

# 本征可拉伸阈值型忆阻器及其神经元仿生特性

田雨<sup>1,2</sup>, 朱小健<sup>2</sup>, 孙翠<sup>2</sup>, 叶晓羽<sup>2</sup>, 刘慧媛<sup>2</sup>, 李润伟<sup>2</sup>

(1. 宁波大学 材料科学与化学工程学院, 宁波 315211; 2. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

**摘要:** 研制具有生物神经元信息功能的柔性电子器件对于发展智能穿戴技术具有重要意义。传统阈值型忆阻器可模仿神经元信息整合功能, 但因缺乏本征柔韧性, 难以满足应用需求。本工作制备了一种基于本征可拉伸阈值型忆阻器的柔性人工神经元, 它由银纳米线-聚氨酯复合介质薄膜和液态金属电极构成。在外加电压下, 器件呈现良好的阈值电阻转变特性, 这归因于银纳米线间形成非连续银导电细丝的动态通断。该器件可模仿生物神经元的整合-发放及脉冲强度和脉冲间隔调制的尖峰放电功能。在 20% 拉伸应变下, 器件工作参数基本保持稳定, 性能未发生明显退化。本工作为发展可拉伸柔性人工神经元及下一代智能穿戴设备提供重要材料和技术参考。

**关键词:** 神经形态计算; 忆阻器; 阈值开关; 可拉伸; 人工神经元

中图分类号: TN389 文献标志码: A

## Intrinsically Stretchable Threshold Switching Memristor for Artificial Neuron Implementations

TIAN Yu<sup>1,2</sup>, ZHU Xiaojian<sup>2</sup>, SUN Cui<sup>2</sup>, YE Xiaoyu<sup>2</sup>, LIU Huiyuan<sup>2</sup>, LI Runwei<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

**Abstract:** The exploration of flexible electronic devices with information processing functions of biological neurons is of great significance for the development of intelligent wearable technologies. Due to lack of inherent mechanical flexibility, conventional threshold-switching memristor based on rigid materials that can implement the computing functions of biological neurons is difficult to fulfill the requirements for potential applications in the future. In this work, an intrinsically stretchable threshold-switching memristor was prepared by using silver nanowire- polyurethane composite as the dielectric layer and liquid metal as the electrodes, respectively. Under application of a sweeping voltage, the device exhibited reliable threshold switching characteristics, which was switched from the high resistance state (HRS) to the low resistance state (LRS) during device programming and spontaneously relaxed to the HRS upon voltage application. Further analysis shows that the underlying mechanism can be attributed to the dynamic formation and rupture of discontinuous silver conductive filaments formed between silver nanowires. In the pulse programming mode, memristor device is able to emulate the integration and firing characteristics of biological neurons, suggesting

收稿日期: 2022-11-28; 收到修改稿日期: 2022-12-17; 网络出版日期: 2022-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(62174164, 61974179, 92064011); 宁波市自然科学基金(202003N4029); 中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20200030); 中国科学院对外合作重点项目(174433KYSB20190038)  
National Natural Science Foundation of China (62174164, 61974179, 92064011); Ningbo Natural Science Foundation (202003N4029); Scientific Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (YJKYYQ20200030); External Cooperation Program of Chinese Academy of Sciences (174433KYSB20190038)

作者简介: 田雨(1997-), 男, 硕士研究生. E-mail: tianyu@nimte.ac.cn

TIAN Yu (1997-), male, Master candidate. E-mail: tianyu@nimte.ac.cn

通信作者: 朱小健, 研究员. E-mail: zhuxj@nimte.ac.cn

ZHU Xiaojian, professor. E-mail: zhuxj@nimte.ac.cn

its great potential as an artificial neuron. Moreover, the pulse amplitude and pulse interval modulated neuronal spiking behaviors are successfully replicated using such devices. Under 20% tensile strain, the threshold-switching memristor shows negligible changes in the operating parameters during device switching and neuronal function implementations, suggesting its excellent mechanical flexibility and stability. This work provides important guidelines for the development of high-performance stretchable artificial neuronal devices and next-generation intelligent wearable systems.

**Key words:** neuromorphic computing; memristor; threshold switching; stretchable; artificial neuron

人工智能和可穿戴等技术的发展迫切需要研制智能穿戴电子设备,以满足健康监测、电子皮肤和人机交互等领域的应用需求<sup>[1-3]</sup>。受人脑的启发,以人工神经元为基础的神经形态计算器件以其高效信息处理功能及低能耗等优点,而成为实现仿生智能芯片的理想选择<sup>[4-5]</sup>。为适应穿戴场景,开发能够模仿神经元信息功能的柔性人工神经元是关键步骤<sup>[6-7]</sup>。

与传统用于构建人工神经元的刚性硅基电路相比,具有阈值电阻转变特性的忆阻器因结构简单、材料选择广泛和动力学特性丰富等优点,已成为构建柔性人工神经元的理想选择<sup>[8-11]</sup>。例如, Xu 等<sup>[12]</sup>在柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)衬底上制备了最小弯曲半径为 2.14 cm 的 Ag/Nafion/Au 阈值型忆阻器,并基于此器件模仿了神经元的泄漏-整合-发放(Leaky integrate-and-fire, LIF)功能;朱佳雪等<sup>[13]</sup>在柔性聚酰亚胺(PI)衬底上制备了最小弯折半径为 2.5 mm 的 NbO<sub>x</sub> 基阈值型忆阻器,并结合电路设计模拟了 LIF 神经元。尽管在柔性衬底上沉积刚性功能材料可使阈值型忆阻器具有一定弯折能力,但因刚性材料缺少本征可拉伸性以及和柔性衬底之间弹性模量不匹配,会导致器件在拉伸等大形变过程中出现开裂失效问题,难以满足穿戴场景的要求<sup>[14-16]</sup>。因此,如何研制可在拉伸应变下保持结构和电学性能稳定的阈值型忆阻人工神经元器件成为重要挑战。

