

钛酸钙基忆阻器的多态信息传输在神经形态计算中的应用

刘伟斌, 肖 阳, 唐新桂*

广东工业大学物理与光电工程学院, 广东省传感物理与系统集成应用重点实验室, 广东 广州

收稿日期: 2026年3月19日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月9日

摘 要

集成电路的工艺技术已进入发展瓶颈期, 进一步实现高计算能力集成已成为一项重大挑战。在这项工作中, 基于层状钙钛矿结构的 $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ 的神经形态器件已被开发出来, 而界面缺陷状态主导的载流子弛豫为实现具有突触控制能力的离子动力学提供了一条可靠的途径。测试结果表明, 该结构具有与人工突触相似的电流增益/抑制特性, 并且这种稳健的突触生长可控性可用于多比特信息处理的实现, 相对传统计算架构可提供超高的单位信息处理集成度的能力。神经网络中卷积图像处理的96.8%的识别准确率体现了其计算潜力, 有望超越冯·诺依曼系统的框架。

关键词

$\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜, 人工突触, 神经形态计算

Multi-State Information Transfer Based on $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ Memristor in the Application of Neuromorphic Computing

Weibin Liu, Yang Xiao, Xingui Tang*

Guangdong Provincial Key Laboratory of Sensing Physics and System Integration Applications, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

Received: March 19, 2026; accepted: May 2, 2026; published: May 9, 2026

Abstract

The process technology of integrated circuits has entered a developmental plateau, and further

*通讯作者。

文章引用: 刘伟斌, 肖阳, 唐新桂. 钛酸钙基忆阻器的多态信息传输在神经形态计算中的应用[J]. 应用物理, 2026, 16(5): 439-446. DOI: 10.12677/app.2026.165040

advancement of high-computing power integration has become a major challenge. In this work, neuromorphic devices based on Ruddlesden-Popper (RP) structured $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ have been developed, and the interface defect state-dominated carrier relaxation provides a reliable pathway to achieve synaptically controllable ionic dynamics. Test results show that the structure has current gain/suppression characteristics similar to those of artificial synapses, and this robust synaptic growth controllability can be utilized for the realization of multi-bit information processing. Compared with traditional computing architectures, it offers the ability to achieve an extremely high unit information processing integration rate. The 96.8% recognition accuracy of convolutional image processing in neural networks exemplifies the computational potential that promises to exceed the framework of von Neumann systems.

Keywords

$\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ Film, Artificial Synapse, Neuromorphic Computing

Copyright © 2026 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

微电子技术的快速发展正逐渐逼近摩尔定律的极限，如何开发高密度的信息集成芯片，以获得更高的计算能力来应对大数据计算的更高需求，已成为实时研究的热点之一。人类大脑中具备的大量并行计算能力和自主可塑性学习为解决这一问题提供了可靠思路，而突触作为构建人类大脑的基本单元，对于实现神经形态计算网络至关重要[1]-[3]。新型电子器件可用于模拟突触活动，例如双脉冲促进(PPF)、双脉冲抑制(PPD)、长期增强(STP)、长期抑制(LTP)，并且还能进一步朝着可控的经验性学习可塑性发展[4][5]。目前，诸如钽钛氧和锆钛氧这类硫族化合物薄膜材料已被报道可用于制备能够模拟神经元功能的神经形态器件，而基于硫族化合物材料的诸如铁电二极管、忆阻器和隧道晶体管等机制所产生的突触效应也已得到了广泛研究[6]-[9]。

然而，利用由模拟突触可塑性产生的广泛多导电状态进行的信息编码仍面临诸多挑战，例如连续突触可塑性的表现不佳、可调电位状态的数量较少以及无法保证信息传导的可靠性。Ruddlesden-Popper (RP) 结构的硫族化合物氧化物相较于单层结构材料具有更高的性能突破潜力，这是由于其独特的晶体结构所决定的[10]-[12]。在此，我们制备了首个 $\text{Au}/\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7/\text{Si}$ 结构的薄膜晶体管，并且该器件的测试结果不仅证明了突触单元的基本活性功能，如脉冲频率放大、脉冲频率减小、连续脉冲学习记忆和连续脉冲衰减的存在，而且还展示了在多个状态中可靠的信息编码传导。要实现这些功能，就必须对中间的钙钛矿功能层进行精心设计，该层与晶体内部的物理相结构、异质接触表面的扩散屏障以及界面处的载流子捕获和释放密切相关。为了验证这些突触可塑性功能在神经网络中的实用性，构建了一个模拟真实神经网络的卷积神经网络平台，并在不同的图像识别项目中取得了良好的验证结果。这些研究的结果将为从另一个维度整合高密度算力增强提供新的解决方案。

2. 实验

2.1. CTO 薄膜的制备

在本次实验中，通过溶胶-凝胶路线并采用旋转涂覆工艺制备了 $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ (简称为 CTO) 薄膜。所使

