

文章编号: 1000-7032(2026)03-0515-11

基于超薄氧化铝绝缘修饰层忆阻器的光电神经元

张国成^{1*}, 曾自力¹, 唐建川¹, 苏长强¹, 易鑫¹,
黄宣烨¹, 卓立¹, 严育杰^{2*}

(1. 福建理工大学 微电子技术研究中心, 福建 福州 350108;

2. 厦门理工学院 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 金属氧化物忆阻器因材料广泛、低成本及与 CMOS 工艺兼容性等优点, 在非易失性存储、智能传感和神经形态计算等领域备受关注。然而, 受限于其阈值电压波动大、开关稳定性和循环耐久性差等缺陷, 现有金属氧化物忆阻器的实用化进程及应用价值受到制约。本文以 ZnO 为阻变功能层, 通过原子层沉积技术引入 2 nm 超薄氧化铝绝缘修饰层, 有效调控了器件导电细丝的生长与熔断过程, 显著提升器件开关稳定性的同时, 将电流开关比提升至 10^4 以上, 阈值电压波动范围也明显降低。该器件在电压偏置下可模拟生物神经元的积分-发放、自泄露、不应期等特性, 并能通过电压脉冲幅值调控点火时间。此外, 365 nm 紫外光照射可进一步降低器件的阈值电压并缩短点火时间。基于器件的光电协同调控特性, 通过构建 64×64 忆阻器阵列, 成功实现了光学输入轨迹的特征提取与锐化, 该研究为推动神经形态计算的发展提供了一种有效策略。

关键词: 忆阻器; 超薄氧化铝; 神经元; 光电协同调控

中图分类号: O472

文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20250243

CSTR: 32170. 14. CJL. 20250243

Photonic Neuron Based on Memristor with Ultra-thin Alumina Insulating Modification Layer

ZHANG Guocheng^{1*}, ZENG Zili¹, TANG Jianchuan¹, SU Changqiang¹, YI Xin¹,
HUANG Xuanye¹, ZHUO Li¹, YAN Yujie^{2*}

(1. Research Center for Microelectronics Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zgc@fjut.edu.cn; yujieyan@xmut.edu.cn

Abstract: Metal oxide memristors have garnered significant attention in fields such as non-volatile memory, intelligent sensing, and neuromorphic computing due to their wide material availability, low cost, and compatibility with CMOS processes. However, their practical implementation and application value remain constrained by inherent limitations including substantial threshold voltage fluctuations, poor switching stability, and inadequate cycling endurance. This paper employs ZnO as the resistive switching layer and introduces a 2 nm-thick ultrathin aluminum oxide insulating modification layer *via* atomic layer deposition. This effectively regulates the growth and fusing process of conductive filaments within the device, significantly enhancing switching stability while elevating the current switching ratio to over 10^4 and markedly reducing threshold voltage fluctuation. Under voltage bias, the device can simulate biological neuron characteristics such as integrate-and-fire behavior, self-leakage, and refractory periods, with ignition timing controllable *via* voltage pulse amplitude. Furthermore, irradiation with 365 nm ultraviolet light further reduces the threshold voltage and shortens the ignition time of the device. Leveraging the opto-electrical co-regulation properties of the device, a 64×64 memristor array was constructed to successfully achieve feature extraction and

收稿日期: 2025-11-17; 修订日期: 2025-12-02

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2021J011082); 国家自然科学基金(62304189)

Supported by the General Program of Natural Science Foundation of Fujian Province (2021J011082); National Natural Science Foundation of China (62304189)

sharpening of optical input trajectories. This research provides an effective strategy for advancing neuromorphic computing.

Keywords: memristors; ultra-thin alumina; neuron; photoelectric co-regulation

1 引 言

受数据存储与处理分离特性的制约,传统冯诺依曼计算系统在大数据时代面临严峻挑战^[1-3]。为此,亟需一种低功耗、高速并行的新型计算架构。相比之下,人脑能够以极低的能耗同时进行信息的存储和计算,在应对这一挑战上提供了灵感^[4]。近年来,受人脑启发的神经形态计算架构以人工突触与神经元为硬件核心元素,通过分别模拟突触可塑性和脉冲整合-发放功能,以实现神经网络的系统级协同运作^[5-6]。为了在物理层面模拟生物突触和神经元特性,研究人员提出了多种材料和器件结构。其中,具有内在开关效应的忆阻器被视为构建类脑神经形态器件的理想选择^[7]。忆阻器因其结构简单、可拓展性好、开关速度快、稳定的耐用性等优势,在构建人工神经元器件方面受到了广泛关注^[8-10]。人工神经元器件的主要作用是整合多个来自突触传递的输入信号,并在超过阈值时产生峰值信号传递给下一级神经元,以此来实现信息的交换^[11-12]。根据不同的工作机制,常见的忆阻神经元包括价变神经元、电化学神经元、相变神经元以及莫特神经元。

由于具有稳定的化学性质、材料易于合成、低成本且与CMOS工艺兼容等优点,金属氧化物在构建忆阻器领域展现出独特的优势,如良好的光电性能、较长的保留时间和高耐久性^[13-15]。因此,金属氧化物忆阻器在构建人工神经元方面成为备受关注的核心候选器件^[16]。然而,尽管人们提出了多种不同介质层的金属氧化物忆阻器用以模拟神经元的整合-发放特性,但仍然存在阈值电压波动大、高低阻态不稳定和循环耐久性差等问题,这限制了其实用化进程及应用价值^[17-19]。为解决这些问题,研究人员提出了元素掺杂等方法,但这通常需要复杂的制备工艺,且可能会带来额外的影响因素^[20]。相比之下,在忆阻器功能层底部引入通过原子层沉积(ALD)制备的超薄绝缘修饰层是一种简单高效的解决办法^[21]。ALD技术基于原子层级别的逐层沉积原理,具备厚度原子级可控、沉积均匀性佳、保形性优异且工艺温和的核心优势,

能精准制备超薄且致密的绝缘修饰层。通过调控绝缘层厚度和材料的性质,能够限制忆阻器内部导电细丝的生长以及熔断,从而能够实现稳定的阈值开关、提高电流开关比,同时增强器件的开关周期稳定性^[22-24]。

