

基于氧空位调控的 HfO_x 忆阻器稳定性研究*

朱媛媛¹⁾ 杨梓怡¹⁾ 杨淑宁¹⁾ 张云飞¹⁾ 张苗¹⁾
王鑫¹⁾ 王红军^{1)†} 徐静^{2)‡}

1) (陕西科技大学物理与信息科学学院, 西安 710021)

2) (南阳师范学院物理与电子工程学院, 南阳 473061)

(2025年7月21日收到; 2025年9月6日收到修改稿)

HfO_x 忆阻器因其低操作电压、良好的耐受性及循环特性等优异性能, 使其成为下一代非易失性存储器最有前景的候选者之一. 然而, 由于 HfO_x 薄膜内氧空位导电细丝的形成和断裂的随机性, 器件阈值电压分布较为分散, 整体稳定性较差, 因此, 通过调控氧空位来提高 HfO_x 器件的稳定性具有重要的研究意义. 本研究采用磁控溅射法制备了不同氧氧比的三组器件, 均表现出双极性阻变特性. 在三种不同氧氧比的 $\text{W}/\text{HfO}_x/\text{Pt}$ 器件中, 氧氧比为 45:5 的器件展现出最优的综合性能: I - V 循环超过 200 次、开关比 $\sim 10^3$ 、在 10^4 s 内具有优异的数据保持特性且阈值电压分布集中, 表明器件稳定性显著提高. 通过构建氧空位调控与导电细丝演变的物理模型, 揭示了氧空位浓度对阻变机理的影响机制. 本研究明确了氧空位的调控 HfO_x 忆阻器性能的关键作用, 为发展高性能、高可靠性的阻变存储器提供了有效途径.

关键词: 忆阻器, HfO_x 薄膜, 氧空位, 导电细丝

PACS: 73.40.Rw, 85.30.-z, 85.30.De

DOI: 10.7498/aps.74.20250971

CSTR: 32037.14.aps.74.20250971

1 引言

在信息快速发展的时代, 传统存储器在存储速度、功耗和使用寿命等方面面临着严峻的挑战, 为突破冯·诺依曼架构的瓶颈并解决相关问题, 对存储器性能要求不断提高, 因此开发出新材料、新结构的存储器件, 来满足大数据、人工智能等新行业领域的需求是必然趋势^[1-5]. 忆阻器由于结构简单、读写速度快及多值存储等优势, 其在人工智能、类脑计算等领域扮演着越来越关键的角色, 被认为是下一代存储器件最有前景的候选者^[6-12].

忆阻器依据数据保持特性可分为易失性与非

易失性两类, 易失性器件在撤除外加偏压后, 其电阻状态无法长期保持, 会自发恢复至初始高阻态. 与之相反, 非易失性器件在撤除电压后能够维持低阻态较长时间 (一般几天甚至几年)^[13,14]. 近年来, 忆阻器件迅速发展, 其阻变层材料体系也日益丰富, 包括硫系化合物^[15]、钙钛矿基材料^[16]、有机介质材料^[17]、二维材料^[18]及二元氧化物^[19]等. 在众多的阻变介质材料中, 二元氧化物的结构简单、材料组分容易控制且制备工艺简单, 如 AlO_x , WO_x , TaO_x , HfO_x 等材料在忆阻器取得了一系列重要的研究进展^[20-23]. 其中 HfO_x 材料所具有的高介电常数、适中的禁带宽度和高热稳定性等优势, 使其广泛应用于忆阻器的研究中^[24-26].

* 陕西省自然科学基金 (批准号: 2025JC-YBMS-001) 和国家自然科学基金 (批准号: 11905119) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wanghongjun@sust.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: xujing@nynu.edu.cn

HfO_x 忆阻器通过精准调控 HfO_x 薄膜中的氧空位浓度和氧空位分布, 能够稳定在高低阻态间灵活切换阻变行为, 从而实现数据存储的能力 [27,28]. 相较于易失性器件, HfO_x 忆阻器呈现出的非易失性数据存储和内存计算能力使之成为最有潜力的存储器之一, 且具备低的操作电压及良好的耐受性等优点 [29-32]. 但是器件稳定性有待提高, 因此, 如何提升 HfO_x 忆阻器的稳定性是亟待解决的问题.

HfO_x 忆阻器的导电机理主要是由于氧空位导电细丝的形成与断裂, 但是其形成和断裂无法预测, 所以难以控制器件稳定性 [33,34]. 而氧空位导电细丝的形成与断裂主要是由于 HfO_x 阻变层中的氧空位缺陷导致的, 这对于忆阻器的性能起着关键作用 [35-37]. 氧空位浓度对于氧空位导电细丝形态有着极大的影响, 较高的氧空位浓度有助于形成更粗的导电细丝, 导电细丝连接将更为紧密, 器件性能更加稳定 [38,39]. 为了制备稳定的 HfO_x 器件, 本文将通过改变氩氧比调控氧空位浓度, 获得具备高稳定性的 HfO_x 忆阻器并研究其薄膜内氧空位浓度对器件稳定性的影响.

2 实验方案

实验步骤: 本实验使用磁控溅射法制备了三明治结构的 W/HfO_x/Pt 器件, 其制备方案如下: 首先, 依次使用丙酮、酒精、去离子水对已制备好的底电极, 即 Pt 衬底分别进行 30 s 超声清洗, 再将其放入鼓风烘干箱中进行 70 °C 烘干处理, 为了方便后续的电学性能测试, 将底电极部分区域使用耐高温胶带粘贴; 其次, 采用射频磁控溅射法在 Pt 衬底沉积 HfO_x 阻变层, 靶材为 99.99% 的高纯度金属钪靶, 抽真空至 8×10^{-4} Pa, 经过 7 min 加热至 300 °C, 起辉压强为 8 Pa, 工作压强 0.5 Pa, 溅射功率为 100 W, 正式溅射前进行 10 min 预溅射去除被氧化的表面, 再进行 8 min 溅射, 氩气流速与氧气流速之比分别为 30:20, 40:10, 45:5 (气体流速单位为 sccm (1 sccm = 1 mL/min)); 最后, 使用直径为 300 μm 的掩模版, 采用射频磁控溅射法在 HfO_x 阻变层上沉积顶电极 W, 靶材为 99.99% 的高纯度钨靶, 抽真空至 8×10^{-4} Pa, 无需加热, 起辉压强为 5 Pa, 工作压强为 0.5 Pa, 溅射功率为 25 W, 进行 15 min 预溅射, 再进行 20 min 溅射, 氩气流速为 40 sccm. 经以上步骤, W/HfO_x/Pt 忆

阻器件制备完成.

测试与表征: 对 HfO_x 薄膜进行表征, 使用 X 射线衍射 (XRD, Bruker D8 Advanced) 对其晶相结构进行分析; 使用扫描电子显微镜 (SEM, FEI Quanta 200F) 对其表面及截面进行扫描, 得到薄膜表面形貌及厚度; 使用 X 射线光电子能谱 (XPS, ESCALAB 250Xi) 确认其化学成分及价态; 通过与探针台连接的 Keithley 2601B 半导体参数分析仪进行电学性能测试.

3 结果与讨论

本实验采用磁控溅射法制备 W/HfO_x/Pt 器件, 其结构如图 1 所示, 底电极为在 SiO₂ 衬底上溅射的 Pt, HfO_x 为阻变层, W 为顶电极.

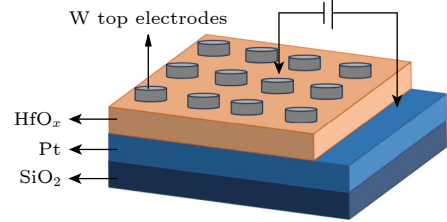


图 1 W/HfO_x/Pt 忆阻器结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the W/HfO_x/Pt memristor structure.

为了确认所制备的 HfO_x 薄膜的晶相结构, 测试了 45:5 条件下制备的 HfO_x 薄膜的 XRD 图谱, 如图 2 所示. 可以看出, 在 $2\theta = 39.9^\circ$ 处出现峰值, 对应于 Pt 的 (111) 晶面, 未发现明显的 HfO_x 特征衍射峰. 这表明 HfO_x 薄膜为非晶态, 意味着 HfO_x 材料内部会存在大量的缺陷, 相较于晶态氧化物, 非晶态氧化物会存在更多氧空位, 对于忆阻器中阻值变化有着关键作用.