用的起始原料为醋酸钙一水合物 $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和钛酸丁酯 $\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$ 。溶剂选用了甲醇 CH_3OH 和乙酸 CH_3COOH , 乙酰丙酮 $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ 作为稳定钛酸酯基的试剂。首先分别将醋酸钙溶解在加热后的乙酸中, 将钛酸丁酯溶解在甲醇中。接着将钙-钛混合溶液混合, 并在 70°C 下搅拌 30 分钟, 加入适量乙酰丙酮以稳定溶液。然后继续搅拌 30 分钟, 无需回流和高温蒸馏去结晶水。最终溶液的浓度可通过添加甲醇和乙酸调整至 0.2 M, pH 值为 3。整个前驱体溶液的制备过程是在常温环境下进行的。溶液在六个月的保存期内稳定, 未出现沉淀现象。

在将溶液涂覆到基底之前, 需先通过滤纸上的多孔部位进行过滤, 以避免颗粒污染。样品的热处理过程是在热板和快速热退火(RTA)炉中完成的。通过以 3600 转/分钟的速度进行 30 秒的涂覆操作, 将 CTO 薄膜的涂层溶液沉积到 n 型 Si(100)基底上。每次涂覆过程结束后, 均在空气环境中使用热板将样品在 350°C 下热处理 10 分钟。此步骤重复多次以获得所需的薄膜厚度。在 Si 基底上的 CTO 薄膜在氧气氛围中以 $100^\circ\text{C}/\text{s}$ 的加热速率通过 RTA 方法在 750°C 下进行退火 10 分钟。最后, 通过离子溅射仪器镀上金电极, 从而完成 Au/CTO/Si(100)忆阻器的制备。

2.2. 性能表征

为验证这些突触可塑功能在神经网络中的实用性, 搭建了用于仿真的卷积神经网络平台, 结果显示器件电位态在不同的图像识别项目中均取得不错的验证结果。这些薄膜的晶体结构通过广角 X 射线衍射仪(XRD, D8Advance, 布鲁克公司)进行了表征。器件的表面和横截面通过扫描电子显微镜(SEM, 日立, SU8220)来展示。CTO 薄膜器件的电学和突触特性通过半导体参数分析仪(吉时利 2400)进行测量。

3. 结果与讨论

3.1. 结构与形貌分析

图 1(a)展示了该装置的原理图结构, 该结构在两端的金电极处施加电压信号后由凯利特 2400 数字源表读取, 而中间的功能层由 $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ 组成, 底部则由 P 型硅组成。从图 1(b)的 XRD 结果来看, 这些薄膜在位于 001 方向($l = 4, 10, 14, 16$)的方向上具有多个明确的强峰, 表明在生长的 $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜中进行了 C 轴的优先晶体取向。从空间群 $A21am$ 分析 $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ 的晶体结构, 其晶格常数为 $a = 5.4172 \text{ \AA}$ 、 $b = 5.4234 \text{ \AA}$ 、 $c = 19.4169 \text{ \AA}$, 在室温下表现出正交对称性[12]。

其中, 在 116 和 1110 方向上还发现了衍射峰, 这表明所制备的样品符合 $\text{CaTiO}_3(\text{CaO})\text{CaTiO}_3$ 多晶薄膜在 RP 结构($A_{n+1}B_nA_{n+1}$)中的特性。通过扫描电子显微镜对 CTO 薄膜的表面和横截面进行了表征, 如图 1(c)所示, 通过两次均匀化操作沉积的薄膜没有明显的缺陷迹象, 如裂缝、孔洞、凹陷等, 同时还有均匀的晶粒生长和表面平整度, 这有效地避免了由于薄膜生长中的缺陷而导致的电学信号不稳定[13][14]。图 1(d)是薄膜的断面图, 可以看到功能层的厚度更加均匀, 与基底的接触紧密, 这可以最大程度地保证测试中电位的均匀性和器件的可靠性, 并且右下角的标尺可以分析显示整个功能层的厚度约为 70 nm。

3.2. 突触特性

钛酸钙薄膜构建的双端器件中, 顶部的金电极和底部的硅衬底分别被用作前突触和后突触膜的替代物, 它们主要起到驱动电荷分离和接收的作用, 而中间功能层的构建则起到了突触间隙的作用, 在微电子器件中起到电荷传输、捕获和域限制的作用。材料界面处存在缺陷势阱, 它能够有效地填充电子-空穴对的束缚, 延长少数载流子的寿命, 并维持在连续刺激电位下的电荷弛豫电流增益[15]-[17]。

图 2(a)和图 2(c)分别表示模拟的双脉冲抑制(PPD)和双脉冲易化(PPF)现象, 增长指数为 110.39%, 衰落指数为 92.75%, 优于同类工作的性能指标[1][7]。PPD 和 PPF 指数的计算公式分别如下:

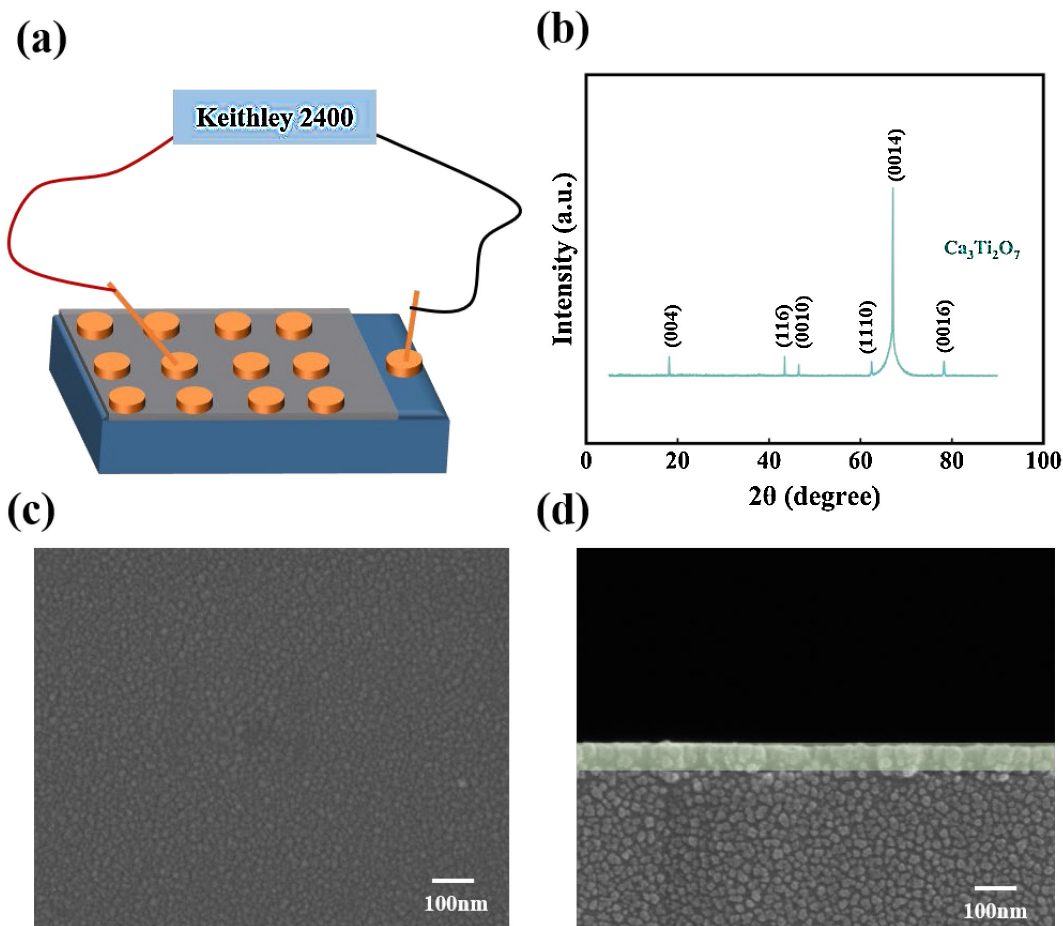


Figure 1. (a) Schematic diagram of the measurement; (b) XRD spectra of CTO films; (c) SEM surface and (d) cross-section morphology of films

图 1. (a) 测量示意图; (b) CTO 薄膜的 XRD 图; (c) (d) 薄膜的扫描电镜表面与断面图

$$PPD = \frac{A_1 - A_2}{A_2} \times 100\% \tag{1}$$

$$PPF = \frac{A_2 - A_1}{A_1} \times 100\% \tag{2}$$

图 2(b)和图 2(e)分别采用不同脉宽来模拟神经元的学习和遗忘活动特性, 从改变连续刺激电位的时间和方位两个维度层面研究材料内部可控离子动态。结果表明, 随着动作电位作用时长延长, 延续前一电流状态的同时将产生抑制(增长)特性, 并且动态电流逐渐趋向饱和状态。图 2(d)在连续成对脉冲刺激下, 增长率从 14%降至 4%, 利用以下 PPF 的衰减指数计算可得神经元衰减的特征时间, 分别得到 τ_1/τ_2 值为 27/22。

$$PPF = C_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + C_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + y_0 \tag{3}$$

为了从连续刺激电位数量的角度研究对器件的仿生突触特性, 在 10、25、50 三种数量下进行测试, 其中同时插入 125 ms 的遗忘间隔。图 2(f)的测试结果显示, 经过遗忘间隔的下一个连续刺激电位仍能保持上一个连续刺激电位末端值, 这表明钛酸钙功能层的薄膜具有良好的电位记忆特性。此外, 还发现在

