

基于 ZrO_2/ZnO 异质结人工突触的研究及应用

任齐重

广东工业大学物理与光电工程学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年3月25日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月12日

摘要

由忆阻器构建的类脑神经形态网络凭借其低功耗、高效的计算机架构而引起了广泛的关注, 也有望打破传统的冯·诺伊曼设计的局限性。本文采用射频磁控溅射技术制备了一种基于 ZrO_2/ZnO 异质结的人工突触器件, 该器件可以实现典型的突触行为, 包括短期可塑性、长期可塑性和成对脉冲促进行为。此外, 该器件构建的卷积神经网络对手写数字数据集和时尚服装数据集分别具有96.6%和71.1%的识别率。这些结果表明, 该设备在神经形态计算领域具有巨大的潜力, 为今后建立有效的神经形态计算系统提供了一种可行的方法。

关键词

忆阻器, 人工突触器件, 神经形态计算

Research and Application of Artificial Synapses Based on ZrO_2/ZnO Heterojunction

Qizhong Ren

School of Physics & Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

Received: Mar. 25th, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 12th, 2025

Abstract

The brain-like neuromorphic network constructed by memristors has attracted wide attention due to its low power consumption and efficient computer architecture, and is also expected to break the limitations of traditional von Neumann design. In this paper, an artificial synaptic device based on ZrO_2/ZnO heterojunction was prepared by RF magnetron sputtering technology. The device can achieve typical synaptic behavior, including short-term plasticity, long-term plasticity and paired pulse

promotion behavior. In addition, the convolutional neural network constructed by the device has a recognition rate of 96.6% and 71.1% for handwritten digital data sets and fashion clothing data sets, respectively. These results show that the device has great potential in the field of neuromorphic computing and provides a feasible method for establishing an effective neuromorphic computing system in the future.

Keywords

Memristor, Artificial Synaptic Device, Neuromorphic Computing

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着对信息存储需求的不断增加,传统的冯·诺伊曼体系结构中 CPU 和内存之间的频繁数据传输已经成为性能瓶颈和提高计算效率的主要障碍[1][2]。研究人员和工程师们正在考虑开发低功耗、高效的计算机架构来解决这个问题。事实上,类脑计算是人工智能的重要灵感来源和核心目标,有可能彻底突破传统的计算架构。人脑的功耗只有大约 20W,这一切要归功于生物突触,突触对记忆和学习至关重要[3][4]。忆阻器与生物突触非常相似,它们可以根据通过它们的电流来改变其电阻,并“记住”这种电阻的变化。换句话说,它能够通过改变其电阻状态来记录之前流过它的电流[5][6]。忆阻器通常是按照“金属-绝缘体-金属”夹层结构设计和制造的双端电子器件。这样做的好处包括减少能源使用和进行有效的计算,这可能有助于打破传统的冯·诺伊曼设计的限制[7][8]。

ZrO₂作为一种具有宽带隙和大导带偏移的高 k 过渡金属氧化物,同时,当 ZrO₂作为中间层时,因其热力学稳定性高、组成简单和半导体工艺兼容性好等优异的性能,在忆阻器领域受到广泛的关注。2012 年, Lin 等人采用磁控溅射法分别在多种温度下完成了 Al/ZrO₂/Pt 结构样品的制备,并发现通过室温沉积的 ZrO₂薄膜中具有最高的非晶格氧含量,从而提高了器件良率,并观察到了稳定的开关行为和较长的保持时间[9]。与此同时,在忆阻器领域对于双层异质结的研究也不在少数,例如 ZrO₂/ZTO [10]、SiO₂/ZrO₂ [11]和 TiO₂/ZrO₂ [12]等。这类忆阻器器件具有寿命长、耐久性高、良好的电阻开关比等优点。Ismail 等人表明,通过在 ZrO₂薄膜上添加一层超薄的 a-ZTO 层,器件具有稳定和可控的电阻开关来更好地复制突触的功能[10]。上述研究大部分基于电阻开关,对异质结在神经形态器件的研究较少。

基于上述问题,本文采用磁控溅射法制备了 Au/ZrO₂/ZnO/ITO/Glass 人工突触器件,并用于生物突触可塑性的各种研究。其中包括短期可塑性、长期可塑性和成对脉冲促进行为[13][14]。研究表明,基于 ZrO₂/ZnO 的人工突触器件具有良好的突触可塑性。此外,由该突触设备构建的卷积神经网络(CNN)对手写数字数据集和时尚服装数据集展示出良好的识别率。这些结果提示了我们制备的人工突触器件在神经网络中的应用潜力。