近期研究表明,使用本征柔性的电极和介质层制备可拉伸忆阻器为解决上述问题提供了重要途径<sup>[14,16]</sup>。液态金属是一种本征弹性导电材料,由镓(Ga)、铟(In)等低熔点金属构成。它在室温下具有良好的导电性和延展性,是制备柔性电极的理想选择<sup>[17]</sup>。例如,由掺杂 Cu 微粒的 GaIn 合金(Cu@GaIn)制成的液态金属电极,在 30%的拉伸应变下仍可保持出色的导电能力<sup>[18]</sup>。另一方面,银纳米线-弹性聚合物复合材料是以弹性聚合物基体为连续相,银纳米线为分散相的一种复合材料。它不仅具有弹性聚合物的柔韧性,而且在电场作用下还具有阈值转变特性<sup>[19-22]</sup>。其中,以聚氨酯(Polyurethane, PU)为代表

的弹性聚合物拉伸性能优异,是理想的弹性聚合物基体材料<sup>[23-24]</sup>。因此将液态金属作为电极,银纳米线-聚氨酯复合薄膜作为介质层,有望获得具有本征可拉伸能力的新型阈值型忆阻器及人工神经元。

本工作以液态金属(Cu@GaIn)作为电极和银纳米线-聚氨酯复合薄膜(AgNWs-PU)作为介质层,采用水溶性牺牲层法制备了可拉伸阈值型忆阻器。研究了该器件的阈值电阻转变特性,分析了其工作机制,并模拟了神经元的脉冲整合发放等信息功能。进一步评估该器件在拉伸应变下的工作稳定性,并展示其作为可拉伸人工神经元在智能可穿戴系统领域的应用前景。

## 1 实验方法

### 1.1 材料准备

NaCl 基片(10 mm×10 mm×2 mm)由自贡三川晶片有限公司提供;银纳米线(AgNWs, 长度 10 μm, 直径 30 nm)由中诺新材科技有限公司提供;882 型水性聚氨酯由广东三七化工有限公司提供;聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)由美国道康宁公司提供,将基本组分与固化剂按 10:1 混合并在常温下搅拌 5 min 备用。

**液态金属(Cu@GaIn)制备:** 首先将金属 Ga(99.99%)和 In(99.995%)按质量比 3:1 混合,在 80 °C 下搅拌 45 min 制得 GaIn 合金。为了降低 GaIn 的表面能,提高与聚合物介质层薄膜的浸润性<sup>[25]</sup>,在 GaIn 合金中添加质量分数为 3.5%的 Cu 微粒(平均粒径 5 μm)后,研磨 40 min 得到样品。

**银纳米线-聚氨酯复合溶液制备:** 取适量水性聚氨酯原液,使用去离子水稀释 10 倍,向其中添加水性聚氨酯质量分数 1.4%的银纳米线并混合均匀制得银纳米线-聚氨酯复合溶液。

### 1.2 制备方法

可拉伸阈值型忆阻器的制备流程如图 1 所示。实验使用 NaCl 基片作为旋涂银纳米线-聚氨酯复合

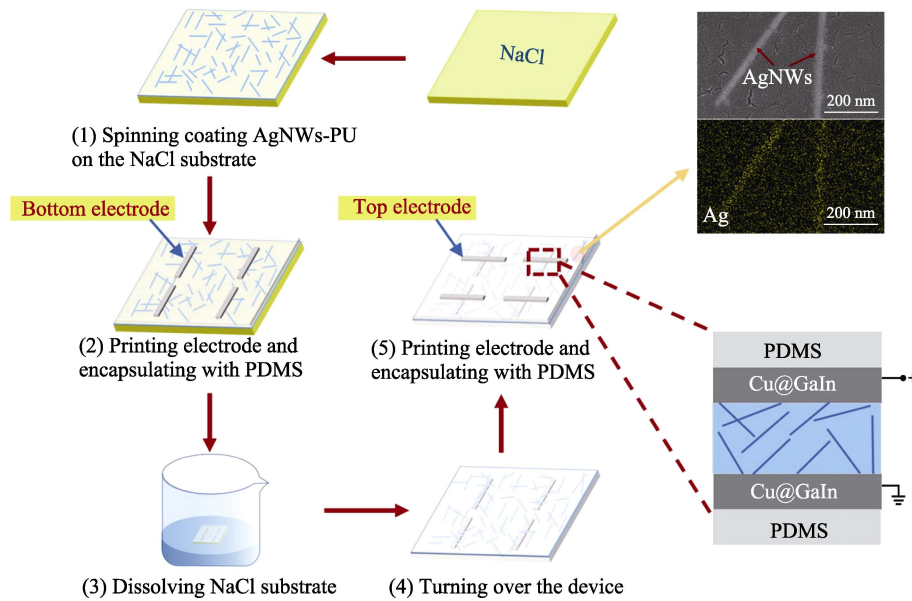


图1 液态金属/银纳米线-聚氨酯复合薄膜/液态金属器件的制备流程图  
Fig. 1 Flow chart of Cu@GaIn/AgNWs-PU/Cu@GaIn device fabrication