未达到电荷饱和之前, 载流子的弛豫时间较为稳定, 并且随着连续刺激次数增加, 增长率显著降低, 这是由于界面势陷阱被填补产生的结果[17]-[19]。

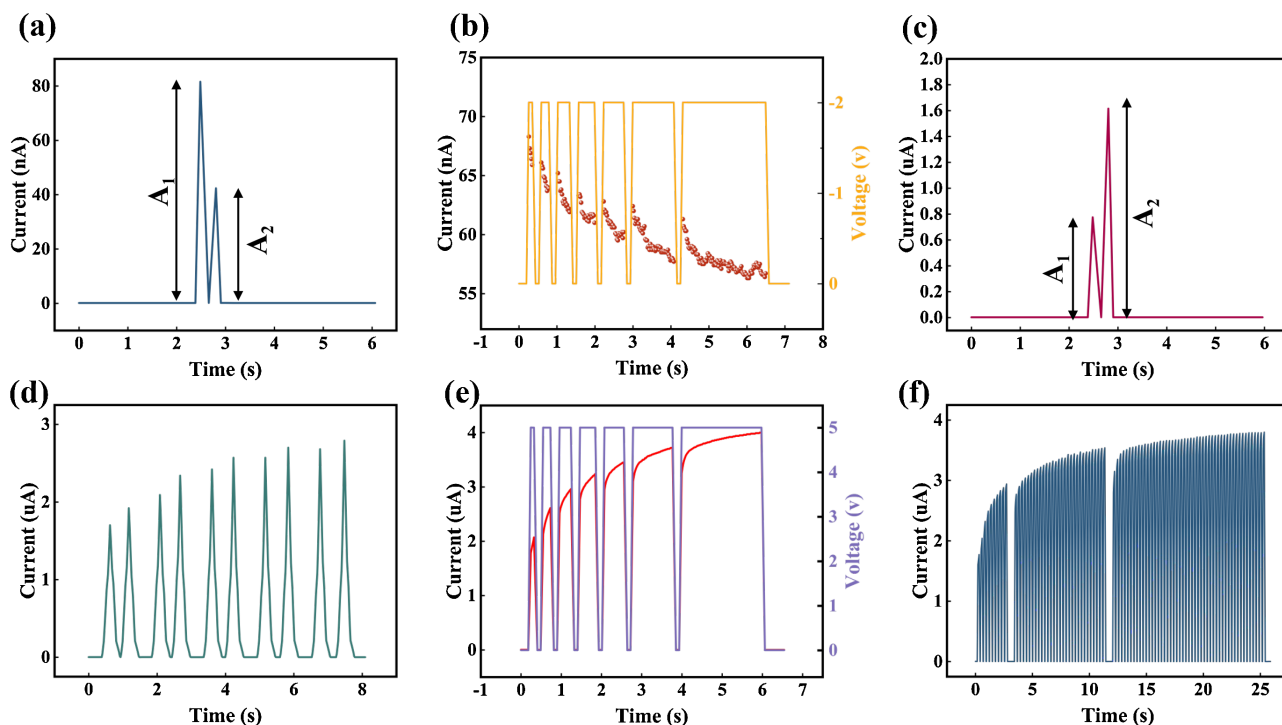


Figure 2. (a) PPD benefit under a pair of negative pulse stimulation; (b) Continuous decay characteristics of the current under applying negative pulses of different durations; (c) PPF benefit under a pair of positive pulses; (d) Continuous PPF benefits under pairs of positive pulses at different intervals; (e) Continuous growth characteristics of current under application of positive pulses of different durations; (f) Test results of current gain under different number of positive pulse stimulation

图 2. (a) 一对负脉冲刺激下的 PPD 效果; (b) 施加不同持续时间负脉冲下电流的连续衰减特性; (c) 一对正脉冲下的 PPF 效果; (d) 不同间隔下成对正脉冲的连续 PPF 效果; (e) 施加不同持续时间正脉冲下电流的连续增长特性; (f) 不同数量的正脉冲刺激下电流增益测试结果

3.3. 多态信息传输与神经形态计算特性

在掌握了电调人工突触的工作机制后, 利用这种强大的生长特性构建了一个八位导电状态信息编码。其 3 位存储和计算能力能够有效解决高度集成环境中的算术瓶颈问题, 相对于二进制信息码, 单位器件内可以提升 400% 的信息承载能力。在得到电可调谐人工突触的效应后, 利用这一稳健增长特性可以构建多位态的响应电流值。从图 3(a)可以看出, 通过首先在多次测试的结果下, 确立最佳的施加电压和脉冲间隔实现高线性度的可重构电位, 然后通过连续脉冲的电位的的增长特性构建了一个标准八位态对应表。图 3(b)~(e)的工作内容是首先分别将英文字母“G”、“D”、“U”、“T”进行八进制的数值转化, 然后将转化的数值兑换成对器件施加的脉冲个数, 最后将末电位对应标准对应表进行数字信息转化。实验结果表明功能层材料针对不同的外脉冲刺激数量仍能够展现准确和可重构的优异性能。