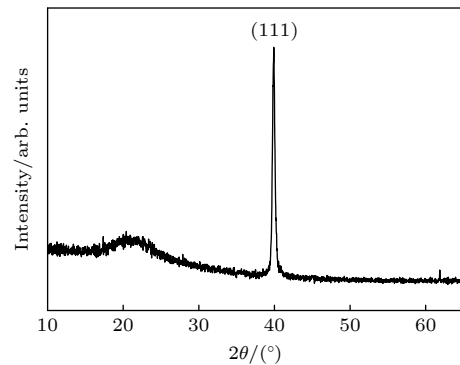


图 2 HfO_x 薄膜的 XRD 图谱

Fig. 2. XRD patterns of the HfO_x thin films.

为了观察 HfO_x 薄膜表面形貌及截面厚度, 对 HfO_x 薄膜进行 SEM 测试. 图 3(a), (b) 分别为 45:5 条件下制备 HfO_x 薄膜的表面和截面 SEM 图像, 其表面颗粒致密均匀, 未发现明显的针孔, 且可观察到 HfO_x 薄膜厚度约为 377 nm.

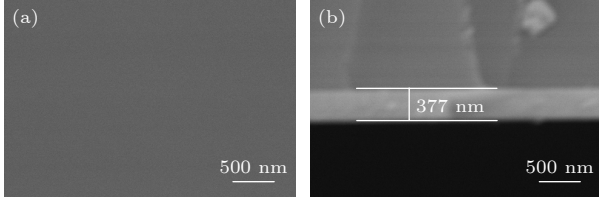


图 3 HfO_x 薄膜的 SEM 图像 (a) 表面图; (b) 截面图
Fig. 3. SEM images of the HfO_x thin films: (a) Surface diagrams; (b) cross-sectional view.

图 4 为 HfO_x 薄膜的 XPS 能谱图, 对其元素组成和价态进行分析. 在 XPS 图中, 采用元素的峰面积来确定不同元素的相对含量或者同一元素不同价态的相对含量, 通过扣背底-分峰-拟合得到不同元素峰面积, 峰面积比即为元素的相对含量^[40]. 图 4(a), (d) 为氩氧比 30:20 条件下的 HfO_x 薄膜. 图 4(a) 为 Hf 4f 谱显示了自旋轨道双重态, 并对其进行高斯拟合, 其 Hf 4f_{5/2} 轨道结合能为 18.1 eV, Hf 4f_{7/2} 轨道结合能为 16.4 eV, 对应于 Hf^{4+} ^[41].

图 4(d) 为 O 1s 图谱出现了两个峰, 其结合能分别为 531.7, 530.1 eV, 分别对应 HfO_x 薄膜中氧空位和晶格氧^[42,43]. 通过对拟合后的晶格氧峰面积和非晶格氧峰面积的比例计算, 得到氧空位相对浓度为 12.69%, 晶格氧相对浓度为 87.31%. 图 4(b), (e) 为氩氧比 40:10 条件下的 HfO_x 薄膜. 图 4(b) 中 Hf 4f_{5/2} 轨道结合能为 18.1 eV, Hf 4f_{7/2} 轨道结合能为 16.3 eV, 对应于 Hf^{4+} ^[41]. 图 4(e) 为 O 1s 图谱出现了两个峰, 其结合能分别为 531.7, 529.9 eV, 分别对应 HfO_x 薄膜中氧空位 (14.21%) 和晶格氧 (83.79%)^[42,43]. 图 4(c), (f) 为氩氧比 45:5 条件下的 HfO_x 薄膜. 图 4(c) 中 Hf 4f_{5/2} 轨道结合能为 18.1 eV, Hf 4f_{7/2} 轨道结合能为 16.3 eV. 图 4(f) 显示了 531.7, 529.9 eV 两个峰, 晶格氧浓度为 74.41%, 氧空位浓度为 25.59%. 图 4(f) 中清晰显示, HfO_x 薄膜内部存在本征的氧空位缺陷, 且相较于 30:20 和 40:10 条件下的 HfO_x 薄膜, 45:5 条件下的 HfO_x 薄膜中所含的氧空位浓度远大于氩氧比 30:20 和 40:10 的氧空位, 随着氧分压的减小氧空位浓度逐渐增大, 而氧空位浓度对于 HfO_x 忆阻器件的性能起着关键作用.

为了进一步探索不同氩氧比对 W/ HfO_x /Pt 器件阻变性能产生的影响, 在室温下对 30:20, 40:10,

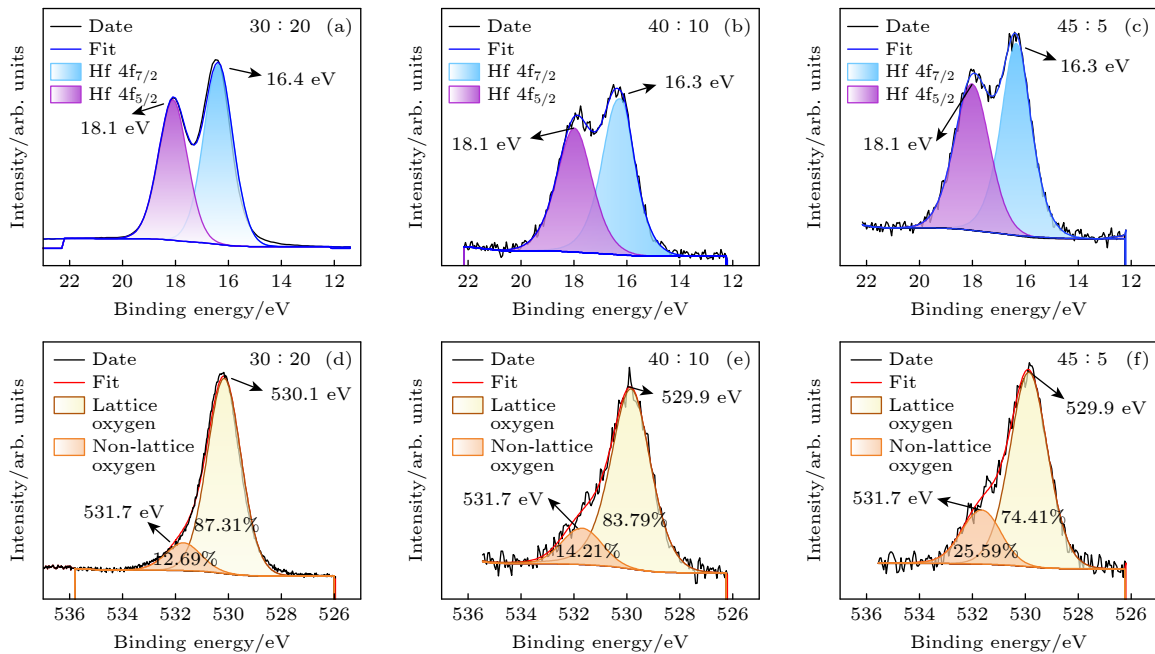


图 4 HfO_x 薄膜的 XPS 能谱 (a)–(c) 氩氧比为 (a) 30:20, (b) 40:10, (c) 45:5 条件下 Hf 4f 核心能级谱图; (d)–(f) 氩氧比为 (d) 30:20, (e) 40:10, (f) 45:5 条件下 O 1s 核心能级谱图

Fig. 4. XPS spectra of the HfO_x thin films: (a)–(c) Hf 4f core level spectrum with argon-to-oxygen ratios of (a) 30:20, (b) 40:10, (c) 45:5; (d)–(f) O 1s core level spectrum with argon-to-oxygen ratios of (d) 30:20, (e) 40:10, (f) 45:5.

45:5 氟氧比条件下的器件进行约 200 次 I - V 循环, 如图 5 所示. 为了便于直观地观察器件特性, 将纵轴进行对数处理, 对其施加合适的偏置电压, 并设置合适的限制电流, 以防止器件被击穿. 图中可观察到, 器件均表现出较为稳定的双极性阻变行为, 在施加正向偏置电压时, 器件会随着电压的增大, 在某一电压值时发生突变, 阻值由高阻态转变为低阻态, 电压取消后依旧保持低阻值状态, 表现了器件的非易失性能; 而后继续施加负向偏置电压时, 器件会在某一负电压时发生突变, 由低阻态转变为高阻态, 器件恢复到原始状态. 图 5(a) 为 30:20 器件的 I - V 特征曲线, 扫描电压为 $0 \rightarrow 3.0 \rightarrow 0 \rightarrow -1.0 \rightarrow 0$ V, 进行 150 次循环后器件失效, 阻值不再发生变化. 图 5(b), (c) 分别为 40:10 和 45:5 器件的 I - V 特征曲线, 扫描电压均为 $0 \rightarrow 2.5 \rightarrow 0 \rightarrow -2.5 \rightarrow 0$ V 并进行 200 次循环. 值得注意的是, 两个器件在施加负向偏置电压过程中, 均会出现渐变行为但并不稳定, 这种行为对于器件的多值存储性能具有巨大潜力, 相比于 40:10 和 45:5 器件, 30:20 器件循环性较差, 表现出明显的突变行为.