本文提出了一种基于Ag/ZnO/Al₂O₃/Si的人工光电神经元器件。通过ALD技术在ZnO与Si衬底之间引入2 nm超薄氧化铝绝缘层,不仅显著提升器件的开关稳定性、增大电流开关比,以及有效降低阈值电压的波动,还使得器件能够模拟生物神经元的积分-发放、自泄露、不应期等特性,器件的点火时间可通过电压脉冲幅值进行调节。此外,在365 nm紫外光下照射下,忆阻器的阈值电压及爆发时间能够进一步降低和缩短。基于忆阻器的光电协同调控特性,通过构建64×64忆阻器阵列,成功实现了光学输入轨迹的特征提取与锐化。这项工作为神经形态计算和智能传感领域的进一步发展奠定了基础。

2 实 验

2.1 样品制备

基底预处理:将衬底硅片置于超声波清洗槽中,依次用丙酮、异丙醇和去离子水各清洗10 min,清洗后用氮气喷枪吹干衬底表面残留的液体,随后将清洗后的硅片进行640 W的氧等离子体功率处理10 min,用于改善表面的亲水性。

绝缘修饰层 Al₂O₃ 的制备:采用ALD技术制备氧化铝薄膜,以三甲基铝(Al(CH₃)₃)和H₂O作为前驱体,在120~200 °C的沉积温度下进行交替反应。沉积过程包括:(i)通入三甲基铝(Al(CH₃)₃)铝源前驱体,使其在基片表面发生化学吸附;(ii)通入氮气吹扫15 s,去除未反应的TMA及副产物;(iii)通入水蒸气与表面吸附的(Al(CH₃)₃)反应生成氧化铝;(iv)再次通入氮气吹扫20 s,清除反应残留物。上述4个步骤构成一个完整的沉积循环,单次循环沉积厚度约为0.1 nm,通过重复20次循环获得厚度约2 nm的氧化铝薄膜。

ZnO阻变层的制备:采用水热法合成氧化锌纳米颗粒。使用称量天平称取0.658 5 g乙酸锌

和0.9062 g四甲基氢氧化铵,分别置于两个洁净试剂瓶中。向装有乙酸锌的试剂瓶中加入30 mL二甲基亚砷(DMSO),搅拌溶解形成溶液A;向装有四甲基氢氧化铵的试剂瓶中加入10 mL乙醇,搅拌溶解形成溶液B。将溶液A置于30℃水浴中恒温,使用胶头滴管将溶液B缓慢滴入溶液A中,滴加完毕后继续在30℃水浴中反应1 h,得到混合溶液。将40 mL混合溶液均分至两个离心管,各加入20 mL乙酸乙酯,以6 000 r/min离心5 min。弃去上清液,向沉淀物中各加入5 mL正丁醇,超声处理使沉淀物完全溶解,通过0.45 μm滤头过滤,得到氧化锌纳米颗粒溶液。使用旋涂机进行旋涂,随后通过针管吸取ZnO溶液,使用直径为0.22 μm的过滤头将ZnO溶液滴到硅片上,在旋涂机转速3 000 r/min下旋涂40 s,而后将样品放于加热台上110℃退火0.5 h,最终得到均匀致密的ZnO薄膜。

银电极的制备:利用热蒸镀法(中国科学院沈阳科学仪器股份有限公司),在真空度为 10^{-4} Pa环境下蒸镀50 nm左右厚度的银电极。

2.2 器件结构与材料

图1为器件结构图,室温下,在硅片基底上制备神经元器件。其中P型高掺杂硅片采购于苏州晶矽电子科技有限公司;乙酸锌($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、四甲基氢氧化铵($(\text{CH}_3)_4\text{N}(\text{OH})\cdot 5\text{H}_2\text{O}$)、正丁醇($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{OH}$)、二甲基亚砷($(\text{CH}_3)_2\text{SO}$)、乙醇($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)、乙酸乙酯($\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$)均购自阿拉丁试剂(上海)有限公司;溶剂氯苯购于西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;丙酮(CH_3COCH_3 99.9%)、异丙醇($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}\geq 99.7\%$)由国药集团化学试剂有限公司提供;电极材料Ag颗粒来自北京合纵天琦新材料科技有限公司。

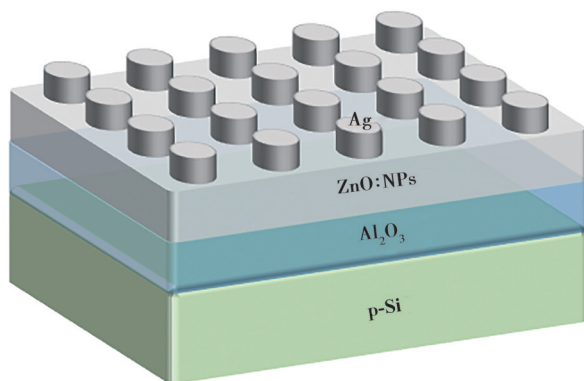


图1 忆阻器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the memristor structure

2.3 测试与表征

器件性能测试均在密闭、室温条件下进行,主要包括:基础伏安曲线、电压脉冲作用下的爆发特性、多次循环双扫电压下的高低阻态分布曲线,黑暗环境和紫外光照射下的双扫特性、积分-发放、自泄露、不应期等神经元性能。使用Keithley 4200-SCS半导体参数测试仪对忆阻器的电学性能进行分析,光源采取365 nm波长的LED光源(北京卓立汉光仪器有限公司MLED 4多通道光源系统),紫外-可见-近红外吸收光谱通过光度计进行测试。

3 结果与讨论

3.1 薄膜厚度(TEM)与紫外-可见透射光谱表征

器件的TEM表征如图2所示,其中顶电极Ag约为50 nm,ZnO约为16 nm, Al_2O_3 为2~4 nm,底电极Si为300 nm。

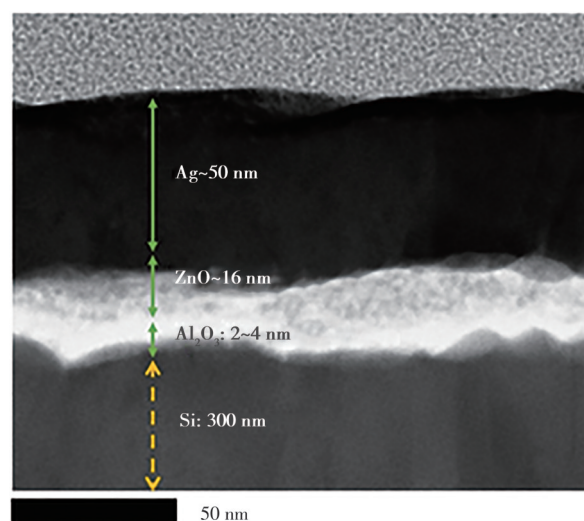


图2 忆阻器TEM表征

Fig.2 TEM characterization micrograph of the memristor

同时测试了实验中所使用到的氧化铝和氧化锌材料的吸收光谱,如图3所示,可以看出ZnO在365 nm波长处存在明显吸收峰。

氧化锌材料的紫外光吸收特性便于后续测试忆阻器在紫外光照射下的双扫特性及神经元性能。

3.2 引入氧化铝修饰层的器件性能分析

Ag/ZnO/Si忆阻器的I-V双扫特性曲线如图4(a)、(b)所示,施加-2→3→-2 V双扫电压时,器件起始的电流较高($>10^{-5}$ A),这是由于溶液法配制的氧化锌的电阻率较低。当电压增加至3 V左右时,器件内部形成完整导电丝,器件从高阻态转变为低阻态,能够看出器件的开关比较小($<10^2$)。

