文章编号: 1007 - 4252(2021)06 - 0006 - 494

忆阻器及其在人工突触器件中的研究进展

秦瑞东,陈玲丽,朱宇波,李 鑫,俞文杰*
(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室,上海 200050)

摘要: 忆阻器与生物突触具有天然相似性,通过忆阻器人工突触构建神经网络是实现高性能计算最有前景的方案之一。本文介绍了忆阻器的工作机制,概述了忆阻器的不同阻变机理,着重介绍了忆阻器材料及其研究近况。最后,从应用出发,回顾了近期通过忆阻器构建人工突触器件的进展,并简要讨论了忆阻器发展面临的主要挑战。

关键词: 忆阻器; 神经形态计算; 人工突触器件
中图分类号: TN389 **文献标识码:** A

Research progress of memristor and its application in artificial synaptic devices

QINRui-dong, CHEN Ling-li, ZHU Yu-bo, LI xin, YU Wen-jie*
(State Key Laboratory of Information Functional Materials, Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: Memristor has natural similarity with biological synapse. Building neural network by memristor artificial synaptic devices is one of the promising schemes to realize high-performance computing. This paper introduces the resistive switching mechanisms of memristor, and focuses on the memristor materials and their recent research status. Finally, from the perspective of application, research progresses of artificial synaptic devices constructed by memristors are reviewed, and the main challenges faced by the development of memristors are briefly discussed.

Key words: Memristor; Neuromorphic computing; Artificial synaptic devices

0 引言

人的大脑由大约 10^{12} 个神经元组成,它们通过 10^{15} 个突触相互连接,基于非线性动力学机制处理信息,具有自学习、自适应、自组织能力[1]。神经形态计算通过模仿人类的大脑神经结构高效地执行人工智能算法。人工模拟突触对于促进神经形态计算的发展至关重要,并且作为非冯诺伊曼体系的存算一体架构,有望突破现有计算瓶颈,实现下一代高性能计算。然而,基于传统 CMOS 器件构建的人工突触,需要多个晶体管构筑,结构复杂、功耗巨大[2],因此有必要开发新器件取代传统的 CMOS 器件用以搭建人工突触器件。

收稿日期: 2021-11-18; **修订日期:** 2021-12-06
通信作者: 俞文杰,E-mail: casan@ mail.sim.ac.cn.

新型模拟人工突触有诸多实现路线，目前已经开发了诸如相变存储器（PCRAM）[3-4]、磁阻随机存取存储器（MRAM）[5-6]、铁电随机存取存储器（Fe-RAM）[7-8]和忆阻器（Memristor）等非易失性存储器件为基础单元的人工突触。在这些技术中，忆阻器被认为是最有希望实现的方案[9]。忆阻器的电学特性和神经突触的传输特性高度相似，可以利用单个忆阻器来模拟一个神经突触的基本功能。与传统的集合多个晶体管及电容来模拟一个突触相比，忆阻器具有以下优点：①减少了能耗，降低了电路设计的复杂性；②器件结构简单，由金属电极-电介质层-金属电极构成的 MIM 结构便可形成一个忆阻器单元；③纳米尺度的忆阻器可集成度高，有望在单一芯片中实现可与人脑容量相比拟的神经网络；④忆阻器与神经突触的相似性源自于忆阻器器件的本征电学行为，弱化了传统突触仿生过程中引入外部信号设计的主观因素，有利于更准确地模拟神经突触。忆阻器的特性与神经形态计算的特点天然适合，是为搭建人工突触量身定做的器件。本文介绍了忆阻器的基本概念及主要阻变机制，总结了忆阻器研究的主要材料体系，并综述了其近年来在人工突触器件中的研究进展。

1　忆阻器概述

1971 年，蔡少棠在理论推导上提出了第四种电路元件——忆阻器[10]（memory resistor，memristor），受限于当时的工艺水平以及对器件原理的研究，在概念提出后的近四十年里关于忆阻器的研究停滞不前。直到 2008 年，惠普实验室宣布在物理上实现了基于 TiO_x 材料的忆阻器[11]。忆阻器在物理器件上的实现引发了对忆阻器以及基于忆阻器各类应用的研究热潮。

简单而言，忆阻器是一种具有记忆功能的非线性电阻，通过控制电流或电压来改变电阻值。忆阻器的出现为科学工作者提供了一个具有全新电路行为的基本无源器件，与之相应的应用领域也蓬勃发展，主要包括：神经形态计算、非易失性存储、真随机数发生器、物理不可克隆技术、随机计算等[12-16]。忆阻器的器件结构通常为三层结构，分别为顶电极（Top electrode，TE）-绝缘层（Insulator）-底电极（Bottom electrode，BE）（图 1），其中顶电极和底电极通常为金属或金属化合物，中间绝缘层材料有许多材料体系，将在第三部分展开介绍。

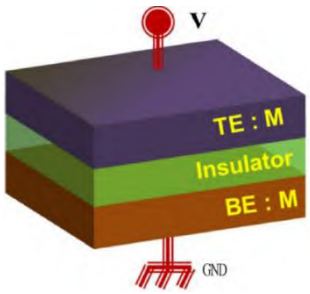

图 1　忆阻器单元结构示意图[17]

Fig. 1 Schematic diagram ofmemristor cell[17]

随着对忆阻器的深入研究，忆阻器的阻值以及开关电压等诸多器件特性被发现具有较大的可变性，同一个器件相同条件的多次循环都可能出现较大的偏差[18]。为提高器件可控性，在三层结构的基础上，出现了新的多层结构，是通过在中间电介质绝缘层中引入储氧层、热导层等功能层来提高忆阻器器件的可控性[12,19-20]，这对忆阻器大规模阵列以及芯片级的制造而言至关重要，但同时也带来了器件结构越来越复杂的问题。