溶液的衬底。旋涂前使用氧等离子体(150 W, 5 min)对 NaCl 基片表面进行亲水性处理。匀胶过程第一步使用 900 r/min 的转速旋涂 8 s, 第二步使用 2200 r/min 的转速旋涂 45 s, 结束后在 65 °C 加热台上烘干 2.5 h, 制备出厚度约为 1  $\mu\text{m}$  的银纳米线-聚氨酯复合薄膜。再次, 使用金属掩模板在介质层上溅射一层厚度为 16 nm 的 Au 膜, 随后在 Au 膜上刷涂 400  $\mu\text{m}$  宽的液态金属底电极, 并使用 PDMS 对器件进行封装。最后, 使用去离子水溶解 NaCl 衬底并翻转器件, 刷涂垂直于底电极的 400  $\mu\text{m}$  宽液态金属顶电极, 并用 PDMS 对器件整体封装, 得到图 1 插图中单元结构为 PDMS/Cu@GaIn/AgNWs-PU/Cu@GaIn/PDMS 的器件。

### 1.3 样品表征

使用日立 SU8200 冷场发射扫描电子显微镜观察样品的介质层; 使用 Agilent B1500A 型半导体参数分析仪对器件的  $I$ - $V$  性能进行测试; 使用 Keithley 4225 脉冲测试单元进行神经元特性测试; 如图 1 所示, 测试过程中在器件顶电极施加电压并将底电极接地。

## 2 结果与讨论

### 2.1 器件 $I$ - $V$ 特性研究

图 2(a)显示了基于银纳米线-聚氨酯复合薄膜的阈值器件典型  $I$ - $V$  曲线。向顶电极施加扫描电压, 方向为 0 V  $\rightarrow$  5V  $\rightarrow$  0 V  $\rightarrow$  -5 V  $\rightarrow$  0 V, 研究发现器件具有典型的双向阈值转变特性。以正向为例, 当电

压从 0 V 逐渐增加到阈值电压  $\sim 2$  V ( $V_{\text{th}}$ ) 时, 器件电流从  $\sim 10^{-9}$  A 跃迁到限流 ( $10^{-5}$  A), 此时器件从高阻态 (High resistance state, HRS) 切换到低阻态 (Low resistance state, LRS)。当电压降低至保持电压 0.45 V ( $V_{\text{hold}}$ ) 后, 电流突然减小, 此时器件从 LRS 返回到 HRS。图 2(b)显示了 20 个  $I$ - $V$  循环中的工作电压分布情况。如图 2(c)所示, 器件可在 10 nA  $\sim$  10  $\mu\text{A}$  的限流下稳定工作, 开关比随限流增加而逐渐增加。

图 2(d)显示了介质层厚度对器件工作电压的影响。通过控制匀胶机转速, 分别得到介质层厚度为 12、5.5、2.8、1  $\mu\text{m}$  的器件。为了进行比较, 对四个器件分别取 20 次双向  $I$ - $V$  循环, 并进行工作电压统计。从图 2(d)中可以看出器件的工作电压及波动性随着介质层的减薄而不断降低, 当介质层厚度从 12  $\mu\text{m}$  减小到 1  $\mu\text{m}$  时,  $V_{\text{th}}$  从  $(24.4 \pm 4.1)$  V 下降到  $(2.1 \pm 0.4)$  V。继续减薄薄膜, 器件会出现导通现象。这可能是当薄膜过薄时, 导电银纳米线贯穿介质层, 使器件上下电极短路。

### 2.2 器件工作机理分析

实验研究了该器件产生阈值电阻转变特性的物理机制。根据 Wang 等<sup>[22]</sup>的工作, 在强电场作用下, 分散在聚合物基体中的银纳米线可通过氧化、迁移和还原形成银纳米导电细丝, 连通银纳米线和器件电极, 进而引起 HRS 到 LRS 的转变。而在弱电场下, 银导电细丝在表面张力和原子自发弛豫驱动下自发断裂, 是器件从 LRS 转变为 HRS 的主要原因。鉴于介质材料成分的相似性, 可以推断银纳米线间形成银