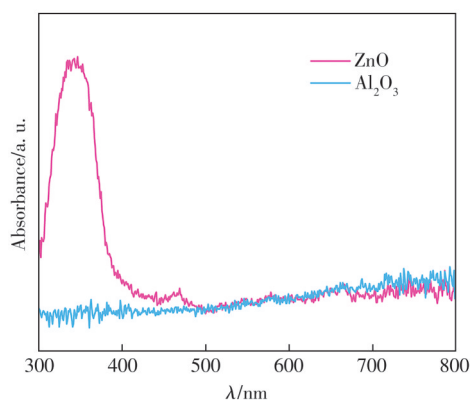


图3 氧化锌、氧化铝材料吸收光谱

Fig.3 Absorption spectra of ZnO and Al₂O₃

此外,在连续相同的10次双扫循环过程中,器件的阈值电压波动较大,双扫循环稳定性较差,这源于器件内部导电细丝的随机生成。通过在氧化锌

和硅衬底之间引入一层超薄的氧化铝绝缘层,Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器的 I - V 双扫特性曲线如图4(c)、(d)所示。施加 ± 5 V双向扫描电压时,器件的起始电流明显降低($<10^{-6}$ A),这源于插入的氧化铝层提高了器件整体的电阻率,使电流开关比大幅提高($>10^4$),阈值电压为4 V左右。此外,器件在连续50次 ± 5 V电压双扫过程中表现出优异稳定性,器件阈值电压的波动非常小。这是因为在器件内部导电丝断裂时不会完全断开,而是在氧化铝层中留下部分残留的导电结构,在下一次循环生成导电丝时,导电丝会在原来断裂的位置重新生长,因此器件能够表现出优异的双扫稳定性和耐久性。需说明的是,引入的氧化铝厚度对器件阻变性能有所影响,当氧化铝层厚度为10 nm时,器件需要更大的外部偏压才能导通。

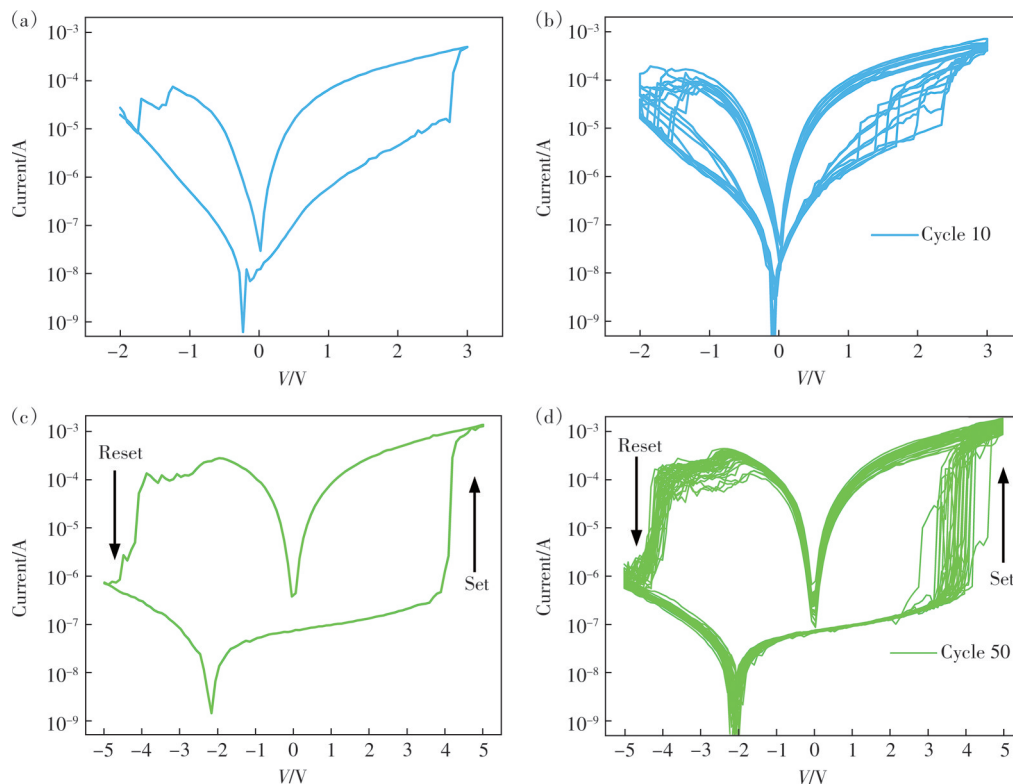


图4 (a) Ag/ZnO/Si 忆阻器的 I - V 双扫特性曲线; (b) Ag/ZnO/Si 忆阻器的10次循环双扫稳定性; (c) Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器的 I - V 双扫特性曲线; (d) Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器的50次循环双扫稳定性

Fig.4 (a) I - V double-sweep characteristic curve of the Ag/ZnO/Si memristor. (b) 10-cycle cyclic double-sweep stability of the Ag/ZnO/Si memristor. (c) I - V double-sweep characteristic curve of the Ag/ZnO/Al₂O₃/Si memristor. (d) 50-cycle cyclic double-sweep stability of the Ag/ZnO/Al₂O₃/Si memristor

人工神经元器件的设计目标在于模拟生物神经元对输入信号的整合能力及脉冲编码特性,并在此基础上实现更高的仿生性。图5(a)、(c)分别展示了 Ag/ZnO/Si 和 Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 两种结构忆阻器的积分整合特性,在忆阻器两端施加幅值

2 V、占空比 60%(电压脉冲作用时间 60 ms,间隔时间 90 ms)的电压脉冲时,由于 ZnO 自身较低的电阻率,电压脉冲作用下,器件的电流迅速上升,导致 Ag/ZnO/Si 忆阻器未能模拟出生物神经元的积分整合特性。相比之下,Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻

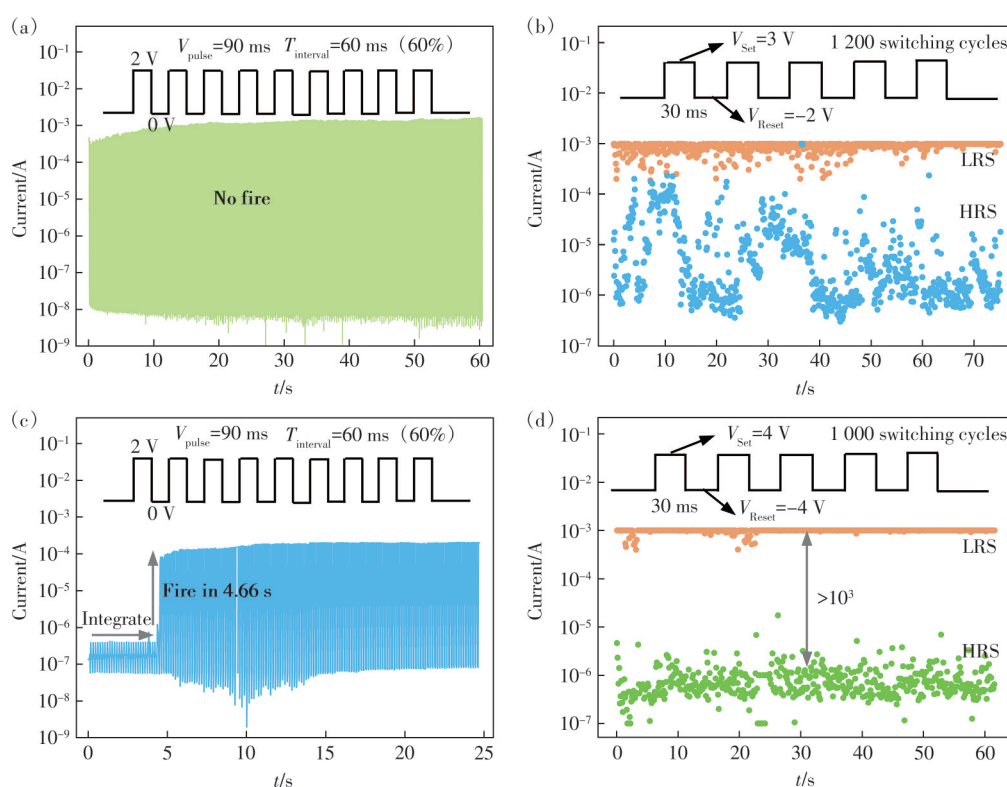


图5 (a)Ag/ZnO/Si忆阻器的积分整合特性;(b)Ag/ZnO/Si忆阻器的置位复位循环耐久性;(c)Ag/ZnO/Al₂O₃/Si忆阻器的积分整合特性;(d)Ag/ZnO/Al₂O₃/Si的置位复位循环耐久性

Fig.5 (a)Integrate-and-fire characteristic of the Ag/ZnO/Si memristor. (b)Set-reset cyclic endurance of the Ag/ZnO/Si memristor. (c)Integrate-and-fire characteristic of the Ag/ZnO/Al₂O₃/Si memristor. (d)Set-reset cyclic endurance of the Ag/ZnO/Al₂O₃/Si memristor

器成功模拟了积分-整合特性,这是因为电压脉冲刺激促进了器件内部导电细丝(CF)的完整形成,使得器件从高阻态(HRS)向低阻态(LRS)转变。图5(b)、(d)展示了两种器件的置位-复位循环耐久性。在持续重复施加 V_{set} 与 V_{reset} 电压的测试中,单层 ZnO 忆阻器的高低阻态切换稳定性差,循环耐久性不佳;而 Al₂O₃/ZnO 双层结构忆阻器在自复位电压作用下表现出优异的稳定性,高低阻态切换规律,且具备更优的开关比。

3.3 Al₂O₃/ZnO 双层结构忆阻器的光电神经元性能

Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器在不同幅值的电压脉冲作用下,其爆发时间有所区别,如图6(a)、(b)所示,设定电压脉冲作用时间 60 ms,间隔时间 90 ms,占空比 60%。当电压脉冲幅值为 1.5 V 时,器件爆发时间约为 13.36 s,而当电压增加至 1.8 V 时,器件爆发时间约为 9.12 s,这表明器件的爆发时间能够通过电压幅值调控。此外,为了演示器件的自泄露与不应期特性,在器件两端施加连续脉冲刺激后撤除电压激励,观察发现器件达到点

火状态后能在短时间内会恢复到初始状态,表明忆阻器具备自发返回静息状态的能力,如图6(c)所示。图6(d)结果表明,在器件达到放电状态后持续施加刺激脉冲,器件在激活后会自行恢复到静息电位,并在一段时间后继续激活。这一周期性行为可以模拟神经元的不应期特性,进一步增强了人工神经网络的功能多样性。

由于 ZnO 材料的紫外光吸收特性,在黑暗环境及 365 nm 紫外光(光强分别为 $0.31 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $0.65 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $0.97 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$) 的照射下,测试了器件的 I - V 特性,如图7(a)所示。结果表明,在紫外光照射下,器件的阈值电压有所降低,这主要源于光照激发使器件内部载流子浓度提升,进而加速了导电细丝的形成,且阈值电压随光强增大呈持续下降趋势。接着,在 $0.97 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 365 nm 紫外光照射下,测试了器件的积分整合特性,施加的外部电压脉冲幅值依次为 1.2 V、1.8 V 和 2 V。如图7(b)、(c)、(d)所示,可以看出器件的点火爆发时间明显提前,这也是归因于器件的光电导效应。