2　忆阻器阻变机制

目前，在越来越多的材料体系中都发现了忆阻特性，然而其电阻转变特性背后的物理机制还存在争议。忆阻器的主要阻变机制有导电细丝型（Filamentary）和界面型（Interface-type）两大类，其中导电细丝型由于其主导的物理过程和细丝组成不同又可分为热化学机制（Thermochemical mechanism）、金属导电细丝（Electro-chemical metallization，ECM）和氧空位导电细丝（Valence change memory，VCM），界面型有纯界面电子效应（Purely electronic and electrostatic）和铁电极化（Ferroelectric polarization）两种（图 2）。热化学机制的忆阻器大多为单极型（Unipolar）器件，其他机制的器件多为双极型（Bipolar）。

2.1　导电细丝机制

导电细丝机制（图 3）是目前公认的最主要的忆阻器阻变机制。依据组成不同，导电细丝主要有金属导电细丝和氧空位导电细丝，电场是离子（氧空位）运动的主要驱动力。此外，由电流产生的焦耳

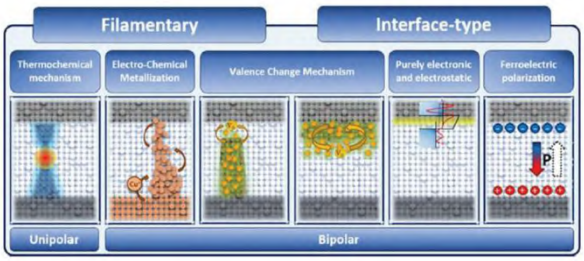

图 2 忆阻器主要的阻变机制[21]

Fig. 2 Classifications of resistive switching mechanisms of memristors[21]

热也可作为主要驱动，产生了热化学机制。

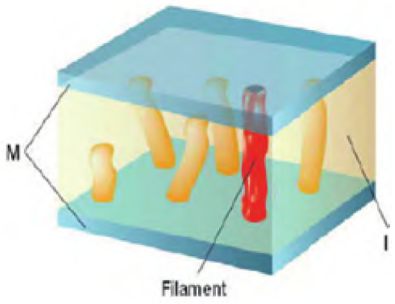

图 3 导电细丝机制示意图[23]

Fig. 3 Schematic diagram of conductive filament mechanism[23]

热化学效应是最常见的与热效应相关的阻变机制。当样品中有电流通过时，会产生焦耳热，产生的热量如不能及时散发便会不断累积使局部温度升高，导致局部的材料化学计量比发生变化，材料的不同化学计量比具有不同的电阻，这是促使器件产生电阻转变的主要原因。热流的产生与外加电场方向无关，因此，基于热效应的忆阻器大多是单极性的。此类忆阻器通常由能够形成非化学计量的材料组成，如氧化镍、氧化铪、氧化钛等过渡金属氧化物[23]。

金属导电细丝机制主要发生在活泼电极/电介质层/惰性电极材料体系。电化学金属化机制主要存在于电介质层为固态电解质类型的忆阻器中，电极材料通常一端为易氧化金属电极(如 Ag、Cu、Ni 等)，另一端为惰性金属电极(如 Pt、Pd、W 等)。金属导电细丝的生长过程经历以下三个主要步骤[24]：

(1) 在忆阻器易氧化的电极上施加正电压时，电极中的金属原子(M)被氧化，发生氧化反应($M-ze^-\rightarrow M^{z+}$)，产生带 z 个正电荷的金属离子(M^{z+})；

(2) 在电场的作用下，M^{z+}离子向阴极(如 Pt、W 等)移动；

(3) 到达阴极后，M^{z+}离子得到电子发生还原反应($M^{z+}+ze^-\rightarrow M$)，还原得到的 M 原子在阴极处沉积，构成导电细丝。

反应依次进行，最终在电介质层中形成连接两个电极的导电丝，器件的电阻减小；反之，施加相反的电压，电介质层中的部分导电丝断开，器件的电阻增加。基于此机制的忆阻器器件，正极为活性电极材料，中间层材料为氧化物或固态电解质材料，为活性电极离子提供迁移基体。

氧空位导电细丝机制，主要发生在惰性电极/氧化物电介质层/惰性电极材料体系。氧空位导电细丝主要由氧化物层中的氧空位构成[25]，电场能够使氧化物薄膜中的氧离子发生迁移运动，形成大量的氧空位缺陷态，当大量氧空位堆积贯穿整个薄膜，器件从高阻态转变为低阻态；施加反向电压时，氧空位与氧离子结合，导电细丝断裂，器件从低阻态转变为高阻态。

2.2 界面电子效应

界面电子效应根据电介质和金属电极的界面效应，通过改变金属电极/电介质的界面电子特性或者金属电极的功函数来控制忆阻器的电阻。金属和半导体接触会形成肖特基势垒，体现出整流特性，调控金属和半导体之间的肖特基势垒可以实现电阻转变[26]。基于单层电介质材料的忆阻器件，调节电介质层的电阻或调制电极与绝缘层之间势垒是调控器件阻变行为的有效方法。在金属-绝缘体-金属结构的忆阻器中，其中一侧的金属与绝缘体为肖特基接触，另一侧为欧姆接触。当欧姆接触一侧施加正电压时，氧离子向另一个电极迁移，使得势垒区氧空位增加，肖特基势垒高度降低，器件呈现低电阻状态；反之，电场驱动氧离子向欧姆接触侧迁移，中和势垒区的氧空位，增加肖特基势垒高度，器件电阻向高阻态转变。

3 忆阻器材料

忆阻器的性能与选用的电极材料、电介质材料的种类密切相关。不同种电介质材料制造的忆阻器器件性能往往表现出较大差别，使用不同类型电极材料和同种电介质材料的两种器件也可能表现出不

同的电阻转变行为。下面具体介绍忆阻器电极材料和电介质材料的研究进展。

3.1　电极材料

传统电子器件中的电极通常作为辅助角色，只作为载流子的传输载体，而在忆阻器中，电极材料显著地影响器件的电阻切换行为。忆阻器中常用的电极材料包括单质电极（大多数金属）、合金电极（如 Cu-Te 合金[27]、Ag-Cu 合金[28]）、硅基电极（如 n-Si[29]、p-Si[30]）、氮化物基电极（如 TiN[31-32]）。氮化物基电极因其能够储存氧离子的特性而通常被用在以氧空位导电细丝为阻变机制的体系中。基于电极所发挥的作用可分为以下几种类型，包括对阻变现象没有影响的惰性电极（例如 Pb[35]、Pt[36-38]）、有助于形成基于空位导电细丝的相对活性电极（例如 Ti[39]、Ta[40]）和可以作为金属导电细丝源的活性电极（例如 Ag[41-43]、Cu[44-46]）。其中惰性电极通常不会对忆阻器的开关特性产生影响，但在对电极为活性电极的情况下，惰性电极可能会对活性电极离子的还原产生催化作用。

