

Cu/MgO/MoS₂/Cu 结构的电阻开关特性

何小龙 陈鹏[†]

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2024 年 9 月 14 日收到; 2024 年 12 月 1 日收到修改稿)

采用磁控溅射的方法制备了 Cu/MgO/Cu, Cu/MgO/MoS₂/Cu 和 Cu/MoS₂/MgO/Cu 三种器件. 通过对器件的表征测试及 $I-V$ 曲线的测量, 发现对于 Cu/MgO/Cu 器件, 加入 MoS₂ 插入层后, 器件的电阻开关特性会发生大的变化. 分析结果表明, MoS₂ 插入层并没有改变器件的主要传导机制 (空间电荷限制传导), 但影响了界面势垒的调控作用, 这种影响还与 MoS₂ 插入层的位置有关. Cu/MgO/Cu, Cu/MgO/MoS₂/Cu 和 Cu/MoS₂/MgO/Cu 三种器件中, Cu/MgO/MoS₂/Cu 器件表现出更大的开关比 (约为 10^3) 和更低的复位电压 (约为 0.21 V), 这可以归因于 MgO 与 MoS₂ 之间界面势垒的调控. 而 Cu/MoS₂/MgO/Cu 器件表现出较好的可靠性和稳定性. 此外, MoS₂ 层在插入到底电极 Cu 和 MgO 之间时, 器件的漏电流有明显的降低.

关键词: 电阻开关特性, 界面势垒, 开关比**PACS:** 85.25.Hv, 81.07.-b, 73.40.Qv, 85.35.-p**DOI:** 10.7498/aps.74.20241298**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241298

1 引言

在过去的几十年里, 随着互联网时代的飞速发展, 信息的数据量也在不断攀升, 迫切需要新的存储设备来储存数据^[1-3]. 由于“冯·诺依曼瓶颈”的预测^[4], 研究人员把目光从传统的存储器转向新兴的随机存取存储器 (random access memory, RAM), 其中电阻式随机存取存储器 (resistive random access memory, RRAM) 由于其高速、低成本、高存储密度以及优异的可扩展性, 近年来备受关注^[5-7]. 然而, 仍然存在器件的可变性、嵌入式应用的功耗、交叉棒阵列集成中的读写干扰等问题, 这些问题阻碍了 RRAM 的商业化^[8-10]. 到目前为止, 已经在二元金属氧化物^[11]、多元金属氧化物 (特别是钙钛矿结构的金属氧化物)^[12-14]、有机化合物^[15] 等材料中发现了电阻开关 (resistive switching, RS) 现象. 在二元金属氧化物中, HfO₂ 和 Ta₂O₅ 因其良

好的电阻开关性能和成熟的工艺技术而被广泛研究^[16-19]. 例如, Kumar 等^[17] 报道了 ITO/MgO/HfO₂/ITO 透明电阻开关器件, 该器件通过开关层中的缺陷工程表现出照片响应, 这导致了在形成的导电细丝中的次表面活性开关位置, 从而减少了通过多晶电极的氧损失. 该器件具有优良的开关比 (约 10^7)、高稳定的直流电置位和光置位耐久性 (>1000 次循环而不退化)、优良的保持力 (> 10^4 s @85 °C)、高透明性 (>85% 的可见光透过率) 和 30 μ s 的光置位响应时间. 同时, 这项研究中提到了 MgO 层的插入所带来的器件性能的增强. Lee 等^[19] 提出了一种基于 TaO_x 的双极电阻开关存储器, 其结构为 Ru/Al₂O₃/Ta₂O₅/TaO_x/Al₂O₃/W. 该器件具有出色的存储器性能, 包括快速操作速度 (约 10 ns)、良好的开关耐久性 (约 10^6 个周期) 和稳定的数据保持能力 (> 10^4 s @200 °C). 相比之下, MgO 在 RRAM 方面的研究还有待更多的关注, 目前相关的参考文献相对较少^[20-22]. 但 MgO 与 HfO₂ 同

[†] 通信作者. E-mail: pchen@swu.edu.cn

属于二元金属氧化物, 在电学性能和光学性能方面有许多相近之处, 例如二者都具有高透射率、宽带隙、化学性质稳定等特点^[23]. 同时, 已经有研究表明, MgO 具有优异的电阻开关特性, 是 RRAM 应用的潜在候选材料之一^[24].