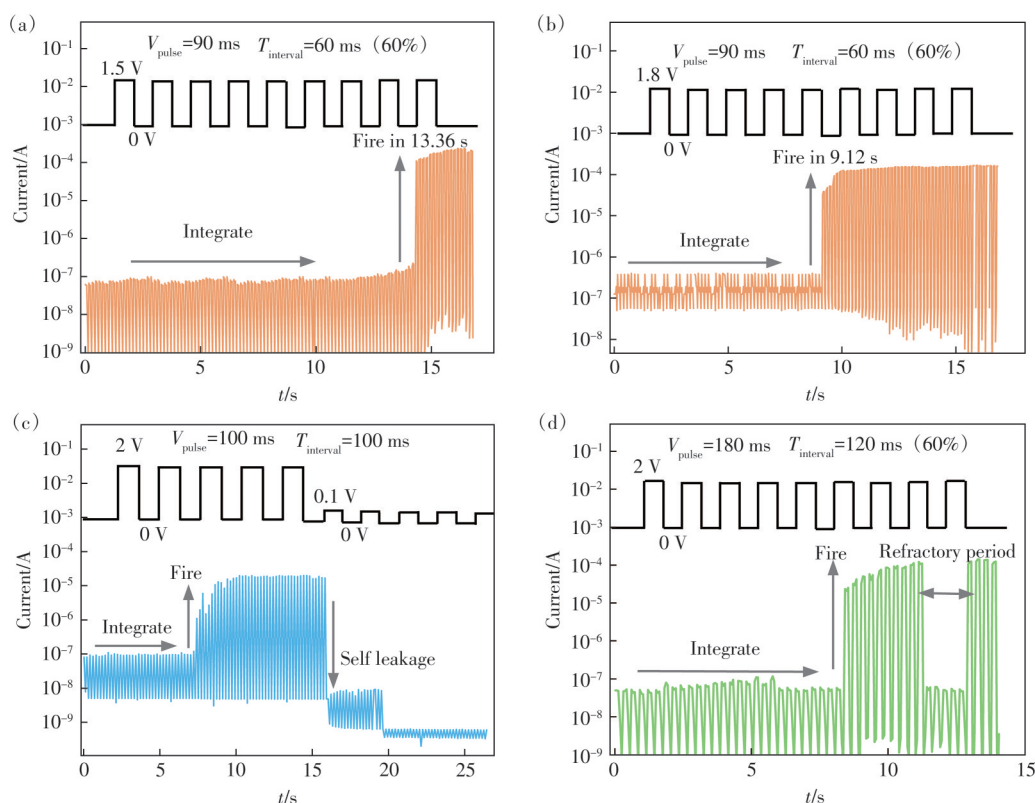


图6 (a)~(b)Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器的积分整合特性,脉冲电压分别为 1.5 V 和 1.8 V;(c)Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器的自泄露特性;(d)Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器的不应期特性

Fig.6 (a)–(b)Integrate-and-fire characteristics of the Ag/ZnO/Al₂O₃/Si memristor with pulse voltages of 1.5 V and 1.8 V, respectively. (c) Self-leakage characteristic of the Ag/ZnO/Al₂O₃/Si memristor. (d) Refractory period characteristic of the Ag/ZnO/Al₂O₃/Si memristor

3.4 机理解释

基于 Ag/ZnO/Si 和 Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器所表现出的差异化 I - V 双扫特性及积分整合特性,分别提出了对应的工作机制。Ag/ZnO/Si 人工神经元器件的工作机制如图 8(a)所示。在初始状态,器件内部存在自由氧以及氧空位,由于银是活性金属,当在顶电极上施加正偏压时(i),银电极会被氧化为 Ag⁺,并在电场作用下向下迁移至底部电极处,随后 Ag⁺在底部电极处得到电子被还原从而形成银导电细丝(CF),与此同时,由于价态变化机制(VCM)的发生,器件内部的氧空位在外电场作用下逐渐聚集在顶部电极附近,形成簇状的氧空位导电细丝(CF);当偏置电压逐渐增大达到器件阈值电压时(ii),银 CF 和氧空位 CF 相连接形成完整的 CF 通道,器件从 HRS 转变为 LRS;当在顶电极上施加一定的负向偏置电压时(iii),器件底部的银 CF 被氧化为 Ag⁺而断裂,导致内部导电通道破坏,器件从 LRS 转变为 HRS;随着负向偏压的持续作用(iv),器件内部的银导电细丝完全溶解;当施加下一次相同幅值的正向电压

扫描时(v),器件内部的银导电细丝和氧空位导电细丝再次生成;需要注意的是此时银导电细丝是随机生成的(vi),银导电细丝的形成位置和上一次置位(SET)过程不一致,这种导电细丝的随机生成特性导致 Ag/ZnO/Si 忆阻器的双扫阈值电压波动显著,循环双扫稳定性差。Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器的工作机制和 Ag/ZnO/Si 忆阻器大致相同,区别在于过程(iv)中:由于氧化铝绝缘层的存在,负向偏压作用时,银导电细丝不会完全熔断,而是在氧化铝层底部残留部分银原子,在下一次正向电压扫描时,器件内部的银导电细丝以残留银原子为位点持续生长,进而与氧空位导电细丝连接促使器件从 HRS 转变为 LRS^[25]。因此,插入的超薄氧化铝绝缘层可有效调控器件内部导电细丝的断裂与再生过程,显著提升器件的循环双扫稳定性,同时显著降低阈值电压波动。此外,Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器在 365 nm 紫外光照射下的工作机制如图 8(b)所示。在器件两端施加正向电压和紫外光时,由于氧化锌的紫外光吸收特性,光子能量会被氧化锌材料吸收并产生光生空