2. 实验部分

在本次研究中,我们使用磁控溅射法制备 ZrO₂薄膜和 ZnO 薄膜,成功制备了 Au/ZrO₂/ZnO/ITO/Glass 忆阻器器件。其中 Au 作为顶电极, ZrO₂/ZnO 作为中间层, ITO/Glass 作为忆阻器的衬底和底电极。具体步骤表述如下。首先,对衬底进行超声清洗,将清洗后的基底置于镀膜仓中,随后分别溅射 ZrO₂薄膜和

ZnO 薄膜。实验参数如下：对于 ZnO 薄膜，纯度为 99.9% ZnO 靶材，氩气流量为 45 sccm，压力为 0.5 pa，射频功率为 60 W，溅射时间为 0.5 h。对于 ZrO₂ 薄膜，纯度为 99.9% ZrO₂ 靶材，氩气流速为 24 sccm，氧气流速为 6 sccm，压力为 1 pa，射频功率为 100 W，溅射时间为 1 h。最后，用高真空涂层机在样品表面沉积一层金电极作为顶电极。

使用扫描电子显微镜(SEM)(ZEISS GeminiSEM 300, 德国)观察薄膜的表面和横截面形貌。采用半导体参数分析仪(Keithley 2400)检测样品的人工突触特性。

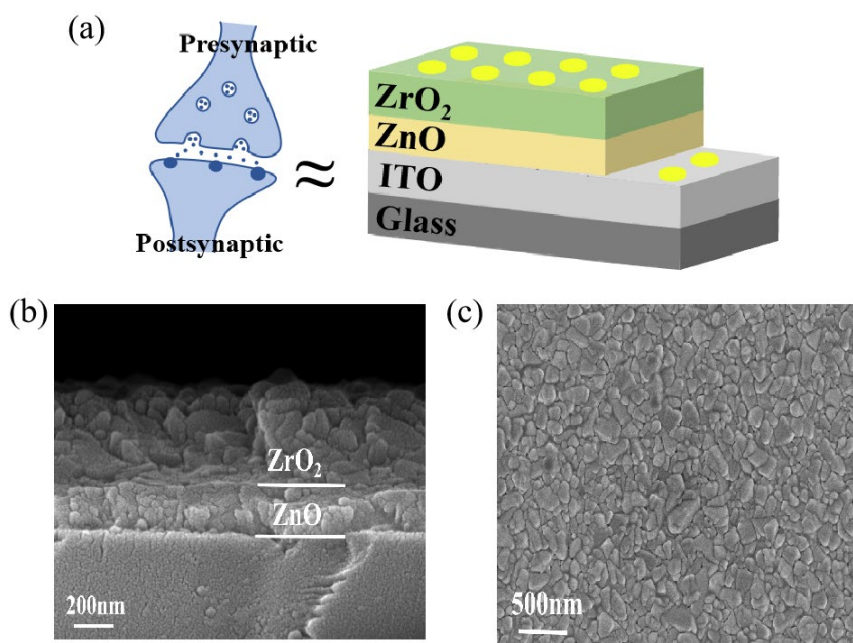


Figure 1. (a) Schematic diagram of Au/ZrO₂/ZnO/ITO/Glass structure; (b) SEM image of the cross-section of ZrO₂/ZnO film; (c) SEM image of the surface of ZrO₂/ZnO film

图 1. (a) Au/ZrO₂/ZnO/ITO/Glass 结构示意图; (b) ZrO₂/ZnO 薄膜横截面的 SEM 图像; (c) ZrO₂/ZnO 薄膜表面的 SEM 图像

3. 结果与讨论

3.1. 器件的结构和阻变性能研究

图 1(a)为该人工突触的结构示意图；图 1(b)和图 1(c)为 ZrO₂/ZnO 薄膜的 SEM 横截面和表面图像。从横截面图可以看到薄膜分层明显而平整。表面形貌密实、光滑，无明显缺陷。ZrO₂ 薄膜厚度约为 435.5 nm，ZnO 薄膜厚度约为 192.2 nm。

对于人工突触器件来说，当给予电压脉冲时，随着氧离子和电子的迁移，器件的电导率会发生变化。具体来说，忆阻器的上下电极类似于突触的前后膜，中间功能层类似于突触间隙中的神经递质。当受到外界刺激时，突触可以调节神经递质和钠、钾、钙、氯离子的运动和吸收。同样，忆阻器可以调节功能层中离子、电子、空位或缺陷的漂移和扩散，以实现其各自特性的变化[15]-[17]。图 2(a)为电压 - 电流(I-V)曲线。施加的电压顺序如下：0 V→2 V→0 V→-2 V→0 V。实验结果表明，在扫描过程中，器件将从高阻态(HRS)变为低阻态(LRS)，然后返回到高阻态(HRS)。此外，该器件具有良好的稳定性和重复性，如图 2(b)所示，在 1000 次循环中，电阻开关比稳定在一个数量级以上。在阻变过程中，我们对 Au 顶电极施加正电压时，带正电荷的氧空位从 ZrO₂ 层向下漂移到 ZnO 层，并进一步迁移到底电极形成导电细丝。同