MgO 是一种常见的金属氧化物, 具有较宽的带隙 (7.3—7.8 eV), 中等的介电常数 (9.8—10), 高热稳定性和高的击穿电场 (高达 12 MV/cm)^[23]. 无机过渡金属硫化物 MoS₂ 具有可变带隙 (大块 MoS₂ 和单层 MoS₂ 分别为 1.27 eV 和 1.98 eV)、高电子亲和性 ($\chi \sim 4$ eV)、大介电常数 ($k \sim 4$ —17) 和化学性质稳定等特点, 近年来作为 RRAM 的开关层材料备受关注^[25–27]. 然而, 关于双层 MgO/MoS₂ 基 RRAM 的电阻开关特性和电流传导机制的研究目前缺乏相关文献.

本文研究了单层 MgO 器件、双层 MoS₂/MgO 堆栈器件和双层 MgO/MoS₂ 堆栈器件的电阻开关特性. 在分析过程中, 观察到双层 MgO/MoS₂ 器件的低功耗特性和较大的开关比. 同时, I - V 曲线的结果表明, 单层 MgO 器件和双层 MoS₂/MgO 堆栈器件的主要传导机制是空间电荷限制传导 (space-charge-limited conduction, SCLC), 而在双层 MgO/MoS₂ 堆栈器件中, 发现了界面势垒的调控作用, 并且界面势垒的调控作用会随着插入位置的不同而有所差异. 此外, 表征测试分析的结果支持了所提出的机理模型, 并对双层器件的电阻开关特性提供了解释.

2 实验和方法

室温下采用磁控溅射的方法, 将 Cu/MgO/Cu 多层薄膜、Cu/MgO/MoS₂/Cu 多层薄膜和 Cu/MoS₂/MgO/Cu 多层薄膜分别沉积在三块完全相同的氧化铟锡 (简称 ITO) 导电玻璃衬底上, 其中 ITO 衬底为商业购买所得, 单个 ITO 玻璃片的尺寸为 20 mm×10 mm×1.1 mm, ITO 薄膜的厚度约为 185 nm, ITO 衬底的方阻小于 6 Ω , 透射率大于 84%. 在溅射之前, 为保证薄膜生长的质量, 腔体的背景真空压强为 1.8×10^{-4} Pa, 溅射过程中通入高纯氩气, 流速为 30 SCCM (体积流量单位, standard cubic centimeter per minute, SCCM), 并保持溅射时腔体的压强为 1 Pa. 制备 Cu/MgO/MoS₂/Cu 器件的过程如下: 首先, 在直流溅射功率为

30 W 的情况下将 150 nm 的 Cu 沉积在 ITO 表面作为底电极 (bottom electrode, BE). 然后在射频溅射功率为 50 W 的情况下将 120 nm 的 MoS₂ 沉积在 Cu 上. 随后, 在射频溅射功率为 30 W 的情况下将 60 nm 的 MgO 沉积在 MoS₂ 上. 最后, 在直流溅射功率为 30 W 的情况下将 150 nm 的 Cu 沉积在 MgO 表面作为顶电极 (top electrode, TE). 另外两种器件的制备过程同理, 图 1(a)、图 1(b)、图 1(c) 分别为三种器件的结构示意图. 为了分析器件的电学特性, 使用 Keithley 2400 源表测量器件的 I - V 曲线. 同时, 为了确定薄膜的晶相和器件所包含的元素种类、化学态, 分别对器件进行了 X 射线衍射仪 (X-ray diffractometer, XRD) 和 X 射线光电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 的测试. 其中, XPS 和 XRD 的测试样品均为 MgO/MoS₂/Cu 器件.

3 结果与讨论

图 1(d) 是 MgO/MoS₂/Cu 器件的 XRD 图谱, 其中 (2 2 2) 和 (4 4 1) 是 ITO 的结晶峰, (1 1 $\bar{1}$) 是 CuO 的结晶峰, (1 1 1) 和 (2 0 0) 是 Cu 的结晶峰, (1 1 0) 是 Cu₂O 的结晶峰. 同时, 没有明显对应的 MgO 和 MoS₂ 结晶峰, 这表明器件中的 MgO 和 MoS₂ 应该非晶态的^[28]. 众所周知, 在室温下用磁控溅射技术生长出的薄膜大多都是非晶态^[29]. 同时, 在参考和对比了多个相关文献中的 XRD 图谱后^[12,13,16,17,30,31], 发现图 1(d) 中确实没有 MgO 和 MoS₂ 对应的衍射峰, 这证实了 MgO 和 MoS₂ 确实是非晶态的. MgO/MoS₂/Cu 器件的 XPS 图谱如图 2 所示, 其中图 2(a) 是经过非线性最小二乘法拟合后的 Cu 的俄歇电子谱 (Auger electron spectroscopy, AES), 拟合结果表明并没有金属 Cu 的存在, Cu 元素主要来源于 CuO 和 Cu₂O. 为了进一步证明样品中 Cu 的化学状态, 对 Cu 2p 谱图进行了拟合, 结果如图 2(b) 所示. 图 2(b) 表明 Cu 2p 可以分成 7 个峰, 其中 962.79 eV 的峰对应 Cu²⁺ 的强卫星峰, Cu 2p_{1/2} 和 Cu 2p_{3/2} 的位置都有两个峰, 分别对应 CuO 和 Cu₂O 的峰, CuO 的峰位靠左, 分别为 954.47 eV 和 934.63 eV, Cu₂O 的峰位靠右, 分别为 952.53 eV 和 932.74 eV. 剩下两个峰位分别是 944 eV 和 940.82 eV, 对应 Cu²⁺ 的强卫星峰和 Cu⁺ 的微卫星峰的混合信号. Cu 的