3.2　电介质材料

惠普在 2008 年首次以 TiO_x 作为电介质材料制造出忆阻器[11]，但早在 1962 年，Hickmott 就在由 SiO_2、Al_2O_3、Ta_2O_5 等氧化物薄膜组成的金属-氧化物-金属结构中发现了电阻转变现象[47]，后续在其他化合物、钙钛矿、二维材料等多种材料体系中都发现了阻变现象。近些年，新材料阻变效应的报道仍然层出不穷，但基于新材料的器件性能距离真正实现应用仍具有较大差距。目前，忆阻器中电介质材料主要涵括了二元氧化物、钙钛矿材料、硫系半导体、二维材料、有机材料几大材料体系。

二元氧化物材料由于其制备工艺简单且成熟、与 CMOS 工艺兼容性好，是目前研究最为广泛且最成熟的忆阻器电介质材料，特别是 HfO_x[48-52]、TiO_x[53-55]、ZrO_x[39,56-57] 等。目前已经开发出的层堆叠的方法被用来提升器件性能，插入的功能层可以作为储氧层、热导层、离子扩散限制层等。清华大学团队制造了 $TiN/HfO_x/HfAl_yO_x/TiN$ 的叠层结构，通过 HfO_x/AlO_y 的结构控制氧空位的产生提高了忆阻器的开关转换特性，并在 1 Kb 阵列上实现了多阻态特性（图 4）[12]。Parshina 等研究了 $Ag/TaO_x/TaO_y/Ta$（$x > y$）的双层 TaO 材料忆阻器结构，得到了 10^3 开关电阻比和约 1 V 的较低复位操作电压[58]。Huang 等通过双层氧化铝构建了 $W/AlO_x/Al_2O_3/Pt$ 忆阻器单元，实现了较快的开关切换速度以及不同温度下的良好保持性能[20]。目前基于二元氧化物材料的忆阻器器件可控性尚能满足兆比特（Mb）级别的阵列，但由于氧化物材料其本征的非化学计量特性，氧空位分布难以通过工艺手段进行调控，进一步提高器件的可控性仍是该类材料实现更大阵列规模面临的最大挑战。

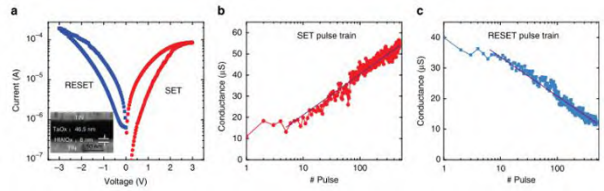

图 4　$TiN/HfO_x/HfAl_yO_x/TiN$ 结构忆阻器的器件结构及其性能[12]。（a）器件准直流扫描的 *I*-*V* 曲线，插图为器件的 TEM 图像；（b）（c）分别为置位和复位过程中，器件在脉冲电压下的电导连续变化

Fig. 4　Device structure and performance of $TiN/HfO_x/HfAl_yO_x/TiN$ memristor[12]. (a) *I*-*V* curve of a single cell for a quasi-DC sweep, inset is a TEM image of the device; (b) (c) Continuous conductance tuning performance under an identical pulse train condition during SET and RESET process

硫系化合物、氮化物等由于其快离子导体特性而受到关注。有诸多材料已被用于忆阻器研究，如 GeSe[15]、GeTe[59]、AgS[42]、CuS[60] 等。Ren 等研究了基于 GeSe-GeTe 合金的忆阻器器件，器件表现出了较快的开关速度和优异的保持性能[61]。Li 等利用硫系化合物高离子迁移率的特性，通过与较低离子迁移率的 Al_2O_3 材料堆叠设计了异质的双层忆阻器器件，再通过调整低离子迁移率材料的厚度较好地控制器件的阻变行为，并成功模拟了人工神经突触功能[59]。由于离子在此类材料的迁移活化能较低，离子迁移速率高，器件有着优异的开关速度，但同时也出现了保持性能和耐久性较差两个亟待解决的问题。

钙钛矿材料以其丰富的物理性能在诸多领域都被广泛研究。钙钛矿材料是具有钙钛矿 $CaTiO_3$ 结构的一大类化合物的总称。钙钛矿材料的忆阻行为

来源于材料本征的两种极化状态，因此具有良好的开关循环性能。材料体系从最初的含铅钙钛矿材料的研究，逐步发展到卤化物钙钛矿材料的研究，也开发出了元素掺杂、双钙钛矿等提高器件性能的方法[21,62-65]。钙钛矿材料最大的问题是难与 CMOS 工艺兼容，此外，其阻变行为可能是多种物理行为共同作用的结果，阻变机理分析困难。

二维材料以柔性及独特的电子特性受到越来越多关注。二维材料主要包括石墨烯[66]、过渡金属碳氮化物(MXene)[67]以及以 MoS_2 为代表的二维过渡金属硫族化合物[68]。Wang 等基于氧化二硫化钼和石墨烯通过层转移技术制备了范德华异质结忆阻器，首次得到了基于全二维材料的忆阻器，器件具有高鲁棒性，在 340 ℃的高温下也能稳定工作并且保持良好的开关性能，创下了稳定工作所处温度的新记录(图 5)[69]。当前，高质量二维材料的合成、器件阵列的集成以及制造工艺与传统半导体制造的兼容性是二维材料面临的挑战。

