综述

基于氧化铪构建的人工神经网络研究进展

刘　鎏，曹炜康，杨书亮，胡轶群*，李庆轩*，李振海*
（安徽大学 集成电路学院，合肥 230601）

摘要：氧化铪铁电隧道结（ferroelectric tunnel junction, FTJ）凭借独特的材料特性与器件性能，在存内计算中展现出较好的应用潜力。本文对铪基材料在人工神经网络中的应用与实现进行系统考察，为未来非冯·诺伊曼架构的硬件实现提供理论与实验依据。对 HfO_2 基 FTJ 的材料特性、器件性能及其在存内计算中的潜在应用进行深入分析：探讨铪基材料的研究背景、国内外研究现状及发展趋势；分析 FTJ 的工作原理，涵盖开关比、耐久性以及多态存储等关键指标；总结当前改善材料铁电性能的主要方法；重点讨论铪基 FTJ 在人工神经网络中的应用情况，并对其未来发展方向进行展望。

关键词：氧化铪；铁电隧道结；人工神经网络；存内计算；神经形态计算

中图分类号：TP183　　**文献标志码：**A

DOI: 10.3724/jfmd.2504018　　CSTR: 32180.14.jfmd.2504018

Research progresses on artificial neural network based on hafnium oxide

LIU Liu, CAO Weikang, YANG Shuliang, HU Yiqun*, LI Qingxuan*, LI Zhenhai*
(School of Integrated Circuits, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: The hafnium oxide ferroelectric tunnel junction (FTJ) has shown great potential in in-memory computing due to its unique material properties and device performance. This paper systematically examines the application of hafnium-based FTJ in artificial neural networks, providing both theoretical and experimental foundations for the hardware realization of non-von Neumann architectures. Material properties, device performance of HfO_2-based FTJs, and their potential applications in in-memory computing are thoroughly analyzed. The research background, global advancements, and emerging trends in hafnium-based materials are reviewed. The operational principles of FTJs are explored, with an emphasis on critical metrics such as switching ratio, endurance, and multi-state storage, alongside current strategies to enhance their ferroelectric characteristics. The integration of hafnium-based FTJs into neural networks is evaluated, and potential future development pathways are projected.

Key words: hafnium oxide; ferroelectric tunnel junction; artificial neural network; in-memory computing; neuromorphic computation

收稿日期：2025−04−17；　**修订日期：**2025−05−20

作者简介：刘　鎏（2003—），女，学士，研究方向为集成电路设计与系统集成（E-mail: 18261654405@163.com）
通信作者：胡轶群（1994—），男，讲师，研究方向为微纳米力学（E-mail: huyiqun@ahu.edu.cn）
李庆轩（1995—），男，讲师，研究方向为柔性电子器件（E-mail: liqx@ahu.edu.cn）
李振海（1993—），男，讲师，研究方向为新型存储器件（E-mail: li.zhenhai@ahu.edu.cn）

0 引言

随着人工智能的快速发展，传统冯·诺伊曼计算架构由于物理上的“存”“算”分离特性，面临着计算效率低下和能量损耗过高的问题。近年来，存内计算与神经形态计算通过模拟生物神经系统的并行处理机制，为突破这一瓶颈提供了新思路。铁电隧道结（ferroelectric tunnel junction, FTJ）作为一种新型非易失性存储器，凭借独特的工作原理与优异性能，成为当前研究的热点之一[1]。

FTJ 由两片金属电极及中间的铁电材料构成。当施加外电场时，铁电层的极化方向发生翻转，引发其电阻状态的转换，进而产生隧道磁电阻效应[2]。伴随极化方向的翻转，隧穿电流会发生显著变化，使器件电阻随之改变，从而实现数据的存储与读取功能。FTJ 的非易失性使其在断电状态下仍能保持已存储数据，可满足持久存储需求。这一特性还使其能够呈现多种状态，在人工神经网络的构建中可有效模拟生物神经网络中突触的功能。此外，FTJ 器件具有低功耗、高速的特点，可实现高精度、线性的电导调控[3]。

钙钛矿型材料是常用的传统铁电材料，包括 $BaTiO_3$、$BiFeO_3$、$PbZr_{0.2}Ti_{0.8}O_3$ 等种类[4]。这类材料具有较高的极化强度和剩余极化强度，有助于实现较大的隧穿电阻。然而，随着实际应用对器件性能要求的提升，这类材料在与硅基技术兼容的过程中逐渐暴露出晶格、热、化学和界面不匹配的问题。同时，在纳米级厚度下，传统钙钛矿型铁电材料的铁电性能受到限制，难以满足超大规模集成电路对器件尺寸不断缩小的要求。

在此背景下，HfO_2 基铁电材料及其对应的 FTJ 器件逐渐受到关注。HfO_2 具有与硅工艺的兼容性良好、工作电压低以及居里温度高等优点。此外，HfO_2 优异的互补金属-氧化物-半导体（complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS）工艺兼容性意味着其可与现有半导体工艺结合，便于实现大规模集成与制造，这推动了神经网络硬件系统的实际应用与商业化进程[5]。

FTJ 器件的早期研究主要聚焦于其在非易失性存储器领域的应用。近年来，相关研究取得了一系列显著进展。Cheema 等[6] 采用低温原子层沉积技术在硅基底上制备了 1 nm 厚的锆掺杂氧化铪薄膜，并通过压电力显微镜、X 射线衍射图谱、X 射线吸收光谱等方法证明了其中强铁电性能的存在。Luo 等[7] 在铁电量子隧道结中成功实现了在亚纳秒电脉冲调控下电导态的非易失连续调制，研发出类脑突触器件。Wang 等[8] 开展了基于锆掺杂氧化铪基铁电薄膜的人工突触器件的研究，并基于优化后的薄膜制备了 FTJ 器件，实现了较高的开关比和优异的电导调制特性。Cao 等[9] 首次研发了一种与 CMOS 工艺完全兼容的氧化铪基反铁电神经元器件，其具有超低能耗、超高稳定性与耐久性等优势，基于此构建的双层神经网络在手写体识别任务中达到了 96.8% 的识别准确率。

可见，FTJ 的应用场景已不再局限于传统存储器领域，而是在神经形态计算方向也展现出巨大潜力。神经形态计算模拟了大脑神经元间的信号传递机制，通过“突触”传递信息。作为忆阻突触器件，FTJ 具备模拟生物突触功能的潜力。调控 FTJ 器件的电阻状态，可实现与生物神经元类似的突触传递。尽管目前仍存在一些挑战，但随着硅兼容材料的不断优化和神经网络应用的发展，未来 FTJ 器件有望成为非易失性存储与计算领域的重要组成部分。深入探究与其相关的材料特性、器件结构及应用潜力，将有助于推动下一代存储与计算技术的突破。

1 FTJ 器件的存储机理与性能分析

1.1 FTJ 的工作原理

FTJ 的发现可追溯至 20 世纪 70 年代，Esaki 等[10] 首次提出了一种可能的 FTJ 结构，并将其命名为“极化开关”。该结构由两片金属电极及中间的铁电材料构成，如图 1 所示。

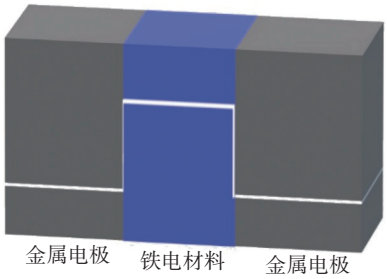

图 1 FTJ 器件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the FTJ device structure

在 FTJ 的金属电极上施加电压时，电子会以一

定概率通过超薄的铁电绝缘层, 发生量子隧穿, 进而形成隧穿电流。在此过程中, 隧穿概率主要取决于铁电绝缘层的势垒高度和宽度: 当铁电层的极化方向与电场方向相反时, 势垒高度和宽度增大, 电子隧穿概率降低, 隧穿电流减小, FTJ 呈现高电阻态; 反之, 隧穿概率升高, 隧穿电流增大, FTJ 呈现低电阻态[11]。由于铁电材料具有非易失性极化特性, 通过施加电压使铁电层发生极化翻转时, 电子隧穿概率会在高低两个稳定值之间切换, 使 FTJ 形成两个非易失性电阻状态, 分别对应于二进制存储单元中的“0”和“1”。因此, 通过精准调控外加电压, 可实现 FTJ 在低电阻态和高电阻态之间的可逆转变, 从而模拟生物神经元的突触可塑性。

