高的反馈. 再继续施加输入脉冲电压, 就会引起忆阻器的习惯化特性, 此时的器件电导率逐渐降低, 导致电容放电频率变慢, 输出脉冲频率也相应降低到 40 Hz 左右, 可称为习惯化初期. 当输入脉冲电压累积到一定数量后就会引起忆阻器完全的习惯化特性, 器件电导率也保持在较低的水准, 引起输出频率继续降低到 8 Hz 左右, 此时的神经系统已经完全适应这种连续刺激, 不会再

针对此类重复刺激作出激烈反应, 直到下一个不同的刺激信号到来. 具有习惯化特性的神经系统更贴合生物机体本能, 对于重复发生的事件, 生物体在经历习惯化后给出的反馈时间会明显缩短. 这更有利于神经系统高效率地处理较为复杂的脉冲信号, 也符合本文一开始提到的具有习惯化特性的神经系统应对重复外界刺激逐渐降低自身反应频率的设定.

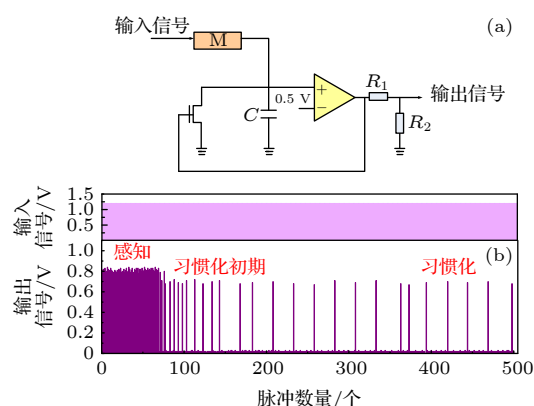


图 6 神经系统 LIF 模型习惯化特性测试 (a) 含有习惯化特性忆阻器的 LIF 模型图; (b) 连续脉冲测试, 展示了习惯化特性对完整神经系统的影响

Fig. 6. Habituation measurement of LIF model: (a) LIF model structure with habituation memristor; (b) the effect of habituation memristor in LIF model with continuous pulse stimuli.

4 结 论

本文制备的含有铝纳米颗粒的 AlN 薄膜忆阻器在连续脉冲电压刺激下呈现了特殊的习惯化特性, 这一特性的产生与脉冲电压幅值和间隔都有相关性. 产生这一特性的原因与铝基薄膜本身以导电丝原理为基础的阻变特性相关. 将具备习惯化特性的忆阻器接入 LIF 模型, 可模拟完整神经系统的习惯化行为. 具有习惯化特性的神经系统更贴近生物机体本身特性, 对于长期重复的刺激会主动降低自身反应频率, 使主体更快适应周围环境变化, 具备更强的学习和信息处理能力.

参考文献

- [1] Yamins D L, DiCarlo J J 2016 *Nat. Neurosci.* **19** 356
- [2] Wan Q, Jiang X Y, Andreea M N, Lu S G, Kimberly S M, Thomas W A 2012 *Nat. Neurosci.* **15** 1144
- [3] Thompson R F, Spencer W A 1966 *Psychol. Rev.* **73** 16
- [4] Rankin C H, Abrams T, Barry R J, Bhatnagar S, Clayton D