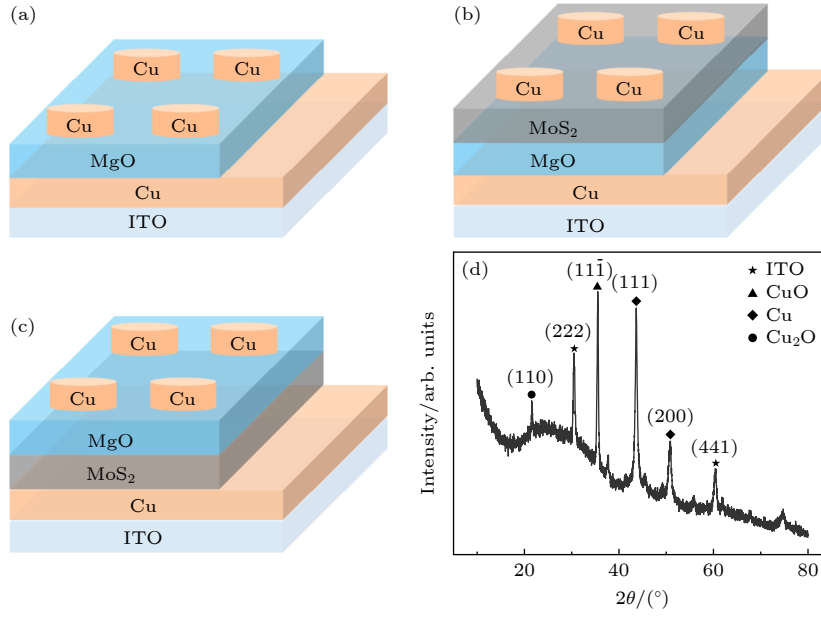


图 1 器件结构示意图及 XRD 图谱 (a) Cu/MgO/Cu 的结构; (b) Cu/MoS₂/MgO/Cu 的结构; (c) Cu/MgO/MoS₂/Cu 的结构; (d) MgO/MoS₂/Cu 的 XRD 图谱

Fig. 1. Structure diagram and XRD pattern of device: (a) Structure of Cu/MgO/Cu; (b) structure of Cu/MoS₂/MgO/Cu; (c) structure of Cu/MgO/MoS₂/Cu; (d) XRD pattern of MgO/MoS₂/Cu.

