

忆阻器原理与相关应用进展综述

孙 赫

天津大学微电子学院, 天津
Email: hh641112639@163.com

收稿日期: 2021年5月12日; 录用日期: 2021年6月17日; 发布日期: 2021年6月25日

摘 要

忆阻器是继电阻、电感、电容后, 人类发现的第四种无源基本电子元器件, 其材料大致可分为五类: 金属氧化物、钙钛矿、固态电介质、硫系化合物半导体、有机材料。由于忆阻器的非线性、非易失的特性, 其具有极强的研究价值, 并在存储器、与神经网络等领域中具有广阔的应用前景。本文总结了忆阻器的基本结构原理与材料, 针对二元与多元金属氧化物类与钙钛矿类忆阻器现有研究进行了讨论, 并在现有研究的基础上叙述其应用现状, 最后对忆阻器的发展进行了全面总结与展望。在未来, 忆阻器有望突破摩尔定律对硅基集成电路的限制, 为电路优化与计算机体系结构的发展添砖加瓦。

关键词

忆阻器, 神经网络, 非易失性存储器, 基本材料, 工作原理

Summary of the Principles and Related Applications of Memristors

He Sun

School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin
Email: hh641112639@163.com

Received: May 12th, 2021; accepted: Jun. 17th, 2021; published: Jun. 25th, 2021

Abstract

Memristor is the fourth kind of passive basic electronic components discovered by human beings after resistance, inductance and capacitance. Its materials can be roughly divided into five categories: binary metal oxides, perovskite, solid state dielectric, sulfide compound semiconductor and organic materials. Because of its non-linear and non-volatile characteristics, memristors are of great research value and have broad application prospects in memory, neural network and other

fields. In this paper, the basic structural principles and materials of memristors are summarized, the existing research about binary metal oxides and perovskite memristors are discussed, and their application status is described based on the existing research. Finally, the development of memristors is comprehensively summarized and prospected. In the future, memristors are expected to break through the limitations of molar rate on silicon based integrated circuits and contribute to the development of circuit optimization and computer architecture.

Keywords

Memristor, Neural Network, Non-Volatile Memory, Basic Materials, The Working Principle

Copyright © 2021 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

自 1946 年世界上第一台计算机问世以来, 冯·诺依曼结构体系一直占据着重要地位, 该结构将运算器和存储器分离开来, 通过指令实现数据的调用与处理[1] [2]。随着互联网大数据与人工智能技术的迅速发展, 传统的存储器和 CPU 的读写、运行速度在未来可能会跟不上软件技术的发展速度[3]。1971 年, 加州大学伯克利分校的蔡少棠教授首次提出忆阻器的概念, 即在自然界应该还存在着某种描述电荷与磁通量之间的关系, 但在当时的技术条件下没有找到能够描述这种关系的材料[4]。

直到 2008 年, HP 团队第一次发现具有忆阻器特性的材料[5], 该团队在对部分掺杂的 TiO₂ 两端加电压进行电阻测试时发现其具有特殊的电学特性, 即当电流从非掺杂一侧通向掺杂一侧时器件电阻会增大, 当电流从掺杂一侧通向非掺杂一侧时电阻减小, 电阻具有记忆历史电流的特性。该材料为后续的忆阻器的结构和电路研究奠定了基础[6]。

忆阻器在电路应用与优化中具有划时代的意义。由于其电学特性与脑内神经突触的工作原理相似[7] [8], 且由忆阻器搭建的类脑计算平台在面积、功耗、速度以及自适应学习等方面均更由于传统系统, 近年来, 基于忆阻器的存算一体的异构融合类脑计算平台的研究如雨后春笋般涌现, 其非线性非易失的特性也让其在存储器领域大放异彩。HP 公司利用忆阻器设计的 RRAM 比现有闪存的密度高, 或将替代 DRAM 和其他类型存储器[9]。