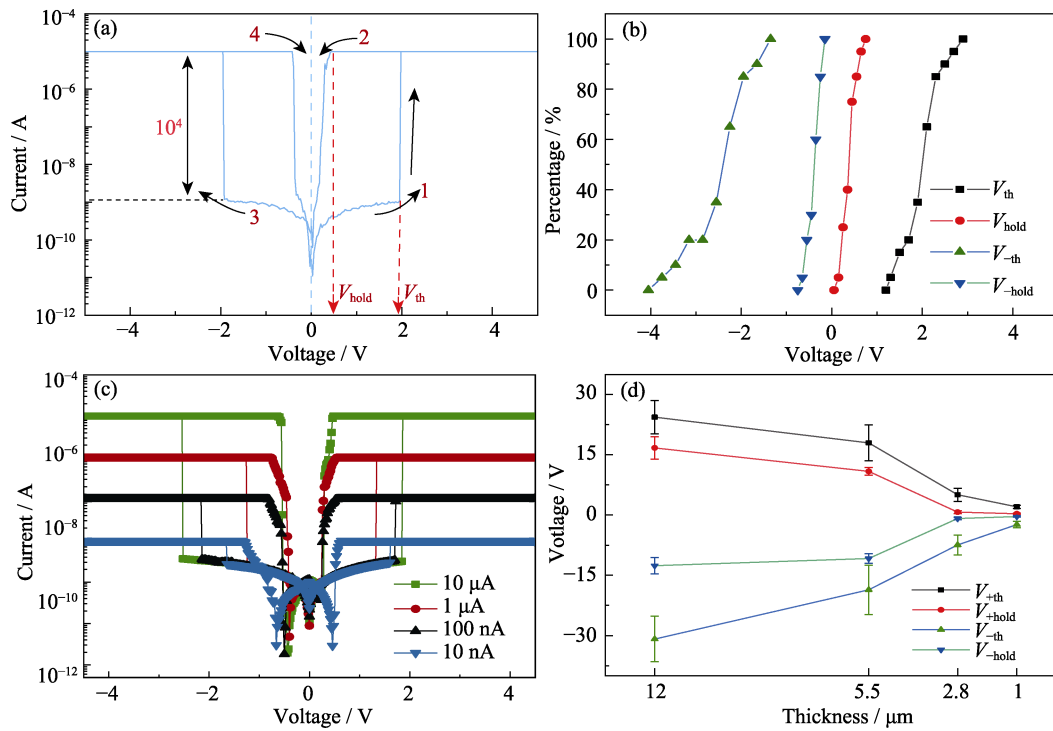


图 2 液态金属/银纳米线-聚氨酯复合薄膜/液态金属器件的  $I$ - $V$  特性

Fig. 2  $I$ - $V$  characteristics of the Cu@GaIn/AgNWs-PU/Cu@GaIn device

(a)  $I$ - $V$  curve of the Cu@GaIn/AgNWs-PU/Cu@GaIn device; (b) Cumulative distribution function of the operation voltages; (c)  $I$ - $V$  curves of the device under different compliance currents; (d) Dependence of the operation voltage on the thickness of the AgNWs-PU film

导电细丝的通断是诱导器件电阻转变的主要原因。

值得注意的是, 获得导电单原子链是形成完整导电细丝的边界条件, 其呈现电导量子化特性, 电导值为  $1G_0$ (根据朗道理论,  $G_0 = 2e^2/h$ , 其中  $e$  为基本电荷,  $h$  为普朗克常数, 对应  $R_0=12.9 \text{ k}\Omega$ )<sup>[26]</sup>。通过对比计算发现, 在操作过程中, 器件的 LRS 电阻值始终高于  $R_0$ , 如图 3(a)所示。这一结果表明当器件处于 LRS 时, 形成了不连续的银导电细丝, 电极之间的电荷传输伴随着隧穿效应<sup>[27]</sup>。

基于以上分析, 本课题组提出了器件的工作机理模型。如图 3(b-左)所示的纳米接触结构(银纳米

线/聚氨酯/银纳米线), 当施加正向电压时, 顶部银纳米线中部分 Ag 原子会被氧化为  $\text{Ag}^+(\text{Ag}-e^- \rightarrow \text{Ag}^+)$ 。随后  $\text{Ag}^+$ 在电场作用下通过 PU 迁移到底部银纳米线, 并被还原为 Ag 原子( $\text{Ag}^++e^- \rightarrow \text{Ag}$ )。随着 Ag 原子在底部堆积, 银导电细丝在银纳米线之间逐渐生长<sup>[28]</sup>。当  $V > V_{th}$ 时, 银导电细丝会连通银纳米线, 此时隧穿电流急剧增大, 达到限流时, 导电细丝停止生长, 形成具有间隙的银导电细丝, 如图 3(b-中)所示。当  $V < V_{hold}$ 时, 该导电细丝在表面张力作用下自发断裂, 使器件从 LRS 自发过渡到 HRS, 如图 3(b-右)所示。这是由于银导电细丝的表面能较

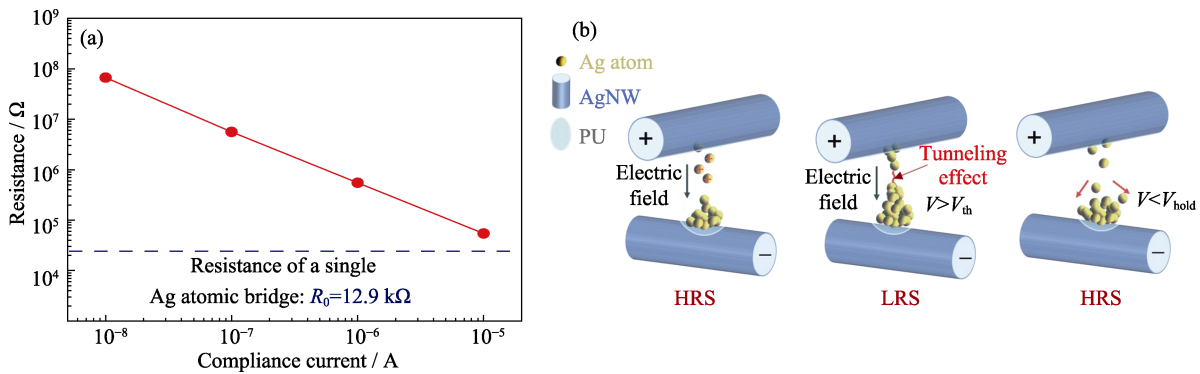


图 3 液态金属/银纳米线-聚氨酯复合薄膜/液态金属器件的工作机制

Fig. 3 Working mechanism of the Cu@GaIn/AgNWs-PU/Cu@GaIn device

(a) Dependence of the device resistance at the LRS on the compliance currents; (b) Illustration of the dynamic Ag filament formation/rupture between AgNWs during threshold switching process

高, 在没有足够电场维持的情况下, 其会自发断裂以减小表面积<sup>[29]</sup>。

### 2.3 器件神经元特性研究

在生物神经元中, 信息整合功能是通过膜电位的变化来实现<sup>[30]</sup>。神经元膜类似于电容器, 整合来自其它神经元的脉冲信号后, 膜电位得到提升。当膜电位达到阈值时, 神经元发放动作电位, 并将膜电位重置<sup>[31]</sup>。同时, 神经元具有泄漏特性<sup>[32]</sup>, 当膜电位未达阈值停止输入电脉冲, 膜电位会自发衰减, 如图 4(a)所示。为了研究阈值型忆阻器在模仿神经元功能方面的潜力, 对器件施加电脉冲, 研究其电流响应特性, 如图 4(b)所示。图 4(c)展示了向器件施加幅值为 6 V, 宽度为 10 ms, 间隔为 30 ms 的电脉冲序列时的测试结果, 可以发现, 器件对前五个脉冲进行整合, 在第六个脉冲时到达阈值并发放了电流尖峰, 模仿了神经元中的脉冲整合-发放功能。