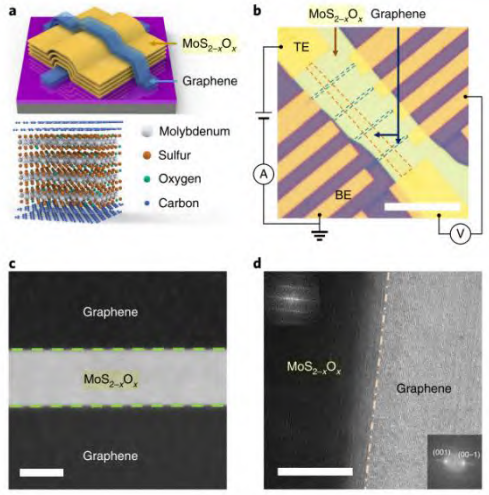

图 5 石墨烯/氧化二硫化钼/石墨烯忆阻器结构及截面[69]

Fig. 5 Graphene/$MoS_{2-x}O_x$/Graphene devices and cross-section images [69]

有机材料种类繁多，具备柔韧性好、透明性好等特点，通过合理设计有机分子可以对材料的多种性能进行调控。目前已经发现了多种材料可以实现电阻转变，如聚合物薄膜、有机小分子和天然生物材料(如鸡蛋蛋白、蚕丝蛋白等)[70-71]。但基于有机材料的忆阻器在器件的开关特性、循环特性等性能上与无机材料性能仍具有较大差距，阻变机理也有待深入研究。

4 忆阻器在人工突触器件中的研究进展

神经元之间通过突触连接，突触的连接强度可随自身传递信号的增强或减弱而做出相应的改变，称为突触可塑性(synaptic plasticity)[72]。突触可塑性对于学习和记忆功能起着重要作用。基于忆阻器的人工突触器件，其不同阻值状态对应着生物突触的不同权重，构建忆阻器人工突触阵列可以有效地实现深度神经网络(Deep Neural Networks，DNN)的功能。目前，人们提出了多种基于不同忆阻器材料来构建人工突触的方案，并且已经取得了显著的进展。

人工突触的基本结构如图 6a 所示，紫色为前神经元轴突，蓝色为后神经元树突，黄色代表神经元之间的突触。突触的基本功能包含三大功能：①短时可塑性(Short-term plasticity，STP)(图 6b)；②长时增强/减弱作用(Long-term potentiation/depression，LTP/LTD)(图 6d，e)；③尖峰时间依赖可塑性(spike timing dependent plasticity，STDP)(图 6g)。其中 STP 和 LTP 主要控制器件的记忆行为，STDP 决定器件的学习行为。STP 是神经连接的暂时增强或抑制，通常只能维持数秒到几十分钟。在突触的短期效应中，双脉冲易化(paired pulse facilitation，PPF)和双脉冲弱化(paired pulse depression，PPD)(图 6c)是非常重要的两种效应。当两个相连信号作用于突触前膜时，第二个脉冲将改变突触权重，且两信号时间间隔越小，第二个脉冲引起的改变效果越明显。LTP 是具有长时间保留的突触可塑性，可维持数小时到数周的时间。外部信号导致人工突触发生非易失性变化。突触权重也可能随脉冲信号发生连续的长时变化(图 6f)。STDP 是指突触的权重会受到突触前膜和突触后膜尖峰的相对时间差的影响，STDP 是生物神经的基本学习机制(图 6g)。使用忆阻器来模拟突触的功能，器件需要具有以上一种或多种突触效应。

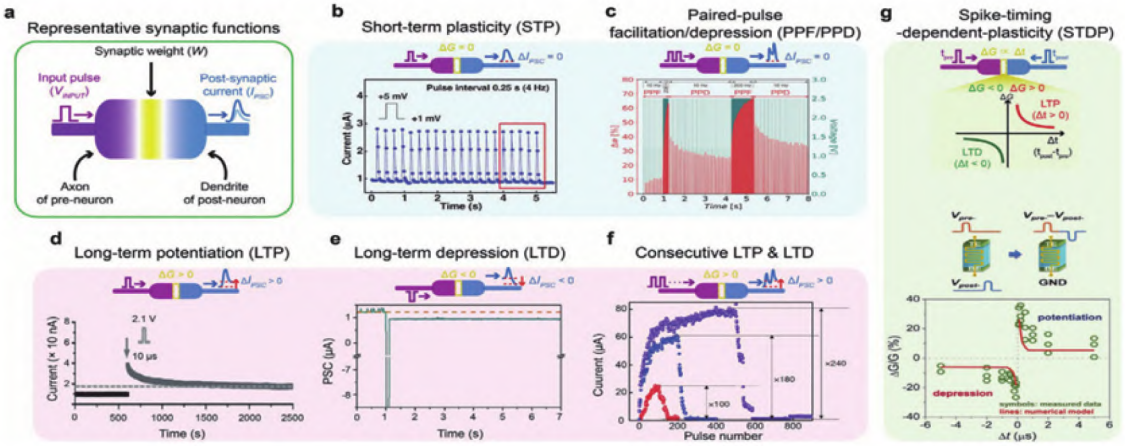

图 6　基本的突触功能及其利用忆阻性人工突触的实验演示[73](a) 人工突触基本结构; (b) 短时可塑性; (c) 双脉冲易化/弱化; (d) (e) 长时增强/减弱; (f) 突触权重随脉冲信号连续长时变化; (g) 尖峰时间依赖可塑性

Fig. 6 Essential synaptic functions and their experimental demonstrations utilizingmemristive artificial synapses[73] (a) basic structure of artificial synapses; (b) STP; (c) PPF/PPD; (d) (e) LTP/LTD; (f) Consecutive LTP & LTD; (g) STDP

基于导电细丝机制的忆阻器通过外加电脉冲驱动金属离子和氧空位的运动，从而控制导电细丝的形成和断裂来模拟突触功能。此类忆阻器，尺寸可以微缩到纳米级别，有利于提高器件集成度，但是当发生电阻转换时，器件的电导会显著变化，并且外加刺激的时间和器件电导率响应是非线性的，这不满足在神经网络学习过程中所需的突触权重变化响应与外加刺激良好线性度。因此，研究人员在制备基于此类机制的忆阻器人工突触时，在电介质层中添加离子阻挡层，避免器件电导的突然变化，提高突触权重响应与外加电刺激的线性度。