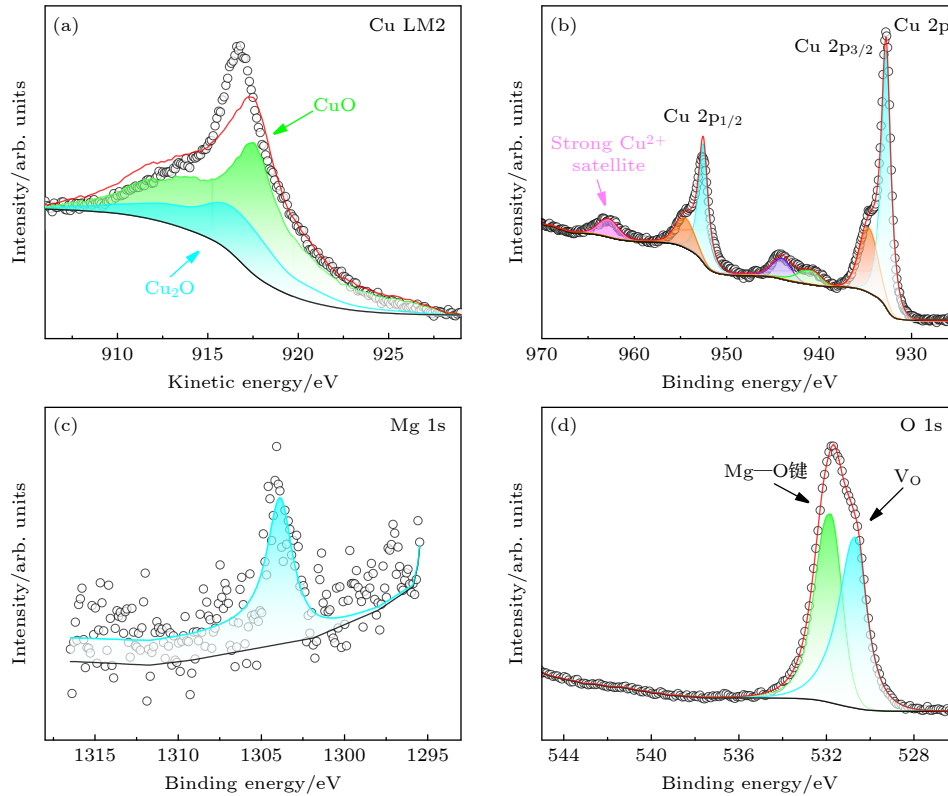


图 2 器件的 XPS 谱图 (a) Cu 的俄歇电子谱; (b) Cu 2p 的 XPS 谱图; (c) Mg 1s 的 XPS 谱图; (d) O 1s 的 XPS 谱图

Fig. 2. XPS spectra of the device: (a) AES of Cu; (b) XPS spectrum of Cu 2p; (c) XPS spectrum of Mg 1s; (d) XPS spectrum of O 1s.

XPS 分析结果表明, MgO 薄膜中含有 Cu 的氧化物. 图 2(c) 是 Mg 1s 谱图的拟合结果, 可以看出谱图的噪声干扰较大, 这表明 Mg 元素的信号较弱,

但依然有一个微弱的峰, 峰位为 1303.88 eV, 对应着金属 Mg, 这可能与 Cu 的氧化过程有关. 图 2(d) 是 O 1s 谱图的拟合结果, 约 531.8 eV 处的较高结

合能对应于开关层 (switching layer, SL) 中的氧空位 (简称 V_O), 而约 530.64 eV 处的较低结合能对应于晶格氧离子 (Mg—O 键), 这表明器件中可能发生氧离子的迁移运动, 并形成了新的氧化物^[23].

使用 Keithley 2400 源表测量器件的 I - V 曲线, 测量路径为 $0\text{ V} \rightarrow 0.75\text{ V} \rightarrow 0\text{ V} \rightarrow -0.75\text{ V} \rightarrow 0\text{ V}$, 三种器件的 I - V 曲线都绘制在半对数坐标下, 结果如图 3 所示, 其中右图均是左图中突出显示的红色循环曲线, 并且三种器件的循环曲线都符合反 8 字形 (counter-figure-of-eight, cF8) 双极开关的 I - V 曲

线, 且原始器件都需要经历软击穿 (forming 或 electroforming) 过程^[32]. 通过对比 Cu/MgO/Cu 和 Cu/MoS₂/MgO/Cu 的 I - V 曲线, 可以发现 Cu/MoS₂/MgO/Cu 器件的复位电压 (V_{Reset}) 明显小于 Cu/MgO/Cu 器件, 但两者的设置电压 (V_{Set}) 没有明显差异, 这表明插入的 MoS₂ 层可以降低 Cu/MgO/Cu 器件的功耗. 同理, 通过对比 Cu/MgO/Cu 和 Cu/MgO/MoS₂/Cu 的 I - V 曲线, 可以发现 Cu/MgO/Cu 器件的开关比约为 10, 但插入 MoS₂ 层后, Cu/MgO/MoS₂/Cu 器件的开关比约为 10^3 , 并且