1.2　FTJ 的存储性能

1.2.1　开关比

FTJ 的开关比指的是高电阻态与低电阻态的电阻比值, 这是衡量其存储性能的核心指标之一。较高的开关比有助于提升存储器的读取稳定性和抗干扰能力, 使器件能够实现更显著的状态切换, 进而提高存储密度。

新型掺杂氧化铪基铁电材料体系凭借与 CMOS 工艺的良好兼容性, 有效克服了厚度微缩的限制。然而, 受 $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$(HZO)基体材料固有的纳米多晶、多相复合结构的影响, 其器件开关比被限制在约 10^2 量级。为突破这一瓶颈, Gao 等[4] 采用原子层沉积技术构建了 Pt/1.5 nm HZO/Nb 掺杂 $SrTiO_3$(NSTO)铁电隧道结器件, 成功实现了高达 2×10^7 量级的开关比。实验与理论计算表明, 增加垂直极化的 [001]G 极性区和氧空位比例可显著提升铁电极化强度($P_r \approx 31\ \mu C\cdot cm^{-2}$), 进而强化隧穿电阻(tunneling electroresistance, TER)效应。通过施加不同幅值的电压, 研究人员测量了 Pt/1.5 nm HZO/NSTO FTJ 器件的电流-电压(*I-V*)回线(图 2(a)), 并获得了目前铪基 FTJ 器件的最大开关比(约 2×10^7, 如图 2(b)、(c)所示)。

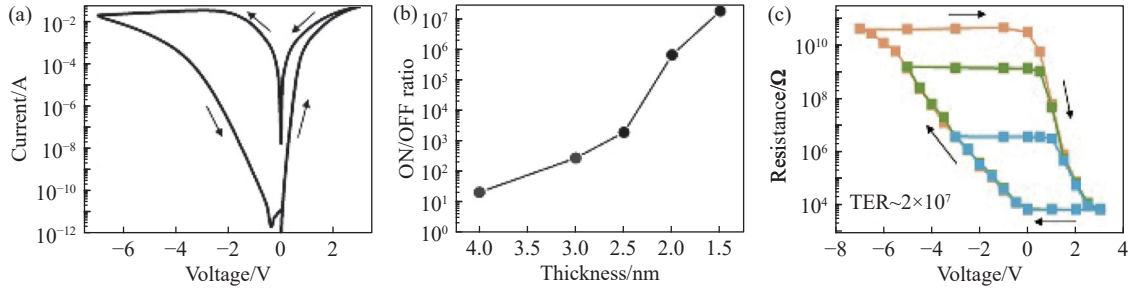

图 2　Pt/HZO/NSTO FTJ 器件的性能[4]。(a) Pt/HZO/NSTO 器件的 *I-V* 回线; (b)不同 HZO 厚度 FTJ 的开关比; (c) *R-V* 回线

Fig. 2　Performance of Pt/HZO/NSTO FTJ devices[4]. (a) *I-V* curves of Pt/HZO/NSTO devices; (b) switching ratio of FTJ with different HZO thicknesses; (c) *R-V* hysteresis loops

为实现更高的开关比, 中国科学技术大学的 Wang 等[12] 通过引入氧化硅插层构建了“介电/铁电”复合势垒结构, 显著提升了 FTJ 的不对称性, 从而实现了优异的高开关比性能。图 3(a)为不同极化状态器件电流密度随着施加电压的变化情况。图 3(b)展示了材料在不同脉冲宽度下的电阻随脉冲电压的变化, 揭示了其电阻开关特性及其对脉冲宽度的敏感性。宽脉冲有助于材料电阻状态的切换, 窄脉冲下则切换效果较弱。图 3(c)体现了材料的电学开关行为随脉冲宽度变化的规律, 并揭示了不同极性下的开关激活能垒。图 3(d)展示了材料在高/低电阻状态之间可逆切换的稳定性和可重复性。

1.2.2　耐久性、稳定性与可靠性

作为一种新型存储与逻辑器件, FTJ 的稳定性是评估其性能的另一个核心指标。随着开关循环次数的增加, FTJ 可能出现开态电流减小、高低阻态隧穿电阻比值下降以及极化翻转特性劣化等问题, 严重影响器件的正常运行与使用寿命。

FTJ 的稳定性测试主要包括疲劳性能测试与保持特性测试, 二者共同保障器件在长期使用中的可靠性与数据保持能力。图 4(a)为 FTJ 疲劳性能测试过程示意图。在测试开始前, 需测量 FTJ 器件在初始状态下的开态电阻和关态电阻, 作为后续测试的基准。然后, 通过施加特定电压脉冲进行写入和擦除操作, 模拟实际工作条件, 从而评估 FTJ 在

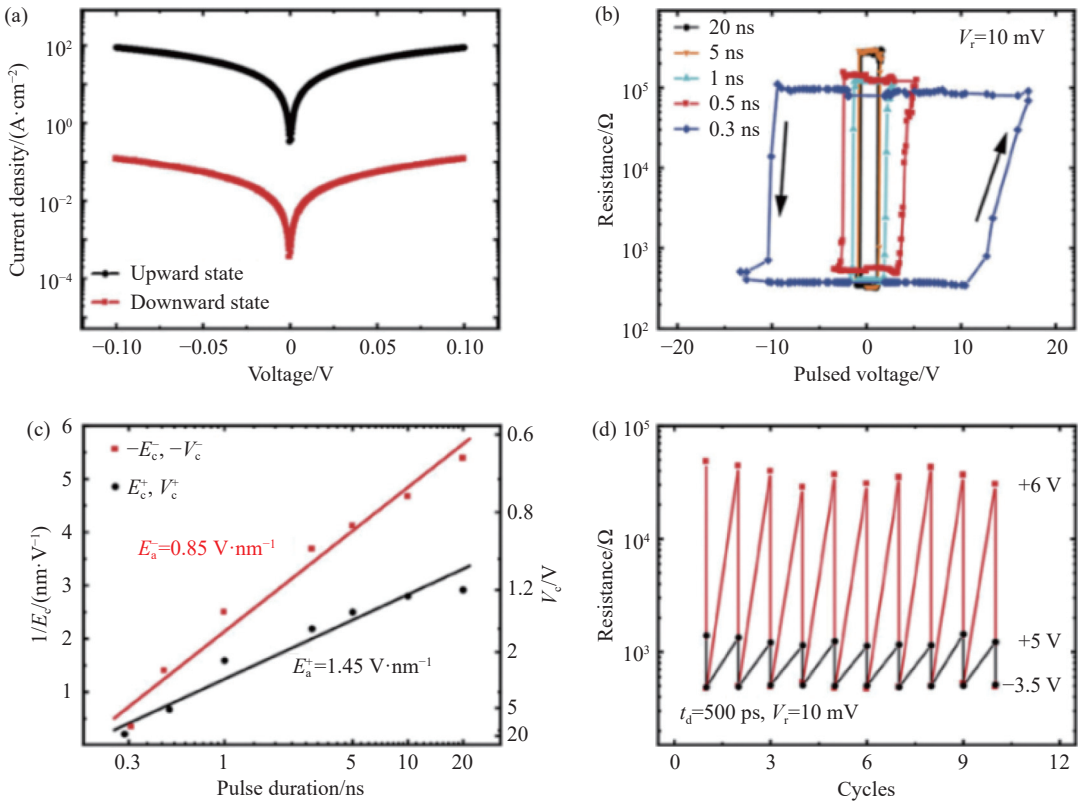

图 3　FTJ 的超快电阻翻转[12]。(a)FTJ 高、低阻态的直流伏安特性;(b)FTJ 在不同操作时间下的阻变特性;(c)FTJ 操作时间与矫顽场的关系;(d) FTJ 在 0.5 ns 操作时间下高、低阻态间的直接转换