2. 忆阻器的基本电学特性

忆阻器通常被分为荷控型和磁控型忆阻器两类[10], 其磁通量与电荷具有的联系, 本文列为:

$$f(\psi, q) = 0 \quad (1)$$

对于荷控忆阻器, 其磁通量 ψ 是电荷数 q 的函数, 即:

$$\psi = f(q) \quad (2)$$

将此关系式两边同时对时间 t 求导:

$$d\psi/dt = df(q)/dq \cdot dq/dt \quad (3)$$

由磁通与电压的关系:

$$d\psi/dt = V(t) \quad (4)$$

由电流的定义式:

$$dq/dt = I(t) \quad (5)$$

再令:

$$df(q)/dq = M(q(t)) \quad (6)$$

联立公式(2), (3), (4), (5), (6)得:

$$I(t) = M(q(t)) \cdot V(t) \quad (7)$$

其中, $M(q(t))$ 为忆阻器的忆导值, 忆导值是磁通 ψ 的函数, 而磁通又是电压在时域上的积分函数, 由此可知, 忆导值是电压在时域上的积分。从而可以得到, 忆阻器的电导值与历史所加电压有关。即使电压断开, 由于磁通不变, 忆阻器的忆导值也不变, 即忆阻器具有记忆功能[11][12]。对于磁控忆阻器, 分析方法及数学推导与荷控忆阻器类似, 在此不再赘述。

上文介绍了忆阻结构电学性质理论分析的基本数学模型。在物理模型层面上, 又可以大致分为线性离子漂移模型、非线性离子漂移模型、西蒙斯隧道势垒模型和阈值自适应模型[13][14][15][16]几种模型。目前最常见的离子漂移模型忆阻器结构见图1, M_{on} 为忆阻器的低阻区, M_{off} 为忆阻器的高阻区。脉冲调制可以改变忆阻器的电导特性, 当有正向脉冲加在忆阻器两端时, 界面 W 会向高阻区移动, 电导增大, 反之电导减小[17][18]。离子漂移模型是简化的, 在电动力学中有潜在的局限性。许多不同的实验证明忆阻器的工作是非常非线性的。这意味着, 线性离子漂移模型的精度很差。

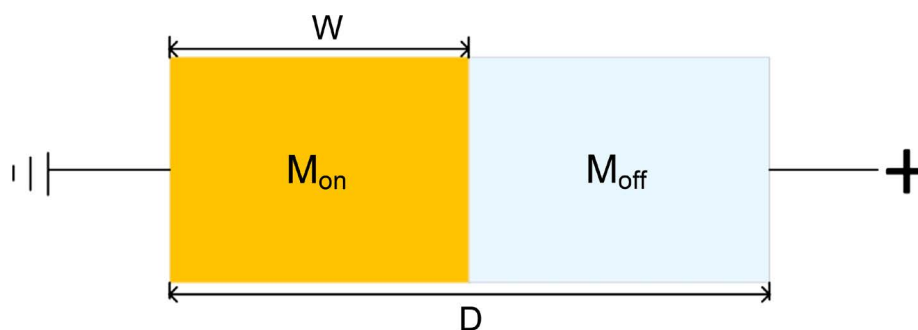


Figure 1. Memristor simple model
图1. 忆阻器简易模型

忆阻器电导与电压之间往往是非线性的, 这会给其在电路应用后的信号增大处理难度, 如果后续研究中能更注重线性度, 会在电路中应用更广泛[19]。

3. 常见忆阻器材料

对于双极性激励信号, 忆阻器必须满足三个特征[20][21]:

- 1) 器件必须在 I-V 平面上显示电压与电流的磁滞回线;
- 2) 磁滞回线波瓣的面积应随着激励频率的增加而单调减小;
- 3) 磁滞回线应随着激励频率趋于无穷大而收缩为单值线性函数。

忆阻器的 I-V 的磁滞回线一定程度上可以反映电阻开关现象。电阻开关现象的本质是电阻切换过程, 目前尽管许多科研团队都发表了关于电阻开关的论文, 但描述电阻开关现象的完整模型目前仍然缺失。但无论电阻切换过程中出现何种机制, 都可以确定, 在非常低的频率下, 忆阻器系统有足够的反应时间将电阻调整到受控参数(电流或电压)的瞬时值。基于这一原理, 电路表现得像非线性电阻[22]。然而, 当频率非常高时, 系统没有足够的时间来调节控制随电流或电压变化的周期性振荡的电阻。在这种情况下,

电路开始表现得像线性电阻。这是由材料内部的局部电阻偶极子形成的[23]。换句话说，结构中电偶极子的自形成意味着极化电荷的调节作用导致电路具有电容效应。因此结构的忆阻行为与电荷的调节有关，电荷的作用导致电流与电压具有磁滞现象[24]。忆阻器在伏安平面上的理论特性见图 2。