进一步研究了输入电脉冲参数对神经元发放特性的影响规律。首先, 通过固定脉冲宽度和间隔, 改变脉冲幅值, 研究了器件的整合发放行为。图 5(a)显示的是将脉冲宽度设定为 10 ms, 脉冲间隔设定为 30 ms, 测试脉冲幅值为 5.5、6、6.5 和 7 V 时的器件响应。图 5(b)统计结果表明, 当脉冲电压幅值从 5.5 V 提高到 7 V, 器件发放电流尖峰所需积累的电脉冲数( $N_{\text{Fire}}$ )从 7 个降为 3 个。该特性与生物神经元

尖峰发放周期随刺激强度的增加而降低相一致<sup>[33]</sup>。该结果表明此器件可以模拟生物神经元中强度调制的尖峰放电功能。

然后, 控制脉冲宽度和幅值不变, 通过改变脉冲间隔研究器件的整合发放行为。图 5(c)显示的是将脉冲宽度设定为 10 ms, 脉冲振幅设定为 6 V, 测试脉冲间隔为 10~50 ms 时的器件响应。图 5(d)统计结果表明, 随着脉冲时间间隔的不断增加, 器件首次发放电流尖峰所需的脉冲数相应增加。该现象可归结于器件在脉冲间隔期间由于自发弛豫产生类似于神经元的泄漏效应。时间间隔越长, 自发弛豫效应越强, 尖峰发放越困难。这一结果表明该器件能够模拟生物神经元中脉冲间隔调制的尖峰放电功能。

### 2.4 器件拉伸能力测试

为了评估阈值器件在可穿戴系统中应用的可行性, 本工作对不同程度拉伸应变下的器件进行了测试。如图 6(a)所示, 定义平行于底电极和顶电极的方向分别为拉伸应变的  $x$  和  $y$  方向。将器件粘贴在丝杆滑台上, 沿  $x$  或  $y$  轴方向依次拉伸至 20%, 并做  $I$ - $V$  测试。图 6(b)为器件沿  $x$  方向拉伸 20% 与未拉伸时的对比实拍图。对测试所得工作电压进行统计分析, 结果如图 6(c)所示。可以看出, 器件沿  $x$  方向的拉伸应变在 20% 以内时, 工作电压幅值对拉伸不敏

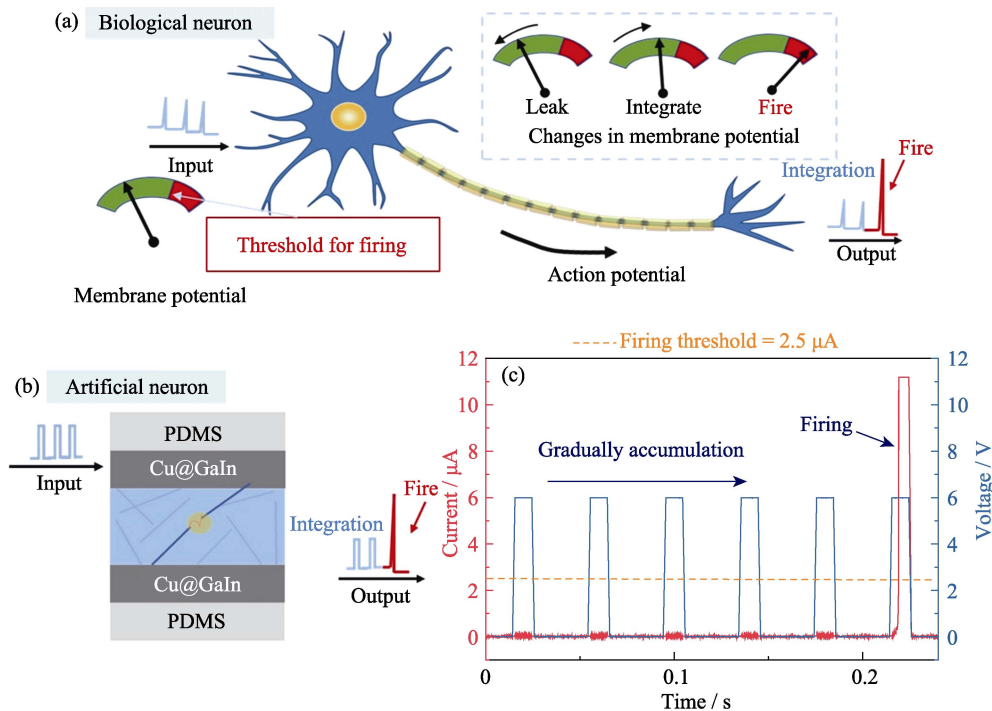


图 4 液态金属/银纳米线-聚氨酯复合薄膜/液态金属器件模拟生物神经元的整合发放功能  
 Fig. 4 Emulation of the integrate-and-fire behaviors of biological neurons with the Cu@GaIn/AgNWs-PU/Cu@GaIn device  
 (a, b) Schematic diagram for (a) biological neuron and (b) artificial neuron; (c) Typical integrate-and-fire behavior of the memristor based artificial neuron; Colorful figures are available on website