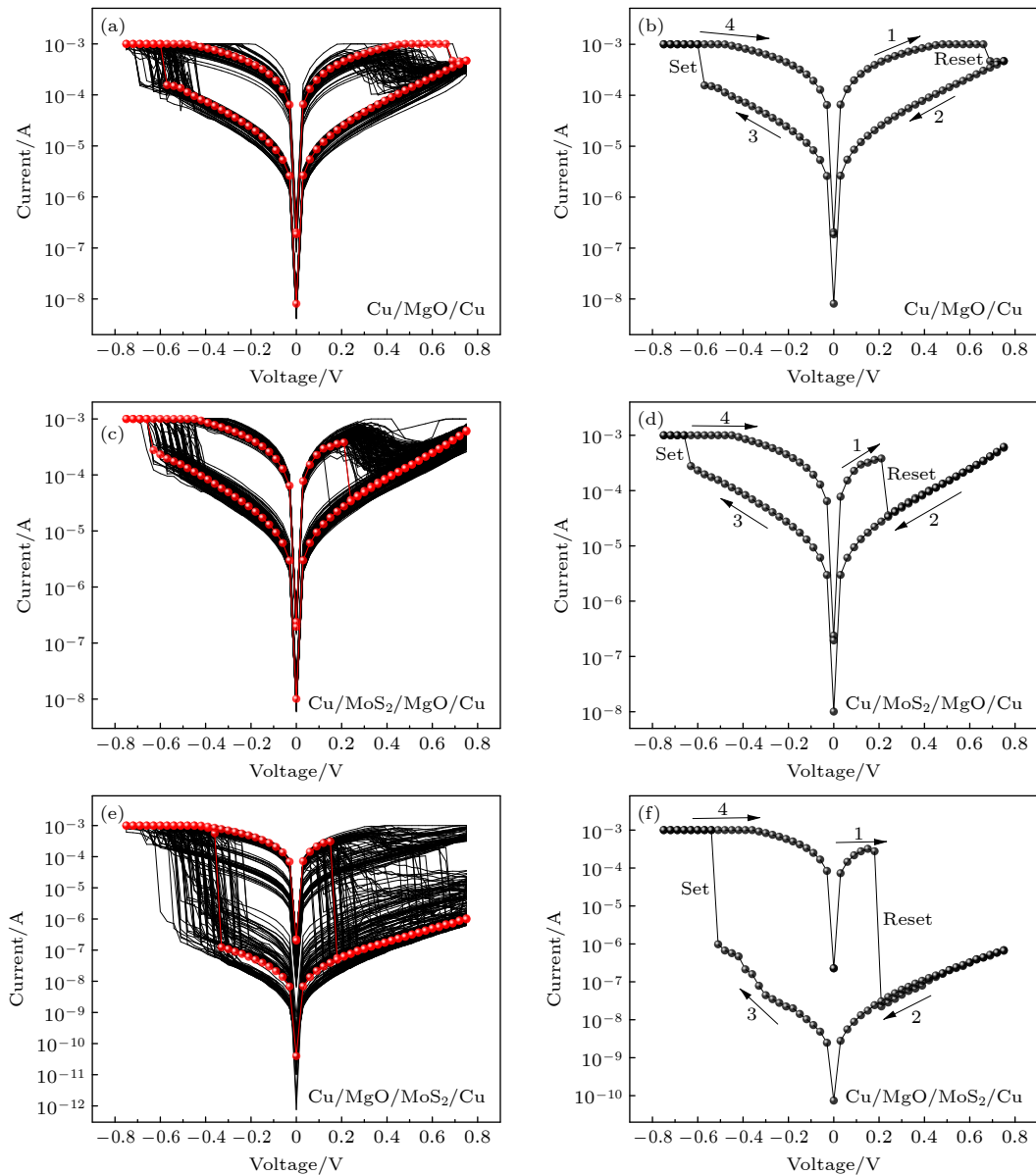


图 3 半对数坐标下三种器件的 I - V 循环轨迹图 (a) Cu/MgO/Cu 的多循环曲线; (b) Cu/MgO/Cu 的单循环曲线; (c) Cu/MoS₂/MgO/Cu 的多循环曲线; (d) Cu/MoS₂/MgO/Cu 的单循环曲线; (e) Cu/MgO/MoS₂/Cu 的多循环曲线; (f) Cu/MgO/MoS₂/Cu 的单循环曲线
Fig. 3. I - V cycle trajectories of the three devices in semilog coordinates: (a) Multiple cycle curves of Cu/MgO/Cu; (b) single cycle curve of Cu/MgO/Cu; (c) multiple cycle curves of Cu/MoS₂/MgO/Cu; (d) single cycle curve of Cu/MoS₂/MgO/Cu; (e) multiple cycle curves of Cu/MgO/MoS₂/Cu; (f) single cycle curve of Cu/MgO/MoS₂/Cu.