为了探究 W/HfO_x/Pt 忆阻器的多值存储性能, 测试了在不同限制电流下器件的阻变行为. 如图 6 所示, 分别对 3 组器件在不同限制电流测试约 30 次的 I - V 循环, 取一条作为代表性 I - V 曲线, 器件随着限制电流的增大窗口值逐渐增大, 均表现出稳定的 3 种阻值状态. 因此可以通过对器件设置不同的限制电流来调节其阻值状态, 从而实现多级存储功能. 值得注意的是, 30:20 器件 (图 6(a)) 在设置过程中突变电压分布较为杂乱, 可稳定实现的离散阻态数量有限; 40:10 器件 (图 6(b)) 不同 I_{CC} 操作下对应的阻态区分度显著, 可稳定实现的离散阻态数量最多, 多级存储性能最优; 45:5 器件 (图 6(c)) 虽具备多值存储潜力, 但其可实现的稳定阻态数量及阻态稳定性均逊于 40:10 器件. 因此, 40:10 器件的多值存储能力更强更稳定. 40:10 和 45:5 器件较为稳定, 说明导电细丝在阻变层中的形成较为稳定, 但在复位过程中氧空位重新分布或被填充使导电细丝断裂, 且限制电流越大使得氧空位移动更为剧烈, 在复位过程中需要更大的电压. 综合本实验结果及相关文献报道 [44,45], 表明存在一个

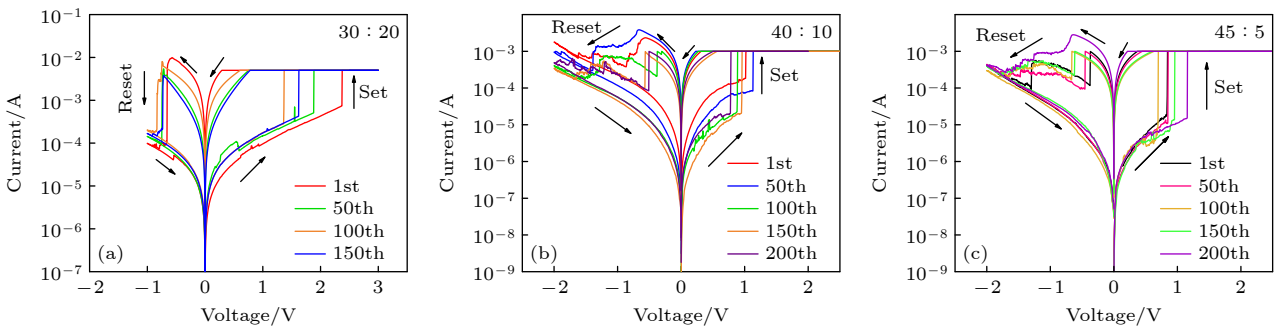


图 5 W/HfO_x/Pt 忆阻器的 I - V 特性曲线 (a) 30:20 器件; (b) 40:10 器件; (c) 45:5 器件

Fig. 5. I - V characteristic curves of the W/HfO_x/Pt memristor: (a) The device with a ratio of 30:20; (b) the device with a ratio of 40:10; (c) the device with a ratio of 45:5.

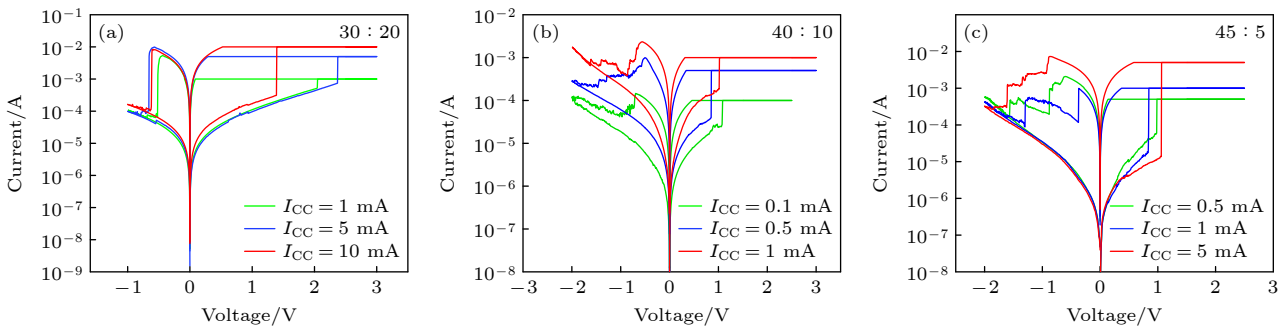


图 6 W/HfO_x/Pt 忆阻器在不同限制电流 I_{CC} 下的 I - V 特性 (a) 30:20 器件; (b) 40:10 器件; (c) 45:5 器件

Fig. 6. I - V characteristics of the W/HfO_x/Pt memristor under different current compliance values: (a) The device with a ratio of 30:20; (b) the device with a ratio of 40:10; (c) the device with a ratio of 45:5.

优化的氧空位浓度窗口 ($5 \times 10^{20} - 6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$), 在此范围内制备的金属氧化物忆阻器更有利于实现高性能、高稳定性的多级存储操作, 氧空位浓度过低或过高均可能限制器件的多级存储能力.

对 3 组器件的阈值电压进行统计分布, 如图 7 所示. 30:20 器件的 Set 阈值电压集中分布在 1.68 V, Reset 阈值电压集中分布在 -0.76 V , 如图 7(a) 所示; 40:10 器件的 Set 阈值电压集中分布在 0.93 V, Reset 阈值电压集中分布在 -1.7 V , 如图 7(b) 所示; 45:5 器件的 Set 阈值电压集中分布在 0.91 V, Reset 阈值电压集中分布在 -1.84 V , 如图 7(c) 所示. 30:20 器件的 set 电压较其他两组器件较大, Reset 电压较小但是分布范围过于宽泛. Set 阈值电压随氧分压的降低逐渐减小, 由于低氧分压条件下薄膜沉积时氧缺陷富集, 氧空位浓度高, 因此较小的电压就可以驱动形成氧空位导电细丝, 形成的导电细丝更为稳定; Reset 阈值电压随氧分压的降低逐渐增大, 由于氧空位浓度高使形成的氧空位导电细丝更粗且稳定, 因此需要较大的电压使其断裂. 同时, 45:5 器件表现出分布更为集中的 Set/Reset 电压分布,

证明导电细丝的形成与断裂的随机性显著降低, 阻态转变电压相较于其他两组器件更为稳定, 对器件的性能具有重要作用.

忆阻器件的循环性能十分重要, 因此测试了 3 组器件的循环稳定性, 并且记录在读取电压为 0.05 V 时下的高阻态和低阻态, 如图 8 所示. 图 8(a) 为 30:20 器件的循环耐受性测试结果表明, 器件在低阻态下的阻值分布较为分散, 波动显著; 而高阻态虽然分布均匀, 但整体呈现逐渐下降的趋势, 且在约 180 次循环后出现失效. 失效机制可归因于在持续电场作用下, 氧空位导电细丝形成过程中, 氧离子向 HfO_x 薄膜与顶电极界面处迁移并聚集, 发生氧化反应产生氧气, 从而在顶电极处形成微小气泡导致器件失效 [46]. 此外, 由于 30:20 器件导电细丝直径较小, 电流密度高度集中, 随着循环测试的次数逐步增加后, 焦耳热效应累积的热量会引起局部温度上升, 进而加速器件性能退化, 缩短开关周期, 最终导致器件失效. 而 40:10 器件的高阻态随着循环次数的增加整体呈向上趋势, 低阻态较为

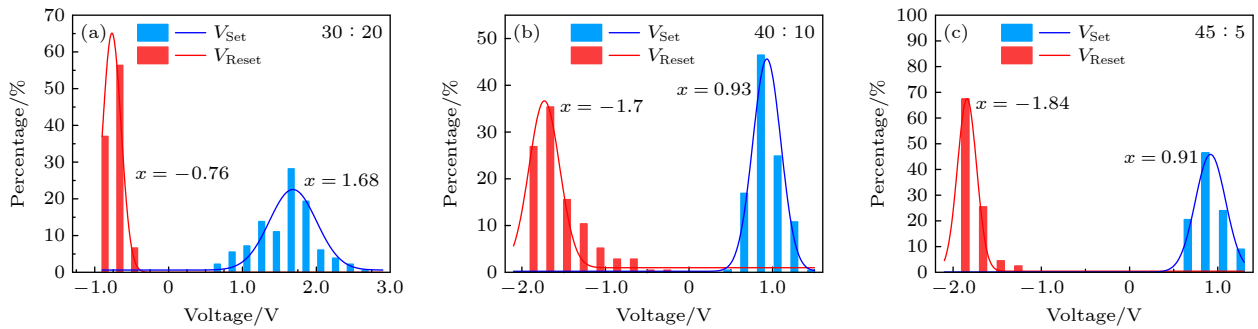


图 7 W/HfO_x/Pt 忆阻器的阈值电压统计分布 (a) 30:20 器件; (b) 40:10 器件; (c) 45:5 器件

Fig. 7. Statistical distribution of threshold voltage of W/HfO_x/Pt memristors: (a) The device with a ratio of 30:20; (b) the device with a ratio of 40:10; (c) the device with a ratio of 45:5.