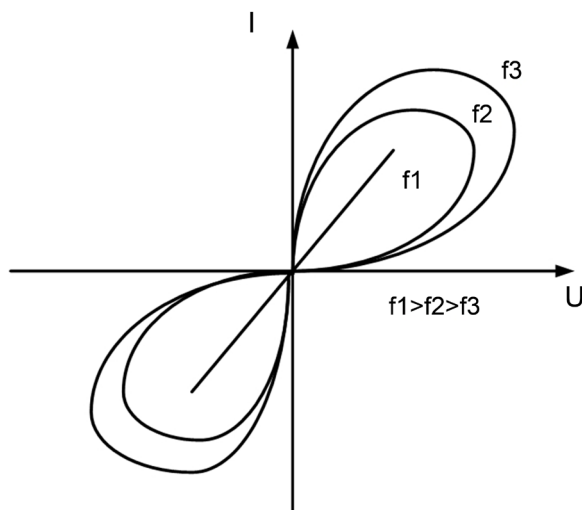


Figure 2. Typical theoretical characteristics of memristors
图 2. 忆阻器典型的理论特性

能够观察到忆阻效应(磁滞回线)的材料非常多样，如许多金属氧化物：氧化镍、氧化锆、氧化锌、氧化钨、氧化钛等。

对于二元金属氧化物类忆阻器材料，最常用的是二氧化钛(TiO_2)，其薄膜层的制造可以使用不同的化学或物理方法来实现[25] [26]。向正(铂)电极施加正电压，电场将掺杂区中的氧空位推进到纯二氧化钛层(未掺杂区)， TiO_{2-x} 区域宽度增加， TiO_2 区域宽度减少；反之，将导致反相效应，氧空位被吸引到电极，未掺杂区域宽度增加，掺杂区域宽度减少。二氧化钛层中电阻转换的机制通常被认为是基于导电细丝的产生。根据细丝理论，电阻转换机制包括导电细丝的形成和破坏，这可以通过电迁移或氧空位等缺陷的热扩散来实现。与其它阻变材料相比，二元金属氧化物具有结构简单、材料组分容易控制和制备工艺与 CMOS 艺兼容等优点，因此更加受到产业界的关注。

氧化钽(Ta_2O_5)是另一种二元金属氧化物类的材料，在忆阻器结构中的电阻切换机制中起着非常重要的作用，因为它是一种电阻状态完全受控的材料[27]。此外，基于纳米多孔 $\text{Ta}_2\text{O}_{5-x}$ 制造具有 162 Gbit 密度交叉杆阵列的存储系统是可能的，可以满足大规模存储器件的要求。

除二元金属氧化物外，关于多元金属氧化物类忆阻器材料的研究也备受关注。常见的有 $\text{Pr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{MnO}_3$ 、 $\text{La}_x\text{Ca}_{1-x}\text{MnO}_3$ 和 $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{MnO}$ 等四元金属氧化物与 SrTiO_3 、 SrZrO_3 和 SrRuO_3 等三元金属氧化物。但多元金属氧化物的成分较为复杂，难以得到精确化学比的晶体结构，材料与器件的制备工艺与传统的 CMOS 工艺兼容性不好，在一定程度上阻碍其发展和应用。

在所有已发现具有忆阻特性的钙钛矿类材料中，铌酸锂(LiNbO_3)是神经形态应用的潜在候选材料[28]。S Wang 等人描述了结构为钛-铂-铌酸锂-钛-铂的忆阻器的制作和测量[29]，其中，铌酸锂层的厚度 42 nm，铌酸锂开关层可用脉冲激光沉积法(Pulsed Laser Deposition, PLD)制备；在硅衬底上通过等离子增强化学气相沉积法(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)沉积二氧化硅微米层；顶部电极由钛制成，它可以促进层内氧空位的运动，从而导致忆阻效应。该结构的测量是通过室温下电压的循环变化进行的：在进行主要测量前，施加 3~4 v 脉冲电压促进器件成形；在主要测量中，施加 -3~3 v

扫描电压，可显示可重复的磁滞回线图，呈现双极电阻开关机制。相比多元氧化物类，这种材料利用了 IC 中常用的工艺，技术较为成熟。

4. 忆阻器的应用

4.1. 忆阻器在神经网络中的应用

突触是神经网络的关键，由于忆阻器电阻取决于它过去状态的特性与脑内神经突触的工作方式类似，可以用来模拟人类大脑中的突触连接，并用于神经动力学的神经形态芯片的相关研究[3] [30] [31]。在忆阻器未出现之前，类脑计算平台主要是由深度学习专用处理器来搭建。