值得注意的是, 在写入下一个数字信息前, 施加 -0.1 V 的反向电压用来确保器件内部处于初始状态。这样使得界面电荷完全脱去捕获并且可以避免载流子的弛豫性能影响到多态信息的准确性和稳定性。总之, 实验结果表明在单个钛酸钙器件中无需复杂变化的脉冲信号就能够实现准确的多电位信息传导。

基于仿生突触可塑性能的神形态器件可与神经网络计算相结合, 在这里, 用 Python 语言在 Pycharm 集成开发环境下搭建了用于图像识别的验证平台, 利用 CTO 的连续多位态电流特性可以进行权重层的

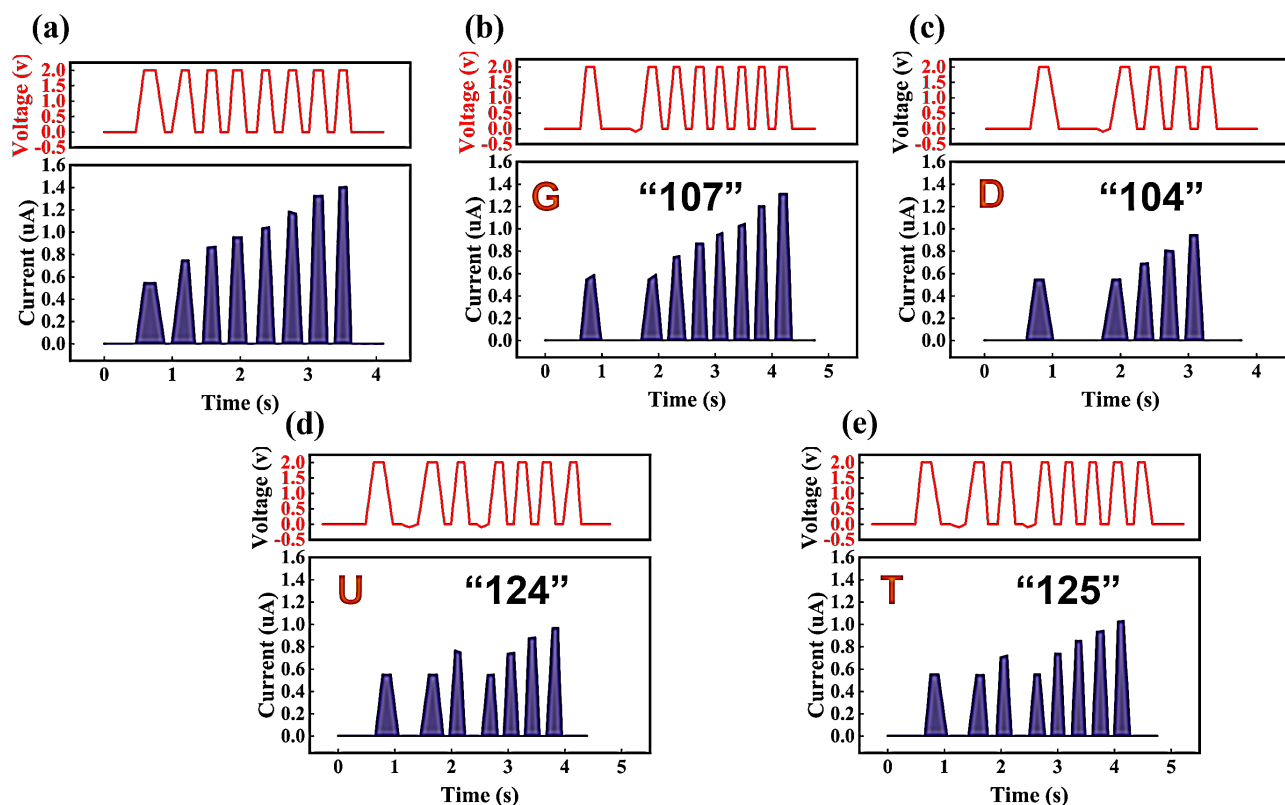


Figure 3. (a) Corresponding table of multipotentials generated under continuous 2 V pulse stimulation; (b)–(e) Letters “G”, “D”, “U”, and “T” were converted to their corresponding octal values, and current response results after stimulating the device using the corresponding number of pulses

图 3. (a) 连续 2 V 脉冲刺激下生成的多电位对应表; (b)–(e) 字母 “G”、“D”、“U”、“T” 转换成对应的八进制数值, 利用相应数量脉冲刺激器件后得出的电流响应结果

