动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023100902

六方氮化硼忆阻器的研究进展

王思博，刘晓航，陈占国*

（吉林大学 电子科学与工程学院，长春 130012）

摘　要： 六方氮化硼是一种与石墨烯结构相似的材料，以六方氮化硼作为阻变介质层的忆阻器，具有良好的散热性能，不易发生介电击穿，能够实现小尺寸、低功耗和大的开关比；在计算机运算存储研究、人工神经网络和神经形态（即类脑）计算领域有极大的应用前景。文章主要介绍了忆阻器的分类，分析了六方氮化硼忆阻器的阻变机制，综述了六方氮化硼忆阻器的研究现状。最后，指出了六方氮化硼忆阻器当前面临的挑战，并展望了未来的发展方向。

关键词： 六方氮化硼；忆阻器；低维材料

中图分类号： TN389；O482.4　**文章编号：** 1001－5868(2024)01－0011－08

Research Progress of Hexagonal Boron Nitride Memristor

WANG Sibo，LIU Xiaohang，CHEN Zhanguo

（School of Electronic Science and Engineering，Jilin University，Changchun 130012，CHN）

Abstract： As a graphene-like structural material，hexagonal boron nitride (h-BN) possesses many superior properties. Owing to their enhanced qualities such as simple device structure，low power consumption，and good scalability potential，h-BN memristors are receiving increasing attention and are currently considered to hold great application prospects in the fields of computing and storage，artificial neural networks，and neuromorphic computing. In this paper，a classification of memristors is introduced，the resistive switching mechanism of the h-BN memristor is discussed，and the research status of the h-BN memristor is reviewed. Finally，the current challenges of the h-BN memristor are pointed out，and the paper concludes with an outlook of the future direction of development.

Key words： hexagonal boron nitride；memristor；low dimensional material

0　引言

忆阻器是一种有记忆功能的无源器件，具有电阻的量纲，其忆阻值与输入电流或电压的作用历史密切相关，它被定义为电阻、电容和电感之外的第四类基本电路元器件[1]。2008 年惠普（HP）实验室成功制造出了第一个忆阻器[2]，自此掀起了忆阻器研究尤其是氧化物忆阻器研究的热潮，人们对于忆阻器研究的关注也与日俱增。

六方氮化硼（h-BN）是一种与石墨烯晶格结构相似的层状材料，其热稳定性与化学稳定性强[3]，具有很高的本征电阻率（10^{14} Ω·cm 量级）[4]。二维 h-BN 可以通过机械剥离[5-6]、液相剥离[7-8]等自上而下的方法制备，也可以利用化学气相沉积（CVD）[9-11]、磁控溅射[12]等传统工艺方法自下而上生长。

由于 h-BN 的这些优异性质，以 h-BN 作为忆阻器的阻变介质，制备金属/绝缘层/金属（MIM）结构忆阻器，不易发生介电击穿、具有良好的散热性能、能够实现较低的功耗以及较大的开关比。此外，二

收稿日期：2023－10－09.

基金项目：国家自然科学基金项目（62174066）.

* 通信作者：陈占国

维 h-BN 的制备工艺能够与传统工艺兼容也使忆阻器具有实现小尺寸、阵列化的潜力。本文从忆阻器的分类出发，介绍存在于 h-BN 忆阻器中的几种主要阻变机制，综述其在数据存储、人工神经网络等领域的研究现状，指出当前面临的挑战，并对未来的发展方向进行了展望。

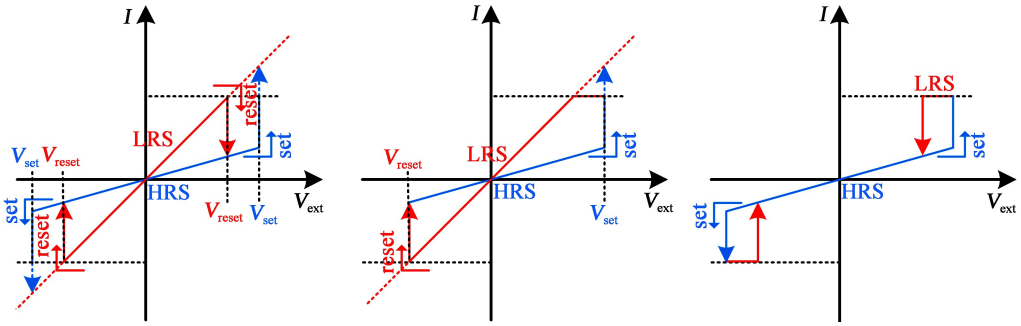
1 忆阻器分类

忆阻器的种类很多，可以按多种方式进行分类，下面主要介绍目前较为常用的几种分类方式。

1.1 按照开关极性分类

依照忆阻器的开关极性分类，可以将忆阻器分为单极型、双极型和阈值型。这种划分方法的主要依据是忆阻器在高阻态(HRS)和低阻态(LRS)之间转换时电极两侧所施加的电压极性。初始状态为 HRS 的忆阻器，在外加偏压的作用下，由 HRS 转变为 LRS 的过程称为置位(set)过程，此时施加的偏压称为置位电压；忆阻器由 LRS 恢复为 HRS 的过程称为复位(reset)过程，此时所施加的偏压称为复位电压。忆阻器在置位的过程中通常出现电流激增，因此往往通过设置限制电流(CL)来防止忆阻器由于突然产生过大的电流而造成不可恢复的击穿。