Fig. 3　Ultrafast resistance switching in ferroelectric tunnel junctions[12]. (a) The DC *I*-*V* characteristics of high and low resistance states in FTJs; (b) resistive operational characteristics of FTJs at different operational time; (c) the relationship between operational time and coercive field in FTJs; (d) direct transition between high and low resistance states of FTJs at an operational time of 0.5 ns

长期使用中的稳定性和耐久性。周期性测试完成后,通过读取操作获取 FTJ 的状态,并与初始状态进行对比,量化剩余极化强度的衰减程度,进而评估器件的疲劳性能。

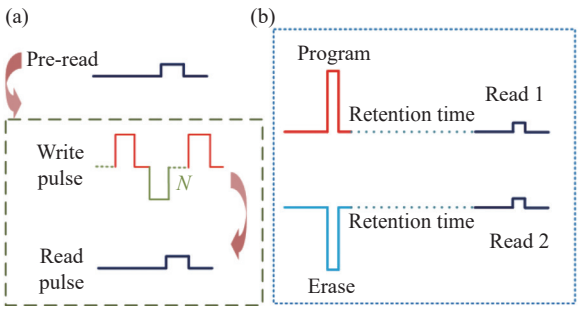

图 4　FTJ 的 (a) 疲劳特性与 (b) 保持特性测试过程示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the testing process for (a) FTJ fatigue characteristic and (b) retention characteristic

保持特性是 FTJ 的另一个重要指标,用于表征其在断电状态下长时间维持存储状态的能力。图 4(b)为 FTJ 保持特性测试的示意图。测试前,需将 FTJ 编程至特定极化状态,随后将其置于无电场环境中模拟断电条件。通过定期读取极化状态来监测数据保持能力随时间的变化情况,评估 FTJ 在无刷新条件下的数据保持期限。

Li 等[13] 研究了铝(Al)和镧(La)共掺杂对铪基铁电薄膜性能的影响,揭示了材料与结构设计在提升耐久性方面的重要作用。结果表明,La 的引入会引发薄膜晶格的畸变,改变铪基铁电薄膜的相结构,并显著增强其极化能力。同时,Al 的掺杂能够优化材料的晶格结构,提高其在高温环境下的稳定性。Al 和 La 的协同掺杂,不仅可显著提升铪基铁电薄膜的极化特性,还能增强其抗高温疲劳性能,从而实现了综合耐久性的提升。这一研究突出了材料成分与结构设计的协同作用,为开发高性能、高耐久性的铁电器件提供了新思路。

此外,铪基铁电薄膜的耐久性问题与氧空位的存在密切相关,因为氧空位不仅会引起极化损失和电畴固定,还会在薄膜中形成导电通道,进而影响

器件寿命。因此, 控制氧空位的数量成为提升器件耐久性的关键策略之一。界面处理等方法被用于调控界面处氧空位的数量[8]。

1.2.3　多态存储特性

通常情况下, FTJ 仅表现出高阻和低阻两种电阻状态。然而, 某些材料同时具备铁电性和铁磁性, 在特定温度下能够同时展现自发极化和自发磁化, 产生磁电耦合效应, 从而实现多态存储[14]。例如, $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 和 $La_{1-x}Ca_xMnO_3$ 等氧化物钙钛矿材料能够同时表现出隧道磁电阻和隧穿电致电阻效应, 这类特殊材料构筑的 FTJ 通常被称为多铁隧道结(multiferroic tunnel junction, MFTJ)。

在 MFTJ 中, 当材料内部的磁化方向从平行切换到反平行时, 其电阻会发生显著变化, 这为调控 MFTJ 的阻值提供了额外的自由度, 可通过调制磁场和电场实现四态存储。Yin 等[15] 利用这一磁电耦合机制, 基于 $BaTiO_3$ 实现了稳定的四态 MFTJ, 并进一步通过集成铁磁层之间的非共线磁化对准设计, 实现了具有 8 种非易失性阻状态的 MFTJ, 如图 5 所示(其中, 1 Oe ≈ 79.577 $A·m^{-1}$)。通过调控界面处电极与势垒之间的磁化和极化耦合, 电子的自旋极化方向亦可随铁电极化方向的翻转而反转。Pantel 等[16] 通过纳秒级电脉冲来调控电子的自旋方向, 实现了对 MFTJ 阻态的精确调控。

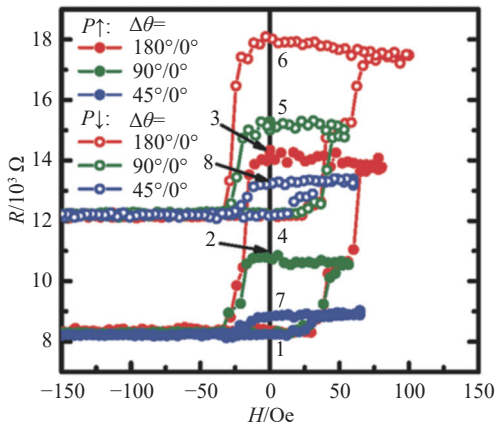

图 5　磁调节多电阻 MFTJ 特性, 在 80 K 下呈现出 8 种非易失性电阻状态[15]

Fig. 5　Characteristics of magnetically regulated multi-resistance MFTJ, with 8 non-volatile resistance states at 80 K[15]

除了多铁电体本身具备的多态存储特性外, 选择具有铁磁性的电极材料也能使 FTJ 产生磁电耦合效应, 从而实现多态存储。例如, 钴(Co)作为一种常见的铁磁性金属材料, 常被用作 MFTJ 的电极。由 Co 与铁酸铋($BiFeO_3$)构成的铁电隧道结可实现 6 种稳定的非易失存储状态, 开关比超过 10^4[17]。

2　铪基薄膜铁电性能的优化

研究人员提出了多种增强铪基铁电薄膜电学性能的方法。通过掺杂元素来改变晶体结构对称性或引入适量氧空位以降低相转变能垒, 可有效提升 HfO_2 薄膜的铁电性能。此外, 在衬底与电极间引入应力、减小薄膜厚度以及降低退火温度等方法, 也有助于稳定铁电相[18]。

2.1　掺杂优化

掺杂能够改变薄膜的晶体结构和缺陷状态, 进而影响其铁电性能。掺杂原子可在 HfO_2 薄膜内产生内应力, 以促进正交相的形成, 也可利用掺杂层与 HfO_2 正交相结构相似的特点, 诱导正交相的生成。此外, HfO_2 薄膜的铁电性能与其掺杂离子半径及掺杂含量密切相关。掺杂剂与 Hf 的离子半径差异会导致薄膜中金属原子与氧原子之间的键长发生变化, 从而改变 HfO_2 基薄膜的晶体结构对称性[19]。

值得注意的是, HfO_2 铁电相处于亚稳态结构, 氧空位作为其中最常见的缺陷类型, 在稳定亚稳态铁电相方面具有显著作用, 但也会对器件性能产生一定负面影响。例如, 氧空位对铁电畴壁的束缚效应会减慢 HfO_2 铁电极化的翻转速度。为应对这一挑战, Zhou 等[20] 采用受主元素 La 与施主元素 Ta 共掺杂的方法来调控外延铪基铁电薄膜, 成功稳定了铪基铁电的极化相, 降低了氧空位含量, 并制备出兼具高极化和快速翻转特性的铪基铁电薄膜。Li 等[21] 通过理论计算证明: 不同的 Al 掺杂含量会导致铁电薄膜的导电性、介电常数和铁电翻转动力学等多种电学性质发生变化, 适量的 Al 掺杂能够提高材料的剩余极化强度并降低矫顽电场, 而过量掺杂则可能引入缺陷态、削弱材料的铁电性能, 甚至使材料完全丧失铁电性。Xu 等[22] 研究了 Zr 和 La 共掺杂的铪基铁电薄膜, 发现其铁电性能随着 Zr 含量的增加而增强。此外, Wang 等[23] 通过提高标准 HZO 薄膜中的金属原子(Hf 和 Zr)含量以扩展晶格, 在额外应力的作用下稳定了铁电正交相(r 相), 显著优化了铪基铁电薄膜的矫顽电场、漏电流、耐压性和疲劳特性等电学性能。这些研