Peng 等在传统 HfO_x 薄膜的基础上插入 $BiFeO_3$ (BFO) 制造了 $Pt/HfO_2/BFO/HfO_2/TiN$ 结构的忆阻器(图 7a) ，改善了器件的电阻转换性能，并且展现出良好的多阻态特性(图 7b) 。在对器件的突触特性研究中发现，插入 BFO 后人工突触的 LTP 和 LTD 的非线性因子降低，具有更好的电导调制线性度(图 7c) ，这对于将器件应用于人工神经网络中提高识别精度十分重要; 同时，对该器件 PPF、STDP 突触特性的表征中也展现出了较好的突触学习行为。基于该器件构造的人工神经网络 MNIST 模式识别的准确率最高达到了 91.2%(图 7d) [74] 。

Li 等人构建了 $Cu/GeTe/Al_2O_3/Pt$ 结构的忆阻结构单元，图 8a 为结构单元界面 SEM 图像。在 Al_2O_3 厚度为 3 nm 的器件中，施加脉冲宽度为 15

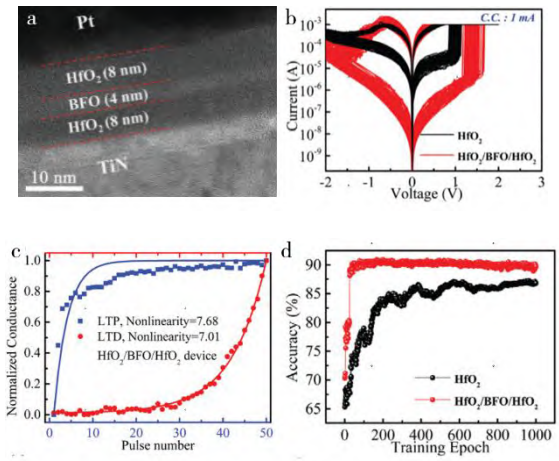

图 7　$HfO_2/BFO/HfO_2$ 结构忆阻器(a) 及其突触特性[74]: (b) 多阻态特性; (c) 电导调制线性度; (d) 模式识别准确率

Fig.7 Device structure of $HfO_2/BFO/HfO_2$ (a) and its synapse characteristic[74]: (b) multiple resistance characteristics; (c) conductance modulation linearity; (d) pattern recognition accuracy

μm、脉冲强度为 0.45 V，以及脉冲宽度为 15 μm、脉冲强度为-0.35 V 的固定电压脉冲信号，器件分别出现 LTP 和 LTD 行为，并且展现出了 STDP 学习行为(图 8c，d) [59] 。

此外，二维材料作为下一代材料，在人工突触领

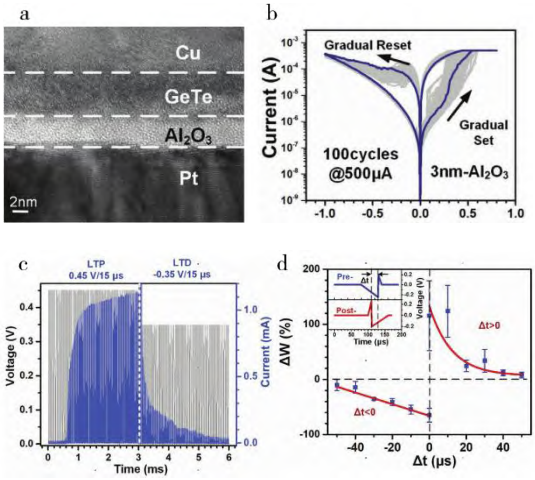

图 8 Cu/GeTe/Al_2O_3/Pt 器件结构及其突触特性[59]

Fig. 8 Device structure of Cu/GeTe/Al_2O_3/Pt and its synapse characteristic[59]

域吸引了广泛注意，近年来研究人员对具有代表性的 MoS_2 材料进行了广泛研究。Sangwan 等人制造了单层多晶 MoS_2 的忆阻器，通过与晶体管结合实现了电导调制，并发现 MoS_2 多端器件表现出 LTD、LTP 等突触特性[75]。

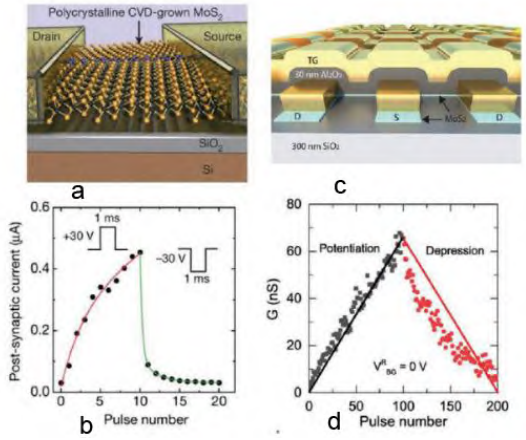

图 9 单层多晶 MoS_2 忆阻器结构示意图及其突触特性[77]

Fig. 9 Structural diagram and synaptic characteristics of single-layer polycrystalline MoS_2 memristor[77]

Li 等通过分子束外延的方法生长了晶圆级的多晶 $HfSe_2$，并基于此制备了具有可编程电导的忆阻器交叉阵列，实现了 0.6 V 较低的开关电压、0.82 pJ 的低切换能量。通过 C-AFM 和 TEM 表征显示器件的阻变机制是 Hf 导电丝的生成和溶解。制备的忆阻器也显示出了 LTD、LTP 等突触特性，据此构建的人工神经网络对 MNIST 数据集的识别准确率达到 93.34%[78]。

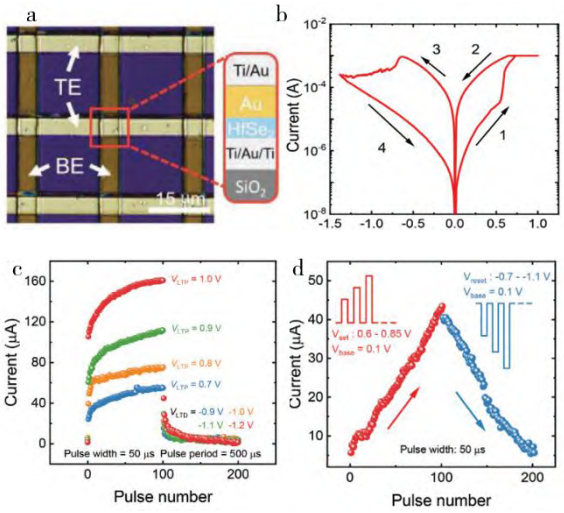

图 10 Ti/Au/$HfSe_2$/Ti/Au 器件结构及其突触特性[78]