三种忆阻器的 I-V 特性曲线如图 1 所示[13]，单极型忆阻器的置位电压 V_{set} 与复位电压 V_{reset} 为相同极性，即进行置位和复位过程需要施加相同方向的电压。双极型忆阻器的置位电压与复位电压为不同极性，即置位后需要对忆阻器施加与置位过程极性相反的偏压才可以完成复位。单极型忆阻器和双极型忆阻器在没有外界偏压 V_{ext} 时有两个稳态，是一种非易失性存储器。阈值型忆阻器在施加阈值电压时可以进行置位，由 HRS 转变为 LRS，当外界偏压撤去时发生复位，器件恢复为 HRS。阈值型忆阻器在没有外界偏压时只有一个稳态，是一种易失性存储器。



(a) 单极型 (b) 双极型 (c) 阈值型

图 1 三种忆阻器的特征 I-V 曲线[13]

1.2 按赋定关系分类

按照磁通量(ϕ)和电荷(q)的赋定关系分类也是忆阻器的一种分类方法，这种分类方法可以将忆阻器分为荷控忆阻器和磁控忆阻器两类。

根据蔡少棠提出的忆阻器的定义[1]，忆阻器可以由磁通量与电荷的约束关系定义，其赋定关系可以表示为：$f(\phi,q)=0$。当忆阻器的赋定关系为 ϕ 是 q 的单值函数，即可以表示为：$\phi=f_1(q)$ 时，则可以把这个忆阻器看作一个电荷控制的忆阻器，即荷控忆阻器。同样地，如果忆阻器的赋定关系为 q 是 ϕ 的单值函数，即可以表示为：$q=f_2(\phi)$ 时，则可以把这个忆阻器看作一个由磁通量控制的忆阻器，即磁控忆阻器。

1.3 按主要应用分类

根据忆阻器的主要应用，可以将忆阻器分为数字忆阻器和模拟忆阻器两类[14]。数字忆阻器的开关比大，HRS，LRS 间的转换速度快，且置位电压和复位电压的电压值较为稳定；模拟忆阻器在外加偏压的作用下电流不会发生突变，它的电流变化较为平缓，电阻随着施加的扫描电压变化而变化，并具有对当前电阻状态的记忆能力。

因其特性不同，两种忆阻器的应用领域也有所差别。数字忆阻器的应用领域通常为存储和逻辑运算，适合应用于计算机等系统中的存储单元。模拟忆阻器由于其特性类似于神经突触，因而可以用来模拟突触的可塑性，从而应用到神经网络和神经形态的计算和模拟中[15-17]。模拟忆阻器和数字忆阻器的应用领域有所差别的原因主要是它们不同的忆阻特性[18]。

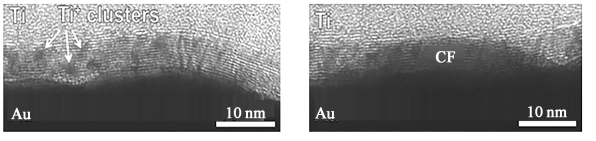
2　h-BN 忆阻器的主要阻变机制

在当前国内外的忆阻器研究过程中，对于忆阻器阻变机理的研究一直都是忆阻器研究的重点和难点，其主要原因是忆阻器的阻变机理多种多样，且一直存在些许争议。目前，忆阻器的众多阻变机理可以主要归纳为电化学金属化机制（ECM）、价态转变机制（VCM）、热化学机制（TCM）[19]。这几种机制在忆阻器的阻变过程中并不是单独存在的，它们很有可能在一次阻变过程中同时存在[20]。下面主要介绍存在于 h-BN 忆阻器中的几种主要阻变机理。

2.1　电化学金属化

当忆阻器的电极材料一端使用活性金属电极，另一端使用惰性金属电极时，在活性电极一端施加正电压，活性金属 M 被氧化为 M^{n+} 并在电场作用下向负极迁移，这些金属离子被还原为 M 原子后，逐渐形成导电细丝（CF），此时器件处于 LRS。当施加反向电压时，导电细丝被氧化溶解，导致忆阻器呈现 HRS。导电丝的形成包含了阳极氧化、金属阳离子迁移以及离子还原三个部分。阻变介质、电极材料选择的不同，影响着导电丝的形成过程。

当金属阳离子迁移速度较快时，阳极氧化的速度以及离子还原的速度都相对较慢，只有当金属阳离子迁移到惰性电极一侧后才会被还原。在惰性电极附近金属原子开始慢慢聚集，这样形成了由惰性电极向活性电极方向生长的导电丝。Pan 等[21]在其制备的忆阻器中，采用原位扫描隧道显微镜观测了忆阻器中导电丝的形成状态。如图 2 所示，在导电丝的形成过程中，活性金属 Ti 形成的导电细丝其较窄端在活性金属电极一侧，说明导电细丝是从惰性金属一侧向活性金属一侧生长。



（a）聚集的 Ti^+　　（b）从 Au 向 Ti 生长的导电丝

图 2　由惰性电极向活性电极生长的导电细丝高分辨率 TEM 图像[21]