时, 氧离子向 Au 顶电极移动。器件逐渐从 HRS 转变为 LRS。相应地, 当对 Au 顶电极施加负电压时, 由于氧离子的运动和氧空位的重新填充, 导电细丝断裂。这使得器件逐渐从 LRS 转变为 HRS [12] [18] [19]。为了深入探讨阻变性能的传导机理, 对器件的 I-V 曲线进行进一步分析。图 2(c)和图 2(d)分别对应于正向偏置电压和负向偏置电压下的双 $\log(I)$ - $\log(V)$ 图。如图 2(c)所示, 器件的初始状态为 HRS, 当电压较低时, HRS 斜率为 1.0, 这属于欧姆导电机理。在 HRS 时, 注入电荷较少, 这些注入电荷将被氧空位捕获。漂移电流在器件中占主导地位。随着施加的电压增加, 器件的斜率逐渐升高至 2.3, 这对应空间电荷限制电流(SCLC)导电机理。随后, 在高电压区域, 斜率分别为 8.4 和 5.4, 此时可以认定为缺陷被填满的空间电荷限制电流导电机理。这主要是因为随着电压的增加, 注入的电子将填满所有的氧空位。相应地, 斜率急剧增加。该器件也逐渐由 HRS 转变为 LRS。在低压区域, 斜率降回 1.3, 为欧姆导电机理。此时施加的电压不能使电子穿过由 Au 和 ZrO_2 形成的肖特基势垒。如图 2(d)所示, LRS 的斜率为 1.3, 随着施加电压的极性反转, 负偏置电压将电子从氧空位中释放出来。在高电压区域, 斜率分别为 2.7 和 2.1, 随着氧空位中的电子逐渐被完全释放, 该设备从 LRS 转换为 HRS。最后随着施加的电压逐渐减小, 导电机理转变为欧姆导电机理[20] [21]。

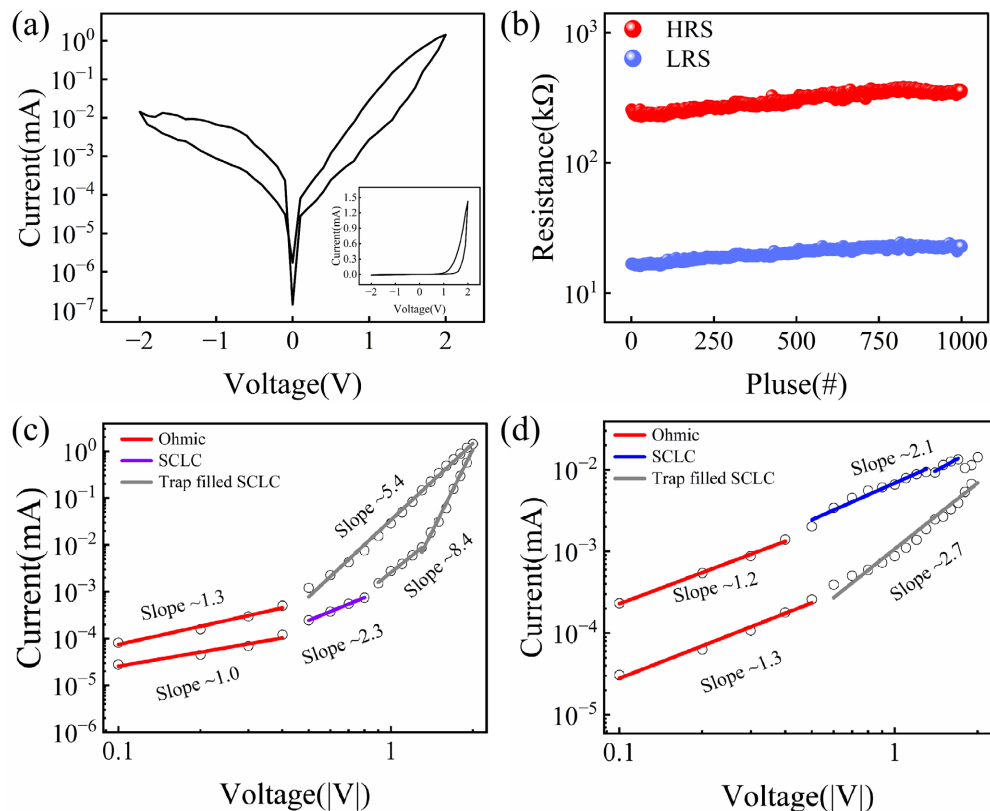


Figure 2. (a) Single log I-V measurement curve of device; (b) Resistance of HRS and LRS in 1000 consecutive voltage sweeping cycles on device; (c) Log(I)-log(V) plots of device under positive voltage; (d) Log(I)-log(V) plots of device under negative voltage