究结果，进一步凸显了掺杂手段在调控铪基铁电薄膜电学性质方面的有效性。

Müller 等[24] 研究了不同 ZrO_2 含量的 TiN/HZO/TiN 的电学性质，其电滞回线和 *C-V* 测量结果如图 6 所示。可见，随着 Zr 掺杂量的增加，HZO 薄膜的铁电性先增强，随后逐步转变为以 Zr 为主导的反铁电性。Liu 等[25] 对 La 掺杂的铪基铁电薄膜进行了系统研究，结果如图 7 所示，当 Hf 与 La 元素的比例为 15∶1 时，器件的剩余极化强度达到最大值，所制备的 FTJ 器件开关比达到了 92。

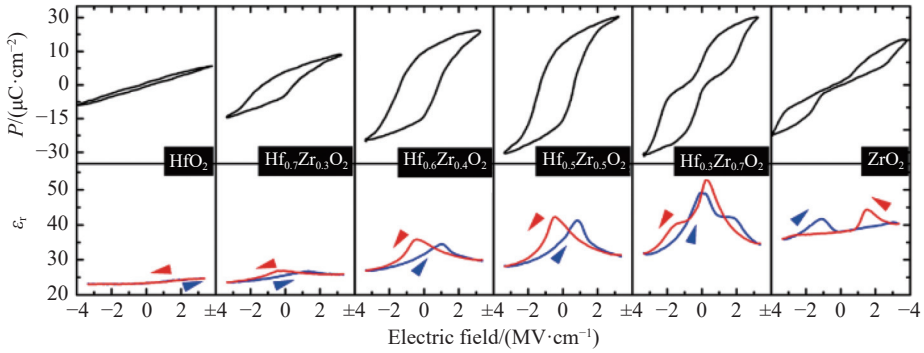

图 6　Zr 掺杂的铪基薄膜的铁电性能[24]

Fig. 6　Ferroelectric properties of Zr-doped hafnium-based thin films[24]

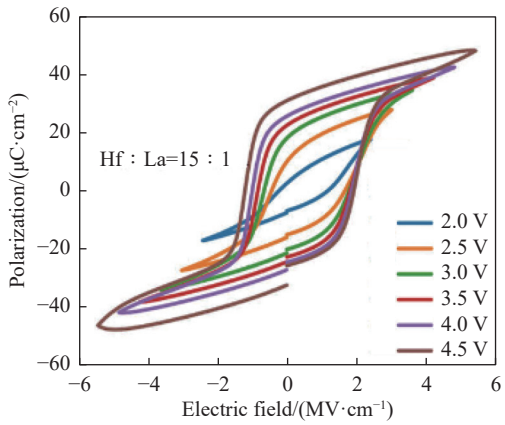

图 7　La 掺杂的铪基薄膜的铁电性能[25]

Fig. 7 Ferroelectric properties of hafnium-based thin films doped with La[25]

2.2　制备方法优化

HfO_2 薄膜的性能在很大程度上受到外延生长过程中工艺条件的影响。不同的工艺参数会导致薄膜在微观结构、化学缺陷、厚度均匀性以及密度等方面的差异，从而影响其物理和化学性质。因此，系统评估各类沉积方法的优缺点，对于制备高质量 HfO_2 薄膜至关重要。目前常用的制备技术主要分为物理方法和化学方法，前者包括物理气相沉积（包括磁控溅射）、脉冲激光沉积等，后者主要包括化学气相沉积、原子层沉积以及溶胶-凝胶法等，这些方法各具特点，适用于不同的应用场景和需求[26]。

2.2.1　物理制备方法

物理气相沉积是一种采用物理方法将材料源表面气化或离子化，并在基体表面沉积薄膜的技术，主要包括蒸发镀膜、溅射镀膜和离子镀膜等。Yamamoto 等[27] 通过物理气相沉积在 Si 衬底上沉积 HfO_2，并通过透射电子显微镜分析发现，预沉积的 Hf 层能有效调控 HfO_2/SiO_2 界面的性质。这是因为，在物理气相沉积制备 HfO_2 的过程中，Ar/O_2 等离子体会透过 HfO_2 对 Si 基进行氧化，从而形成较厚的 SiO_2 层。Hf 的存在有效抑制了 SiO_2 层的生长，减小了“死层”的厚度，从而优化了 HfO_2 的性能。

磁控溅射是一种在靶材背面设置磁体的物理气相沉积方式。电子在电场作用下获得较高动能后与氩原子发生碰撞，电离出氩离子和二次电子；二次电子在电场作用下继续加速并获得初始动能轰击靶材，从而实现持续镀膜。磁控溅射法的优势在于沉积速度可控且沉积薄膜质量优异，但与其他方法相比，其沉积速率较低，不适用于快速制备厚膜。Liu 等[28] 采用磁控溅射的方法制备了 $Au/HfO_2/Si$ 结构的光电二极管，发现该器件对紫外光最为敏感，在 23.5 $mW·cm^{-2}$ 的紫外光照射下，器件的光电流可达 80 μA，且表现出良好的重复性。

脉冲激光沉积法制备薄膜的原理如图 8 所示。较高能量的激光束持续轰击靶材表面，当靶材上的光斑处达到足够高的温度时，靶材表面熔化，原子在激光作用下发生电离，形成等离子体。这些离子

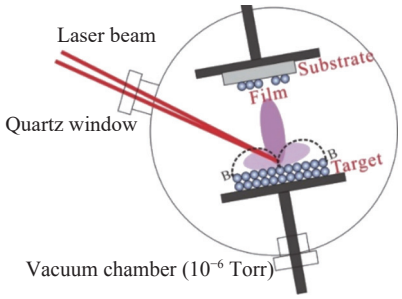

图 8　脉冲激光沉积法制备薄膜的原理图

Fig. 8 Schematic diagram of thin film deposition by pulsed laser deposition

在获得动能后相互作用，沿靶法向呈余弦分布。通常情况下，沉积腔内会充入一定量的过程气体。气相离子在腔内与过程气体发生碰撞和散射，以增强气相离子的自由程，最终沉积到基底完成薄膜的外延生长。Shin 等[29]利用脉冲激光沉积法制备了 Nb/HfO_2/ITO/YSZ 电容，并通过电滞回线分析发现，该器件具有优异的铁电性能，剩余极化强度为 6.2 μC·cm^{-2}。进一步的研究表明，氧化铪的尺寸会影响薄膜的铁电性能，当尺寸小于 7 nm 时，薄膜仍具有铁电性能。Ikeda 等[30]通过脉冲激光沉积法在 Si 上沉积 HfO_2，结合 *C*-*V* 曲线和扫描电子显微镜分析发现，HfO_2 的取向和晶体结构强烈依赖于其生长条件。此外，通过降低 HfO_2/Si 结构中的氧含量来抑制界面处低介电常数氧化物的含量，可有效减小电容的漏电流。

2.2.2　化学制备方法

化学制备方法主要包括化学气相沉积、溶胶-凝胶法和原子层沉积[31]。化学气相沉积首先将原材料蒸发或升华形成所需气体，随后通过加热并通入不同气体进行化学反应，生成用于薄膜生长的气体，最终反应材料被吸附于基底上，完成薄膜的外延生长。该方法具有沉积速度快、薄膜均匀性好的特点。

溶胶-凝胶法首先将金属盐溶解于适当的溶剂中，然后按一定比例对不同的金属盐溶液进行混合，以获得目标溶液；随后，通过旋涂、垂直提拉或静电纺丝等方式将溶胶涂覆于基底表面；最后，将基片置于退火炉中，经干燥、热解和退火处理后得到所需薄膜[32]。该方法反应温度较低，但在干燥过程中可能因气体释放导致成膜松散。