当金属阳离子迁移速度很慢时，阳极氧化以及离子还原的速度相对较快，导致金属阳离子还没到达惰性电极时就被阴极漂移来的电子还原，在靠近活性电极处被还原成金属状态，成为活性电极的延伸部分。这种金属导电丝与上述第一种情况相反，它是由活性电极延伸出来向惰性电极一侧生长的。Qian 等[22]使用 STEM 对 Ag/h-BN/Cu 结构忆阻器进行表征，如图 3 所示，导电细丝由活性电极向惰性电极生长。这是因为 h-BN 薄膜中 Ag^+ 的迁移率比传统氧化物电介质中的迁移率更低。因此，Ag^+ 在移动一小段距离后便捕获从底部电极注入的自由电子，并在到达阴极之前还原成 Ag 原子，从而呈现出由活性电极到惰性电极的导电细丝生长过程。

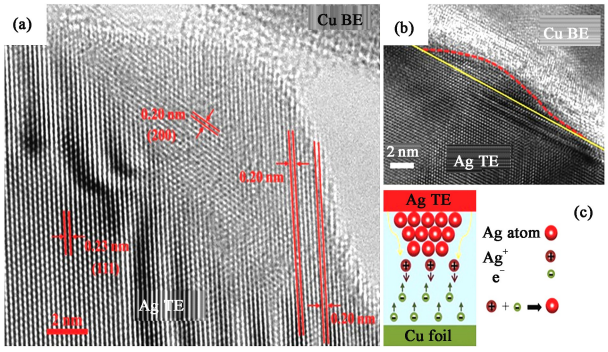


图 3　由活性电极向惰性电极生长的导电细丝高分辨 TEM 图像（a）与细丝生长机制示意图（b，c）[22]

在其他阻变材料的忆阻器中，也观测到了相似的导电细丝形成过程。Hubbard 等[23]观测到 Cu/Al_2O_3/Pt 结构忆阻器中 Cu 导电丝由惰性电极 Pt 侧向活性电极 Cu 侧生长，最后连接上下两个电极。Yang 等[24]对 Ag/a-Si/W 器件的阻变过程进行了动态观测，观察到了导电细丝由活性电极侧向惰性电极侧生长过程。

2.2　由 h-BN 缺陷导致的阻变特性

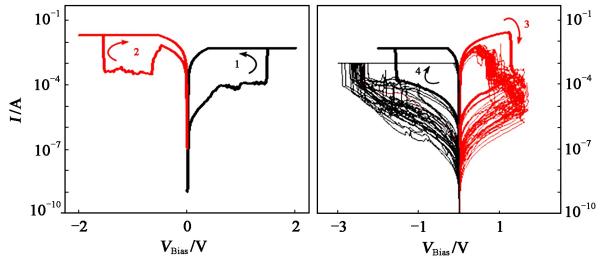
采用活性电极的忆阻器的阻变机理通常与电化学金属化机制相关。而以 h-BN 为介质、两端均采用惰性电极的 MIM 结构器件仍然呈现出阻变特性。

苏州大学的 Mario Lanza 团队用惰性电极 Au 制备了 Au/h-BN/Au 结构忆阻器，系统研究了 h-BN 中各种缺陷对阻变特性的影响[25]。结果表明，没有缺陷的多层 h-BN 未呈现出明显的阻变特性，而具有点缺陷、晶界等晶格缺陷的 h-BN 产生了明显的阻变现象。而转移过程导致的 h-BN 薄膜的褶皱、聚合物残余、薄膜与电极的间隙等对器件的性能没有显著影响。因此，h-BN 体内的晶界、缺陷也是忆阻器产生阻变现象的原因之一。Zobelli 等[26]对 h-BN 中硼空位和氮空位的移动进行了第一性原理计算，结果表明从能量的角度出发，在 h-BN 的熔点以下，硼空位相对于氮空位更容易发生移动，即氮空

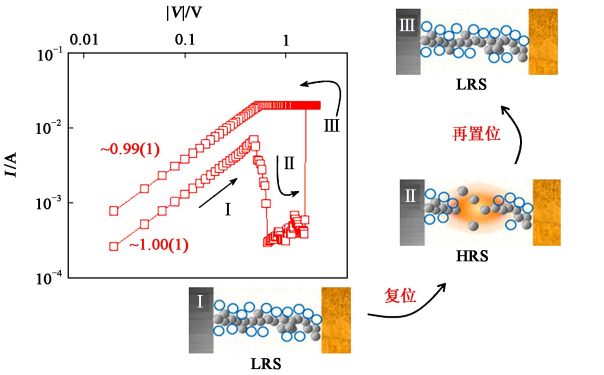
位相对于硼空位发生移动需要更高的能量。当对器件施加偏压时，多层 h-BN 薄膜的晶界在阻变过程中起着至关重要的作用，沿着富含硼空位的晶界迁移是金属离子对 h-BN 层渗透的一种能量更低的途径，因此在电场的作用下金属离子也可以借助硼空位发生迁移使器件表现出忆阻特性[27]。

2.3 导电细丝热熔解

导电细丝的热熔解也是 h-BN 忆阻器的阻变机制之一。金属电极形成导电细丝后，忆阻器件可能会表现出热化学机制的阻变行为。由于通电过程中产生的焦耳热，使导电细丝发生热熔解，从而使器件状态由 LRS 转变为 HRS。Zhuang 等[28]在制备的 Ti/h-BN/Au 结构忆阻器中观测到了器件异常的跳变。图 4(a)为该忆阻器的 *I-V* 特性测试结果，图中标号 1～4 为扫描顺序。如第二次扫描所示，器件在负偏压下由 LRS 转变为 HRS，随后又回归 LRS，器件的阻值产生了异常的跳变。而在随后的测试中器件又恢复为双极型。图 4(b)为第二次扫描的对数坐标曲线和该现象产生的原理示意图。在导电细丝形成后由于焦耳热的原因使导电丝破裂。随后在外加电场作用下导电丝又重新形成，从而使器件出现无极性(nonpolar)的现象。