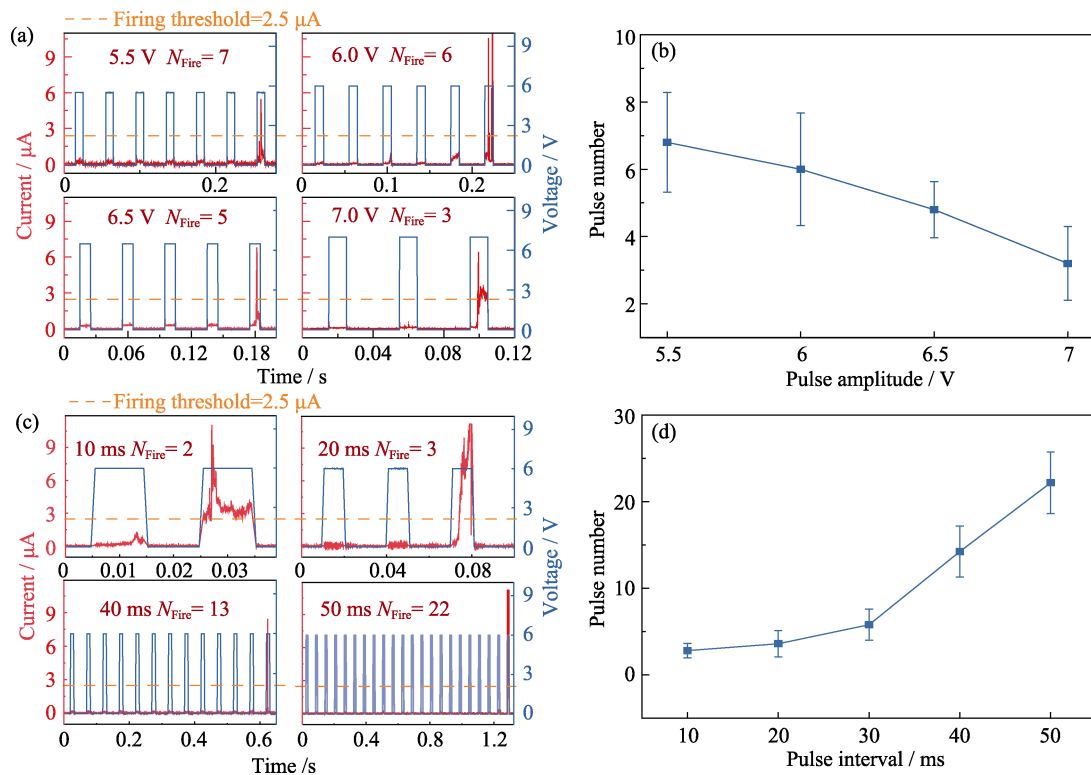


图 5 输入脉冲幅值、间隔对阈值型忆阻人工神经元整合发放功能的影响

Fig. 5 Influences of the voltage pulse amplitude and interval on the integrate-and-fire behaviors of the memristor based artificial neuron

(a) Integrate-and-fire behaviors of the device as a function of the voltage pulse amplitude with pulse interval and width at 30 ms and 10 ms, respectively; (b) Relationship between the required pulse number for device firing ( $N_{\text{Fire}}$ ) and the pulse amplitude; (c) Integrate-and-fire behaviors of the device as a function of the voltage pulse interval with pulse amplitude and width at 6 V and 10 ms, respectively; (d) Relationship between the required pulse number for device firing ( $N_{\text{Fire}}$ ) and the pulse interval; Colorful figures are available on website

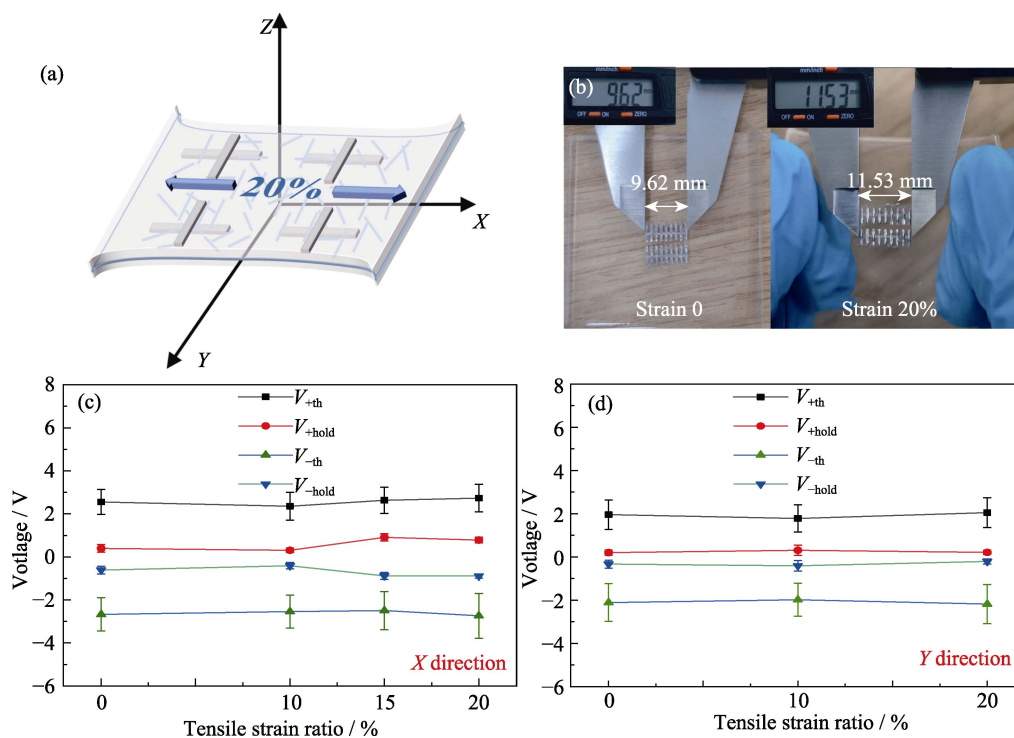


图 6 拉伸应变条件下液态金属/银纳米线-聚氨酯复合薄膜/液态金属器件的阈值转变电压研究

Fig. 6 Threshold switching voltages of the Cu@GaIn/AgNWs-PU/Cu@GaIn device under different tensile strain conditions (a) Schematics of the device stretching under tensile strain; (b) Optical images of the device before and after being stretched by 20%; (c, d) Evolution of the operation voltage for the device with tensile strain in (c) x and (d) y directions