图 2. (a) 器件的单对数 I-V 测量曲线; (b) 器件上连续 1000 次电压扫描循环中的 HRS 和 LRS 的电阻; (c) 正电压下器件的(c) $\log(I)$ - $\log(V)$ 图; (d) 负电压下器件的 $\log(I)$ - $\log(V)$ 图

3.2. 器件的短期突触性能研究

突触连接强度(突触权重)定义了一个神经元通过突触发送到另一个神经元的信号的强度, 或突触

携带信号的能力。研究表明,该器件可以模拟广泛的突触活动。短期突触可塑性是指短时间内突触对刺激反应的变化。通过调节突触的传输效率,可以快速增强或减弱信号的传输,这对神经网络的动态调控和信息处理至关重要[22][23]。

图3显示了 Au/ZrO₂/ZnO/ITO/Glass 器件在三角波电压扫描下的短期增强(STP)和短期抑制(STD)效应。如图3(a)和图3(b)所示,施加的三角波振幅为2V,当提供正三角波电压时,电导率逐渐增大。相反地,当提供一个负三角波电压时,电导率逐渐下降。这可与生物突触的 STP 和 STD 相媲美。

为了进一步探索短期突触可塑性,将模拟另外一种不同形式的短期可塑性:成对脉冲促进行为(PPF)。PPF 主要涉及短期内神经递质释放的变化[13][14]。PPF 被定义为在短时间内以相同强度的连续给予两个连续的刺激。与第一个刺激相比,第二个刺激产生一个振幅更大的动作电位或突触后电位。在这里,我们施加两个连续的脉冲电压来模拟 PPF。其中,独立记录第一次电流响应(I_1)和第二次电流响应(I_0)。测试示意图3(c)所示。PPF index 由公式(1)计算。实验结果表明,随着时间间隔的逐渐变大,PPF index 从 143% 迅速下降到 9%,如图3(d)所示。本实验很好地模拟了 PPF 的行为,在短时间内,随着时间间隔的增加,突触后膜受到的刺激逐渐减少,导致突触逐渐恢复到初始状态。PPF 与时间间隔的关系用方程(2)进行拟合,其中, A_1 和 A_2 是常数。弛豫时间 τ_1 为 0.553 s, τ_2 为 0.676 s。

$$\text{PPF index} = \frac{I_1 - I_0}{I_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{PPF} = A_1 \exp\left(-\frac{X}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{X}{\tau_2}\right) \quad (2)$$

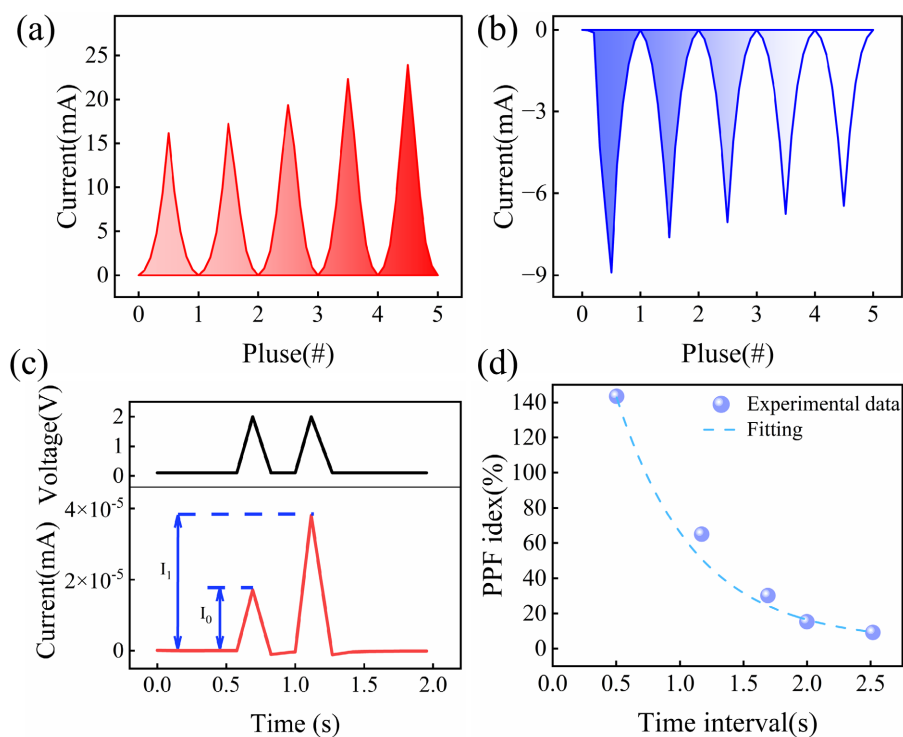


Figure 3. ((a) (b)) STP and STD effects of the device under triangular wave voltage scanning; (c) PPF test diagram; (d) Relationship between PPF and time interval