(a) 器件的 *I-V* 特性



(b) 热熔解的原理示意图与其 *I-V* 曲线

图 4 存在导电细丝热熔解器件的 *I-V* 特性与机制示意图[28]

由于 h-BN 忆阻器中的这些阻变机制会共存于器件中，因此可能导致器件呈现多种极性共存[20-21]，影响着忆阻器特性的稳定。通过设置合适的 CL 大小，能够在一定程度上避免器件由于焦耳热导致导电细丝破裂，提升器件的稳定性。

3 h-BN 忆阻器研究现状

前文中对于 h-BN 忆阻器的阻变机理进行了详细的介绍。目前，使用 h-BN 作为阻变介质制备忆阻器的研究仍刚刚起步，相关文献报道还相对较少，下面将综述 h-BN 忆阻器研究现状。

3.1 h-BN 阻变存储器

随着信息化时代的来临，人们对于信息存储的需求不断增加，而忆阻器则是近年来存储技术研究的热点之一。忆阻器可以作为一种新型存储器即阻变存储器[29](RRAM)，应用于存储和逻辑运算中，利用阻态的高低作为“1”和“0”存储信息。虽然近年来对于金属氧化物 RRAM 已经有较多研究，但是由于性能等方面的不足对于面向产业化还有很多挑战。若能引入新的材料体系，如钙钛矿[30-31]、碳纳米管[32-33]、纳米线[34-35]和二维材料等，能够产生不同于金属氧化物忆阻器所具有的一些性能，对当前面临的一些问题可能提供新的解决思路。其中，使用二维材料似乎是一种更佳的途径，并且已经获得了一些具有许多优良性能的忆阻器。

在二维材料体系中，h-BN 被认为是一种理想的阻变介质，其电绝缘性自然地提供了更大的开关电流比。即使厚度只有单原子层的 h-BN 也能够表现出优良的阻变性能。Wu 等[27]使用 CVD 生长的单层 h-BN 为阻变介质制备忆阻器，器件具有较大的开关比(约为 10^7)以及较快的操作速度(小于 15 ns)，相较于其他金属氧化物电介质材料，h-BN 忆阻器还具有实现柔性器件的能力。Qian 等[22]首次利用在铜衬底上 CVD 法生长的 h-BN 薄膜制备了超薄(约为 3 nm)柔性 h-BN 阻变存储器件。他们制备的器件分别为需要进行薄膜转移和无需薄膜转移两种，如图 5 所示，以氧化铟锡(ITO)/聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)为基底，以 ITO 为电极，制备了 Ag/h-BN/ITO 结构柔性忆阻器；以生长了 h-BN 的铜箔为电极，在 PET 基底上实现了无需薄膜转移的 Au/h-BN/Cu 结构柔性忆阻器。两种器件均呈现出双极阻变特性，并能够在 550 次开关后仍保持良好的阻变特性。

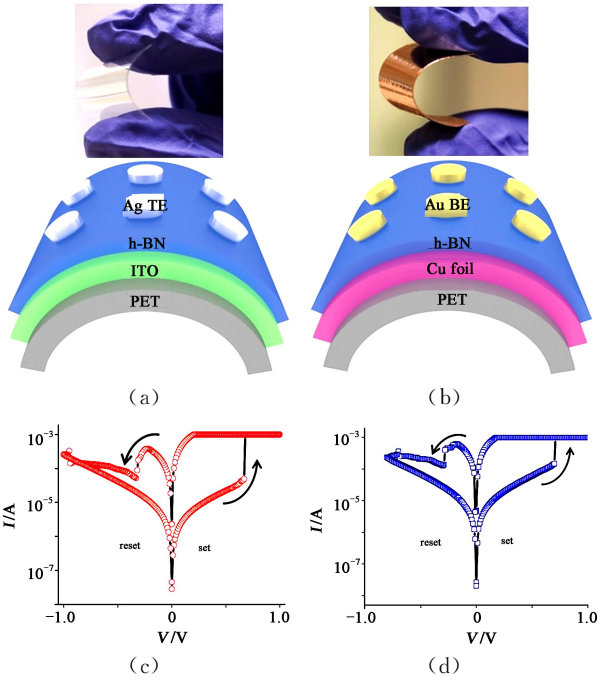


图 5　两种柔性忆阻器的结构示意图及其 *I-V* 特性曲线[22]。(a),(b) Ag/h-BN/ITO 与 Au/h-BN/Cu 柔性忆阻器结构示意图与实物图;(c),(d) Ag/h-BN/ITO 与 Au/h-BN/Cu 结构忆阻器的 *I-V* 特性

h-BN 可以在 MIM 结构的基础上通过堆叠其他功能层改进器件性能。Chen 等制备了 Ti/TiO/h-BN/Cu 结构的忆阻器,并与没有氧化层的 Ti/h-BN/Cu 忆阻器的性能进行了比较[36]。图 6(a)～(c)分别为具有氧化层的 h-BN RRAM 和没有氧化层的器件电阻分布的累积概率图。从实验结果可以得到,在多层 h-BN 和活性电极 Ti 之间插入 Ti 的氧化层,能够使器件的读写次数增加,电阻状态的均匀性得到明显改善。