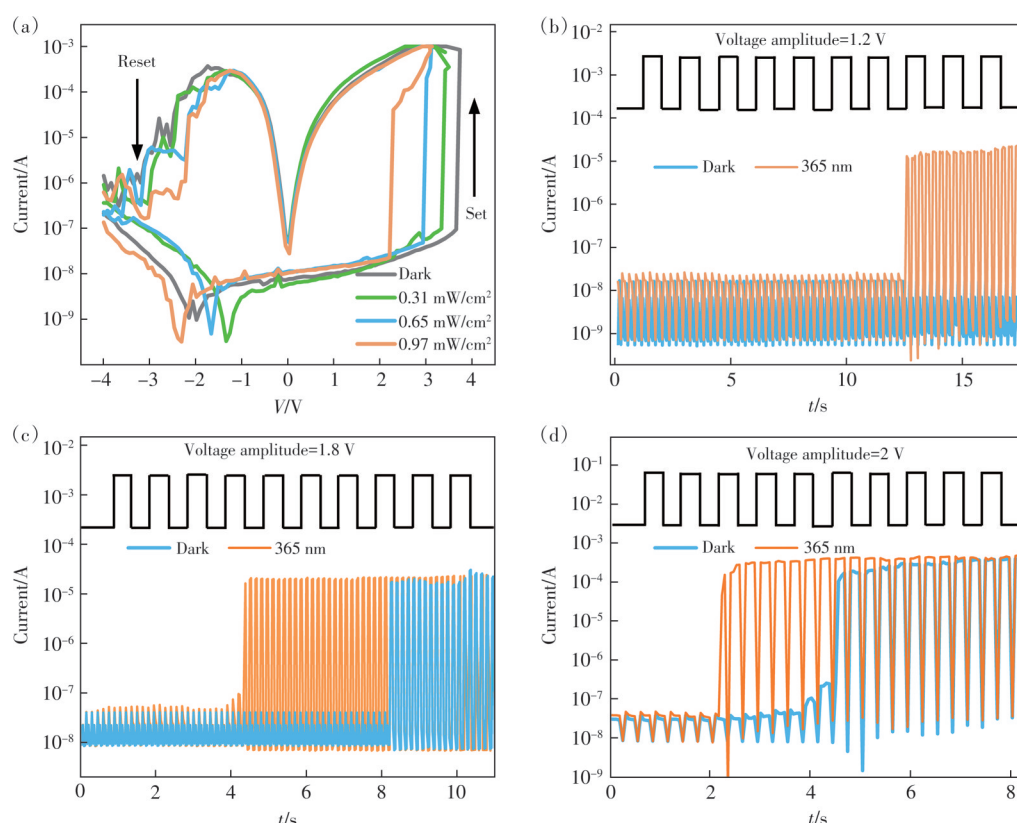


图 7 (a) Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器在黑暗及不同 365 nm 紫外光强度照射下的 I - V 特性; (b)~(d) Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器在紫外光照射下的积分整合特性, 电压脉冲幅值分别为 1.2 V、1.8 V 和 2 V

Fig.7 (a) I - V characteristics of the Ag/ZnO/Al₂O₃/Si memristor under darkness and different intensities of 365 nm UV light. (b) - (d) Integrate-and-fire characteristics of the Ag/ZnO/Al₂O₃/Si memristor under UV light irradiation, with voltage pulse amplitudes of 1.2 V, 1.8 V, and 2 V, respectively

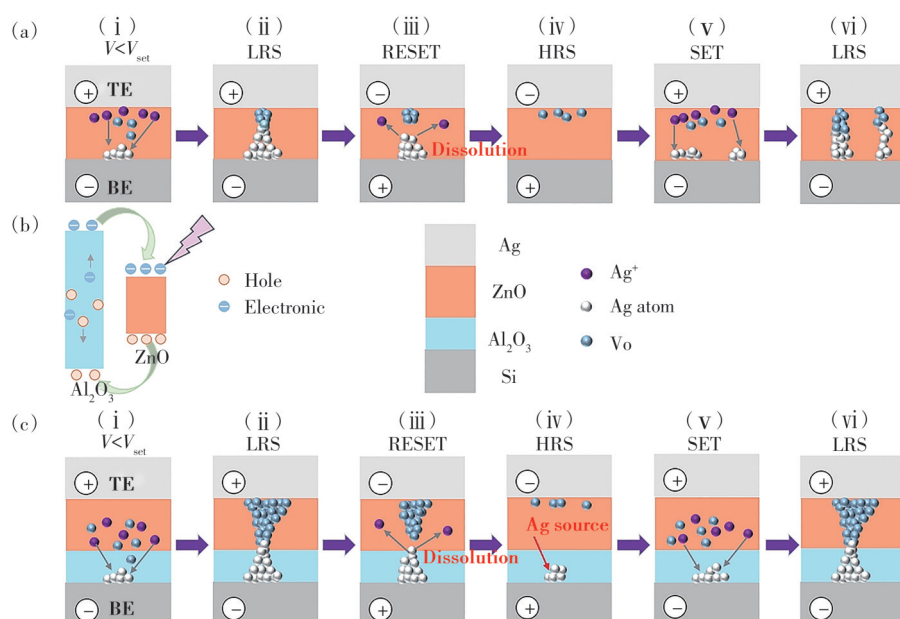


图 8 基于 Ag/ZnO/Si 及 Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 的光电神经元器件的工作机制。(a) Ag/ZnO/Si 忆阻器的开关工作机制; (b) Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器在紫外光作用下的工作机制; (c) Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器的开关工作机制

Fig.8 Operating mechanisms of optoelectronic neuron devices based on Ag/ZnO/Si and Ag/ZnO/Al₂O₃/Si. (a) Switching operating mechanism of the Ag/ZnO/Si memristor. (b) Operating mechanism of the Ag/ZnO/Al₂O₃/Si memristor under ultraviolet (UV) light irradiation. (c) Switching operating mechanism of the Ag/ZnO/Al₂O₃/Si memristor

穴,由于氧化铝的禁带宽度远大于氧化锌,在这种能带结构下,产生的光生空穴会在氧化锌和氧化铝层的界面处积累,从而产生与外部电场方向相同的光生电动势^[26];同时,紫外光激发产生的部分空穴可借助量子隧穿效应穿过超薄 Al_2O_3 (2 nm) 绝缘层抵达底电极,进而形成光电流^[27-28]。以上过程有利于复合导电丝的形成以及放电行为的产生,因此在紫外光作用下,器件的阈值电压和放电时间分别有所降低和提前。

3.5 光轨迹提取应用

基于器件表现出的紫外光照阈值电压降低及爆发特性,通过构建 64×64 阵列,进行了光学输入轨迹的特征提取工作。如图 9(a) 所示。当发光物体在基于忆阻器的阵列电路中移动时,其运动轨迹可通过电导转换及阵列中器件的不同触发时间进行感知和处理。如图 9(b) 所示,在光电混合调控策略中,当选择适当电压脉冲并同时输入光

信号时,忆阻器阵列可被激活并切换至低阻抗态 (LRS)。由于阵列中仅存在高阻抗态 (HRS) 与低阻抗态 (LRS) 两种导电状态,照明轨迹得以锐化。图 9(c) 展示了输入至忆阻器阵列的照明轨迹,图 9(d) 则呈现经阵列处理后的输出轨迹,可以看出处理后轨迹较输入轨迹更为清晰。阵列处理增强了信号对比度,并有效削减了轨迹边缘的冗余信号。此外,在相同电刺激但不同光强照射下,忆阻器具有不同的触发时间。因此,不同强度的外部光信号可通过具有不同触发时间的神经元输出电脉冲进行编码,进而传输至下一级人工神经网络进行光强度信息的后续处理。基于忆阻器的阵列电路可实现输入信号的锐化处理,将输入信号编码为具有不同放电时间的电脉冲并传输至后续人工神经网络。该方案能够简化光电信号处理流程,在提升机器视觉系统效率方面具有巨大潜力。