图3. ((a) (b)) 器件在三角波电压扫描下的 STP 和 STD 效应; (c) PPF 测试示意图; (d) PPF 与时间间隔的关系

3.3. 器件的长期突触性能研究

长期突触可塑性是长期记忆的形成和维持的必要基础。从 STP 到 LTP 的转变可以通过长时间反复刺激设备来实现。长期增强(LTP)和长期抑制(LTD)是调节突触权重的关键[24] [25]。

在这里,我们将通过以下两种测试方法来模拟长期突触可塑性。如图 4(a)和图 4(b)所示,分别对器件施加振幅为 2 V、脉冲宽度为 500 ms、间距为 500 ms 的方波脉冲。可以观察到,当施加正向电压时,器件的电流信号可以持续增加 120 s,相反地,当施加反向电压时,电流信号可以持续减少 120 s。此外,如图 4(c)所示,对器件分别连续施加振幅为 2 V 的电压刺激,并分别持续 5 s。经过五个循环后发现, LTP 和 LTD 曲线变化很小,表明了该器件良好的稳定性和重复性。最后,如图 4(d)所示,我们对第一个循环的电导率进行归一化处理,并分别求出 LTP 的非线性度 A_p 为 3.42, LTD 的非线性度 A_d 为 4.64。这将为下一部分神经网络的权值更新作铺垫。

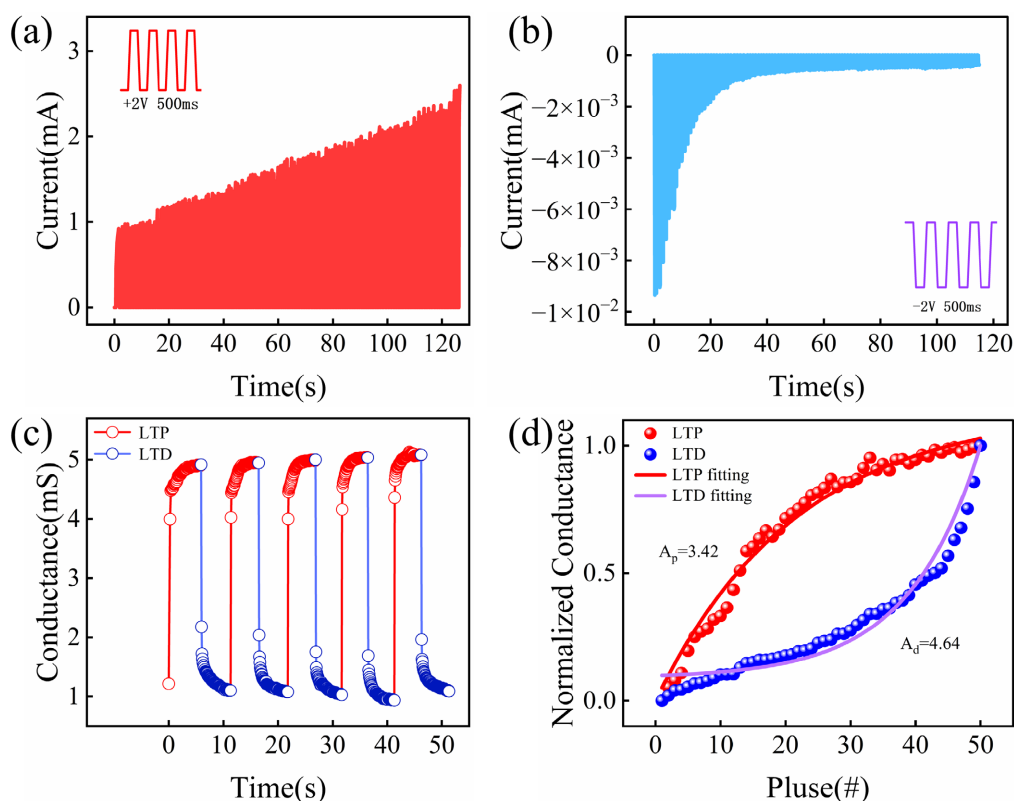


Figure 4. (a) Long-term enhancement characteristics of the device; (b) Long-term suppression characteristics of the device; (c) LTP/LTD characteristics of the device in 5 cycles; (d) Normalized conductivity changes applied to neural networks