原子层沉积是一种典型的低温薄膜制备方法。与传统的物理气相沉积和化学气相沉积相比，原子层沉积的沉积速率较低，但所制备的 HfO_2 薄膜具有原子级厚度的可控性以及卓越的台阶覆盖性和均匀性。随着器件尺寸的不断缩小，沉积速率已不再是器件制备的主要制约因素，而对薄膜高质量的要求日益成为关键[33]。因此，选择并优化薄膜制备工艺，以提升氧化铪薄膜的质量，仍是铪基 FTJ 材料研究中一个基础且关键的问题。

2.3　薄膜厚度与晶粒尺寸调控

HfO_2 有单斜相（m 相）、四方相（t 相）、立方相（c 相）、正交相（o 相）和菱方相（r 相）等不同的相结构。其中，oIII 和 r 相为铁电相，在常温常压条件下，oIII 比较容易稳定存在。为提升 oIII 相的含量，常通过减小薄膜厚度、降低退火温度等方式来抑制晶粒的生长。

Polakowski 等[34]在未掺杂的 HfO_2 薄膜中观测到了铁电特性，表明铁电性并非仅源于掺杂元素。研究表明，当薄膜中晶粒尺寸较小时，晶粒表面能的增加有助于提高薄膜的铁电性能，这可能与 oIII 相的稳定性及表面能效应有关。Kobayashi 等[35]研究了 HfO_2 铁电薄膜中介观尺度晶粒的形成及其对电学特性的影响，发现 HfO_2 基铁电多晶薄膜中介观尺度晶粒（尺寸接近器件尺寸）的形成会显著影响存储器的电学特性。此外，通过分析 HfO_2 铁电薄膜厚度对极化开关动力学的影响，他们发现尽管不同厚度的 $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ 薄膜的静态低频极化相当，但较薄的 $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ 电容器的动态极化开关速度较慢。结合非局部开关模型分析和物理表征，研究发现较薄的 HZO 薄膜中存在更小的晶粒、更明显的取向不均匀性以及更多的晶界，这些因素会对宏观极化开关起到阻碍作用。

上述研究表明，通过调控薄膜的组成、结构和缺陷状态，可有效增强铪基铁电薄膜的铁电性能，这为开发高性能铁电存储器及其他铁电器件提供了重要的理论和实验依据。

3　铪基 FTJ 人工神经网络构建

3.1　人工神经网络的背景与原理

人工神经网络是一种模仿生物神经网络基本原理而构建的数学模型。它以网络拓扑学为理论

基础，模拟人脑神经系统处理复杂信息的方式，具有并行分布式处理、高度容错性、智能化和自学习等特点，能够将信息的处理与存储融为一体[36]。

1943 年，McCulloch 和 Pitts 提出了神经元的数学模型——MP 模型，标志着人工神经网络研究的正式开启。1986 年，Rumelhart 等提出了反向传播算法，进一步推动了人工神经网络的发展。此外，Hopfield 神经网络模型为神经网络在联想记忆和优化求解等领域的应用开辟了新路径。随着大数据时代的到来，深度学习逐渐成为人工神经网络发展的热点方向。

图 9 展示了神经网络的基本结构，其由输入层、隐藏层和输出层构成。理解神经网络的工作原理，主要基于几个核心概念：神经元、权重与偏置、激活函数。神经元指的是负责接收、整合和传导神经信号的特殊细胞，是神经系统的基本结构和功能单位。权重表示神经元之间的连接强度，而偏置允许神经元在输入为零时仍能产生输出。激活函数用于引入非线性特性，使神经网络能够处理复杂的非线性问题。神经网络的核心任务是构建模型并设定权值。在训练过程中，通常需要准备一系列输入数据及对应的输出数据。选定网络架构、传递函数和训练算法后，神经网络会基于输入数据计算输出结果，并通过对比实际输出与期望输出的差异，对权值进行调整优化。

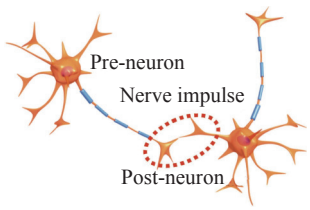

图 9　前馈神经网络模型

Fig. 9　Feedforward neural network model

完整神经网络的构建通常包含以下步骤：(1)初始化各神经元和层，分配初始权重和偏置；(2)通过激活函数将输入信号转换为输出信号；(3)使用损失函数衡量神经网络预测值与实际值之间的差距；(4)采用梯度下降算法优化权重和偏置；(5)对上述步骤进行反复迭代，直至损失函数达到最小值。

神经网络的训练过程主要包括前向传播、损失函数计算、反向传播以及优化算法等环节。前向传播是指输入数据逐层通过网络传递，最终生成输出结果。反向传播通过计算损失函数的梯度，逐层更新网络的权重和偏置，从而使误差达到最小化。前向传播的数学模型为：

$$y=\sigma(Wx+\boldsymbol{b}) \tag{1}$$

式中，y 为输出值，x 为输入值，$\boldsymbol{W}$ 为权重矩阵，$\boldsymbol{b}$ 为偏置向量，σ 为激活函数。

反向传播的数学模型为：

$$\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{W}}=\frac{\partial L}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial \boldsymbol{W}}=\frac{\partial y}{\partial W}\delta \tag{2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{b}}=\frac{\partial L}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial \boldsymbol{b}}=\frac{\partial y}{\partial \boldsymbol{b}}\delta \tag{3}$$

式(2)、式(3)中，L 为损失值，δ 为梯度。

优化算法用于在训练过程中调整网络参数，以最小化损失函数。常用的优化算法包括梯度下降、随机梯度下降以及自适应矩估计(adaptive moment estimation, Adam)算法等。梯度下降方法简单直接，适用于小规模数据集；随机梯度下降算法适用于大规模数据集，但收敛速度较慢；Adam 算法收敛速度快，但在训练后期可能导致模型出现振荡。梯度下降的数学模型为：

$$W_{\text{new}}=W_{\text{old}}-\eta\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{W}} \tag{4}$$

$$b_{\text{new}}=b_{\text{old}}-\eta\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{b}} \tag{5}$$

式(4)、式(5)中，W_{new} 和 b_{new} 分别为更新后的权重和偏置，W_{old} 和 b_{old} 分别为旧的权重和偏置，η 为学习率。

目前常用的人工神经网络除前述的前馈神经网络外，还包括卷积神经网络、循环神经网络以及生成对抗网络等。卷积神经网络由卷积层、池化层和全连接层组成，主要用于处理图像和空间数据，能够捕捉图像的局部特征，被广泛应用于图像分类、目标检测等领域，如人脸识别和自动驾驶等。循环神经网络适用于处理序列数据，如语言模型、文本生成等任务(机器翻译、语音合成等)，通过引入时间维度，能够考虑上下文信息。生成对抗网络由生成器和判别器组成，用于生成逼真的数据样本。生成器生成与真实数据相似的样本，而判别器则负责区分真实样本与生成样本。

3.2　铪基 FTJ 在图像识别中的应用

图像识别技术广泛应用于智能手机、无人机等设备中，但这些设备的电池容量有限，需依赖低功耗硬件架构以确保其实时运行能力。此外，设备

的高效性也逐渐成为使用者的核心需求之一，以支持同时执行图像识别、视频流分析和目标跟踪等任务。铪基铁电器件凭借高速和低功耗特性，正逐渐成为图像识别硬件的理想选择之一。

Wang 等[8]研究了一种基于外延 Zr 掺杂 HfO_2 铁电薄膜的人工突触器件，并设计了一种多层神经网络，通过 Python 优化权重矩阵，获得了映射后的神经网络模型。该全连接 4 层神经网络由 784 个输入神经元（28×28）和 10 个输出神经元（0～9）组成。模拟过程中，首先在软件中构建全连接的 4 层神经网络，并使用梯度下降算法进行迭代训练，以获取优化后的权重矩阵；随后，基于最小映射误差原则，通过特殊归一化方法将长时程增强/长时程抑制（LTP/LTD）分布与软件权重矩阵进行映射，并利用其进行直接干扰，从而获得对 MNIST 数据集的识别准确率。得益于 FTJ 突触的良好权重调节能力，该神经网络最终实现了高达 93.7% 的模拟识别准确率和 97.3% 的训练准确率。图 10 为基于外延 HZO铁电隧道结的全连接多层神经网络识别示意图。