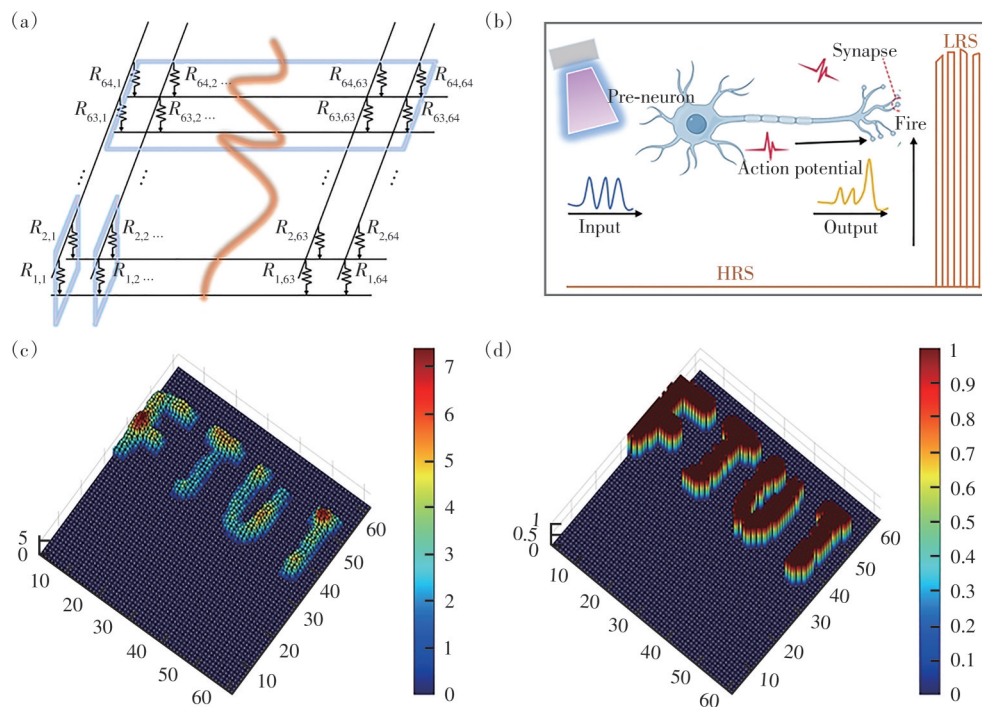


图 9 基于光电忆阻器的光学输入轨迹特征提取应用。(a)用于光学输入轨迹提取的 64×64 忆阻器阵列示意图;(b)光电协同刺激下忆阻器的电阻态切换示意图;(c)输入至忆阻器阵列的光照轨迹;(d)由忆阻器阵列处理后的输出轨迹

Fig. 9 Application of optical input trajectory feature extraction based on optoelectronic memristors. (a) Schematic diagram of the 64×64 memristor array for optical input trajectory extraction. (b) Schematic diagram of resistance state switching of the memristor under optoelectronic synergistic stimulation. (c) Light irradiation trajectory input to the memristor array. (d) Output trajectory processed by the memristor array

最后,对比了其他工作制备的忆阻器性能,如表 1 所示。本文提出的忆阻器具有较低的阈值电压,且该电压波动范围较小,同时具备较高

的开关比,无需外部电路即可实现神经元的一系列核心功能。此外,与既往研究相比,本文设计的忆阻器展现出显著优势。循环稳定性与耐久

性更优,经 10³次开关循环后性能无明显退化,长期工作可靠性突出;同时实现了光感知与计算功能的一体化集成,在紫外光照射下,器件阈值电压与点火时间进一步降低,能够完成光输入轨迹识别任务,为光调控神经形态计算提供了全新技术路径。

表 1 与其他工作的性能比较
Tab. 1 Performance comparison with other jobs

Device structure	Set voltage/V	Fluctuation range/V	On/Off ratio	Peripheral circuits	Year
Ti/TiO ₂ /HfO ₂ /Si	4.0	~1	<10 ²	yes	2020 ^[29]
Ti/Pt/NbO _x /Ti/Pt	2.5	>0.5	<10 ²	yes	2022 ^[30]
Ag/STO/Pt	2.0	>1	<10 ⁴	yes	2023 ^[31]
Pt/NbO _x /TiN	3.0	~1.5	<10 ³	yes	2024 ^[10]
Au/In ₂ S ₃ /SiO ₂ /Si	6.0	~1	~10	yes	2022 ^[32]
Pt/Nb/NbO _x /W/Ti	4.5	>1.5	<10 ³	yes	2023 ^[33]
Au/Ag/Cs ₃ Sb ₂ I ₉ /ITO	~0.15	N	~10 ⁵	N	2023 ^[34]
Ag/ZnO/Al ₂ O ₃ /Si	3	~0.5	>10 ⁴	no	This work

4 结 论

本文提出了一种基于 Ag/ZnO/Al₂O₃/Si 忆阻器的人工光电神经元器件,该器件具有稳定的阈值开关特性和较高的电流开关比,能够模拟典型的泄漏集成点火的神元特性,包括积分点火、自泄漏和不应期行为。此外,利用 ZnO 在紫外光下的光响应特性,研究了光电协同刺激效应,实验发现光刺激有助于加速电刺激作用下神经元的放电过

程。基于器件独特的光电协同调控特性,通过构建 64×64 忆阻器阵列,成功实现了光学输入轨迹的特征提取与锐化。该研究促进了神经形态计算的发展,为多功能、高性能神经形态系统的发展提供了参考。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250243>

参 考 文 献:

[1] SUN K X, CHEN J S, YAN X B. The future of memristors: materials engineering and neural networks [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(8): 2006773.

[2] KIM M K, PARK Y, KIM I J, *et al.* Emerging materials for neuromorphic devices and systems [J]. *iScience*, 2020, 23(12): 101846.

[3] 刘依婷, 万军, 邱晨光, 等. 基于低维材料的神经形态器件研究进展 [J]. *发光学报*, 2023, 44(6): 1085-1111.
LIU Y T, WAN J, QIU C G, *et al.* Research progress of neuromorphic devices based on low-dimensional materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(6): 1085-1111. (in Chinese)

[4] 李雯, 曾诺兰, 周嘉, 等. 有机聚合物掺杂离子液体忆阻器用于低电压人工光电突触 [J]. *发光学报*, 2024, 45(9): 1547-1559.
LI W, ZENG N L, ZHOU J, *et al.* Ionic liquid-doped organic polymer memristors for low-voltage artificial optoelectronic synapses [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(9): 1547-1559. (in Chinese)

[5] DU C, CAI F X, ZIDAN M A, *et al.* Reservoir computing using dynamic memristors for temporal information processing [J]. *Nat. Commun.*, 2017, 8(1): 2204.