图 4. (a) 器件的长期增强特性; (b) 器件的长期抑制特性; (c) 器件在 5 个循环内的 LTP/LTD 特性; (d) 应用于神经网络的归一化电导率变化

3.4. 器件的神经网络应用

本文构建了一个卷积神经网络(CNN)对手写数字识别集和时尚服装识别集进行分类,以分析其在神经形态计算中的潜力[26] [27]。本研究基于经典卷积神经网络架构 LeNet-5 进行优化设计,如图 5(a)所示。在神经网络完成两个卷积层和池化层操作后,生成的特征进行扁平化处理。最终由全连接层输出一个十维向量。该架构在维持高效计算效率的同时,能够充分提取并优化输入数据的核心特征,为后续的认识

任务提供了可靠的保障。图 5(b)为两种数据集的部分训练样本示意图。如图 5(c)所示, 经过 100 次迭代的训练, 对于手写数字数据集的识别率达到 96.6%, 对于时尚服装数据集的识别率达到 71.1%。在对于服装数据集的识别任务中, 我们能发现识别率不稳定, 这可能是因为我们的 LTP/LTD 的非线性度不够好, 良好的非线性权重更新, 对于改善神经网络的准确率具有重要的影响。未来我们将尝试调制出新的输入脉冲(例如变幅脉冲)来得到更加理想的长期数据, 以此提高数据的非线性度。最后我们所制备的器件显示了该器件在神经形态计算方面的巨大前景, 并提供了一条可行的途径来构建一个高效率的神经形态网络。

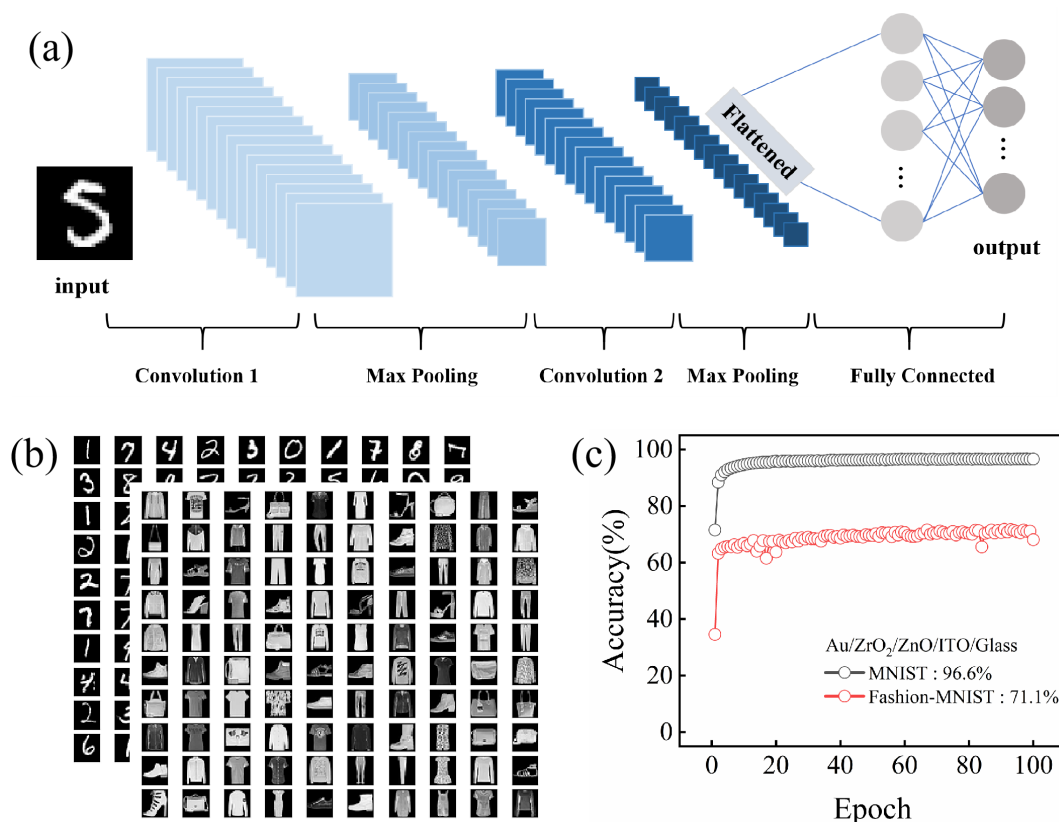


Figure 5. (a) CNN network structure; (b) Training sample diagram of two data sets; (c) Recognition accuracy
图 5. (a) CNN 网络结构; (b) 两种数据集的训练样本示意图; (c) 识别精度