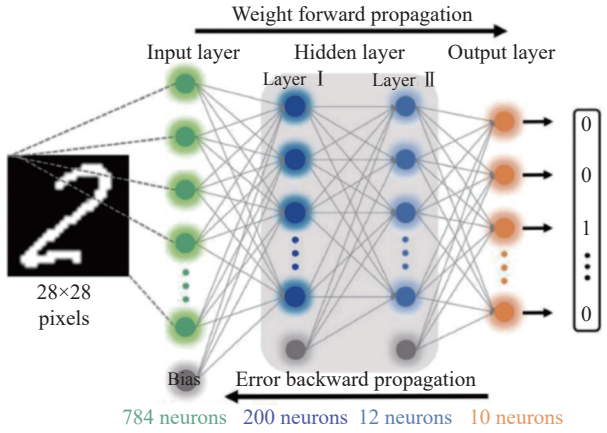

图 10　基于外延 HZO 铁电隧道结的全连接多层神经网络示意图[8]

Fig. 10 Schematic diagram of a fully connected multilayer neural network based on an epitaxial HZO ferroelectric tunnel junction[8]

Cao 等[9]首次实现了一种与 CMOS 工艺完全兼容的氧化铪基反铁电神经元，同时构建了一个两层脉冲神经网络（784×400×10），用于 MNIST 数据集分类和评估基于反铁电场效应晶体管（anti-ferroelectric field-effect transistor, AFeFET）神经元的网络级性能。研究采用首次脉冲时间编码方法，每个输入神经元的刺激恰好发放一个脉冲，而信息则通过发放顺序来传递。图 11 为基于铁电场效应晶体管（Ferroelectric field-effect transistor, FeFET）突触和 AFeFET 神经元的网络硬件实现方案。输入信号施加于 FeFET 突触的漏极，其源极电流由脉冲宽度调制（pulse width modulation, PWM）控制器采集并转换为幅度固定、宽度可调的脉冲信号。将 PWM 的输出作为突触后电位，进一步施加至 AFeFET 神经元的栅极以执行积分过程。基于 AFeFET 神经元的训练结果表明，在 1 μA 阈值条件下可实现约 95% 的识别准确率。

Xu 等[22]采用与 CMOS 工艺兼容的新兴反铁电纳米材料，研制出一种基于新原理的人工突触/神经元器件。通过对称电极配置研究了不同脉冲刺激下器件的积分-放电-漏电神经元行为特性，结果表明其单次脉冲发射能耗低至 1.36 fJ。引入非对称电极以形成偏置电场，使器件极化滞回特性发生偏移，从而形成两种可清晰区分的极化/电阻状态。此外，该器件成功实现了包括成对脉冲促进和 LTP/LTD 在内的突触功能，其单次脉冲发射能耗进一步降低至 245 aJ。基于此器件构建的人工神经网络系统展示了优良的手写数字识别能力，识别准确率超过 90%。

3.3　铪基 FTJ 在存算一体计算中的作用

神经形态计算依赖于模拟运算，并要求器件具备一系列关键特性，包括线性且对称的电导调谐能力、低写入与读取电流、高响应速度以及高耐久性，以确保系统的可靠性和高效性[37]。在带有插入层的 FTJ 的金属-铁电-金属结构中，低电流密度为实现交叉开关阵列的排列提供了可能。通常情况下，当利用 FTJ 的线性 *I-V* 特性来扩展交叉开关阵列时，高电导率可能导致较大的电流，从而带来不利影响。因此，研究的重点在于开发具有非线性 *I-V* 特性的器件，以实现超低电导率和超低电流。总体而言，FTJ 凭借其在大规模并行计算和集成方面的显著优势，展现出在先进计算场景中的广阔应用前景。

通过先进的结构与材料工程手段，Ota 等[38]利用 FTJ 提升了强化学习（reinforcement learning, RL）的性能与可靠性。传统忆阻器在编程时难以实现精确的导电状态控制，而强化学习能够在多种控制和决策任务中达到接近人类的水平。模拟结

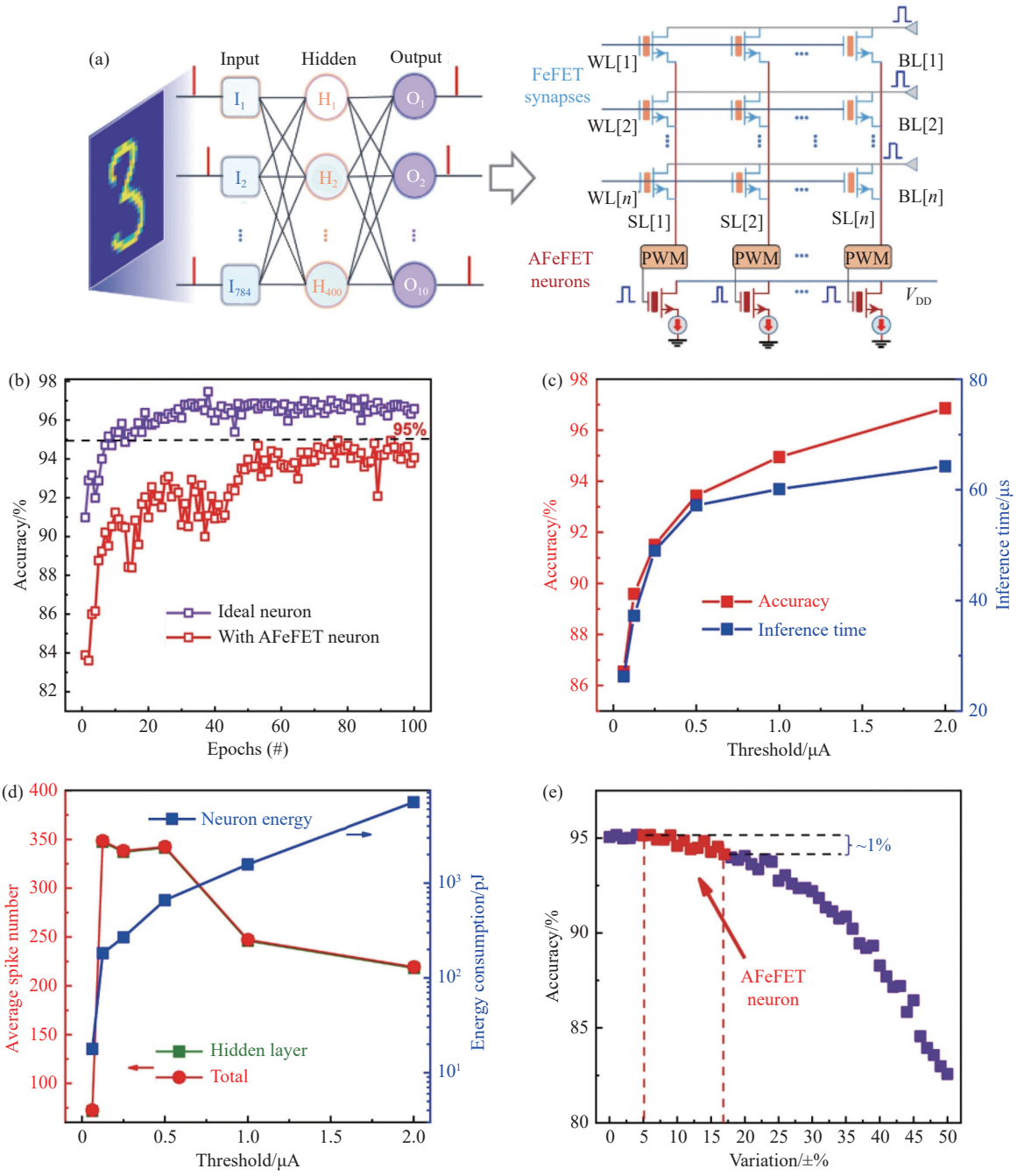

图 11　基于 FeFET 突触与 AFeFET 神经元的网络硬件实现[9]。(a)图像识别神经网络示意图;(b)随着训练测试增加图像识别率变化过程;(c)阈值和识别率的关系;(d)神经元阈值调整对其发放脉冲数量和能量消耗的影响;(e)均一性对器件识别准确率的影响