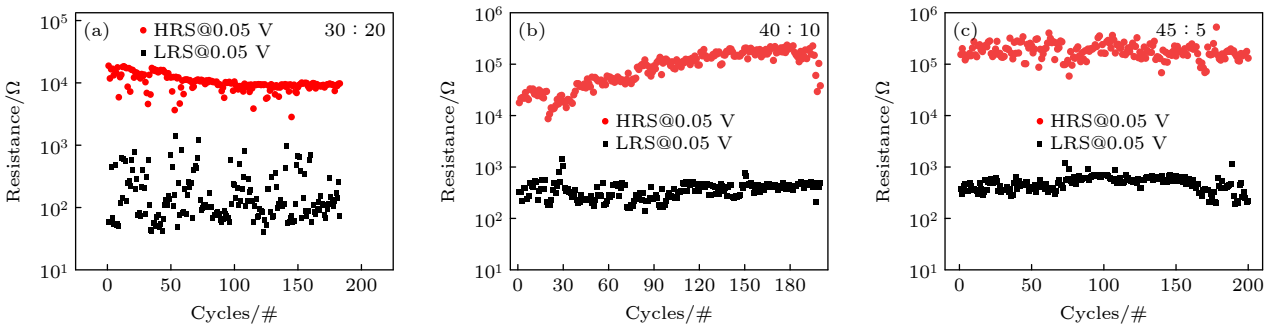


图 8 W/HfO_x/Pt 忆阻器循环耐受性 (a) 30:20 器件; (b) 40:10 器件; (c) 45:5 器件

Fig. 8. Cycling endurance of the W/HfO_x/Pt memristor: (a) The device with a ratio of 30:20; (b) the device with a ratio of 40:10; (c) the device with a ratio of 45:5.

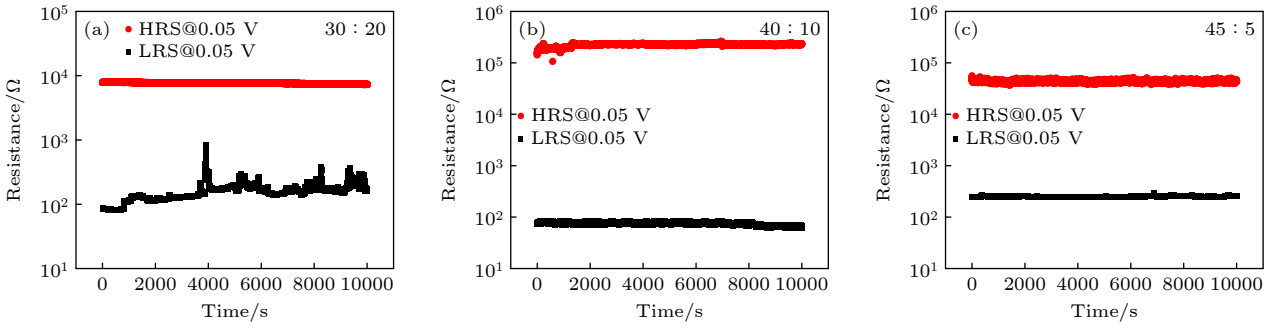


图9 W/HfO_x/Pt 忆阻器的数据保持特性 (a) 30:20 器件; (b) 40:10 器件; (c) 45:5 器件

Fig. 9. Data retention characteristics of the W/HfO_x/Pt memristor: (a) The device with a ratio of 30:20; (b) the device with a ratio of 40:10; (c) the device with a ratio of 45:5.

稳定, 如图 8(b) 所示. 相较于 30:20 器件和 40:10 器件, 45:5 器件表现出更好的稳定性, 高阻态与低阻态基本维持在一个水平直线上且波动较小, 无过多的阻值跳点, 同时拥有 $\sim 10^2$ 稳定的开关比值, 如图 8(c) 所示. 这是由于在氧空位浓度为 45:5 条件下, 相较于其他两组条件 HfO_x 阻变层中氧空位浓度更高, 所形成的氧空位导电细丝更为粗壮且会减少分支的形成, 降低导电细丝形成和断裂的随机性, 提高了器件的稳定性.

图 9 展示了 3 组器件在室温下的数据保持特性, 将器件分别置于高阻态和低阻态, 使用 0.05 V 的读取电压, 进行 10^4 s 的保持特性测试. 图 9(a) 为 30:20 器件的保持特性, 可以直观看出, 器件处于低阻态时保持特性波动较大, 保持特性较差, 开关比为 $\sim 10^2$ 且逐渐减小. 这可能是由于此器件中氧含量较多, 氧空位较少, 从而形成的导电细丝较细, 因此处于低阻态时导电细丝不稳定, 出现较大的波动. 而 40:10 (图 9(b)) 和 45:5 (图 9(c)) 器件整体较为平稳, 开关比分别保持在 $\sim 10^3$ 和 $\sim 10^2$. 值得注意的是, 45:5 器件相比于 40:10 器件保持特性更为稳定, 几乎未发现阻值波动. 这可能是由于导电细丝形成的质量更高, 器件在断电情况下更能保持阻值稳定, 其存储能力更好.

为了进一步探究 W/HfO_x/Pt 忆阻器的读取与擦除能力, 将设置电压设为 ± 2 V, 读取电压设置为 0.05 V, 脉冲间隔为 2 ms, 限制电流为 1 mA, 对器件施加电脉冲信号测试 3 组器件的响应时间, 如图 10 所示. 需要注意的是, 测试脉冲响应时间所使用的是电脉冲信号, 与测试 *I-V* 曲线所使用的直流电源不同, 在进行脉冲测试时, 会对器件施加一个较大的电脉冲信号, 对器件损害较大, 因此设

置合适的限制电流来保护器件不被击穿, 降低对器件的损害. 首先施加正向电脉冲, 实现器件读取信息的过程, 3 组器件均实现由高阻态向低阻态的瞬时阻态转变, 电流值同时发生瞬时变化, 随后施加 0.05 V 的读取电压, 在对器件阻态没有影响的前提下, 读取器件的电流值; 再施加负向电脉冲, 器件由低阻态瞬时转变为高阻态, 实现器件对信息的擦除过程, 随后也施加一个读取电压, 读取电流值. 图 10(a) 为 30:20 器件的响应时间, 其写入和擦除信息的时间均为 70 μ s; 图 10(b), (c) 为 40:10 和 45:5 器件的响应时间, 其写入信息时间均为 70 μ s, 擦除信息时间均为 130 μ s. 可以看出 30:20 器件的响应能力会更好. 在本研究中, 45:5 器件的氧空位浓度最高, 稳定性较好但响应时间略差, 主要原因是由于高浓度氧空位的聚集促使形成了直径更大、结构更稳定的导电细丝. 因此, 要实现此类细丝的完全断裂, 需要更长的响应时间. 相反, 在 30:20 器件中, 形成的导电细丝可能相对更细, 其断裂所需的热量更低、速度更快, 因此表现出更短的擦除时间. 45:5 器件 (氧空位浓度为 25.59%) 的优势在于形成了稳定的导电细丝, 因此表现出较高的循环耐久性和数据保持特性, 但是开关动力学稍慢, 特别是擦除速度. 30:20 器件 (氧空位浓度为 12.69%) 的优势在于更快的开关动力学, 细丝结构更易改变, 但其稳定性均一性 (如阈值电压分布) 不如高 V_0 浓度的器件, Liu 等 [47] 也发现类似的结果. 器件的综合性能是多种因素共同作用的结果, 需要根据应用场景 (高稳定性存储器或者类脑计算) 来优化氧空位浓度. 在本研究中, 45:5 器件尽管其擦除速度并非最好, 但是在开关比、耐久性和保持特性方面的综合优势, 使其更适合作为可靠稳定的多值忆阻器.