Fig. 10 Device structure of Ti/Au/$HfSe_2$/Ti/Au and its synapse characteristic[78]

实现突触功能所关注的性能有突触功能完整性、外加脉冲宽度和幅度、训练能耗、电导状态数、电导动态范围、突触响应的线性度、保留率和耐久性等。目前基于忆阻器构建人工突触的研究大多只关注其中某几个性能，还需要对上述性能进行广泛研究，才能进一步对用于构建人工突触的各种材料体系和器件结构进行评估。

忆阻器具有较为完整的各类突触功能，器件的可扩展性和耐久性好，但存在能耗高、突触权重变化次数有限以及突触响应的线性度有待进一步提高等问题。同时，神经形态计算的硬件系统构建本质上是忆阻器阵列的集成，基于交叉阵列的忆阻器系统存在的寄生电流会导致抗干扰能力较差，在训练过程中可能出现读取错误和能耗增加。为了解决该问题，通常需要串联选择器或晶体管形成 1T1R 或 1S1R 单元，由此又带来电路级和系统级设计的复杂性[79]。上述问题带来的诸多挑战，需要进一步通过对忆阻器的材料、结构等多方面研究来解决。

5 总结与展望

忆阻器由于其电学特性与生物突触特性的高度相似，在高性能神经形态计算模拟基本人工突触中显示出了巨大的潜力。近些年，人工智能和神经网

络的快速发展推动着忆阻器器件的研究，发展了导电细丝理论、界面电子理论、热效应等解释器件阻变过程的物理模型并对不同材料体系的忆阻器等进行了广泛的研究。通过忆阻器模拟人工突触也取得了一定进展，能够实现 LTP、PPF、STDP 等的基本突触功能，较传统 CMOS 构建的神经网络也展现出诸多优势。但忆阻器的实际应用仍面临诸多问题，周期间与器件间的较大性能波动是忆阻器进一步推向大规模应用的最大挑战。另一方面，阻变机理研究不够透彻，发展的诸多仿真模型停留在现象解释的阶段，还不能从理论上给出进一步提高器件性能的方法，未来在模型与理论方面仍需进行深入的研究。

参考文献：

[1] Chklovskii D B, Mel B W, Svoboda K. Cortical Rewiring and Information Storage [J]. Nature, 2004, 431(7010): 782-788.

[2] Khwa W S, Chang M F, Wu J Y, et al. A Retention-Aware Multilevel Cell Phase Change Memory Program Evaluation Metric [J]. IEEE Electron Device Letters, 2016, 37(11): 1422-1425.

[3] Nandakumar S R, Le Gallo M, Boybat I, et al. A Phase-Change Memory Model for Neuromorphic Computing [J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(15): 1-12.

[4] Jackson B L, Rajendran B, Corrado G S, et al. Nanoscale Electronic Synapses Using Phase Change Devices [J]. ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems, 2013, 9(2): 1-20.

[5] Wu M H, Hong M C, Chang C C, et al. Extremely Compact Integrate-and-Fire STT-MRAM Neuron: A Pathway toward All-Spin Artificial Deep Neural Network [C]. // 2019 Symposium on VLSI Technology. Kyoto, Japan, 2019: T34-T35.

[6] Vincent A F, Larroque J, Zhao W S, et al. Spin-Transfer Torque Magnetic Memory as a Stochastic Memristive Synapse [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2015, 9(2): 166-174.

[7] Wan Q, Zhang P, Shao Q, et al. $(Bi_{0.2}Sb_{0.8})_2Te_3$ Based Dynamic Synapses with Programmable Spatio-Temporal Dynamics [J]. APL Materials, 2019, 7(10): 1-8.

[8] Jot S, Zyarah A, Kurinec S, et al. FeFET-Based Neuromorphic Architecture with On-Device Feedback Alignment Training [C]. // 2020 21st International Symposium on Quality Electronic Design. Santa Clara, USA, 2020: 317-322.

[9] Chen A. A Review of Emerging Non-Volatile Memory (NVM) Technologies and Applications [J]. Solid-State Electronics, 2016, 125: 25-38.

[10] Chua L O. Memristor-The Missing Circuit Element [J]. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1971, 18(5): 507-519.

[11] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The Missing Memristor Found [J]. Nature, 2008, 453: 80-83.

[12] Yao P, Wu H, Gao B, et al. Face Classification Using Electronic Synapses [J]. Nature Communications, 2017, 8: 15199.

[13] Yao P, Wu H, Gao B, et al. Fully Hardware-Implemented Memristor Convolutional Neural Network [J]. Nature, 2020, 577: 641-646.

[14] Fackenthal R, Kitagawa M, Otsuka W, et al. A 16Gb ReRAM with 200MB/s Write and 1GB/s Read in 27nm Technology [C]. // 2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers. San Francisco, USA, 2014: 338-339.

[15] Chai Z, Freitas P, Marsland J, et al. GeSe-Based Ovonic Threshold Switching Volatile True Random Number Generator [J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(2): 228-231.

[16] Chai Z, Freitas P, Zhang W D, et al. Stochastic Computing Based on Volatile GeSe Ovonic Threshold Switching Selectors [J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(10): 1496-1499.

[17] Prakash A, Jana D, Maikap S. TaOx-Based Resistive Switching Memories: Prospective and Challenges [J]. Nanoscale Research Letters, 2013, 8(1): 418.

[18] Raghavan N. Performance and Reliability Trade-Offs for High-k RRAM [J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(9-10): 2253-2257.

[19] Sekar D C, Bateman B, Raghuram U, et al. Technology and Circuit Optimization of Resistive RAM for Low-Power. Reproducible Operation [C]. // 2014 IEEE International Electron Devices Meeting. San Francisco, USA, 2015: 28.3.1-28.3.4.