- F, Colombo J, Coppola G, Geyer M A, Glanzman D L, Marsland S, McSweeney F K, Wilson D A, Wu C F, Thompson R F 2009 *Neurobiol. Learn. Mem.* **92** 135
- [5] Fu T D, Liu X M, Gao H Y, Ward J E, Liu X R, Yin B, Wang Z R, Zhuo Y, David J F Walker, Joshua Yang J, Chen J H, Derek R L, Yao J 2020 *Nat. Commun.* **11** 1861
- [6] Zhong Y N, Wang T, Gao X, Xu J L, Wang S D 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1800854
- [7] Wan C J, He Y L, Jiang S S, Li J F, Wan Q 2020 *Adv. Electron. Mater.* **26** 389
- [8] Liu Y C, Lin Y, Wang Z Q, Xu H Y 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 168504 (in Chinese) [刘益春, 林亚, 王中强, 徐海阳 2019 物理学报 **68** 168504]
- [9] Shao N, Zhang S B, Shao S Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 128503 (in Chinese) [邵楠, 张盛兵, 邵舒渊 2016 物理学报 **65** 128503]
- [10] Zhu X J, Wang Q W, Wei D L 2020 *Nat. Commun.* **11** 2439
- [11] Dang B J, Wu Q T, Song F, Sun J, Yang M, Ma X H, Wang H, Hao Y 2018 *Nanoscale* **10** 20089
- [12] Yang X, Fang Y C, Yu Z Z, Wang Z W, Zhang T, Yin M H, Lin M, Yang Y C, Cai Y M, Huang R 2016 *Nanoscale* **8** 18897
- [13] Shi Y Y, Liang X H, Yuan B, Victoria C, Li H T, Hui F, Yu Z C W, Yuan F, Eric P, Philip W, Mario L 2018 *Nat. Electron.* **1** 458
- [14] Yao P, Wu H Q, Gao B, Tang J S, Zhang Q T, Zhang W Q, Yang J J, He Q 2020 *Nature* **577** 641
- [15] Writam B, Liu Q, Lv H B, Long S B, Liu M 2017 *Nanoscale* **9** 14442
- [16] Wu Q T, Wang H, Luo Q, Writam B, Cao J C, Zhang X M, Wu F C, Liu Q, Li L, Liu M 2018 *Nanoscale* **10** 5875
- [17] Pan F, Gao S, Chen C, Song C, Zeng F 2014 *Mater. Sci. Eng.* **83** 1
- [18] Gao S, Yi X H, Shang J 2019 *Chem. Soc. Rev.* **48** 1531
- [19] Yang X, Wang C, Shang J, Zhang C C, Tan H W, Yi X H, Pan L, Zhang W B, Fan F, Liu Y Q, Chen Y, Liu G, Li R W 2016 *RSC Adv.* **6** 25179
- [20] Ting Y, Chen J Y, Huang C W, Huang T K, Hsieh C Y, Wu W W 2018 *Small* **14** 1703153
- [21] Ella G 2014 *Semicond. Sci. Technol.* **29** 104004
- [22] Li C, Hu M, Li Y N, Jiang H, Ge N, Eric M, Zhang J M, Song W H, Noraica D, Catherin E G, Li Z Y, Strachan J P, Lin P, Wang Z R, Barnell M, Wu Q, Stanley Williams R, Joshua Yang J, Xia Q F 2018 *Nat. Electron.* **1** 52
- [23] Chen Y R, Song H, Jiang H, Li Z M, Zhang Z W, Sun X J, Li D B, Miao G Q 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 193502
- [24] Kim H D, An H M, SeI Y, Kim T G 2011 *IEEE Electron Device Lett.* **32** 1125
- [25] Chen C, Gao S, Tang G S, Fu H D, Wang G Y, Song C, Zheng F, Pan F 2013 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **5** 1793
- [26] Lin C C, Liou H Y, Chu S Y, Huang C Y, Hong C S 2018 *Cryst. Eng. Commun.* **20** 6230
- [27] Zhu W, Chen T P, Liu Y, Fung S 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 063706
- [28] Zhu W, Chen T P, Yang M, Liu Y, Fung S 2012 *IEEE Trans. Electron Devices* **59** 2363
- [29] Gilmer D C, Veksler D, Kirsch P, Vandelli L, Padovani A, Larcher L, McKenna K, Shluger A, Iglesias Porti V M, Nafria M 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 124518
- [30] Umberto C, Ludovic G, Attilio, Karl O, Alexis F, Andreas S, Christophe D, Olivier R, Hugo B, Malgorzata J, Wilfried V 2014 *Nano Lett.* **14** 2401
- [31] Pablo S, Julien T, Benoit C, Etienne J, Marie Paule B, Federico T, Marcelo R, Laurent C 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1604740
- [32] Yang J Q, Wang R P, Ren Y, Mao J Y, Wang Z P, Zhou Y, Han S T 2020 *Adv. Mater.* **2020** 2003610
- [33] Gao S, Zeng F, Chen C, Tang G S, Lin Y S, Zheng Z F, Song C, Pan F 2013 *Nanotechnology* **24** 335201
- [34] Gao S, Chen C, Zhai Z, Liu Y, Lin S, Li S, Lu S, Wang G, Song C, Zeng F, Pan F 2014 *Appl. Phys. Lett.* **6** 063504
- [35] Corinne T, Ramakrishnan I, Vilas M, Nathan G, David F, Jim B, Aaron S, Nicholas C, Zeng H K, Michael H, Christof K, Stefan M 2018 *Nat. Commun.* **9** 709
- [36] Chatterjee D, Kottantharayil A 2019 *IEEE Electron Device Lett.* **40** 1301