Fig. 11　Network hardware implementation based on FeFET synapses and AFeFET neurons[9]. (a) Schematic diagram of the image recognition neural network; (b) evolution of image recognition accuracy with increasing training and testing iterations; (c) relationship between threshold values and recognition accuracy; (d) effect of neural threshold adjustment on firing rate and energy consumption; (e) influence of uniformity on device recognition accuracy

果表明,通过在特定标准偏差值和归一化电导率变化下调节脉冲电压,可以优化训练速度。值得注意的是,进一步提高电压会导致收敛时间延长,表明较低的电压更有助于最大化 RL 性能。此外,研究结果还证实:随着电压裕度(V_m)的增加,器件的耐久性会得到提升;通过同时减小 HZO 层厚度和降低 Zr

含量, 可有效提高 V_m。此外, 与器件缩放相关的 V_m 波动问题可通过电压补偿技术得到有效解决。

Yu 等[39] 通过优化 W/$Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$/W 结构, 使器件表现出显著的 O 相特征、优异的铁电性能($2P_r$=46 μC·cm^{-2})以及良好的耐久性和保持特性。他们还制备了 4 层三维结构阵列, 该阵列展现出优良的均匀性。脉冲测试结果表明, 在 3.5 V 写入电压和 50 ns 脉冲条件下可实现器件的有效开关, 并在 0.5 V 的读取电压下获得了稳定的“0”和“1”状态。利用垂直堆叠架构的互联优势, 同时结合脉冲序列调控技术, 他们首次在该体系中实现了阻变信息处理逻辑与 NAND 非易失性逻辑门操作。通过与 CMOS 器件的异质集成, 仿真验证了包括 NOT、AND、NOR 在内的组合逻辑功能兼容性。该工作突破了传统平面结构的维度限制, 为三维垂直集成的多比特存储-计算单元设计提供了实验依据, 同时证明了铪基铁电材料在构建高密度、低功耗、高鲁棒性计算存储融合器件方面的可行性, 为下一代非冯·诺伊曼架构的硬件实现奠定了材料基础。

4　现有挑战与未来发展方向

氧化铪基铁电薄膜存在剩余极化较弱、稳定性较差等问题, 由此制备的 FTJ 器件可能面临可靠性方面的挑战。此外, 薄膜的铁电性能会随随着厚度的增加而衰减, 导致器件耐受性降低。未来的研究需围绕材料优化、界面工程和应用扩展等方面展开。

4.1　现存问题与挑战

4.1.1　铁电性机理不明确

目前, 氧化铪薄膜铁电性的微观物理起源仍不明确。另外值得注意的是, 其铁电正交相属于亚稳相。Bai 等[40] 分析了氧空位、单轴应变和外部电场对氧化铪薄膜自发极化的影响, 指出这些因素之间存在耦合效应, 有助于稳定铁电正交相。Tian 等[41] 基于第一性原理研究了镧系元素和 VB 族元素共掺杂对氧化铪相分数的影响, 发现氧空位与掺杂剂结合可促进氧化铪中铁电相的形成。除了现有的元素掺杂、氧空位调控及制备技术调整等手段外, 未来仍需进一步探究铪基薄膜铁电性产生的根本原因, 寻找稳定铁电相的方法以增强薄膜的铁电性能[42]。

4.1.2　工艺兼容性问题

尽管氧化铪基铁电薄膜已实现初步应用, 但要完全替代传统薄膜仍面临诸多挑战。在硅衬底上直接生长高质量的氧化铪薄膜仍是当前面临的技术瓶颈。后续研究应着力提高氧化铪薄膜与硅基工艺的兼容性, 并通过制备工艺的持续优化进一步提高产品质量[42]。

4.1.3　大规模生产问题

虽然铪基 FTJ 在实验室环境中表现出优异性能, 但在大规模制造中确保器件的稳定性和可靠性仍是一项重大挑战。沉积工艺、掺杂量以及界面处理的细微差异均可能影响器件的长期可靠性。在微米乃至亚微米尺度下, 铪基 FTJ 易受到量子效应和尺寸效应的影响。因此, 需有效管控这些尺寸相关效应, 并在最大化存储密度的同时优化器件的开关特性。另外, 未来的研究方向还应聚焦于降低生产成本、提高产品合格率以及提升制造效率。

4.2　发展趋势

随着对氧化铪基铁电材料研究的不断深入, 研究人员正通过多种创新策略提升其在人工神经网络中的应用潜力。在材料创新与优化领域, 多元掺杂和合金策略已成为提升氧化铪基铁电材料性能的重要手段, 有望进一步优化晶格结构, 以实现高开关比、大读取电流和高耐久性。另外, 借助先进的封装技术和材料设计, 可进一步降低铪基 FTJ 器件的功耗并提高其集成度, 从而推动该类器件在人工神经网络领域的广泛应用。

此外, 氧化铪基 FTJ 的研究正逐渐与认知科学、心理学等学科深度融合, 帮助研究人员更深入地理解人脑的认知和学习机制。未来有望进一步提升该类器件的智能化水平并拓展其应用范围, 为人工智能的发展开辟广阔前景。

5　总结

本综述基于铪基 FTJ 的材料特性与器件性能, 探讨其在人工神经网络和存内计算中的应用潜力。研究表明, 基于氧化铪构建的人工神经网络有望在存算一体化领域发挥重要作用。借助铪基器件的非易失性存储和快速读写特性, 可减少数据在存储

和计算单元之间的传输，从而显著降低系统功耗，提高计算效率，使人工神经网络在处理大数据时具备更快的响应速度，有助于满足大数据分析、实时图像识别、语音处理等需要快速处理大量数据的应用场景的需求。

综上所述，氧化铪基 FTJ 的研究不仅推动了该技术本身的持续发展，也为新型架构计算、认知科学等其他技术领域提供了新的研究方向和应用可能性。随着相关技术的进一步成熟，铁电隧道结和人工神经网络有望在多个行业实现重大技术突破，并加速商业化应用的落地。

参考文献：

[1] KIM I J, LEE J S. Unlocking large memory windows and 16-level data per cell memory operations in hafnia-based ferroelectric transistors[J]. Science Advances, 2024, 10(23): eadn1345.

[2] SETTER N, DAMJANOVIC D, ENG L, et al. Ferroelectric thin films: Review of materials, properties, and applications[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(5): 051606.

[3] GARCIA V, FUSIL S, BOUZEHOUANE K, et al. Giant tunnel electroresistance for non-destructive readout of ferroelectric states[J]. Nature, 2009, 460(7251): 81-84.

[4] GAO Z M, ZHANG W F, ZHONG Q L, et al. Giant electroresistance in hafnia-based ferroelectric tunnel junctions via enhanced polarization[J]. Device, 2023, 1(1): 100004.

[5] 翟亚红, 李平, 张树人, 等. 铁电电容工艺与标准 CMOS 工艺兼容性研究 [J]. 压电与声光, 2007, 29(5): 609-611.
ZHAI Y H, LI P, ZHANG S R, et al. Investigation of compatibility of ferroelectric capacitor fabrication process with standard CMOS fabrication Process[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2007, 29(5): 609-611.

[6] CHEEMA S S, KWON D, SHANKER N, et al. Enhanced ferroelectricity in ultrathin films grown directly on silicon[J]. Nature, 2020, 580: 478-482.

[7] LUO Z, WANG Z J, GUAN Z Y, et al. High-precision and linear weight updates by subnanosecond pulses in ferroelectric tunnel junction for neuro-inspired computing[J]. Nature Communications, 2022, 13: 699.