4. 总结

本文采用磁控溅射法制备了 Au/ZrO₂/ZnO/ITO/Glass 人工突触器件。研究了该器件的 I-V 特性, 同时, 该器件还具有稳定且可重复的电阻开关比。此外, 通过对器件施加不同的电压研究了器件的突触可塑性, 包括短期可塑性、长期可塑性和成对脉冲促进行为。最后, 该器件对于手写数字数据集和时尚服装数据集的识别率分别达到了 96.6% 和 71.1%。这些结果表明, 我们的人工突触器件在神经网络中的应用潜力, 为未来建立有效的神经形态计算系统提供了一条有效的途径。

参考文献

- [1] LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G. (2015) Deep learning. *Nature*, **521**, 436-444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- [2] Yao, P., Wu, H., Gao, B., Tang, J., Zhang, Q., Zhang, W., *et al.* (2020) Fully Hardware-Implemented Memristor Convolutional Neural Network. *Nature*, **577**, 641-646. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1942-4>
- [3] Xu, Z., Li, Y., Xia, Y., Shi, C., Chen, S., Ma, C., *et al.* (2024) Organic Frameworks Memristor: An Emerging Candidate for

- Data Storage, Artificial Synapse, and Neuromorphic Device. *Advanced Functional Materials*, **34**, Article ID: 2312658. <https://doi.org/10.1002/adfm.202312658>
- [4] Zidan, M.A., Strachan, J.P. and Lu, W.D. (2018) The Future of Electronics Based on Memristive Systems. *Nature Electronics*, **1**, 22-29. <https://doi.org/10.1038/s41928-017-0006-8>
 - [5] Kumar, D., Chand, U., Wen Siang, L. and Tseng, T. (2020) High-Performance TiN/AL₂O₃/ZnO/AL₂O₃/TiN Flexible RRAM Device with High Bending Condition. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **67**, 493-498. <https://doi.org/10.1109/ted.2019.2959883>
 - [6] Fan, S., Wu, E., Cao, M., Xu, T., Liu, T., Yang, L., *et al.* (2023) Flexible In-Ga-Zn-N-O Synaptic Transistors for Ultralow-Power Neuromorphic Computing and EEG-Based Brain-Computer Interfaces. *Materials Horizons*, **10**, 4317-4328. <https://doi.org/10.1039/d3mh00759f>
 - [7] Huh, W., Lee, D. and Lee, C. (2020) Memristors Based on 2D Materials as an Artificial Synapse for Neuromorphic Electronics. *Advanced Materials*, **32**, Article 2002092. <https://doi.org/10.1002/adma.202002092>
 - [8] Raifuku, I., Chao, Y., Chen, H., Lin, C., Lin, P., Shih, L., *et al.* (2021) Halide Perovskite for Low-Power Consumption Neuromorphic Devices. *EcoMat*, **3**, e12142. <https://doi.org/10.1002/eom2.12142>
 - [9] Lin, C., Chang, Y., Lin, H. and Lin, C. (2012) Effect of Non-Lattice Oxygen on ZrO₂-Based Resistive Switching Memory. *Nanoscale Research Letters*, **7**, Article No. 187. <https://doi.org/10.1186/1556-276x-7-187>
 - [10] Ismail, M., Abbas, H., Choi, C. and Kim, S. (2020) Controllable Analog Resistive Switching and Synaptic Characteristics in ZrO₂/ZTO Bilayer Memristive Device for Neuromorphic Systems. *Applied Surface Science*, **529**, Article ID: 147107. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147107>
 - [11] Lee, D., Sokolov, A.S., Ku, B., Jeon, Y., Ho Kim, D., Tae Kim, H., *et al.* (2021) Improved Switching and Synapse Characteristics Using PEALD SiO₂ Thin Film in Cu/SiO₂/ZrO₂/Pt Device. *Applied Surface Science*, **547**, Article ID: 149140. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149140>
 - [12] Liu, H., Tang, X., Liu, Q., Jiang, Y., Li, W., Guo, X., *et al.* (2020) Bipolar Resistive Switching Behavior and Conduction Mechanisms of Composite Nanostructured TiO₂/ZrO₂ Thin Film. *Ceramics International*, **46**, 21196-21201. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.201>
 - [13] Li, N., He, C., Wang, Q., Tang, J., Zhang, Q., Shen, C., *et al.* (2022) Gate-Tunable Large-Scale Flexible Monolayer MoS₂ Devices for Photodetectors and Optoelectronic Synapses. *Nano Research*, **15**, 5418-5424. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4122-z>
 - [14] Han, C., Han, X., Han, J., He, M., Peng, S., Zhang, C., *et al.* (2022) Light-stimulated Synaptic Transistor with High PPF Feature for Artificial Visual Perception System Application. *Advanced Functional Materials*, **32**, Article ID: 2113053. <https://doi.org/10.1002/adfm.202113053>