Cu/MgO/MoS₂/Cu 器件的 V_{Reset} 大幅度下降, V_{Set} 略微下降, 这表明插入 MoS₂ 层后, 器件的开关比得到了一定程度上的提高, 并且器件的整体功耗得到了很大的降低. 最后, 通过对比 Cu/MoS₂/MgO/Cu 和 Cu/MgO/MoS₂/Cu 的 I - V 曲线, 可以发现 MoS₂ 层插入的位置主要影响了器件的漏电流值、 V_{Reset} 和 V_{Set} , 这表明 MoS₂ 层插入在底电极和 MgO 之间可以有效地提高器件的开关比和降低器件的功耗, 但 MoS₂ 层插入在顶电极和 MgO 之间对器件开关比的提高是基本无效的. 为了更直观地对比三种器件的性能, 绘制了如图 4 所示的对比图, 可以明显地发现 Cu/MgO/MoS₂/Cu 的开关比最大, 并且 V_{Reset} 和 V_{Set} 都是最小的, 而 Cu/MgO/Cu 和 Cu/MoS₂/MgO/Cu 的主要区别在于 V_{Reset} 电压不同.

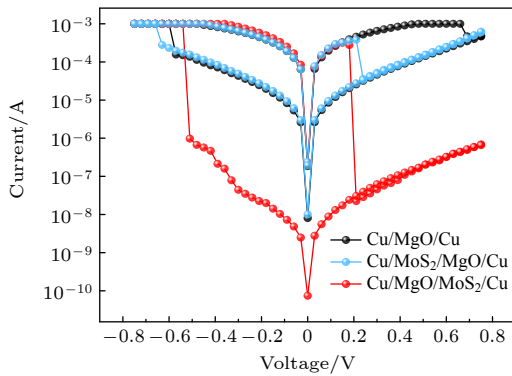


图 4 半对数坐标下三种器件的单循环对比图

Fig. 4. Single cycle comparison diagram of the three devices in semilog coordinates.

为了进一步对比三种器件的可靠性, 分别绘制三种器件的 V_{Reset} 和 V_{Set} 累计概率分布图, 以此来对比三者 V_{Reset} 和 V_{Set} 的弥散性, 结果如图 5 所示. 通过观察图 5, 可以发现三种器件的 V_{Reset} 和 V_{Set} 都比较集中, 相对而言 Cu/MgO/MoS₂/Cu 器

件的 V_{Reset} 和 V_{Set} 可靠性最高, 特别是 V_{Reset} . 此外, 三种器件的高低阻态分布如图 6 所示, Cu/MgO/Cu 器件经历了约 120 个连续的设置/复位周期, Cu/MoS₂/MgO/Cu 器件经历了约 180 个连续的设置/复位周期, Cu/MgO/MoS₂/Cu 器件经历了约 200 个连续的设置/复位周期. 结合图 3 的循环轨迹可以看出, 三种器件当中 Cu//MoS₂/MgO/Cu 器件的循环耐受性和稳定性最好, 但开关比较小 (约为 10). 同时, Cu/MgO/MoS₂/Cu 器件的高阻态 (high resistance state, HRS) 稳定性相对较差, 40 个循环前后的阻态分布情况差异较大, 相对而言低阻态 (low resistance state, LRS) 较为稳定, 器件开关比在 10 — 10^4 之间波动, 但总体来说开关比集中在 10^3 附近, 这表明 MoS₂ 插入层会影响器件 HRS 的阻值分布, 提高了器件的开关比, 但同时一定程度上降低了器件的 HRS 稳定性.

为了探究上述实验现象及器件的开关机理, 将三种器件的 I - V 曲线都在双对数坐标下分别进行线性拟合, 以此来判断三种器件的开关机理的差异. 图 7(a)(c)(e) 均为正偏置电压下的拟合结果, 图 7(b)(d)(f) 均为负偏置电压下的拟合结果, 图中红色部分是 LRS, 蓝色和绿色部分是 HRS. 通过观察图 7 可知, LRS 的拟合曲线呈现斜率为 1 的直线, 表明传导机制主要为欧姆传导, HRS 的拟合曲线在低电压下情况类似, 也对应于欧姆传导模型. 随着电压的增加, 曲线呈现斜率接近 2 的线性关系, 这表明器件遵循经典的 SCLC. 经典的 SCLC 由三个区域组成: 低电压欧姆区 (I - V)、Child 平方区 (I - V^2) 和电流陡增区 (I - V^2)^[28]. 综上所述, 三种器件的传导机制在整体上都符合 SCLC, 但双层器件的高电压区域的拟合结果并不完全符合 SCLC, 这可以归因于 MgO/MoS₂ 界面势垒的调控作用.