Zhu 等[37]通过在金属电极和 h-BN 间添加石墨烯(G)层,制备了 Au/Ti/G/h-BN/G/Au 结构忆阻器,使器件产生了三个稳定的电阻状态,他们将第三个状态称为软低阻态(S-LRS)。通过控制限制电流的大小,能够实现忆阻器在三种阻态间的切换。当测试时使用的 CL 较小时(0.5 mA)器件在 S-LRS 与 HRS 间转换;当测试的 CL 较大时(5 mA)器件在 LRS 与 HRS 间转换;当 CL 大小适中时(1 mA),器件在测试过程中能够出现三个不同的电阻状态,此时的 S-LRS 呈现为亚稳态。他们认为器件呈现三种阻态是由于石墨烯阻挡层的存在,金属离子向阻变介质中的渗透程度不同,使器件形成了更细的导电丝,从而出现 S-LRS。

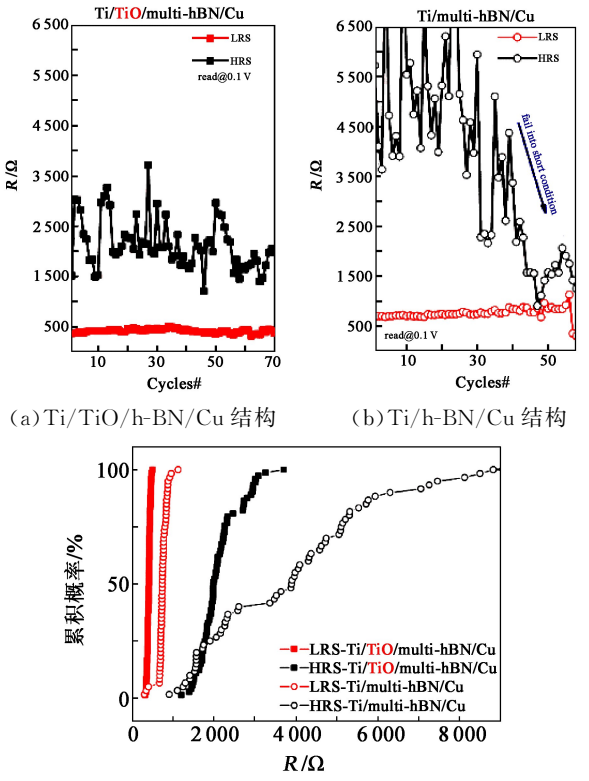


图 6　两种忆阻器的阻态分布与对比图[36]

h-BN 忆阻器多为纵向垂直结构,但也有人研究二维 h-BN 面内的阻变特性。Wang 等[38]利用 SiN_4 的间隙制备了电极间距为 9 nm 的 Ag/h-BN/Ag 横向结构的忆阻器。横向结构的器件仍具有阻变特性,如图 8 所示,器件呈现出单极和双极两种阻变特性,器件的开关比可达到 10^8,亚阈值摆幅降至 0.25 mV/dec。

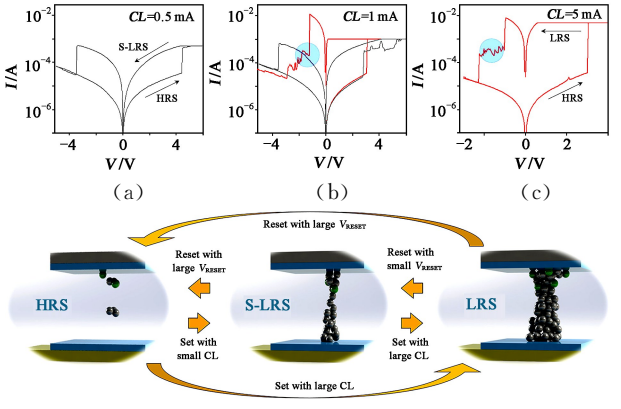


图 7　不同限制电流下器件的 *I-V* 特性曲线与三种阻态间转换机制示意图[37]。(a) HRS 与 S-LRS 间转变的 *I-V* 特性曲线;(b) 三种阻态(HRS/S-LRS/LRS)共存时的 *I-V* 特性曲线;(c) HRS 与 LRS 间转变的 *I-V* 特性曲线;(d) 三种阻态间转换机制示意图

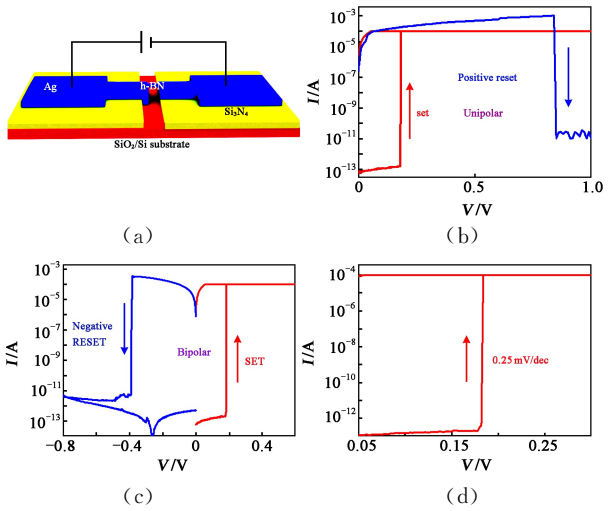


图 8 h-BN 横向忆阻器的结构与阻变特性[38]。(a) 器件结构示意图;(b) 器件呈现单极型阻变特性的 *I-V* 曲线;(c) 器件呈现双极型阻变特性的 *I-V* 曲线;(d)器件的亚阈值摆幅