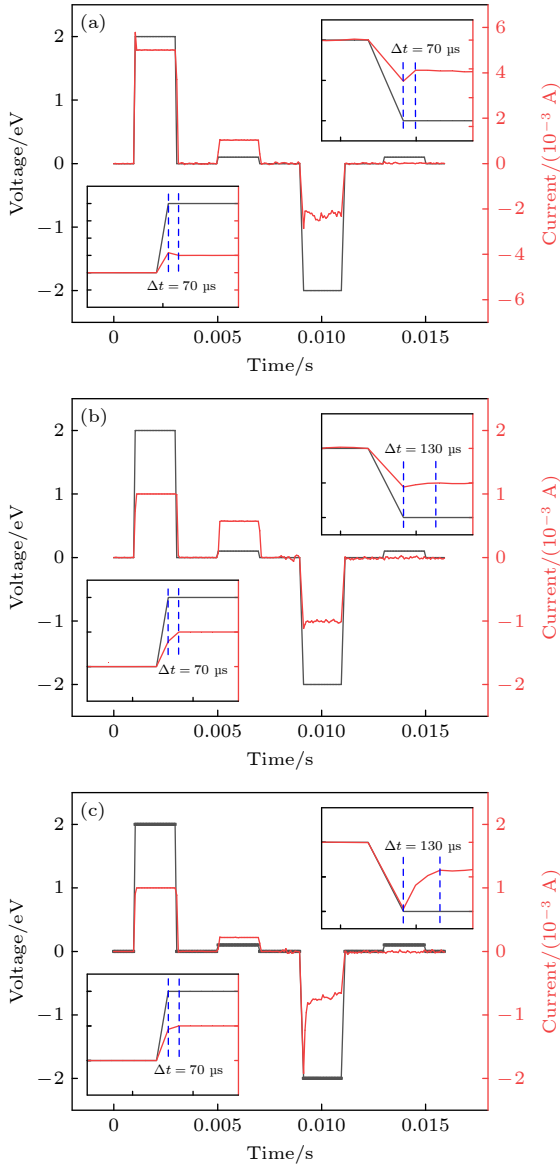


图 10 W/HfO_x/Pt 忆阻器的脉冲响应时间 (图中黑色曲线为设置电压, 红色曲线为器件在电脉冲下测试的电流值) (a) 30:20 器件; (b) 40:10 器件; (c) 45:5 器件

Fig. 10. Pulse response time of the W/HfO_x/Pt memristor (The black curve represents the set voltage, and the red curve represents the current measured from the device under electrical pulses): (a) The device with a ratio of 30:20; (b) the device with a ratio of 40:10; (c) the device with a ratio of 45:5.

为了进一步证明 W/HfO_x/Pt 忆阻器的稳定性及可靠性, 对其进行脉冲循环测试, 读取电压设置为 0.1 V, 进行 200 个周期. 从图 11 可以直观看出, 30:20 器件 (图 11(a)) 稳定性较差, 45:5 器件 (图 11(c)) 相较于 40:10 器件 (图 11(b)) 具有更好的稳定性. 这对于器件在数据存储方面具有更好的可靠性. 此外, 表 1 对本研究和其他文章中已经报道的忆阻器电学性能进行对比. 综合性能评估表

明, 本研究制备的 W/HfO_x/Pt(45:5) 器件相较于多数已有报道的忆阻器件, 表现出更显著的开关比及更低的操作电压.

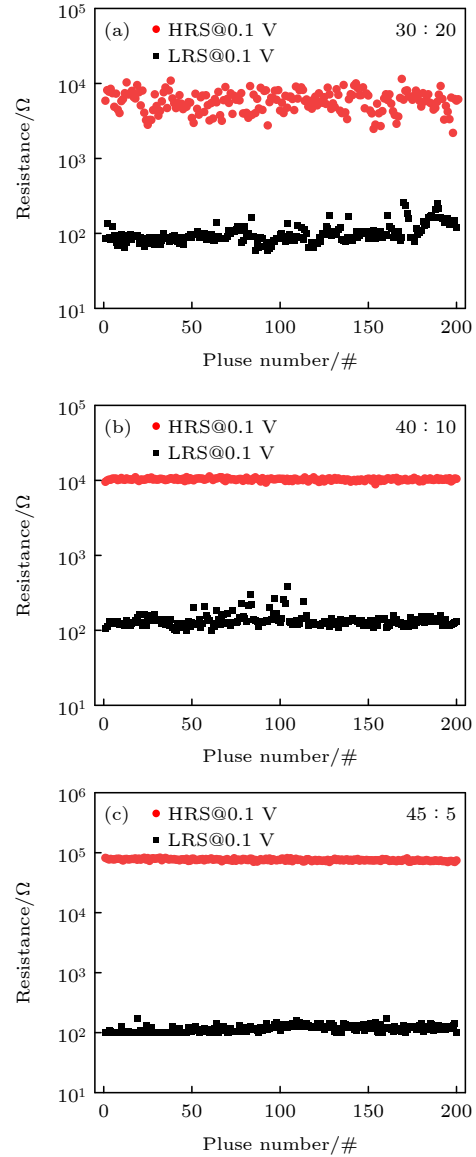


图 11 W/HfO_x/Pt 忆阻器连续周期的脉冲循环 (a) 30:20 器件; (b) 40:10 器件; (c) 45:5 器件

Fig. 11. Pulse cycles of the W/HfO_x/Pt memristor in continuous periods: (a) The device with a ratio of 30:20; (b) the device with a ratio of 40:10; (c) the device with a ratio of 45:5.

图 12 为 W/HfO_x/Pt 器件载流子输运机制, 将 I-V 曲线进行对数处理并分段拟合分析. 如图 12(a) 所示, 器件处于高阻态时, 拟合结果可分为 I, II, III 三个区域, 计算每个区域的斜率, 器件处于超低电场 I 区域时, 由电极注入的电子被 HfO_x 薄膜内部的缺陷捕获, 只有极少的电子在器件内迁移, 此时

表 1 HfO_x 忆阻器与各类忆阻器电学性能的对比
 Table 1. Comparison of electrical performance between HfO_x memristors and various types of memristors.

RRAM structure	V _{Set} /V _{Reset}	Endurance	Retention time	ON/OFF ratio	Response time	Ref.
Ti/hBN/Au	1.73/−0.85 V	200	—	> 50	120/120 ps	[18]
Cu/AlO _x /Al	2.11/−1.1 V	50	~10 ⁴	~10 ⁵	—	[48]
Al/WO _x /ITO	0.65/−3.1 V	100	—	~10 ³	—	[49]
Ti/ZrO ₂ /Pt	2.5/−2 V	100	> 10 ⁴	> 10	250/250 ns	[50]
Pt/HfO ₂ /TiO ₂ /ITO	0.7/−0.5 V	100	~10 ⁴	> 10.6	—	[51]
Ag/BP/HfO ₂ /Pt	1.4/−0.54 V	> 100	—	~10 ²	—	[52]
W/HfO _x /Pt(45:5)	0.91/−1.84 V	200	> 10 ⁴	~10 ³	70/130 μs	This work

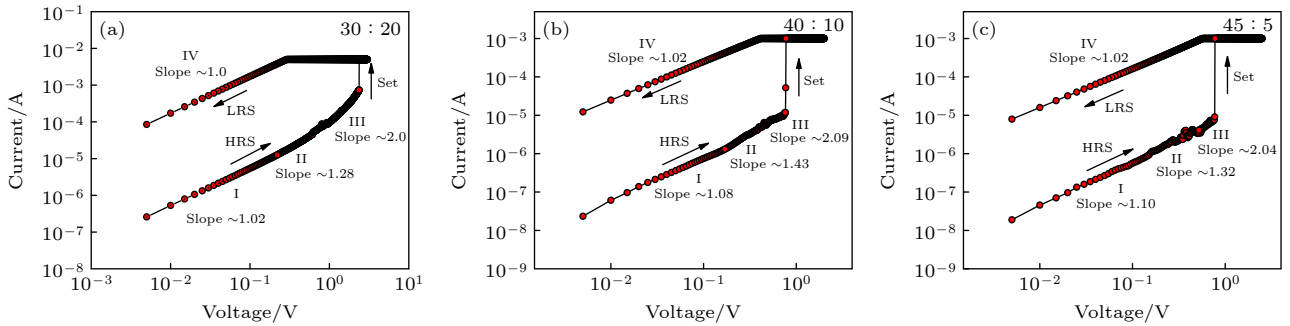

 图 12 W/HfO_x/Pt 忆阻器的导电拟合机制 (a) 30:20 器件正扫描区 I - V 曲线的双对数拟合结果; (b) 40:10 器件正扫描区 I - V 曲线的双对数拟合结果; (c) 45:5 器件正扫描区 I - V 曲线的双对数拟合结果

 Fig. 12. Conductive fitting mechanism of the W/HfO_x/Pt memristor: (a) Double logarithmic fitting results of the I - V curve in the positive scanning region of the device with a ratio of 30:20; (b) double logarithmic fitting results of the I - V curve in the positive scanning region of the device with a ratio of 40:10; (c) double logarithmic fitting results of the I - V curve in the positive scanning region of the device with a ratio of 45:5.