传统的 DNNs 神经网络主要依靠软件在 CPU 与 GPU 平台运行，功耗较大[30] [31]。于是，在 DNNs 神经网络的基础上，相关研究人员又提出了两种主流类脑计算平台：基于深度学习理论的专用处理器和基于神经动力学的类脑神经形态芯片。前者目前研究得较为成熟，不再赘叙，本文主要讨论通过忆阻器实现的支持 SNNs 模型的类脑神经计算平台。

类脑计算平台的首要问题是突触结构的近似电路。几种典型的忆阻器突触结构见图 3 所示，分别为单向突触、半双向突触和双向突触，均是将忆阻器与反馈电阻通过闭环的形式与运算放大器进行连接，通过脉冲调制来进行突触权重的精确调节[31]。

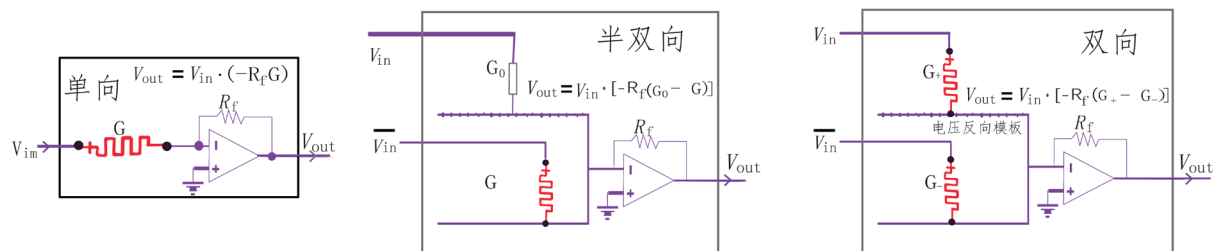


Figure 3. Realization of the synaptic structure of the memristor
图 3. 忆阻器突触结构的实现

突触可进一步形成忆阻器阵列，其结构见图 4，可以得到输入向量与权重向量的乘积。该过程将存储与计算进行融合，为神经形态芯片的研究提供了一种思路[31] [32]。

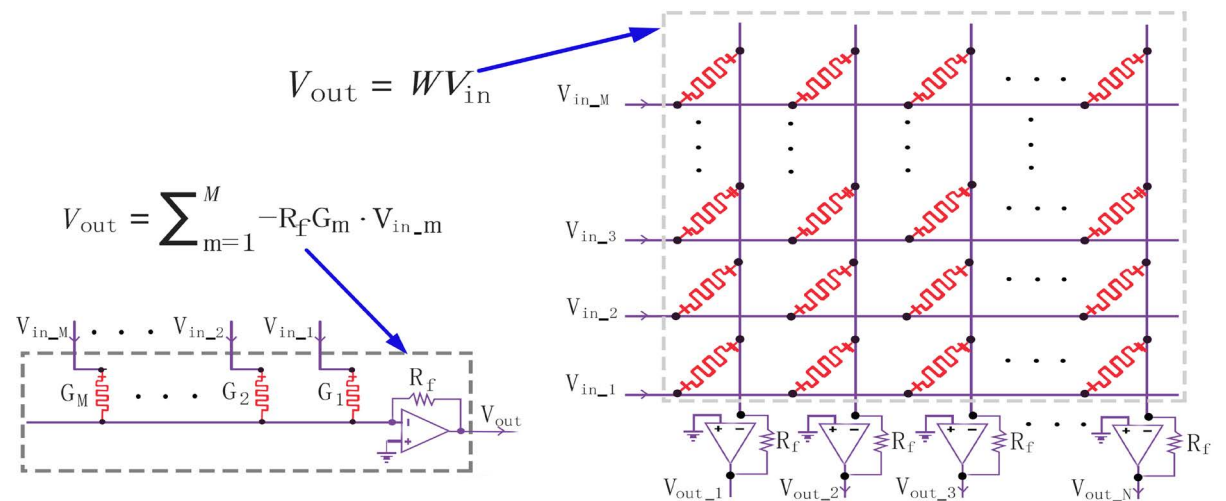


Figure 4. Memristor array
图 4. 忆阻器阵列

存算一体化这一特殊应用对忆阻器的器件特性提出了更高的要求, 现有器件在线性度、耐久性和离散性等关键器件特性上仍不理想, 因此需要探索提高器件性能的方法, 增加可用于计算的有效比特数, 提高不同阻态调控的精度, 缩短电导调控需要的脉冲时间, 抑制电导漂移效应, 减小器件涨落与波动。同时, 针对“存算一体化”芯片中高密度数据存储和低功耗数据处理对器件小型化的需求, 需要研究纳米尺寸下新型存储器的设计与性能优化, 为未来研制高性能智能“存算一体化”类脑芯片提供良好的器件基础。综上可知, 忆阻器的发展对人工智能的高质量发展具有深层次的推动作用。