3.2 h-BN 人工神经突触

忆阻器的 MIM 两端结构类似于生物突触,就像神经细胞的突触前膜和突触后膜间 Ca^+ 的运动一样,离子在忆阻器中的扩散与漂移可以用来模拟生物突触的行为,包括短期和长期记忆,双脉冲促进(PPF)、尖峰时间依赖可塑性(STDP)以及从短期可塑性(STP)向长期可塑性(LTP)的转变等特征,实现神经形态系统[39-43]。

Dastgeer 等[44]制备了 Ag/h-BN/Pt 结构忆阻器,该忆阻器具有生物突触特征,能够模拟生物突触行为。Meng 等[45]提出了一种可用于数字计算以及模拟神经形态计算的柔性二维忆阻器。器件结构为 ITO/h-BN/TaN,该忆阻器能够实现布尔逻辑运算,并具有突触行为特征,能够实现比生物突触快 4 个数量级的响应速度(1 μs),为构建比人脑计算速度更快、效率更高的人工神经网络系统提供了可能。

3.3 h-BN 忆阻器阵列

二维 h-BN 可以通过 CVD 等技术自下而上制备并能够将薄膜转移到其他衬底上,因此具有实现大面积 h-BN 忆阻器阵列的潜力。

Mario Lanza 团队将通过 CVD 制备的大面积 h-BN 薄膜转移到具有电极阵列结构的衬底上。制备了高密度的交叉结构分立忆阻器阵列,并能够用于模拟人工神经网络的图像识别。采用 CVD 方法制备的多层 h-BN 忆阻器阵列,其良率高、可重复性好。能够通过使用不同的电极材料来改变这些器件的阻变机制,从而调控器件特性,以使它们适应于不同的领域[46]。

在存储领域,RRAM 阵列架构一般设计为一个晶体管和一个阻变器件在一起构成一个存储单元的结构(1T1R)或一个选通器和一个阻变器件共同构成一个存储单元的结构(1S1R),以避免器件间的干扰。图 9(a)所示为 1T1R 架构,其利用晶体管的开关特性作为 RRAM 的整流器件来抑制器件间的串扰,以此实现对每一个存储单元的随机控制。其中每一个单元的配置如图 9(a)所示。RRAM 的顶电极(TE)接到位线(BL)上,晶体管的栅极由字线(WL)控制,源端连接到源端线(SL)。通过在 WL 和 BL(SL)处施加电压脉冲来执行 set(reset)操作。如图 9(b)所示,1S1R 架构中的选通器通常是一个与 RRAM 器件串联堆叠的双端器件,可以将其与 RRAM 共同视为一个单元。在交叉点体系结构中,WL 和 BL 相互垂直,每一个单元在两者之间连接。选通器的存在可以有效地解决交叉点架构中器件间的串扰等问题[47-49]。

Wang 等[50]利用单层 MoS_2 制备的场效应晶体管(FET)与 h-BN RRAM 集成,实现了共四个 RRAM 的 1T1R 结构。该结构具有可拓展性,可以通过进一步增加二维 h-BN 薄膜尺寸以及优化转移过程实现更大规模阵列化。Zhang 等[51]利用 h-BN 材料的特性,改进了 1T1R 架构,将三极管和 h-BN RRAM 集成到一个单元内,他们将这种架构称为“0.5T0.5R”。制备的器件开关时间小于 10 ns,能耗仅约为 0.07 pJ/bit,与传统的 1T1R 架构相比能够实现更高的集成密度。

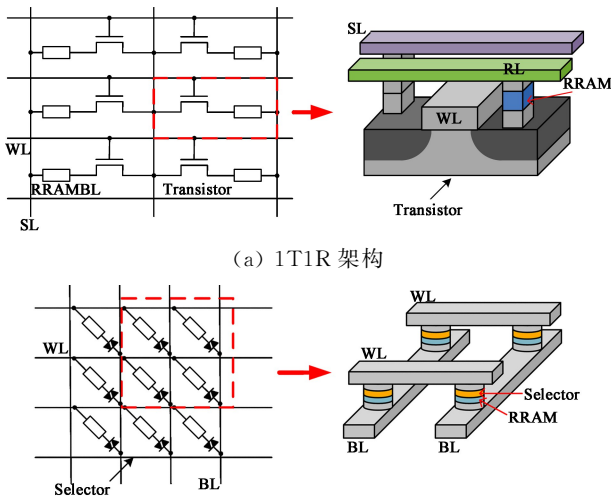


图 9 RRAM 架构[48]

虽然 h-BN 忆阻器具有阵列化的潜力，并能够实现小规模阵列化。然而受限于薄膜尺寸、薄膜质量和薄膜转移过程，器件的稳定性仍需进一步提高，实现大面积、高密度的 h-BN 忆阻器阵列仍有难度。

4　总结与展望

本文从忆阻器的分类出发，对 h-BN 忆阻器的主要阻变机制进行了介绍，并分析不同阻变机制的成因和特点。综述了 h-BN 忆阻器在存储、人工神经网络方向的研究进展，并基于此介绍了 h-BN 忆阻器阵列。

h-BN 忆阻器不仅可以实现大的开关比、低功耗、小尺寸，并且能够制备柔性器件。这使得这种新兴器件具有大规模阵列化的应用潜力，并有望成为未来存储、计算领域的重要组成部分。然而，h-BN 薄膜的晶界、缺陷等对忆阻器性能影响很大，如何能够控制 h-BN 缺陷仍需进一步研究；如何提高器件的读写次数、存储时间、稳定性等方面仍有很长的路要走。

参考文献：

[1] Chua L. Memristor-the missing circuit element[J]. IEEE Trans. on Circuit Theory, 1971, 18(5): 507-519.