由欧姆导电机理主导, 其斜率约为 1. 随着电压的逐渐增大, HfO_x 薄膜内部缺陷被逐步填充, 此时相较于 I 区域中的电子数 II 区域电子数增多, 属于低电场区域, 导电机理受 HfO_x 薄膜由从电极注入的电子主导, 薄膜内自由电子逐渐增加, 器件的导电率逐渐增大, 阻值逐渐变小, 电流与电压呈现出平方关系. 当器件进入高电场 III 区域时, 此时从顶电极中注入薄膜中的自由电子数急剧增加, HfO_x 薄膜内缺陷被完全填充, 缺陷对电子迁移不再产生影响, 氧空位导电细丝将顶电极与底电极连接, 器件电流激增, 使器件进入低阻态. 在高阻态下的 3 个阶段表明器件的导电机理遵循空间电荷限制电流机制 (SCLC)^[53,54]. 当器件处于低阻态, 拟合结果即图中 IV 区域时, 3 组器件斜率约为 1, 均符合欧姆定律, 是由于在 HfO_x 薄膜层内部氧空位导电细丝的形成实现了顶电极与底电极的连接, 器件中电流通过导电细丝传导. 45:5 器件和 40:10 器件也拟合表现出了类似的输运机制, 如图 12(b), (c) 所示.

通过对 3 组器件进行表征测试并进行数据分析, 其性能差异主要归因于 HfO_x 薄膜内的氧空位浓度的不同, 这一差异直接影响了器件内氧空位导电细丝的形成与断裂过程. 在非晶 HfO_x 材料内部, 原子排列长程无序, 内部存在大量的本征缺陷. 理论计算表明^[55], 在这种高度无序的环境中, 氧空位的形成能通常显著低于结晶材料. 制备过程 (如溅射中的缺氧环境) 中, 非晶材料热力学上更容易产生高浓度的氧空位. 氧空位形成后在浓度梯度和电场力的作用下会发生选择性的漂移和扩散. 在非晶 HfO_x 材料内部, 迁移路径虽然整体上由电场驱动, 但具有很强的随机性, 是高度随机和无序的. 然而, 一旦形成一条稳定的导电细丝, 后续的氧空位会倾向于沿着这条已建立的路径进行迁移和聚集^[56]. 研究表明, 氧空位的浓度增大会降低氧离子的迁移势垒高度, 促进氧空位扩散^[44], 且在具有高氧空位的氧化物忆阻器中, 初始状态下导电细丝成核区域附近就已存在高密度的氧空位, 这显著缩短了氧空位的有效迁移路径. 在施加外电场后, 电场定向驱

动氧空位更易沿能量有利的路径聚集,促进了导电细丝的形成与扩展,并倾向于形成更大直径的导电通道[57].

复位过程本质上是导电细丝在焦耳热作用下发生热熔断.通常情况下,导电细丝的断裂通常从最薄弱的“颈缩”点开始[58].粗壮的细丝其直径分布更均匀,不易形成极端的、易断裂的颈缩点.当电流流经导电细丝时产生的焦耳热会显著提升导电细丝局部温度,进一步降低离子迁移活化能,从而协同强化电场对氧空位迁移的驱动效应[59].直径较大的导电细丝具有更大的电流承载面积,能有效分散电流密度,这显著抑制了因局部电流密度过高引发过量焦耳热而导致导电细丝发生热熔断的风险.因此,粗壮的细丝在相同的操作条件下更不容易发生彻底断裂,从而表现为循环耐久性的提升和数据保持能力的增强.反之,直径较小的导电细丝则因电流密度高度集中和局部焦耳热积聚效应,其稳定性降低.

为了更为直观地揭示不同氩氧比条件对器件阻变存储特性的影响,深入剖析氧空位导电细丝切换机制和动态演化,构建了器件阻变机制模型,如图13所示.从图13初始态示意图可以看出,不同氩氧比条件下所制备的 HfO_x 薄膜中氧空位呈现差异性,其中 40:10 器件和 45:5 器件中氧空位浓度显著高于 30:20 器件.这是由于较低的氧分压条件下,薄膜沉积时更易形成氧缺失现象,从而导致氧空位浓度显著提高.当对 W 顶电极施加正向偏置电压,带负电的氧离子向顶电极迁移,而余下的氧空位在氧离子迁移后在底电极向顶电极逐步积累,并且随着电压的增大在底电极与顶电极间形成氧空位导电细丝,呈现导通状态,器件由高阻态转变为低阻态,如图中 Set 过程;后对器件施加负向偏置电压,驱动氧离子由顶电极附近向阻变层底部移动,与带正电的氧空位结合,而在移动过程中氧离子会先与阻变层顶部区域的氧空位结合,因此导电细丝会在顶电极附近区域开始断裂,器件由低阻态回到高阻态,如图13中 Reset 过程.30:20 器件薄膜中氧空位浓度较低,氧空位导电细丝形成和断裂表现出较大的随机性,且导电细丝直径较小,导致器件稳定性欠佳(图13(a));与之相比,40:10 器件由于氧分压降低,氧空位浓度相应的有所提高,形成的氧空位导电细丝对比 30:20 器件稳定性提升,细丝断裂的随机性显著降低(图13(b)),而 45:5

器件其氧空位浓度在三组器件中最高,形成的导电细丝直径有明显增加(图13(c)),器件的稳定性得到进一步增强.

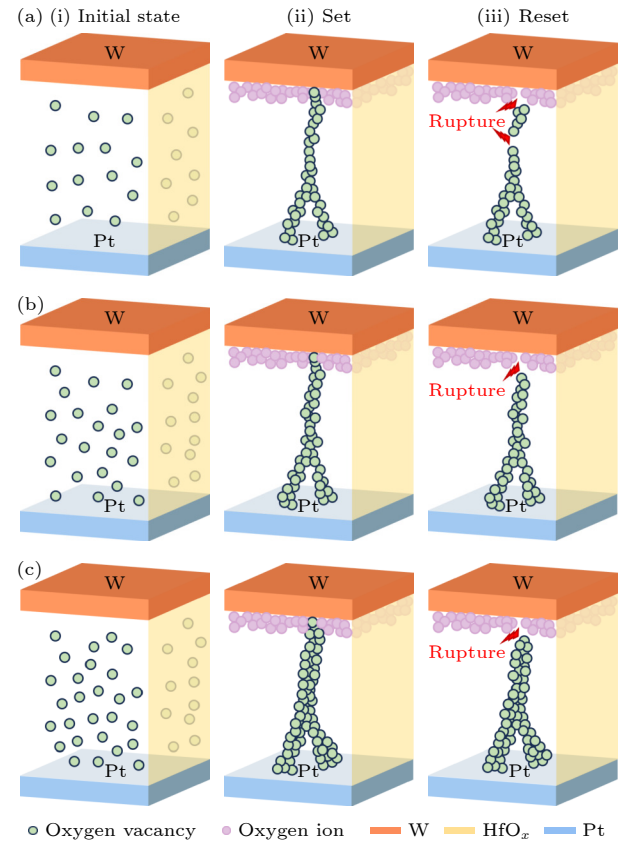


图13 W/ HfO_x /Pt 忆阻器阻变机制示意图 (a) 30:20 器件; (b) 40:10 器件; (c) 45:5 器件

Fig. 13. Schematic diagrams of the resistive switching mechanism of the W/ HfO_x /Pt memristor: (a) The device with a ratio of 30:20; (b) the device with a ratio of 40:10; (c) the device with a ratio of 45:5.