[6] GUPTA S, KUMAR P, PAUL T, *et al.* Low power, CMOS-MoS₂ memtransistor based neuromorphic hybrid architecture for wake-up systems [J]. *Sci. Rep.*, 2019, 9(1): 15604.

[7] YANG J Q, WANG R P, WANG Z P, *et al.* Leaky integrate-and-fire neurons based on perovskite memristor for spiking neural networks [J]. *Nano Energy*, 2020, 74: 104828.

[8] ZHANG X M, WANG W, LIU Q, *et al.* An artificial neuron based on a threshold switching memristor [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2018, 39(2): 308-311.

- [9] CHEN Y H, WANG Y, LUO Y H, *et al.* Realization of artificial neuron using Mxene bi-directional threshold switching memristors [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2019, 40(10): 1686-1689.
- [10] WANG Y Z, HUANG X, XU H, *et al.* Investigation of the modulated threshold memristor for tunable artificial neuron [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2024, 71(11): 7177-7183.
- [11] ZHOU G D, WANG Z R, SUN B, *et al.* Volatile and nonvolatile memristive devices for neuromorphic computing [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2022, 8(7): 2101127.
- [12] 赖秉琳, 李志达, 李博文, 等. 基于有机/无机双层忆阻器的人工光电神经元 [J]. *光子学报*, 2024, 53(4): 0423001.
- LAI B L, LI Z D, LI B W, *et al.* Artificial photoelectric neuron based on organic/inorganic double-layer memristor [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2024, 53(4): 0423001. (in Chinese)
- [13] TIAN Q L, SHAN X Y, BIAN J Y, *et al.* Metal oxide-based resistive switching memristors for neuromorphic computing [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(24): 12046-12065.
- [14] ALI S, KHAN M F, ULLAH M A, *et al.* Magnesium-doped ZnO thin film memristors for enhanced synaptic plasticity and resistive switching in neuromorphic computing [J]. *J. Alloys Compd.*, 2025, 1015: 178800.
- [15] STATHOPOULOS S, KHIAT A, TRAPATSELI M, *et al.* Multibit memory operation of metal-oxide bi-layer memristors [J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7(1): 17532.
- [16] PANCA A, PANIDI J, FABER H, *et al.* Flexible oxide thin film transistors, memristors, and their integration [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(20): 2213762.
- [17] WANG Y, LIU H, WU W S, *et al.* SrTiO₃-based memristor with a metal/oxide bilayer electrode for high recognition accuracy neuromorphic computing [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(26): 13235-13245.
- [18] LEE D, KIM S M, PARK J C, *et al.* Enhancing reliability in oxide-based memristors using two-dimensional transition metal dichalcogenides [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2025, 679: 161216.
- [19] CHU D, KANG S, KIM G, *et al.* First integration of Ni barrier layer for enhanced threshold switching characteristics in Ag/HfO₂-based TS device [J]. *Mater. Today Adv.*, 2024, 22: 100492.
- [20] HAYAT M F, RAHMAN N U, ULLAH A, *et al.* Resistive switching properties in ferromagnetic co-doped ZnO thin films-based memristors for neuromorphic computing [J]. *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.*, 2024, 35(16): 1052.
- [21] QIAO Q, XU D, LI Y W, *et al.* Detection of resistive switching behavior based on the Al₂O₃/ZnO/Al₂O₃ structure with alumina buffers [J]. *Thin Solid Films*, 2017, 623: 8-13.
- [22] MAHADEVAIAH M K, PEREZ E, LISKER M, *et al.* Modulating the filamentary-based resistive switching properties of HfO₂ memristive devices by adding Al₂O₃ layers [J]. *Electronics*, 2022, 11(10): 1540.
- [23] VISHWANATH S K, WOO H, JEON S. Enhancement of resistive switching properties in Al₂O₃ bilayer-based atomic switches: multilevel resistive switching [J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(23): 235202.
- [24] CHEN L, DAI Y W, SUN Q Q, *et al.* Al₂O₃/HfO₂ functional stack films based resistive switching memories with controlled SET and RESET voltages [J]. *Solid State Ion.*, 2015, 273: 66-69.
- [25] GAN K J, CHANG W C, LIU P T, *et al.* Investigation of resistive switching in copper/InGaZnO/Al₂O₃-based memristor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 115(14): 143501.
- [26] ZHANG G C, TANG J C, LAI B L, *et al.* Retina-inspired artificial optoelectronic neurons with broad spectral response for visual image pre-processing [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2025, 46(3): 401-404.
- [27] CAO F, JI X H. Enhanced self-powered UV sensing performance of ZnO/Au/Al₂O₃ photodetector with the decoration of Au nanoparticles [J]. *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.*, 2020, 31(3): 2657-2665.
- [28] CAO F, JIN L, WU Y, *et al.* High-performance, self-powered UV photodetector based on Au nanoparticles decorated ZnO/CuI heterostructure [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 859: 158383.
- [29] RYU J H, KIM S. Artificial synaptic characteristics of TiO₂/HfO₂ memristor with self-rectifying switching for brain-inspired computing [J]. *Chaos Soliton Fract.*, 2020, 140: 110236.
- [30] CHEN P, ZHANG X M, WU Z H, *et al.* High-yield and uniform NbO_x-based threshold switching devices for neuron applications [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2022, 69(5): 2391-2397.
- [31] YAN X B, HAN X, FANG Z L, *et al.* Reconfigurable memristor based on SrTiO₃ thin-film for neuromorphic computing [J].

- Front. Phys.* , 2023, 18(6): 63301.
- [32] ZHAO Y, YU D Q, LEI Z H, *et al.* An artificial optoelectronic nociceptor based on In_2S_3 memristor [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.* , 2022, 55(12): 125401.
- [33] HAN C Y, FANG S L, CUI Y L, *et al.* Configurable NbO_x memristors as artificial synapses or neurons achieved by regulating the forming compliance current for the spiking neural network [J]. *Adv. Electron. Mater.* , 2023, 9(6): 2300018.
- [34] CAO F, HU Z J, YAN T T, *et al.* A dual-functional perovskite-based photodetector and memristor for visual memory [J]. *Adv. Mater.* , 2023, 35(44): 2304550.



张国成(1981–),男,湖北监利人,博士,副教授,2020年于福州大学获得博士学位,主要从事薄膜晶体管及人工神经形态器件的研究。
E-mail: zgc@fjut.edu.cn



严育杰(1993–),男,福建漳平人,博士,副教授,2021年于福州大学获得博士学位,主要从事薄膜晶体管及人工神经形态器件的研究。
E-mail: yujieyan@xmut.edu.cn