线性矩阵运算, 运算的数值结果通过转换和读取形式反映到对图形特征的提取能力[20][21]。图 4(a)展示的是在 Reset50 卷积神经网络模型的基础上进行修改的测试网络结构, 以来自 Flickr、Google images、Yandex images 花卉识别训练集为例进行测试。整个计算模型由五个卷积池化模块组成, 模块之间通过权重层进行数据处理与传输, 模拟了钛酸的突触特性为算术电路架构, 最终计算结果呈现出概率分布。图 4(b)是 Lenet-5 网络架构对混合国家标准与技术研究所(MNIST)进行识别测试的示意图, 该架构包含两个卷积层和两个最大池化层, 同样也是利用权重层对模型进行迭代更新。以上两个模型的权重运算层构架由钛酸钙的多电位信息数据组成, 最后计算的结果呈现概率分布。

如图 4(c)所示, 数字识别项目仅在 10 个训练循环上可突破 90%以上的准确率, 稳定后的最大识别准确度可达 96.8%, 对于更深度的花卉图像信息, 在经历过近 20 训练循环后也能取得最大准确率为 93.5%的不错结果。相对于手写字符识别项目, 花卉识别项目在识别准确率和学习速率上有所降低, 这是由于深度信息的提取转化对权重层有着更高的归一化要求所导致的。图 4(d)中我们列举了氧化物、二维材料、钙钛矿材料中较为典型的实验研究结果, 与之相比发现 RP 结构钛酸钙因其独特的原子结构对电学性能的调控, 呈现出作为神经形态器件在未来神经网络硬件架构应用中的优势和潜力[22][23]。

4. 结论

总之, 实验性地证明了 RP 结构的钙钛矿薄层晶体管具备模拟突触和连续可调电位的特性, 其独特的晶体结构能够调节界面缺陷, 从而使载流子传输更加稳定。在单个组件的突触模拟测试中, 成功实现