[2] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found[J]. Nature, 2008, 453(7191): 80-83.

[3] Yin J, Li J, Hang Y, et al. Boron nitride nanostructures: Fabrication, functionalization and applications[J]. Small, 2016, 12(22): 2942-2968.

[4] Cao X K, Clubine B, Edgar J H, et al. Two-dimensional excitons in three-dimensional hexagonal boron nitride[J]. Appl. Phys. Lett., 2013, 103(19): 191106.

[5] Pacile D, Meyer J C, Girit Ç Ö, et al. The two-dimensional phase of boron nitride: Few-atomic-layer sheets and suspended membranes[J]. Appl. Phys. Lett., 2008, 92(13): 223-225.

[6] Li L H, Chen Y, Behan G, et al. Large-scale mechanical peeling of boron nitride nanosheets by low-energy ball milling [J]. J. of Materials Chemistry, 2011, 21(32): 11862-11866.

[7] Hernandez Y, Nicolosi V, Lotya M, et al. High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite [J]. Nature Nanotechnol., 2008, 3(9): 563-568.

[8] Cao L, Emami S, Lafdi K. Large-scale exfoliation of hexagonal boron nitride nanosheets in liquid phase[J]. Materials Express, 2014, 4(2): 165-171.

[9] Chen T A, Chuu C P, Tseng C C, et al. Wafer-scale single-crystal hexagonal boron nitride monolayers on Cu(111)[J]. Nature, 2020, 579(7798): 219-223.

[10] Siegel G, Gryzbowcki G, Hilton A, et al. Growth of multi-layer hBN on Ni(111) substrates via MOCVD[J]. Crystals, 2019, 9(7): 339.

[11] Camilli L, Sutter E, Sutter P. Growth of two-dimensional materials on non-catalytic substrates: h-BN/Au(111)[J]. 2D Materials, 2014, 1(2): 025003.

[12] Sutter P, Lahiri J, Zahl P, et al. Scalable synthesis of uniform few-layer hexagonal boron nitride dielectric films[J]. Nano Lett., 2013, 13(1): 276-281.

[13] Lee J, Lee S, Noh T. Resistive switching phenomena: A review of statistical physics approaches[J]. Chemicals & Chemistry, 2015, 2(3): 1129.

[14] Lv F, Yang R, Guo X. Analog and digital reset processes observed in Pt/CuO/Pt memristive devices[J]. Solid State Ionics, 2017, 303: 161-166.

[15] Yu S, Gao B, Fang Z, et al. A low energy oxide-based electronic synaptic device for neuromorphic visual systems with tolerance to device variation[J]. Adv. Materials, 2013, 25(12): 1774-1779.

[16] Seokjin K, Young-Chul S, Naidu C, et al. A programmable analog CMOS synapse for neural networks[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 1992, 2(4): 345-352.

[17] Jang B, Kim S, Yang S, et al. Polymer analog memristive synapse with atomic-scale conductive filament for flexible neuromorphic computing system[J]. Nano Lett., 2019, 1(4): 118-122.

[18] Choi H, Jung H, Lee J, et al. An electrically modifiable synapse array of resistive switching memory[J]. Nanotechnology, 2009, 20(34): 345201.

[19] Shen Z, Zhao C, Qi Y, et al. Advances of RRAM devices: Resistive switching mechanisms, materials and bionic synaptic application[J]. Nanomaterials, 2020, 10(8): 1437.

[20] Nuo X, Lifeng L, Xiao S, et al. Characteristics and mechanism of conduction/set process in TiN-ZnO-Pt resistance switching random-access memories[J]. Appl. Phys. Lett., 2008, 92(23): 232112.

[21] Pan C, Ji Y, Xiao N, et al. Coexistence of grain-boundaries-assisted bipolar and threshold resistive switching in multilayer hexagonal boron nitride[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(10): 1604811.

[22] Qian K, Tay R Y, Nguyen V C, et al. Hexagonal boron nitride thin film for flexible resistive memory applications[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(13): 2176-2184.

[23] Hubbard W, Kerelsky A, Jasmin G, et al. Nanofilament formation and regeneration during Cu/Al_2O_3 resistive memory switching[J]. Nano Lett., 2015, 15(8): 5665.

[24] Yang Y, Gao P, Gaba S, et al. Observation of conducting filament growth in nanoscale resistive memories[J]. Nature Communications, 2012, 3(3): 732.

[25] Shen Y, Zheng W, Zhu K, et al. Variability and yield in h-BN-based memristive circuits: The role of each type of defect

[J]. Advanced Materials, 2021, 33(41): 2103656.

[26] Zobelli A, Ewels C P, Gloter A, et al. Vacancy migration in hexagonal boron nitride[J]. Physical Review B, 2007, 75(9): 094104.