4 总结

本文利用磁控溅射法制备了氩氧比为 30:20, 40:10 和 45:5 的 W/ HfO_x /Pt 忆阻器,并系统地对 3 组器件进行表征测试.实验结果表明,增大氩气流速,降低氧气流速显著提升 HfO_x 阻变层中氧空位的浓度,其本质为反应溅射过程中氧分压降低导致的氧缺陷富集效应,非晶 HfO_x 薄膜中无序的原子排列进一步促进了氧空位的形成,其氧空位浓度主要影响氧空位导电细丝的形貌.通过 XPS 分析可以得知所制备的 45:5 器件具有较高的氧空位浓度,为导电细丝的形成提供充足的氧空位.电学测试表明, HfO_x 阻变层中氧空位浓度高的 45:5 器件展示出更优异的阻变性能,超过 200 次的循环耐

受性、 $>10^2$ 的开关比、良好的多值存储能力和 10^4 s 持久稳定的保持特性。本研究通过调控反应溅射气体比例实现对导电细丝形态的调控, 揭示了氧空位浓度对阻变层缺陷和器件阻变性能的调控机制, 这对于发展可靠稳定的多值忆阻器件具有重要意义。

参考文献

- [1] Tang K, Wang Y, Gong C H, Yin C J, Zhang M, Wang X F, Xiong J 2022 *Adv. Electron. Mater.* **8** 2101099
- [2] Cao D W, Yan Y, Wang M N, Luo G L, Zhao J R, Zhi J K, Xia C X, Liu Y F 2024 *Adv. Funct. Mater.* **34** 2314649
- [3] Zhang Y, Mao G Q, Zhao X L, Li Y, Zhang M Y, Wu Z H, Wu W, Sun H J, Guo Y Z, Wang L H, Zhang X M, Liu Q, Lv H B, Xue K H, Xu G W, Miao X S, Long S B, Liu M 2021 *Nat. Commun.* **12** 7232
- [4] Zhang G B, Fan X M, Wang J, Wang Z J, Zhang Z J, Li P T, Ma Y T, Huang K J, Yu B, Wan Q, Miao X S, Zhang Y S 2025 *Nat. Commun.* **16** 5759
- [5] Yao P, Wu H Q, Gao B, Tang J S, Zhang Q T, Zhang W Q, Yang J J, Qian H 2020 *Nature* **577** 641
- [6] Liu D Q, Cheng H F, Zhu X, Wang N N, Zhang C Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 187301 (in Chinese) [刘东青, 程海峰, 朱玄, 王楠楠, 张朝阳 2014 物理学报 **63** 187301]
- [7] Lanza M, Sebastian A, Lu W D, Le Gallo M, Chang M F, Akinwande D, Puglisi F M, Alshareef H N, Liu M, Roldan J B 2022 *Science* **376** eabj9979
- [8] Sun T Y, Qin Z B, Yu F T, Gao S, Wangyang P H, Tang X S, Li H O, Zhang F B, Xu Z M, Cai P, Jiang C S, Xue X G 2025 *Appl. Surf. Sci.* **679** 161150
- [9] Wang L, Zhu H Y, Zuo Z, Wen D Z 2023 *Adv. Electron. Mater.* **9** 2201032
- [10] Hota M K, Pazos S, Lanza M, Alshareef H N 2025 *Mater. Sci. Eng. R Rep.* **164** 100983
- [11] Gong S K, Zhou J, Wang Z Q, Zhu M C, Shen J, Wu Z, Chen W 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 197301 (in Chinese) [龚少康, 周静, 王志青, 朱茂聪, 沈杰, 吴智, 陈文 2021 物理学报 **70** 197301]
- [12] Yang Y F, Xu M K, Jia S J, Wang B L, Xu L J, Wang X X, Liu H, Liu Y S, Guo Y Z, Wang L D, Duan S K, Liu K, Zhu M, Pei J, Duan W R, Liu D M, Li H L 2021 *Nat. Commun.* **12** 6081
- [13] Chen L, He Z L, Li C D, Wen S P, Chen Y R 2020 *Int. J. Bifurcat. Chaos* **30** 2050172
- [14] Zhou G D, Wang Z R, Sun B, Zhou F C, Sun L F, Zhao H B, Hu X F, Peng X Y, Yan J, Wang H M, Wang W H, Li J, Yan B T, Kuang D L, Wang Y C, Wang L D, Duan S K 2022 *Adv. Electron. Mater.* **8** 2101127
- [15] Zhang H Z, Xu C Y, Nan H Y, Xiao S Q, Gu X F 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 246101 (in Chinese) [张浩哲, 徐春燕, 南海燕, 肖少庆, 顾晓峰 2020 物理学报 **69** 246101]
- [16] Rusevich L L, Tyunina M, Kotomin E A, Nepomniashchaia N, Dejneka A 2021 *Sci. Rep.* **11** 23341
- [17] Zhang B, Fan F, Xue W H, Liu G, Fu Y B, Zhuang X D, Xu X H, Gu J W, Li R W, Chen Y 2019 *Nat. Commun.* **10** 736
- [18] Teja Nibhanupudi S S, Roy A, Veksler D, Coppin M, Matthews K C, Disiena M, Ansh, Singh J V, Gearba-Dolocan I R, Warner J, Kulkarni J P, Bersuker G, Banerjee S K 2024 *Nat. Commun.* **15** 2334
- [19] Chen S C, Yang Z, Hartmann H, Besmehn A, Yang Y C, Valov I 2025 *Nat. Commun.* **16** 2348
- [20] Hua P, Ning D 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 107303
- [21] Wang W X, Yin F F, Niu H S, Li Y, Kim E S, Kim N Y 2023 *Nano Energy* **106** 108072
- [22] Wu M C, Chen J Y, Ting Y H, Huang C Y, Wu W W 2021 *Nano Energy* **82** 105717
- [23] Tao Y, Wang Z Q, Xu H Y, Ding W T, Zhao X N, Lin Y, Liu Y C 2020 *Nano Energy* **71** 104628
- [24] Bai J, Xie W W, Zhang W Q, Yin Z P, Wei S S, Qu D H, Li Y, Qin F W, Zhou D Y, Wang D J 2022 *Appl. Surf. Sci.* **600** 154084
- [25] Banerjee W, Kashir A, Kamba S 2022 *Small* **18** 2107575
- [26] Wang Y, Huang H X, Huang X L, Guo T T 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 197201 (in Chinese) [王英, 黄慧香, 黄香林, 郭婷婷 2023 物理学报 **72** 197201]
- [27] Hah J, West M P, Athena F F, Hanus R, Vogel E M, Graham S 2022 *J. Mater. Sci.* **57** 9299
- [28] Sharath S U, Vogel S, Molina-Luna L, Hildebrandt E, Wenger C, Kurian J, Duerrschmabel M, Niermann T, Niu G, Calka P, Lehmann M, Kleebe H J, Schroeder T, Alff L 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1700432
- [29] Wei T T, Lu Y Y, Zhang F, Tang J S, Gao B, Yu P, Qian H, Wu H Q 2023 *Adv. Mater.* **35** 2209925
- [30] Zhou Q Z, Wang F, Zhao X Y, Hu K, Zhang Y J, Shan X, Lin X, Zhang Y P, Shan K, Zhang K L 2023 *J. Intell. Fuzzy Syst.* **45** 5159
- [31] Ran H F, Ren Z J, Li J, Sun B, Wang T Y, Gu D S, Wang W H, Hu X F, Dong Z K, Song Q L, Wang L D, Duan S K, Zhou G D 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2418113
- [32] Zhang Z Z, Wang F, Hu K, She Y, Song S N, Song Z T, Zhang K L 2021 *Materials* **14** 3330
- [33] Yu S M, Chen H Y, Gao B, Kang J F, Wong H S P 2013 *ACS Nano* **7** 2320
- [34] Wang C X, Mao G Q, Huang M H, Huang E M, Zhang Z C, Yuan J H, Cheng W M, Xue K H, Wang X S, Miao X S 2022 *Adv. Sci.* **9** 2201446
- [35] Kaiser N, Vogel T, Zintler A, Petzold S, Arzumano A, Piros E, Eilhardt R, Molina-Luna L, Alff L 2022 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14** 1290
- [36] Jana B, Roy Chaudhuri A 2024 *Chips* **3** 235
- [37] Dai Y H, Pan Z Y, Wang F F, Li X F 2016 *AIP Adv.* **6** 085209
- [38] Zhang K N, Ren Y, Ganesh P, Cao Y 2022 *Npj Comput. Mater.* **8** 76
- [39] Li S Q, Du J G, Lu J G, Lu B J, Zhuge F, Yang R Q, Lu Y D, Ye Z Z 2022 *J. Mater. Chem. C* **10** 17154
- [40] Liu Y H, Zuo Q Y, Sun J Y, Dai J X, Cheng C H, Huang H L 2024 *J. Appl. Phys.* **135** 184502
- [41] Shi Q W, Aziz I, Ciou J H, Wang J X, Gao D C, Xiong J Q, Lee P S 2022 *Nano-Micro Lett.* **14** 195
- [42] Saka K, Gokcen D, Efker H I, Bayram C, Ozcelik S 2025 *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **36** 824
- [43] Mahata C, So H, Ju D, Ismail M, Kim S, Hsu C C, Park K, Kim S 2024 *Nano Energy* **129** 110015
- [44] Rudrapal K, Biswas M, Jana B, Adyam V, Chaudhuri A R 2023 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **56** 205302
- [45] Hwang H G, Pyo Y, Woo J U, Kim I S, Kim S W, Kim D S, Kim B, Jeong J, Nahm S 2022 *J. Alloys Compd.* **902** 163764
- [46] Yang Y C, Zhang X X, Qin L, Zeng Q B, Qiu X H, Huang R 2017 *Nat. Commun.* **8** 15173
- [47] Liu C, Zhang C C, Cao Y Q, Wu D, Wang P, Li A D 2020 *J. Mater. Chem. C* **8** 12478
- [48] Fu L P, Liu H Y, Fan X L, Li Y T 2023 *Phys. Scr.* **98** 095017