4.2. 忆阻器在数字电路中的应用

由于有科学家预测“闪存将因器件小型化相关的限制而停止发展”, 目前已有许多有关非易失性存储器(Non-volatile Memory, NVM)的研究。忆阻器在 NVM 领域有很大的潜力, 因为它具有优质存储器的三个特点: 1) 具有存储效应; 2) 只需要很少的能量; 3) 只需要很小的物理空间。

在基于忆阻器的数字电路中, 0 和 1 的表示是通过忆阻器中出现的两个状态(HRS 和 LRS)来实现的。施加直流电压电写入该位, 施加交流电压读取该位。仍在开发中的新型非易失性存储器有: 电阻随机存取存储器(Resistive Random Access Memory, RRAM) [33]、相变随机存取存储器(Phase Change Random Access Memory, PCRAM)、铁电存储器(Fe Random Access Memory, FeRAM)、磁阻存储器(Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM) [34]。其中, RRAM 目前是基于忆阻器开发的一种新型存储器[35]。

RRAM 是一种二端口器件, 一种该器件的实例是由硅衬底上的三层 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和涂有氮化钛的二氧化硅层构成, 其中开关层放置在电极之间[36]。RRAM 电阻大小可以通过施加的电压或流经的电流的值来调节。RRAM 单元与互补金属氧化物半导体系统集成的常用方法称为 1T1R (1 个晶体管 + 1 个电阻开关元件), 这里的晶体管负责控制开关元件的位置。这种方法的缺点是一个开关元件使用一个晶体管, 因此其封装密度仍然取决于晶体管的所占空间以及可扩展性[37]。与闪存相比, 忆阻器需要很少的能量就能正常工作, 结构简单, 可缩小性高, 操作速度快和功耗低等优点, 已成为下一代非挥发存储器的有力竞争者。HP 实验室通过实验证明了忆阻器的非易失性, 以及它们在 CMOS 系统中的兼容性好、响应时间短和低功耗等特性。但就目前看来, RRAM 仍存在许多问题有待解决。例如如何提高器件的存储, 如何减小器件的转变参数的离散性, 如何降低器件的擦除电流等。

5. 总结与展望

忆阻器是现代基础电子学和高级电子学领域的一个突破性发现, 它的出现将使计算机系统的可靠性和计算能力提高, 功耗降低。但与此同时, 忆阻结构中的复杂物理现象仍然未被研究透彻, 其大规模阵列集成技术仍在研究中, 同时, 在最有应用前景的交叉杆结构忆阻器系统中, 常存在电阻在结构上分布不均匀或电阻漂移等现象, 因此如何制造具有微纳尺寸的高性能交叉杆忆阻器阵列仍然是未来研究的重点与难点之一。以上的困难都使忆阻器目前无法进行大规模应用与生产。因此, 未来研究人员还应在忆阻器的机理、材料、结构等方面继续探索。

参考文献

- [1] Zhang, H., Panda, P., Lin, J., Kalcheim, Y., Wang, K., Freeland, J.W., *et al.* (2020) Organismic Materials for beyond Von Neumann Machines. *Applied Physics Reviews*, 7, Article ID: 11309. <https://doi.org/10.1063/1.5113574>
- [2] Minello, G., Rossi, L. and Torsello, A. (2019) On the Von Neumann Entropy of Graphs. *Journal of Complex Networks*, 7, 491-514. <https://doi.org/10.1093/comnet/cny028>
- [3] 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>
- [4] Wang, M., Cai, S., Pan, C., Wang, C., Lian, X., Zhuo, Y., *et al.* (2018) Robust Memristors Based on Layered