[27] Wu X, Ge R, Chen P A, et al. Thinnest nonvolatile memory based on monolayer h-BN[J]. Adv. Materials, 2019, 31(15): 1806790.

[28] Zhuang P, Lin W, Ahn J, et al. Nonpolar resistive switching of multilayer-hBN-based memories [J]. Adv. Electronic Materials, 2020, 6(1): 1900979.

[29] Chua L. Resistance switching memories are memristors[J]. Appl. Phys. A, 2011, 102: 765-783.

[30] Choi J, Le Q V, Hong K, et al. Enhanced endurance organolead halide perovskite resistive switching memories operable under an extremely low bending radius[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2017, 9(36): 30764-30771.

[31] Xiao Z, Huang J. Energy-efficient hybrid perovskite memristors and synaptic devices[J]. Advanced Electronic Materials, 2016, 2(7): 1600100.

[32] Radoi A, Dragoman M, Dragoman D. Memristor device based on carbon nanotubes decorated with gold nanoislands [J]. Appl. Phys. Lett., 2011, 99(9): 765.

[33] Chai Y, Wu Y, Takei K, et al. Resistive switching of carbon-based RRAM with CNT electrodes for ultra-dense memory[C]// 2010 Inter. Electron Devices Meeting. IEEE, 2010: 9.3.1-9.3.4.

[34] Yan H, Choe H S, Nam S W, et al. Programmable nanowire circuits for nanoprocessors[J]. Nature, 2011, 470(7333): 240-244.

[35] Cagli C, Nardi F, Harteneck B, et al. Resistive-switching crossbar memory based on ni-nio core-shell nanowires[J]. Small, 2011, 7(20): 2899-2905.

[36] Chen P A, Hsu W C, Chiang M H. Bilayer modulation with dual vacancy filaments by intentionally oxidized titanium oxide for multilayer-hBN RRAM [J]. IEEE Trans. on Nanotechnol., 2021, 20: 687-694.

[37] Zhu K, Liang X, Yuan B, et al. Graphene-boron nitride-graphene cross-point memristors with three stable resistive states[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2019, 11(41): 37999-38005.

[38] Wang Y, Huang Z, Chen X, et al. Building resistive switching memory having super-steep switching slope with in-plane boron nitride[J]. Nanotechnology, 2021, 33(12): 125202.

[39] Dastgeer G, Abbas H, Kim D Y, et al. Synaptic characteristics of an ultrathin hexagonal boron nitride (h-BN) diffusive memristor[J]. Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Letters, 2021, 15(1): 2000473.

[40] Wang Z Q, Xu H Y, Li X H, et al. Synaptic learning and memory functions achieved using oxygen ion migration/diffusion in an amorphous InGaZnO memristor[J]. Adv. Functional Materials, 2012, 22(13): 2759-2765.

[41] Wang Z, Joshi S, Savel'ev S E, et al. Memristors with diffusive dynamics as synaptic emulators for neuromorphic computing[J]. Nature Materials, 2017, 16(1): 101-108.

[42] Sokolov A S, Ali M, Riaz R, et al. Silver-adapted diffusive memristor based on organic nitrogen-doped graphene oxide quantum dots (N-GOQDs) for artificial biosynapse applications[J]. Adv. Functional Materials, 2019, 29(18): 1807504.

[43] Yi W, Tsang K K, Lam S K, et al. Biological plausibility and stochasticity in scalable VO_2 active memristor neurons [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 4661.

[44] Dastgeer G, Abbas H, Kim D Y, et al. Synaptic characteristics of an ultrathin hexagonal boron nitride (h-BN) diffusive memristor[J]. Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Letters, 2021, 15(1): 2000473.

[45] Meng J L, Wang T Y, He Z Y, et al. Flexible boron nitride-based memristor for in situ digital and analogue neuromorphic computing applications[J]. Materials Horizons, 2021, 8(2): 538-546.

[46] Chen S, Mahmoodi M R, Shi Y, et al. Wafer-scale integration of two-dimensional materials in high-density memristive crossbar arrays for artificial neural networks[J]. Nature Electronics, 2020, 3(10): 638-645.

[47] Burr G W, Shenoy R S, Virwani K, et al. Access devices for 3D crosspoint memory [J]. J. of Vacuum Science & Technology B, 2014, 32(4): 040802.

[48] Liang J, Wong H S P. Cross-point memory array without cell selectors——Device characteristics and data storage pattern dependencies[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2010, 57(10): 2531-2538.

[49] Chen A. A comprehensive crossbar array model with solutions for line resistance and nonlinear device characteristics[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2013, 60(4): 1318-1326.

[50] Wang C H, McClellan C, Shi Y, et al. 3D monolithic stacked 1T1R cells using monolayer MoS 2 FET and hBN RRAM fabricated at low (150 ℃) temperature[C]// 2018 IEEE Inter. Electron Devices Meeting (IEDM)., 2018: 22.5.1-22.5.4.

[51] Zhang D, Yeh C H, Cao W, et al. 0.5T0.5R——An ultracompact RRAM cell uniquely enabled by van der Waals heterostructures[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2021, 68(4): 2033-2040.

作者简介：

王思博(1998—)，男，吉林省长春市人，硕士，主要从事六方氮化硼忆阻器方面的研究；

陈占国(1972—)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事宽禁带半导体材料与器件、硅基光电子学等方面的研究工作。