- [49] Hsu C C, Chuang H, Jhang W C 2021 *J. Alloys Compd.* **882** 160758
- [50] Wu M C, Jang W Y, Lin C H, Tseng T Y 2012 *Semicond. Sci. Technol.* **27** 065010
- [51] Ye Cong, Deng T F, Zhang J C, Shen L P, He P, Wei W, Wang H 2016 *Semicond. Sci. Technol.* **31** 105005
- [52] Yan X Y, Wang X T, Xing B R, Yu Y, Yao J D, Niu X Y, Li M G, Sha J, Wang Y W 2020 *AIP Adv.* **10** 075013
- [53] Yang C, Wang H Y, Cao Z L, Wang K, Zhou G D, Hou W T, Zhao Y, Sun B 2025 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **17** 6550
- [54] Wang J Q, Wang H Y, Cao Z L, Zhu S H, Du J M, Yang C, Ke C, Zhao Y, Sun B 2024 *Adv. Funct. Mater.* **34** 2313219
- [55] Medvedeva J E, Zhuravlev I A, Burris C, Buchholz D B, Grayson M, Chang R P H 2020 *J. Appl. Phys.* **127** 175701
- [56] Zhang D L, Wang J, Wu Q, Du Y 2023 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **25** 3521
- [57] Aziz J, Kim H, Rehman S, Hur J H, Song Y H, Khan M F, Kim D K 2021 *Mater. Res. Bull.* **144** 111492
- [58] Fadeev A V, Rudenko K V 2024 *Microelectron. Eng.* **289** 112179
- [59] Boynazarov T, Lee J, Lee H, Lee S, Chung H, Ryu D H, Abbas H, Choi T 2025 *J. Mater. Sci. Technol.* **227** 164

Stability of HfO_x memristors based on oxygen vacancy regulation*

ZHU Yuanyuan¹⁾ YANG Ziyi¹⁾ YANG Shuning¹⁾ ZHANG Yunfei¹⁾
 ZHANG Miao¹⁾ WANG Xin¹⁾ WANG Hongjun^{1)†} XU Jing^{2)‡}

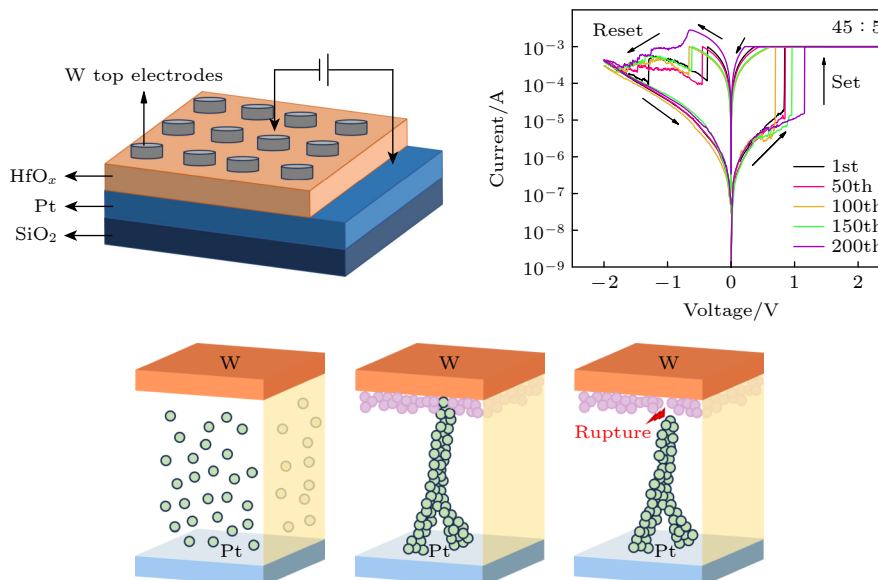
¹⁾ (School of Physics and Information Science, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

²⁾ (College of Physics and Electronic Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

(Received 21 July 2025; revised manuscript received 6 September 2025)

Abstract

HfO_x memristors have emerged as one of the most promising candidates for next-generation non-volatile memory due to their low operating voltage, excellent endurance, and cycling characteristics. However, the randomness in the formation and rupture of oxygen vacancy conductive filaments within HfO_x thin films leads to a relatively dispersed threshold voltage distribution and poor stability. Therefore, improving the stability of



* Project supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2025JC-YBMS-001) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11905119).

† Corresponding author. E-mail: wanghongjun@sust.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: xujing@nynu.edu.cn

HfO_x devices by modulating oxygen vacancies is of significant research importance. In this study, three groups of W/HfO_x/Pt devices are prepared using magnetron sputtering with argon-to-oxygen ratios of 30:20, 40:10 and 45:5, respectively. X-ray photoelectron spectroscopy results indicate that the 45:5 device has the highest oxygen vacancy concentration (25.59%). All of three groups exhibit bipolar resistive switching behavior. Of the three W/HfO_x/Pt devices, the device with the argon-to-oxygen ratio of 45:5 demonstrates the best overall performance: over 200 *I-V* cycles, a switching ratio of $\sim 10^3$, excellent data retention within 10⁴ s, and a concentrated threshold voltage distribution. Analysis of the conduction mechanisms reveals that the device follows a space-charge-limited current (SCLC) mechanism in the high-resistance state and exhibits Ohmic conduction behavior in the low-resistance state. In the initial state, there is a high density of oxygen vacancies near the nucleation region of the conductive filament, which can shorten the effective migration path of oxygen vacancies. Under an applied electric field, negatively charged oxygen ions migrate toward the top electrode, while oxygen vacancies gradually accumulate from the bottom electrode to the top electrode, leading to the formation of continuous conductive filaments. A higher oxygen vacancy concentration facilitates the development of robust and structurally more stable conductive filaments, thereby enhancing the uniformity of resistive switching and device reliability. This study reveals the critical role of oxygen vacancy modulation in the performance of HfO_x memristors and provides an effective pathway for developing high-performance and highly reliable resistive random-access memory.

Keywords: memristor, HfO_x thin film, oxygen vacancy, conductive filament

PACS: 73.40.Rw, 85.30.-z, 85.30.De

DOI: [10.7498/aps.74.20250971](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250971)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250971](https://cstr.net.cn/detail/32037.14.aps.74.20250971)



基于氧空位调控的 HfO_x 忆阻器稳定性研究

朱媛媛 杨梓怡 杨淑宁 张云飞 张苗 王鑫 王红军 徐静

Stability of HfO_x memristors based on oxygen vacancy regulation

ZHU Yuanyuan YANG Ziyi YANG Shuning ZHANG Yunfei ZHANG Miao WANG Xin WANG Hongjun XU Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 217301 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250971

CSTR: 32037.14.aps.74.20250971

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250971>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光电协同调控下 HfO_x 基阻变存储器的阻变特性

Resistive switching characteristics of HfO_x -based resistance random access memory under photoelectric synergistic regulation

物理学报. 2023, 72(19): 197201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230797>

电化学金属化阻性存储器导电细丝生长中的离子动力学研究

Kinetics study of ions in conductive filament growth process of electrochemical metallization resistive memory

物理学报. 2023, 72(24): 248501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231232>

基于电场-温度双场协同调控的有机小分子仿生忆阻器

Bio-inspired organic small-molecule memristor synergistically modulated by electric-thermal field

物理学报. 2025, 74(17): 177301 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250626>

一种适用于大规模忆阻网络的忆阻器单元解析建模策略

An analytic modeling strategy for memristor cell applicable to large-scale memristive networks

物理学报. 2021, 70(17): 178505 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210116>

面向类脑计算的低电压忆阻器研究进展

Recent progress of low-voltage memristor for neuromorphic computing

物理学报. 2024, 73(20): 207302 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241022>

基于忆阻器阵列的下一代储池计算

Next-generation reservoir computing based on memristor array

物理学报. 2022, 71(14): 140701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220082>