[20] Huang X D, Li Y, Li H Y, et al. Forming-Free, Fast, Uniform, and High Endurance Resistive Switching from Cryogenic to High Temperatures in $W/AlO_x/Al_2O_3/Pt$ Bilayer Memristor [J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(4): 549-552.

[21] Bagdzevicius S, Maas K, Boudard M, et al. Interface-Type Resistive Switching in Perovskite Materials [J]. Journal of Electroceramics, 2017, 39: 157-184.

[22] Waser R, Aono M. Nanoionics-Based Resistive Switching Memories [J]. Nature Materials, 2007, 6(11): 833-840.

[23] Lee J S, Lee S, Noh T W. Resistive Switching Phenomena: A Review of Statistical Physics Approaches [J]. Applied Physics Reviews, 2015, 2(3): 031303.

[24] Menzel S. Comprehensive Modeling of Electrochemical Metallization Memory Cells [J]. Journal of Computational Electronics, 2017, 16(4): 1017-1037.

[25] Mohammad B, Jaoude M A, Kumar V, et al. State of the Art of Metal Oxide Memristor Devices [J]. Nanotechnology Reviews, 2016, 5(3): 311-329.

[26] Hansen M, Ziegler M, Kolberg L, et al. A Double Barrier Memristive Device [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 13753.

[27] Goux L, Opsomer K, Degraeve R, et al. Influence of the Cu-Te Composition and Microstructure on the Resistive Switching of Cu-Te/Al_2O_3/Si Cells [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(5): 053502.

[28] Tseng Y T, Chen I C, Chang T C, et al. Enhanced Electrical Behavior from the Galvanic Effect in Ag-Cu Alloy Electrode Conductive Bridging Resistive Switching Memory [J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(5): 053501.

[29] Gao S, Zeng F, Li F, et al. Forming-Free and Self-Rectifying Resistive Switching of the Simple Pt/TaO_x/n-Si Structure for Access Device-Free High-Density Memory Application [J]. Nanoscale, 2015, 7(14): 6031-6038.

[30] Blázquez O, Frieiro J L, López-Vidrier J, et al. Light-Activated Electroforming in ITO/ZnO/ p-Si Resistive Switching Devices [J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(26): 261104.

[31] Pal A, Narasimhan V K, Weeks S, et al. Enhancing Ferroelectricity in Dopant-Free Hafnium Oxide [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(2): 022903.

[32] Young-Fisher K G, Bersuker G, Butcher B, et al. Leakage Current-Forming Voltage Relation and Oxygen Gettering in HfO_x RRAM Devices [J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(6): 750-752.

[33] Hayakawa Y, Himeno A, Yasuhara R, et al. Highly Reliable TaO_x ReRAM with Centralized Filament for 28-Nm Embedded Application [C]. // 2015 Symposium on VLSI Circuits. Kyoto, Japan, 2015: T14-T15.

[34] Zhou Q, Lu Q, Zhou Y, et al. Influences of Preparation Methods on Bipolar Switching Properties in Copper Nitride Films [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 229: 135-139.

[35] Yang Y, Sheridan P, Lu W. Complementary Resistive Switching in Tantalum Oxide-Based Resistive Memory Devices [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(20): 203112.

[36] Kurnia F, Liu C, Jung C U, et al. The Evolution of Conducting Filaments in Forming-Free Resistive Switching Pt/TaOx/Pt Structures [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(15): 152902.

[37] Jeon H, Park J, Jang W, et al. Stabilized Resistive Switching Behaviors of a Pt/TaO_x/TiN RRAM under Different Oxygen Contents [J]. Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science, 2014, 211(9): 2189-2194.

[38] Kim K M, Han S, Hwang C S. Electronic Bipolar Resistance Switching in an Anti-Serially Connected Pt/TiO_2/Pt Structure for Improved Reliability [J]. Nanotechnology, 2012, 23(3): 035201.

[39] Wu M C, Jang W Y, Lin C H, et al. A Study on Low-Power, Nanosecond Operation and Multilevel Bipolar Resistance Switching in Ti/ZrO_2/Pt Nonvolatile Memory with 1T1R Architecture [J]. Semiconductor Science and Technology, 2012, 27(6): 065010.

[40] Wang Y F, Lin Y C, Wang I T, et al. Characterization and Modeling of Nonfilamentary Ta/TaO_x/TiO_2/Ti Analog Synaptic Device [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10150.

[41] Song B, Xu H, Liu S, et al. Threshold Switching Behavior of Ag-SiTe-Based Selector Device and Annealing Effect on Its Characteristics [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2018, 6: 674-679.

[42] Aiba A, Koizumi R, Tsuruoka T, et al. Investigation of Ag and Cu Filament Formation Inside the Metal Sulfide Layer of an Atomic Switch Based on Point-Contact Spectroscopy [J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2019, 11(30): 27178-27182.

[43] Polasko K J, Tsai C C, Cagan M R, et al. Silver Diffusion in Ag_2Se/$GeSe_2$ Inorganic Resist System [J]. Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 1986, 4(1): 418-421.

[44] Jeon H, Park J, Jang W, et al. Resistive Switching Behaviors of Cu/TaO_x/TiN Device with Combined Oxygen Vacancy/Copper Conductive Filaments [J]. Current Applied Physics, 2015, 15(9): 1005-1009.

[45] Choi S J, Kim K H, Park G S, et al. Multibit Operation of Cu/Cu-GeTe/W Resistive Memory Device Controlled by Pulse Voltage Magnitude and Width [J]. IEEE Electron Device Letters, 2011, 32(3): 375-377.

[46] Celano U, Giammaria G, Goux L, et al. Nanoscopic Structural Rearrangements of the Cu-Filament in Conductive-

Bridge Memories [J]. Nanoscale, 2016, 8(29): 13915-13923.

[47] Hickmott T W. Low-Frequency Negative Resistance in Thin Anodic Oxide Films [J]. Journal of Applied Physics, 1962, 33(9): 2669-2682.

[48] Guo T, Tan T, Liu Z. The Improved Resistive Switching of HfO_2: Cu Film with Multilevel Storage [J]. Journal of Materials Science, 2015, 50(21): 7043-7047.