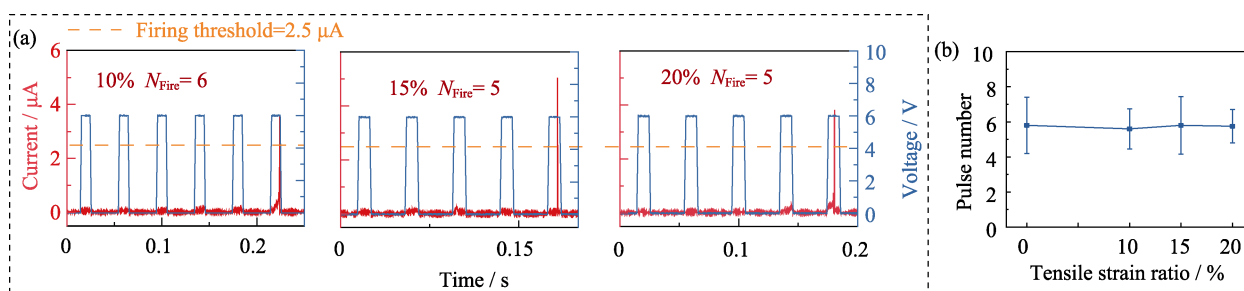


图7 拉伸应变条件下人工神经元的整合发放功能测试

Fig. 7 Integrate-and-fire function test of artificial neuron under tensile strain conditions

(a) Control pulse interval (30 ms), width (10 ms) and amplitude (6 V) being unchanged, and the  $N_{\text{Fire}}$  change of the device by changing tensile strain ratio of the device in the  $x$  direction; (b) Evolution of  $N_{\text{Fire}}$  of the device with tensile strain ratio

感。以  $V_{+\text{th}}$  为例, 拉伸为  $(2.55 \pm 0.58)$  V, 拉伸 20% 时为  $(2.73 \pm 0.65)$  V, 平均电压值波动  $< 8\%$ 。对器件沿  $y$  方向进行拉伸 20% 时可得到类似结果, 如图 6(d) 所示器件的平均  $V_{+\text{th}}$  相比拉伸前波动约 5%。结果表明, 该器件在 20% 的拉伸应变内具有稳定的结构和阈值转变特性。分析认为, 优异的拉伸稳定性源于该器件采用高延展性液态金属和银纳米线-聚氨酯复合薄膜作为电极和介质层, 有效避免了传统忆阻器在大应变条件下产生裂纹和界面脱落导致器件失效的问题<sup>[34]</sup>。在拉伸过程中, 聚氨酯中的银纳米线产生水平方向上的相对滑动, 其之间的绝对距离并未发生显著改变, 从而确保了器件的稳定工作。

基于拉伸条件下稳定的阈值转变特性, 对不同拉伸应变下器件的神经元整合-发放功能进行了测试。将器件依次拉伸 10%、15% 和 20%, 并施加幅值为 6 V, 宽度 10 ms, 间隔 30 ms 的一组脉冲序列, 结果如图 7(a) 所示。图 7(b) 统计结果表明, 在 20% 的拉伸应变内,  $N_{\text{Fire}}$  的数目稳定在 5~7 个左右, 没有明显变化。

### 3 结论

研究采用液态金属(Cu@Galn)作为电极, 银纳米线-聚氨酯的复合薄膜(AgNWs-PU)作为介质层, 结合水溶性牺牲层法制备了可拉伸阈值型忆阻器。该器件呈现稳定的阈值电阻转变特性, 归因于电场下银纳米线间非连续银纳米导电细丝的可逆通断。在外加电压脉冲激励下, 器件可模拟神经元的整合-发放特性, 并实现脉冲强度、间隔调制的尖峰放电功能。该器件具有优良的拉伸稳定性, 在 20% 拉伸应变下, 器件平均正向驱动电压变化小于 8%。本工作为构建下一代柔性智能仿生电子芯片及可穿戴电子设备提供了重要思路。

### 参考文献:

[1] WANG T Y, MENG J L, CHEN L, *et al.* Flexible 3D memristor

array for binary storage and multi-states neuromorphic computing applications. *InfoMat*, 2021, **3(2)**: 212.