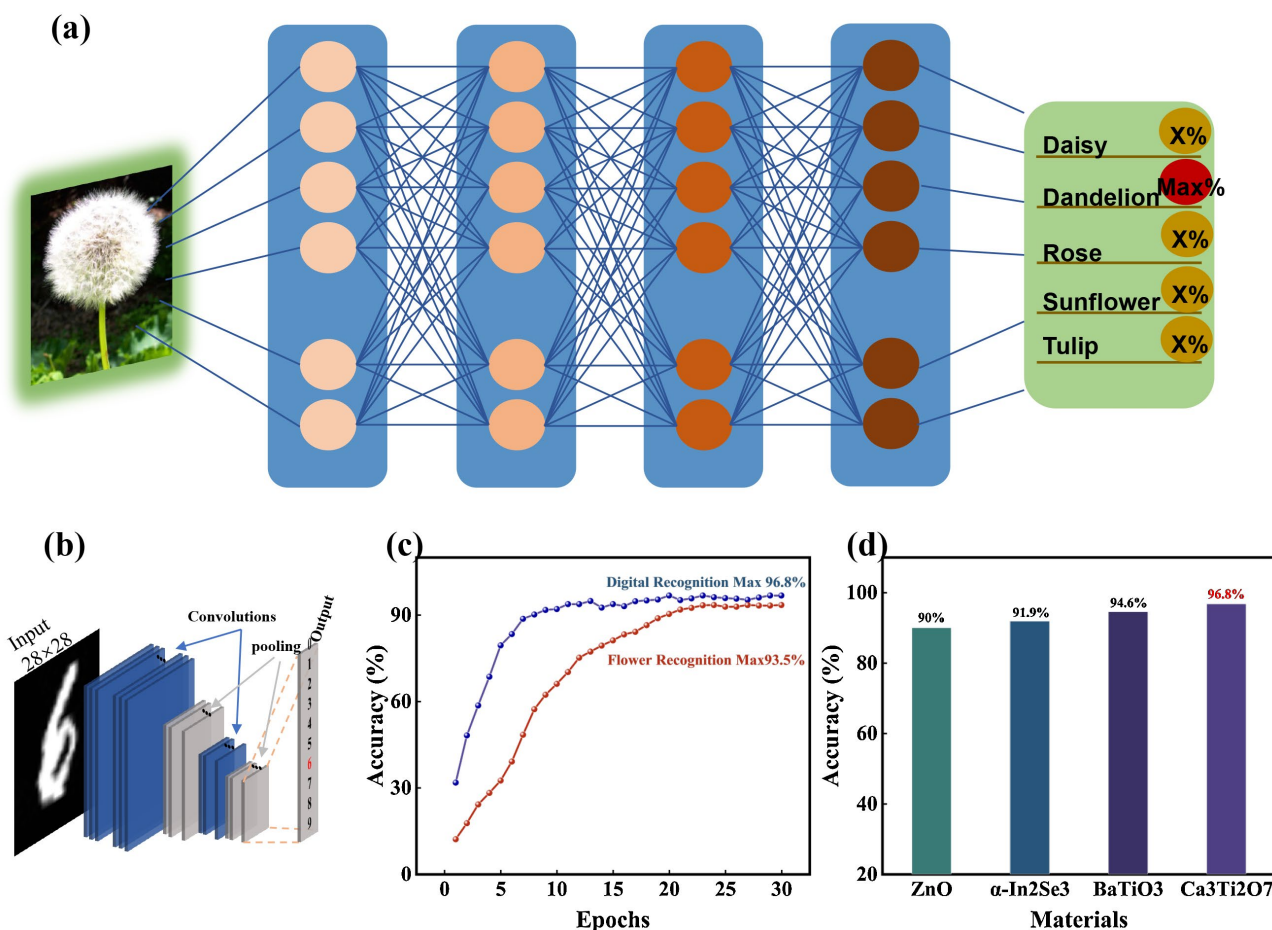


Figure 4. (a) Illustration of the flower recognition project in the convolutional neural network computing architecture; (b) Illustration of network architecture for handwritten digit recognition; (c) Neuromorphic properties of CTO transistor for digit recognition (blue line) and flower recognition (red line) operation results; (d) Computational accuracy of CTO transistors in neural networks with comparison results of several typical neuromorphic devices, such as ZnO, α -In₂Se₃, and BaTiO₃

图 4. (a) 花卉识别项目在卷积神经网络运算架构示意图; (b) 手写数字识别的网络架构图解; (c) CTO 晶体管神经形态特性对数字识别(蓝线)和花卉识别(红线)运算结果; (d) CTO 晶体管在神经网络中的运算精度与 ZnO、 α -In₂Se₃、BaTiO₃ 几种典型神经形态器件对比结果

了短时间间隔和长时间间隔下的生长和抑制特性。此外，在单个器件中产生的连续多个电位能够准确地读取信息代码。最后，在神经网络模拟环境的验证下，手写数字识别准确率达到 96.8%，花卉图像识别准确率达到 93.5%。这表明 RP 结构的 CTO 薄层晶体管作为神经形态器件在构建神经网络计算方面具有足够的可靠性。这些实验结果表明，RP 结构的 CTO 薄层晶体管为在单元集成环境中解决信息运算增强问题提供了一条有效的新途径。

基金项目

本研究得到了中国国家自然科学基金面上项目(编号: 12172093)和广东省基础与应用基础研究基金(编号: 2021A1515012607)的资助。

参考文献

- [1] Patel, M., Gosai, J., Lokhandwala, A. and Solanki, A. (2024) Slow Migration-Controlled Resistive Switching in Stable Dion-Jacobson Hybrid Perovskites for Flexible Memristive Applications. *ACS Applied Electronic Materials*, **6**, 587-598.