Al-based memristor applied to habituation sensory nervous system*

Zhu Wei[†] Guo Tian-Tian Liu Lan Zhou Rong-Rong

(School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(Received 20 November 2020; revised manuscript received 27 November 2020)

Abstract

Sensory nervous system (SNS) can build the connections between organism and outside environment. Both of synapse and neuron are cornerstones of human biological system, which can transmit information to human brain and receive the feedback from central nervous system. Finally, the corresponding responses to the external information are performed. However, the information from outside environment should be received by SNS all the time. It is important for organism to distinguish between the stimuli that required attention and those that are irrelevant and no need to response. Habituation is one of fundamental properties of SNS to form such discrimination. It plays an important role for organism to adapt the environment and filter out irrelevantly repetitive information. In this study, an nc-Al/AlN structured based memristor with a thickness of 40 nm is produced by the sputtering method. The top and bottom electrode are of Ag and Al respectively, forming a sandwiched structure device. Habituation is found in the nc-Al/AlN thin film based memristor which has been rarely reported before. Both of current-voltage ($I-V$) and pulse voltage measurement are executed on this device at room temperature. In the $I-V$ measurement, the memristor shows unipolar switching properties which may be caused by conductive filament connecting or breaking. In the voltage pulse measurement, pulse interval is an important factor to affect memristor conduction. If the pulse interval is quite large, that is, the pulse frequency is low, the memristor will get maximized conduction very slow or in infinity time. If choosing an appropriate pulse voltage and interval value, the habituation will be observed after several stimulus pulses. The larger pulse interval needs more pulse numbers to cause memristor to be habituated, but which results in higher device conduction finally. A habituation memristor can act as synapse and connect with neuron to build the whole leaky integrate-and-fire (LIF) model which is quite often used in circuit design to mimic a real organism neuron behavior. In this model, neuron could be fired only when it gets enough stimuli from previous neuron. If the stimulus pulse frequency is low, there is observed no firing phenomenon in this case. In this study, the input signal of LIF model is a continuous voltage pulse with an amplitude of 1.2 V and interval of 5 ms. Such an input signal will be transmitted by habituation memristor to a neuron electronic element. The output signal is the pulse generated by neuron when it is fired. According to the results, the frequency of output signal is smaller than input information which complies with the basic characteristics of habituation. It is supposed that organisms should not response to this repetitive pulse any more and it will make neuron have more capabilities to handle following information.

Keywords: Al-based thin film memristor, habituation, sensor nervous system

PACS: 85.35.-p, 72.15.Eb, 07.50.-e

DOI: [10.7498/aps.70.20201961](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201961)

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61704010) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2020JQ-341).

[†] Corresponding author. E-mail: wzhu@chd.edu.cn