- Two-Dimensional Materials. *Nature Electronics*, **1**, 130-136. <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0021-4>
- [5] Strukov, D.B., Snider, G.S., Stewart, D.R. and Stanley Williams, R. (2008) The Missing Memristor Found. *Nature*, **453**, 80-83. <https://doi.org/10.1038/nature06932>
- [6] Shen, Y., Wang, G., Liang, Y., Yu, S. and Iu, H.H.-C. (2019) Parasitic Memcapacitor Effects on HP TiO₂ Memristor Dynamics. *IEEE Access*, **7**, 59825-59831. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2914938>
- [7] Lin, P., Li, C., Wang, Z., Li, Y., Jiang, H., Song, W., et al. (2020) Three-Dimensional Memristor Circuits as Complex Neural Networks. *Nature Electronics*, **3**, 225-232. <https://doi.org/10.1038/s41928-020-0397-9>
- [8] Hu, M., Graves, C.E., Li, C., Li, Y., Ge, N., Montgomery, E., et al. (2018) Memristor-Based Analog Computation and Neural Network Classification with a Dot Product engine. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1705914. <https://doi.org/10.1002/adma.201705914>
- [9] Banchuin, R. (2021) The Fractional Order Generalization of HP Memristor Based Chaotic Circuit with Dimensional Consistency. *Cogent Engineering*, **8**, Article ID: 1891731. <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1891731>
- [10] Li, Y., Wang, Z., Midya, R., Xia, Q. and Yang, J.J. (2018) Review of Memristor Devices in Neuromorphic Computing: Materials Sciences and Device Challenges. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **51**, Article ID: 503002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aade3f>
- [11] Abro, K.A. and Atangana, A. (2020) Mathematical Analysis of Memristor through Fractal-Fractional Differential Operators: A Numerical Study. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, **43**, 6378-6395. <https://doi.org/10.1002/mma.6378>
- [12] Ma, X., Mou, J., Liu, J., Ma, C., Yang, F. and Zhao, X. (2020) A Novel Simple Chaotic Circuit based On Memristor-Memcapacitor. *Nonlinear Dynamics*, **100**, 2859-2876. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-05601-x>
- [13] Anusudha, T.A. and Prabaharan, S. (2018) A Versatile Window Function for Linear Ion Drift Memristor Model—A New Approach. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, **90**, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.04.020>
- [14] Singh, J. and Raj, B. (2019) An Accurate and Generic Window Function for Nonlinear Memristor Models. *Journal of Computational Electronics*, **18**, 640-647. <https://doi.org/10.1007/s10825-019-01306-6>
- [15] Singh, J. and Raj, B. (2018) Comparative Analysis of Memristor Models and Memories Design. *Journal of Semiconductors*, **39**, Article ID: 74006. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/39/7/074006>
- [16] Humood, K., Mohammad, B., Abunahla, H. and Azzam, A. (2019) On-chip Tunable Memristor-Based Flash-ADC Converter for Artificial Intelligence Applications. *IET Circuits, Devices & Systems*, **14**, 107-114. <https://doi.org/10.1049/iet-cds.2019.0293>
- [17] Shi, M., Yu, Y. and Xu, Q. (2018) Window Function for Fractional-Order HP Non-Linear Memristor Model. *IET Circuits, Devices & Systems*, **12**, 447-452. <https://doi.org/10.1049/iet-cds.2017.0414>
- [18] Nafea, S.F., Dessouki, A.A., El-Rabaie, S., Elnaghi, B.E., Ismail, Y. and Mostafa, H. (2019) An Accurate Model of Domain-Wall-Based Spintronic Memristor. *Integration*, **65**, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2018.12.001>
- [19] Apollos, E. (2019) Memristor Theory and Mathematical Modelling. *International Journal of Computer Applications*, **178**, 1-8. <https://doi.org/10.5120/ijca2019919089>
- [20] Liu, Y., Ye, C., Chang, K.C., Li, L., Jiang, B., Xia, C., et al. (2020) A Robust and Low-Power Bismuth Doped Tin Oxide Memristor Derived from Coaxial Conductive Filaments. *Small*, **16**, Article ID: 2004619. <https://doi.org/10.1002/smll.202004619>
- [21] Tang, Z., Tang, W., Tang, X., Liu, Q.-X., Jiang, Y.-P., Li, W.-H., et al. (2020) Analog-Type Resistive Switching Behavior of Au/HfO₂/ZnO Memristor Fabricated on Flexible Mica Substrate. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, **120**, Article ID: 114047. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2020.114047>
- [22] Ntinias, V., Ascoli, A., Tetzlaff, R. and Sirakoulis, G.Ch. (2018) A Complete Analytical Solution for the on and off Dynamic Equations of a TaO Memristor. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, **66**, 682-686. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2018.2869920>
- [23] Jiang, C., Li, Q., Sun, N., Huang, J., Ji, R., Bi, S., et al. (2020) A High-Performance Bionic Pressure Memory Device Based on Piezo-OLED and Piezo-Memristor as Luminescence-Fish Neuromorphic Tactile System. *Nano Energy*, **77**, Article ID: 105120. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105120>
- [24] 徐莹. 电磁驱动下神经网络的动力学分析与同步控制[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2020.
- [25] Gul, F. (2018) Carrier Transport Mechanism and Bipolar Resistive Switching Behavior of a Nano-Scale Thin Film TiO₂ Memristor. *Ceramics International*, **44**, 11417-11423. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.198>
- [26] Dongale, T.D., Desai, N.D., Khot, K.V., Volos, C.K., Bhosale, P.N., Kamat, R.K., et al. (2018) An Electronic Synapse Device Based on TiO₂ Thin Film Memristor. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, **13**, 68-75.