- <https://doi.org/10.1021/acsaelm.3c01638>
- [2] Wang, S., Song, L., Chen, W., Wang, G., Hao, E., Li, C., *et al.* (2023) Memristor-Based Intelligent Human-Like Neural Computing. *Advanced Electronic Materials*, **9**, Article 2200877. <https://doi.org/10.1002/aelm.202200877>
- [3] 陈嘉颖. 氧化锌基类脑器件以及神经形态计算[D]: [博士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2025.
- [4] Hu, H., Scholz, A., Singaraju, S.A., Tang, Y., Marques, G.C. and Aghassi-Hagmann, J. (2021) Inkjet-Printed Bipolar Resistive Switching Device Based on Ag/ZnO/Au Structure. *Applied Physics Letters*, **119**, Article 112103. <https://doi.org/10.1063/5.0058526>
- [5] Lin, J., Wang, S. and Liu, H. (2021) Multi-Level Switching of Al-Doped HfO₂ RRAM with a Single Voltage Amplitude Set Pulse. *Electronics*, **10**, Article 731. <https://doi.org/10.3390/electronics10060731>
- [6] Yang, D.P., Li, R.H., Tang, X.G., Li, D.L. and Sun, Q.J. (2025) Photoelectric Dual Mode Sensing System Based on One-Step Fabricated Heterojunction Artificial Synapses Device. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, **165**, Article 101021. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2025.101021>
- [7] Kim, M.K., Kim, I.J. and Lee, J.S. (2021) Oxide Semiconductor-Based Ferroelectric Thin-Film Transistors for Advanced Neuromorphic Computing. *Applied Physics Letters*, **118**, Article 032902. <https://doi.org/10.1063/5.0035741>
- [8] Ganapathi, K., Yoon, Y. and Salahuddin, S. (2010) Analysis of Inas Vertical and Lateral Band-to-Band Tunneling Transistors: Leveraging Vertical Tunneling for Improved Performance. *Applied Physics Letters*, **97**, Article 033504. <https://doi.org/10.1063/1.3466908>
- [9] Wisniewski, P. and Majkusiak, B. (2018) Modeling the Tunnel Field-Effect Transistor Based on Different Tunneling Path Approaches. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **65**, 2626-2631. <https://doi.org/10.1109/ted.2018.2821059>
- [10] Shi, Y., Wang, S.Y., Ma, S., Lei, Y.L., Liu, H.L., Chen, X.L., *et al.* (2020) Nanoscale Imaging of Ferroelectric Domain and Resistance Switching in Hybrid Improper Ferroelectric Ca₃Ti₂O₇ Thin Films. *Physics Letters A*, **384**, Article 126609. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.126609>
- [11] Elcombe, M.M., Kisi, E.H., Hawkins, K.D., White, T.J., Goodman, P. and Matheson, S. (1991) Structure Determinations for Ca₃Ti₂O₇, Ca₄Ti₃O₁₀, Ca_{3.6}Sr_{0.4}Ti₃O₁₀ and a refinement of Sr₃Ti₂O₇. *Acta Crystallographica Section B Structural Science*, **47**, 305-314. <https://doi.org/10.1107/s0108768190013416>
- [12] Li, X., Yang, L., Li, C.F., Liu, M.F., Fan, Z., Xie, Y.L., *et al.* (2017) Ultra-Low Coercive Field of Improper Ferroelectric Ca₃Ti₂O₇ Epitaxial Thin Films. *Applied Physics Letters*, **110**, Article 042901. <https://doi.org/10.1063/1.4974217>
- [13] Yoshida, I., Iwai, T., Uehara, T. and Horikoshi, Y. (2007) Area Selective Epitaxy of GaAs with AlGaAs Native Oxide Mask by Molecular Beam Epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, **301**, 190-193. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.11.042>
- [14] Zhang, Z., Yang, X., Liu, K. and Wang, R. (2022) Epitaxy of 2D Materials toward Single Crystals. *Advanced Science*, **9**, Article 2105201. <https://doi.org/10.1002/advs.202105201>
- [15] Lao, J., Yan, M., Tian, B., Jiang, C., Luo, C., Xie, Z., *et al.* (2022) Ultralow-Power Machine Vision with Self-Powered Sensor Reservoir. *Advanced Science*, **9**, Article 2106092. <https://doi.org/10.1002/advs.202106092>
- [16] Wang, Y., Lv, Z., Chen, J., Wang, Z., Zhou, Y., Zhou, L., *et al.* (2018) Photonic Synapses Based on Inorganic Perovskite Quantum Dots for Neuromorphic Computing. *Advanced Materials*, **30**, Article 1802883. <https://doi.org/10.1002/adma.201802883>
- [17] Yang, Q., Huang, J., Chen, Q., Chen, C., Chen, H. and Guo, T. (2022) Synaptic Transistor with Tunable Synaptic Behavior Based on a Thermo-Denatured Polar Polymer Material. *Journal of Materials Chemistry C*, **10**, 5534-5541. <https://doi.org/10.1039/d2tc00211f>
- [18] Liu, J., Gong, J., Wei, H., Li, Y., Wu, H., Jiang, C., *et al.* (2022) A Bioinspired Flexible Neuromuscular System Based Thermal-Annealing-Free Perovskite with Passivation. *Nature Communications*, **13**, Article No. 7427. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35092-w>
- [19] Feng, D., Niu, Z., Yang, J., Xu, W., Liu, S., Mao, X., *et al.* (2021) Flexible Artificial Synapse with Relearning Function Based on Ion Gel-Graphene FET. *Nano Energy*, **90**, Article 106526. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106526>
- [20] Ravichandran, V., Li, C., Banagozar, A., Yang, J.J. and Xia, Q. (2018) Artificial Neural Networks Based on Memristive Devices. *Science China Information Sciences*, **61**, Article 060423. <https://doi.org/10.1007/s11432-018-9425-1>
- [21] Lee, S.T. and Lee, J.H. (2023) Neuromorphic Computing Using Random Synaptic Feedback Weights for Error Back-propagation in NAND Flash Memory-Based Synaptic Devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **70**, 1019-1024. <https://doi.org/10.1109/ted.2023.3237670>
- [22] Shen, C., Gao, X., Chen, C., Ren, S., Xu, J., Xia, Y., *et al.* (2022) ZnO Nanowire Optoelectronic Synapse for Neuromorphic Computing. *Nanotechnology*, **33**, Article 065205. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac3687>
- [23] Wang, L., Wang, X., Zhang, Y., Li, R., Ma, T., Leng, K., *et al.* (2020) Exploring Ferroelectric Switching in α -In₂Se₃ for Neuromorphic Computing. *Advanced Functional Materials*, **30**, Article 2004609. <https://doi.org/10.1002/adfm.202004609>