- [2] HAN X, XU Y, SUN B, *et al.* Highly transparent flexible artificial nociceptor based on forming-free ITO memristor. *Applied Physics Letters*, 2022, **120(9)**: 094103.
- [3] PARK H L, LEE Y, KIM N, *et al.* Flexible neuromorphic electronics for computing, soft robotics, and neuroprosthetics. *Advanced Materials*, 2020, **32(15)**: 1903558.
- [4] LI Z Y, ZHU L Q, GUO L Q, *et al.* Mimicking neurotransmitter activity and realizing algebraic arithmetic on flexible protein-gated oxide neuromorphic transistors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, **13(6)**: 7784.
- [5] LI H X, HU J Y, CHEN A Z, *et al.* Single-transistor neuron with excitatory-inhibitory spatiotemporal dynamics applied for neuronal oscillations. *Advanced Materials*, 2022, **34(51)**: 2207371.
- [6] STOLIAR P, TRANCHANT J, CORRAZE B, *et al.* A leaky integrate-and-fire neuron analog realized with a Mott insulator. *Advanced Functional Materials*, 2017, **27(11)**: 1604740.
- [7] BO Y, ZHANG P, LUO Z, *et al.* NbO<sub>2</sub> memristive neurons for burst-based perceptron. *Advanced Intelligent Systems*, 2020, **2(8)**: 2000066.
- [8] YANG J Q, WANG R, WANG Z P, *et al.* Leaky integrate-and-fire neurons based on perovskite memristor for spiking neural networks. *Nano Energy*, 2020, **74**: 104828.
- [9] SHI Q W, WANG J, AZIZ I, *et al.* Stretchable and wearable resistive switching random-access memory. *Advanced Intelligent Systems*, 2020, **2(7)**: 2000007.
- [10] CHEN P, ZHANG X, WU Z, *et al.* High-yield and uniform NbO<sub>x</sub>-based threshold switching devices for neuron applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, **69(5)**: 2391.
- [11] HUA Q, WU H Q, GAO B, *et al.* Low-voltage oscillatory neurons for memristor-based neuromorphic systems. *Global Challenges*, 2019, **3(11)**: 1900015.
- [12] XU Y, WANG H, YE D, *et al.* Electrohydrodynamically printed flexible organic memristor for leaky integrate and fire neuron. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, **43(1)**: 116.
- [13] ZHU J X, ZHANG X, WANG M R, *et al.* Flexible memristive spiking neuron for neuromorphic sensing and computing. *Acta Physica Sinica*, 2022, **71(14)**: 338.
- [14] YI X, YU Z, NIU X, *et al.* Intrinsically stretchable resistive switching memory enabled by combining a liquid metal-based soft electrode and a metal-organic framework insulator. *Advanced Electronic Materials*, 2019, **5(2)**: 1800655.
- [15] YANG M, ZHAO X, TANG Q, *et al.* Stretchable and conformable synapse memristors for wearable and implantable electronics. *Nanoscale*, 2018, **10(38)**: 18135.
- [16] TANG D X, LIU J Y, WANG Y X, *et al.* Research progress in flexible resistive random access memory materials. *J. Mater. Eng.*,

- 2020, **48(7)**: 81.
- [17] YUAN B, ZHAO C, SUN X, *et al.* Lightweight liquid metal entity. *Advanced Functional Materials*, 2020, **30(14)**: 1910709.
- [18] LU Y, GAO S, LI F, *et al.* Stretchable and twistable resistive switching memory with information storage and computing functionalities. *Advanced Materials Technologies*, 2021, **6(1)**: 2000810.
- [19] ZHAN S Y, WANG Q G, WANG X L, *et al.* Electric field-induced nonlinear IV characteristic in a AgNWs/PVA film composite. 3rd Annual International Conference on Advanced Material Engineering, Shanghai, 2017: 106–111.
- [20] LU P, QU Z, WANG Q, *et al.* Nonlinear conductive behaviour of silver nanowires/silicone rubber composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, **301(1)**: 012052.
- [21] WANG M, WANG W, LEOW W R, *et al.* Enhancing the matrix addressing of flexible sensory arrays by a highly nonlinear threshold switch. *Advanced Materials*, 2018, **30(33)**: 1802516.
- [22] WANG W, WANG M, AMBSOLI E, *et al.* Surface diffusion-limited lifetime of silver and copper nanofilaments in resistive switching devices. *Nature Communications*, 2019, **10(1)**: 81.
- [23] ZHU H W, GAO H L, ZHAO H Y, *et al.* Printable elastic silver nanowire-based conductor for washable electronic textiles. *Nano Research*, 2020, **13(10)**: 2879.
- [24] 刘峥. IPDI 型水性聚氨酯的固含提高和表面能降低. 合肥: 中国科学技术大学硕士学位论文, 2010.
- [25] YANG J, CAO J, HAN J, *et al.* Stretchable multifunctional self-powered systems with Cu-EGaIn liquid metal electrodes. *Nano Energy*, 2022, **101**: 107582.
- [26] ZHIRNOV V V, MEADE R, CAVIN R K, *et al.* Scaling limits of resistive memories. *Nanotechnology*, 2011, **22(25)**: 254027.
- [27] LIU D Q, WANG N, WANG G, *et al.* Nonvolatile bipolar resistive switching in amorphous Sr-doped LaMnO<sub>3</sub> thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering. *Applied Physics Letters* 2013, **102(13)**: 134105.
- [28] MILANO G, AONO M, BOARINO L, *et al.* Quantum conductance in memristive devices: fundamentals, developments, and applications. *Advanced Materials*, 2022, **34(32)**: 2201248.
- [29] HUANG C H, MATSUZAKI K, NOMURA K. Threshold switching of non-stoichiometric CuO nanowire for selector application. *Applied Physics Letters*, 2020, **116(2)**: 023503.
- [30] 谢卓琳. 氧化物忆阻器的电输运行为调控及其神经元仿生特性研究. 宁波: 中国科学院宁波材料技术与工程研究所博士学位论文, 2021.
- [31] YAN L, PEI Y, WANG J, *et al.* High-speed Si films based threshold switching device and its artificial neuron application. *Applied Physics Letters*, 2021, **119(15)**: 153507.
- [32] ADDA C, CORRAZE B, STOLIAR P, *et al.* Mott insulators: a large class of materials for leaky integrate-and-fire (LIF) artificial neuron. *Journal of Applied Physics*, 2018, **124(15)**: 152124.
- [33] ZHANG Y, FANG Z, YAN X. HfO<sub>2</sub>-based memristor-CMOS hybrid implementation of artificial neuron model. *Applied Physics Letters*, 2022, **120(21)**: 213502.
- [34] SHANG J, XUE W, JI Z, *et al.* Highly flexible resistive switching memory based on amorphous-nanocrystalline hafnium oxide films. *Nanoscale*, 2017, **9(21)**: 7037.