[8] WANG Y K, WANG Q, ZHAO J Y, et al. A robust high-performance electronic synapse based on epitaxial ferroelectric $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ films with uniform polarization and high Curie temperature[J]. Applied Materials Today, 2022, 29: 101587.

[9] CAO R R, ZHANG X M, LIU S, et al. Compact artificial neuron based on anti-ferroelectric transistor[J]. Nature Communications, 2022, 13: 7018.

[10] ESAKI L, LAIBOWITZ R B, STILES P J, et al. Polar switch[J]. IBM Technical Disclosure Bulletin, 1971, 13: 2161.

[11] 张丽芳. THz 波段 RTO 器件集成与功率合成研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
ZHANG L F. Research on integration and power combining of THz band RTO devices[D]. Tianjin: Tiangong University, 2016.

[12] WANG H, GUAN Z Y, LI J C, et al. Silicon-compatible ferroelectric tunnel junctions with a $SiO_2/Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ composite barrier as low-voltage and ultra-high-speed memristors[J]. Advanced Materials, 2024, 36(15): 2211305.

[13] LI Z H, TANG S Q, WANG T Y, et al. Effect of lanthanum-aluminum co-doping on structure of hafnium oxide ferroelectric crystals[J]. Advanced Science, 2025, 12(4): 2410765.

[14] 沈伟松. 基于纳米铁酸盐材料去除染料、重金属和有机污染物及点位能量分布的研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
SHEN W S. Removal of dyes, heavy metals and organic pollutants and studies of site energy distributio function based on nano-ferrite materials[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.

[15] YIN Y W, HUANG W C, LIU Y K, et al. Octonary resistance states in $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3/BaTiO_3/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ multiferroic tunnel junctions[J]. Advanced Electronic Materials, 2015, 1(11): 1500183.

[16] PANTEL D, GOETZE S, HESSE D, et al. Reversible electrical switching of spin polarization in multiferroic tunnel junctions[J]. Nature Materials, 2012, 11(4): 289-293.

[17] GARCIA V, BIBES M. Ferroelectric tunnel junctions for information storage and processing[J]. Nature Communications, 2014, 5: 4289.

[18] 袁国亮, 王琛皓, 唐文彬, 等. HfO_2 基铁电薄膜的结构、性能调控及典型器件应用 [J]. 物理学报, 2023, 72(9): 241-262.
YUAN G L, WANG C H, TANG W B, et al. Structure, performance regulation and typical device applications of HfO_2-based ferroelectric films[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(9): 241-262.

[19] 陈海燕. HfO_2 基薄膜的铁电及反铁电性能研究 [D]. 长沙:

中南大学, 2022.
CHEN H Y. Research of ferroelectricity and antiferroelectricity of HfO_2-based films[D]. Changsha: Central South University, 2022.

[20] ZHOU C, MA L Y, FENG Y P, et al. Enhanced polarization switching characteristics of HfO_2 ultrathin films via acceptor-donor co-doping[J]. Nature Communications, 2024, 15: 2893.

[21] LI Z H, WEI J C, MENG J L, et al. The doping effect on the intrinsic ferroelectricity in hafnium oxide-based nano-ferroelectric devices[J]. Nano Letters, 2023, 23(10): 4675-4682.

[22] XU K L, WANG T Y, LIU Y K, et al. Ferroelectric and antiferroelectric phenomenon in lanthanum doped hafnium based thin films[J]. IEEE Electron Device Letters, 2023, 44(9): 1472-1475.

[23] WANG Y, TAO L, GUZMAN R, et al. A stable rhombohedral phase in ferroelectric $Hf(Zr)_{1+x}O_2$ capacitor with ultralow coercive field[J]. Science, 2023, 381(6657): 558-563.

[24] MÜLLER J, BÖSCKE T S, SCHRÖDER U, et al. Ferroelectricity in simple binary ZrO_2 and HfO_2[J]. Nano Letters, 2012, 12(8): 4318-4323.

[25] LIU Y K, WANG T Y, XU K L, et al. Effect of doping concentration on intrinsic ferroelectric properties of HfLaO-based ferroelectric memory[J]. IEEE Electron Device Letters, 2024, 45(3): 376-379.

[26] 明帅强, 文庆涛, 高雅增, 等. 基于原子层沉积技术制备氧化钽薄膜及其特性研究 [J]. 材料导报, 2021, 35(6): 6042-6047.
MING S Q, WEN Q T, GAO Y Z, et al. Preparation of tantalum oxide thin films by atomic layer deposition technique and their property characterization[J]. Materials Reports, 2021, 35(6): 6042-6047.

[27] YAMAMOTO K, HAYASHI S, NIWA M, et al. Impact of Hf metal predeposition on the properties of HfO_2 grown by physical and chemical vapor deposition[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2003, 42(4S): 1835-1839.

[28] LIU C F, TANG X G, GUO X B, et al. Photodiode characteristics of HfO_2 thin films prepared by magnetron sputtering[J]. Materials & Design, 2020, 188: 108465.

[29] SHIN H W, SON J Y. Ferroelectric properties of HfO_2 nanodots with a diameter smaller than 10 nm deposited on an ITO bottom electrode[J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(20): 202902.

[30] IKEDA H, GOTO S, HONDA K, et al. Structural and electrical characteristics of HfO_2 films fabricated by pulsed laser deposition[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2002, 41(4S): 2476-2479.

[31] 梁硕. Zn 掺杂 β-Ga_2O_3 微米线的制备及紫外探测性能研究 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2023.
LIANG S. Research on preparation of Zn doped β-Ga_2O_3 microwires and UV detection performance[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2023.

[32] 闫鹏程. $Mg_xZn_{1-x}O$ 合金材料的制备与光学性质研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
YAN P C. Preparation and optical properties of $Mg_xZn_{1-x}O$ alloy materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[33] 乌李瑛, 刘丹, 付学成, 等. 掺杂氧化铪基薄膜铁电性能的研究进展 [J]. 真空, 2024, 61(1): 10-20.
WU L Y, LIU D, FU X C, et al. Research progress on ferroelectric properties of hafnium oxide doped thin films[J]. Vacuum, 2024, 61(1): 10-20.

[34] POLAKOWSKI P, MÜLLER J. Ferroelectricity in undoped hafnium oxide[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(23): 232905.

[35] KOBAYASHI M, WU J, SAWABE Y, et al. Mesoscopic-scale grain formation in HfO_2-based ferroelectric thin films and its impact on electrical characteristics[J]. Nano Convergence, 2022, 9(1): 50.

[36] 祁二钊. 基于深度学习的场景分类方法研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
QI E Z. Scene image classification based on deep learning[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.

[37] YU S, CHEN P Y. Emerging memory technologies: Recent trends and prospects[J]. IEEE Solid-State Circuits Magazine, 2016, 8(2): 43-56.

[38] OTA K, YAMAGUCHI M, BERDAN R, et al. Performance maximization of in-memory reinforcement learning with variability-controlled $Hf_{1-x}Zr_xO_2$ ferroelectric tunnel junctions [C]//Proceedings of the IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). New York: IEEE, 2019: 6.2.1-6.2.4.

[39] YU J, WANG T, LU C, et al. 3D nano hafnium-based ferroelectric memory vertical array for high-density and high-reliability logic-in-memory application[J]. Advanced Electronic Materials, 2025, 11(4): 2400438.

[40] BAI F Y, LIAO J J, YANG J H, et al. Mechanical-electrical-

chemical coupling study on the stabilization of a hafnia-based ferroelectric phase[J]. NPJ Computational Materials, 2023, 9: 219.

[41] TIAN Y S, ZHOU Y L, ZHAO M, et al. Improvement of ferroelectric phase fraction in HfO_2 via La-containing co-doping method[J]. Applied Physics Letters, 2024, 124(9): 092907.

[42] 秦羽铖, 蒋昊岚, 闵月淇, 等. 氧化铪基铁电薄膜的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2024, 61(12): 120103.
QIN Y C, JIANG H L, MIN Y Q, et al. Research progress on hafnium oxide based ferroelectric thin films[J]. Micronanoelectronic Technology, 2024, 61(12): 120103.