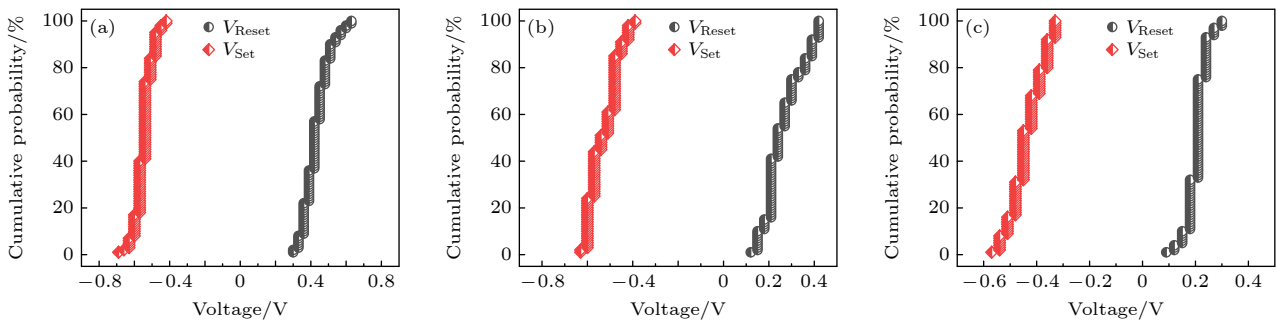


图 5 三种器件的 V_{Reset} 和 V_{Set} 累计概率分布图 (a) Cu/MgO/Cu; (b) Cu/MoS₂/MgO/Cu; (c) Cu/MgO/MoS₂/Cu

Fig. 5. Cumulative probability distribution of V_{Reset} and V_{Set} for the three devices: (a) Cu/MgO/Cu; (b) Cu/MoS₂/MgO/Cu; (c) Cu/MgO/MoS₂/Cu.

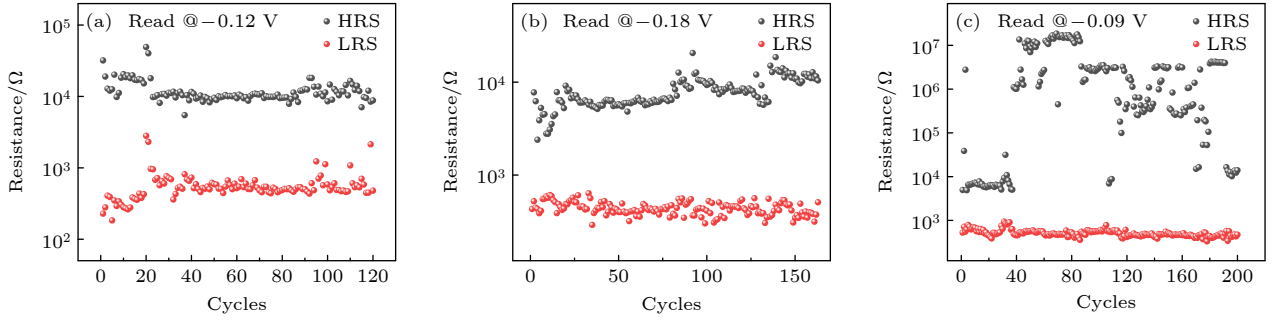


图 6 三种器件的高低阻态分布图 (a) Cu/MgO/Cu; (b) Cu/MoS₂/MgO/Cu; (c) Cu/MgO/MoS₂/Cu

Fig. 6. HRS and LRS distribution of the three devices: (a) Cu/MgO/Cu; (b) Cu/MoS₂/MgO/Cu; (c) Cu/MgO/MoS₂/Cu.