[49] Puglisi F M, Larcher L, Padovani A, et al. Bipolar Resistive RAM Based on HfO_2: Physics, Compact Modeling, and Variability Control [J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2016, 6(2): 171-184.

[50] Garbin D, Vianello E, Bichler O, et al. HfO_2-Based OxRAM Devices as Synapses for Convolutional Neural Networks [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62(8): 2494-2501.

[51] Larcher L, Pirrotta O, Puglisi F M, et al. Progresses in Modeling HfO_x RRAM Operations and Variability [J]. ECS Transactions, 2014, 64(14): 49-60.

[52] Pahinkar D G, Basnet P, West M P, et al. Experimental and Computational Analysis of Thermal Environment in the Operation of HfO_2 Memristors [J]. AIP Advances, 2020, 10(3): 035127.

[53] Yu L E, Kim S, Ryu M K, et al. Structure Effects on Resistive Switching of A1/TiO_x/A1 Devices for RRAM Applications [J]. IEEE Electron Device Letters, 2008, 29(4): 331-333.

[54] Acharyya D, Hazra A, Dutta K, et al. Highly Repeatable Multilevel Resistive Switching Characteristics of an Au/TiO_2/Ti Memory Device [J]. Semiconductor Science and Technology, 2013, 28(12): 125001.

[55] Acharyya D, Hazra A, Bhattacharyya P. A Journey towards Reliability Improvement of TiO_2 Based Resistive Random Access Memory: A Review [J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(3): 541-560.

[56] Wang S Y, Lee D Y, Tseng T Y, et al. Effects of Ti Top Electrode Thickness on the Resistive Switching Behaviors of Rf-Sputtered ZrO_2 Memory Films [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(11): 2007-2010.

[57] Wang Y, Liu Q, Lü H B, et al. Improving the Electrical Performance of Resistive Switching Memory Using Doping Technology [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(11): 1235-1240.

[58] Parshina L, Novodvorsky O, Khramova O, et al. Laser Synthesis of Non-Volatile Memristor Structures Based on Tantalum Oxide Thin Films [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2021, 142: 110460.

[59] Li H Y, Huang X D, Yuan J H, et al. Controlled Memory and Threshold Switching Behaviors in a Heterogeneous Memristor for Neuromorphic Computing [J]. Advanced Electronic Materials, 2020, 6(8): 2000309.

[60] Lim S, Kwak M, Hwang H. Improved Synaptic Behavior of CBRAM Using Internal Voltage Divider for Neuromorphic Systems [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(9): 3976-3981.

[61] Ren K, Zhu M, Song W, et al. Electrical Switching Properties and Structural Characteristics of GeSe-GeTe Films [J]. Nanoscale, 2019, 11(4): 1595-1603.

[62] Panda D, Tseng T Y. Perovskite Oxides as Resistive Switching Memories: A Review [J]. Ferroelectrics, 2014, 471(1): 23-64.

[63] Au K, Gao X S, Wang J, et al. Enhanced Resistive Switching Effect in Ag Nanoparticle Embedded $BaTiO_3$ Thin Films [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(2): 027019.

[64] Hong K, Le Q V, Kim S Y, et al. Low-Dimensional Halide Perovskites: Review and Issues [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(9): 2189-2209.

[65] Wang Y, Lv Z, Zhou L, et al. Emerging Perovskite Materials for High Density Data Storage and Artificial Synapses [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(7): 1600-1617.

[66] Shen Z, Zhao C, Qi Y, et al. Memristive Non-Volatile Memory Based on Graphene Materials [J]. Micromachines, 2020, 11(4): 341.

[67] Anasori B, Lukatskaya M R, Gogotsi Y. 2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes) for Energy Storage [J]. Nature Reviews Materials, 2017, 2: 16098.

[68] Rehman M M, Rehman H M M U, Gul J Z, et al. Decade of 2D-Materials-Based RRAM Devices: A Review [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2020, 21(1): 147-186.

[69] Wang M, Cai S, Pan C, et al. Robust Memristors Based on Layered Two-Dimensional Materials [J]. Nature Electronics, 2018, 1(2): 130-136.

[70] Liao K, Lei P, Tu M, et al. Memristor Based on Inorganic and Organic Two-Dimensional Materials: Mechanisms, Performance, and Synaptic Applications [J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2021, 13(28): 32606-32623.

[71] Yuan L, Liu S, Chen W, et al. Organic Memory and Memristors: From Mechanisms, Materials to Devices [J].

Advanced Electronic Materials, 2021, 7: 2100432.

[72] Benfenati F. Synaptic Plasticity and the Neurobiology of Learning and Memory [J]. Acta Biomedica, 2007, 78 (SUPPL. 1): 58-66.

[73] Choi S, Yang J, Wang G. Emerging Memristive Artificial Synapses and Neurons for Energy-Efficient Neuromorphic Computing [J]. Advanced Materials, 2020, 32(51): 2004659.

[74] Peng Z, Wu F, Jiang L, et al. HfO_2-Based Memristor as an Artificial Synapse for Neuromorphic Computing with Tri-Layer $HfO_2/BiFeO_3/HfO_2$ Design [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31: 2107131.

[75] Sangwan V K, Lee H S, Bergeron H, et al. Multi-Terminal Memtransistors from Polycrystalline Monolayer Molybdenum Disulfide [J]. Nature, 2018, 554: 500-504.

[76] Lee H S, Sangwan V K, Rojas W A G, et al. Dual-Gated MoS_2 Memtransistor Crossbar Array [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(45): 2003683.

[77] Lee G, Baek J H, Ren F, et al. Artificial Neuron and Synapse Devices Based on 2D Materials [J]. Small, 2021, 17 (20): 2100640.

[78] Li S, Pam M E, Li Y, et al. Wafer-Scale 2D Hafnium Diselenide Based Memristor Crossbar Array for Energy-Efficient Neural Network Hardware [J]. Advanced Materials, 2021: 2103376.

[79] Huang W, Xia X, Zhu C, et al. Memristive Artificial Synapses for Neuromorphic Computing [J]. Nano-Micro Letters, 2021, 13(1): 1-28.