 - [15] Lin, W., Sun, B., Mao, S., Qin, J., Yang, Y., Liu, M., *et al.* (2025) Flexible Memristors for Implantable Applications. *ACS Applied Nano Materials*, **8**, 2073-2105. <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c06039>
 - [16] Park, H., Han, J., Yim, S., Shin, D.H., Park, T.W., Woo, K.S., *et al.* (2025) An Analysis of Components and Enhancement Strategies for Advancing Memristive Neural Networks. *Advanced Materials*, **37**, Article ID: 2412549. <https://doi.org/10.1002/adma.202412549>
 - [17] Wang, K., Wang, M., Sun, B., Yang, C., Cao, Z., Wu, T., *et al.* (2025) An Innovative Biomimetic Technology: Memristors Mimic Human Sensation. *Nano Energy*, **136**, Article ID: 110698. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2025.110698>
 - [18] Zhai, H., Kong, J., Yang, J., Xu, J., Xu, Q., Sun, H., *et al.* (2016) Resistive Switching Properties and Failure Behaviors of (Pt, Cu)/Amorphous ZrO₂/Pt Sandwich Structures. *Journal of Materials Science & Technology*, **32**, 676-680. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.03.011>
 - [19] Ismail, M., Rahmani, M.K., Khan, S.A., Choi, J., Hussain, F., Batool, Z., *et al.* (2019) Effects of Gibbs Free Energy Difference and Oxygen Vacancies Distribution in a Bilayer ZnO/ZrO₂ Structure for Applications to Bipolar Resistive Switching. *Applied Surface Science*, **498**, Article ID: 143833. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143833>
 - [20] Kawauchi, T., Kano, S. and Fujii, M. (2019) Electrically Stimulated Synaptic Resistive Switch in Solution-Processed Silicon Nanocrystal Thin Film: Formation Mechanism of Oxygen Vacancy Filament for Synaptic Function. *ACS Applied Electronic Materials*, **1**, 2664-2670. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.9b00625>
 - [21] Liu, Q., Long, S., Wang, W., Zuo, Q., Zhang, S., Chen, J., *et al.* (2009) Improvement of Resistive Switching Properties in ZrO₂-Based ReRAM with Implanted Ti Ions. *IEEE Electron Device Letters*, **30**, 1335-1337. <https://doi.org/10.1109/led.2009.2032566>
 - [22] Payeur, A., Guerguiev, J., Zenke, F., Richards, B.A. and Naud, R. (2021) Burst-Dependent Synaptic Plasticity Can Coordinate Learning in Hierarchical Circuits. *Nature Neuroscience*, **24**, 1010-1019. <https://doi.org/10.1038/s41593-021-00857-x>
 - [23] Liu, Q., Yin, L., Zhao, C., Wu, Z., Wang, J., Yu, X., *et al.* (2022) All-in-One Metal-Oxide Heterojunction Artificial Synapses for Visual Sensory and Neuromorphic Computing Systems. *Nano Energy*, **97**, Article ID: 107171.

-
- <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107171>
- [24] Zhang, W., Pan, L., Yan, X., Zhao, G., Chen, H., Wang, X., *et al.* (2021) Hardware-Friendly Stochastic and Adaptive Learning in Memristor Convolutional Neural Networks. *Advanced Intelligent Systems*, **3**, Article ID: 2100041. <https://doi.org/10.1002/aisy.202100041>
- [25] Zhong, W., Tang, X., Bai, L., Chen, J., Dong, H., Sun, Q., *et al.* (2023) A Halide Perovskite Thin Film Diode with Modulated Depletion Layers for Artificial Synapse. *Journal of Alloys and Compounds*, **960**, Article ID: 170773. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170773>
- [26] Li, C., Belkin, D., Li, Y., Yan, P., Hu, M., Ge, N., *et al.* (2018) Efficient and Self-Adaptive *in-Situ* Learning in Multilayer Memristor Neural Networks. *Nature Communications*, **9**, Article No. 2385. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04484-2>
- [27] Zhang, W., Yao, P., Gao, B., Liu, Q., Wu, D., Zhang, Q., *et al.* (2023) Edge Learning Using a Fully Integrated Neuro-Inspired Memristor Chip. *Science*, **381**, 1205-1211. <https://doi.org/10.1126/science.ade3483>