- <https://doi.org/10.1166/jno.2018.2297>
- [27] Kim, K.M., Lee, S.R., Kim, S., Chang, M. and Hwang, C.S. (2015) Self-Limited Switching in Ta₂O₅/TaO_x Memristors Exhibiting Uniform Multilevel Changes in Resistance. *Advanced Functional Materials*, **25**, 1527-1534. <https://doi.org/10.1002/adfm.201403621>
- [28] Chaudhary, P., Lu, H., Lipatov, A., Ahmadi, Z., McConville, J.P.V., Sokolov, A., *et al.* (2020) Low-Voltage Domain-Wall LiNbO₃ Memristors. *Nano Letters*, **20**, 5873-5878. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c01836>
- [29] Wang, S., Wang, W., Yakopcic, C., Shin, E., Subramanyam, G. and Taha, T.M. (2017) Experimental study of LiNbO₃ Memristors for Use in Neuromorphic computing. *Microelectronic Engineering*, **168**, 37-40. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2016.10.007>
- [30] Li, C., Belkin, D., Li, Y., Yan, P., Hu, M., Ge, N., *et al.* (2018) Efficient and Self-Adaptive *in-Situ* Learning in Multi-layer Memristor Neural Networks. *Nature Communications*, **9**, Article No. 2385. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04484-2>
- [31] 邓磊. 异构融合类脑计算平台的计算模型与关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2017.
- [32] Liu, H., Chen, C., Zhu, X., Sun, S.-Y., Li, Q.-J. and Li, Z.-W. (2020) Memristor-Based Vector Neural Network Architecture. *Chinese Physics B*, **29**, Article ID: 28502. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ab65b5>
- [33] Panda, D., Sahu, P.P. and Tseng, T.Y. (2018) A Collective Study on Modeling and Simulation of Resistive Random Access Memory. *Nanoscale Research Letters*, **13**, Article No. 8. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2419-8>
- [34] Wang, Q., Niu, G., Ren, W., Wang, R. B., Chen, X. G., Li, X., *et al.* (2021) Phase Change Random Access Memory for Neuro-Inspired Computing. *Advanced Electronic Materials*, **2021**, Article ID: 2001241. <https://doi.org/10.1002/aelm.202001241>
- [35] Chen, J., Wu, M., Ting, Y., Lee, W.-C., Yeh, P.H. and Wu, W.-W. (2020) Applications of p-n Homo Junction ZnO Nanowires to One-Diode One-Memristor RRAM Arrays. *Scripta Materialia*, **187**, 439-444. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.06.061>
- [36] Wang, L.G., Qian, X., Cao, Y.Q., Cao, Z.-Y., Fang, G.-Y., Li, A.-D., *et al.* (2015) Excellent Resistive Switching Properties of Atomic Layer-Deposited Al₂O₃/HfO₂/Al₂O₃ Trilayer Structures for Non-Volatile Memory Applications. *Nanoscale Research Letters*, **10**, Article No. 135. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0846-y>
- [37] Radwan, A.G. and Fouda, M.E. (2015) Chapter 2. Memristor: Models, Types, and Applications. In: *On the Mathematical Modeling of Memristor, Memcapacitor, and Meminductor*, Vol. 26, Springer, Cham, 13-49. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17491-4_2