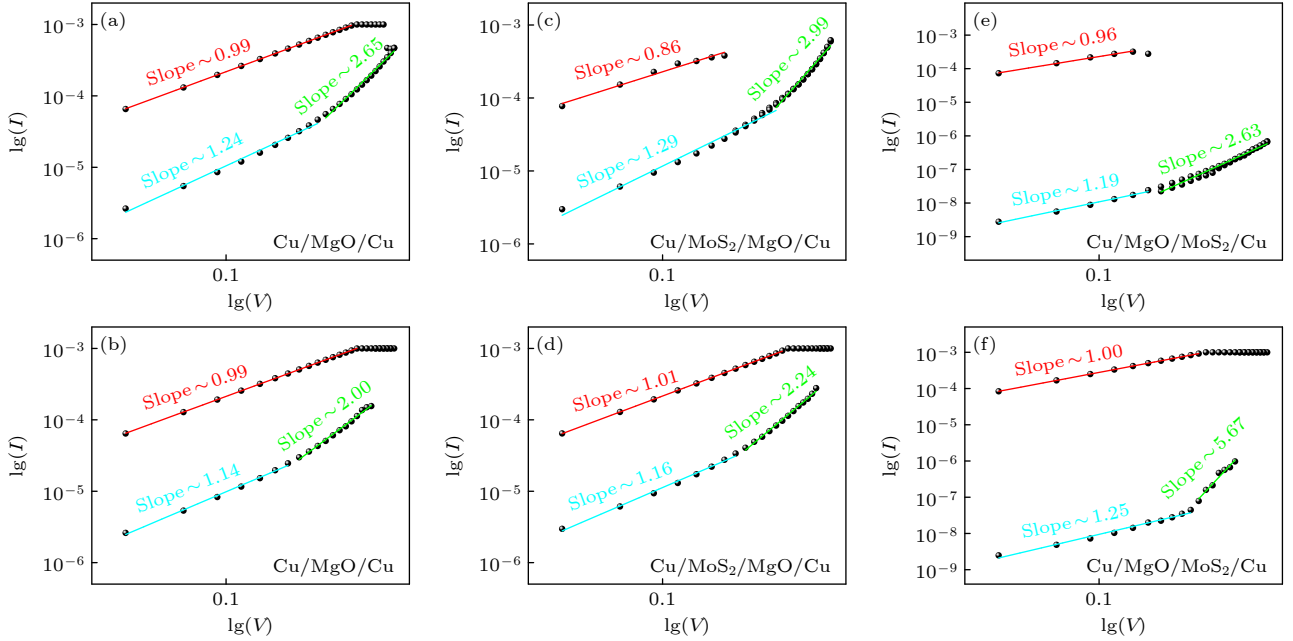
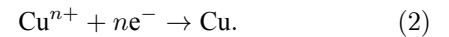
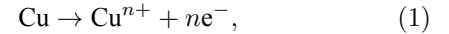


图 7 双对数坐标下三种器件的 $I-V$ 曲线拟合图 (a) 正电压下 Cu/MgO/Cu 的拟合曲线; (b) 负电压下 Cu/MgO/Cu 的拟合曲线; (c) 正电压下 Cu/MoS₂/MgO/Cu 的拟合曲线; (d) 负电压下 Cu/MoS₂/MgO/Cu 的拟合曲线; (e) 正电压下 Cu/MgO/MoS₂/Cu 的拟合曲线; (f) 负电压下 Cu/MgO/MoS₂/Cu 的拟合曲线

Fig. 7. $I-V$ curves fitting diagram of the three devices in double logarithm coordinates: (a) Fitted curve of Cu/MgO/Cu at positive voltage; (b) fitted curve of Cu/MgO/Cu at negative voltage; (c) fitted curve of Cu/MoS₂/MgO/Cu at positive voltage; (d) fitted curve of Cu/MoS₂/MgO/Cu at negative voltage; (e) fitted curve of Cu/MgO/MoS₂/Cu at positive voltage; (f) fitted curve of Cu/MgO/MoS₂/Cu at negative voltage.

三种器件都是先经历过软击穿过程 (均发生在负电压), 然后才进行正常的循环过程. 在 XRD 结果中, 发现了 CuO 的结晶峰, 同样在 XPS 测试结果中发现了 Cu 的氧化物 (CuO_x) 的峰位, 但测试样品是 MgO/MoS₂/Cu, Cu 元素应该来源于底电极, 这表明在磁控溅射过程中有少量 Cu 已经溶进表面的 MgO 薄膜中, 但含量较低, 这与数据结果相符合. 因此, 可以将三种器件的电阻开关机理都归因于 Cu 导电细丝 (conductive filament, CF) 的形成和断裂^[33], 器件的复位过程和设置过程的原理示意图如图 8 所示. Cu 的氧化和还原反应如下:



在 XPS 中测得的 Mg 1s 峰位和 V_O 峰位都对应着 Cu 的氧化物, 但同样是微量的. 复位过程发生前, 器件在负电压下发生软击穿过程, BE Cu 被氧化生成 e⁻ 和 Cuⁿ⁺, 在电场的作用下分别迁移至正负两极, Cuⁿ⁺ 迁移到负极附近时捕获负极附近的 e⁻ 被还原成 Cu, 但是有少量的 Cuⁿ⁺ 在 MgO 层就已经与往正极迁移的少量 O²⁻ 形成 CuO_x, 并没有到达负极, 这与 XPS 的结果相符合. 由于 MgO 带隙较宽, 并且可以认为是绝缘体, 所以载流子想

从 MgO 层通过是十分困难的, 并且 MgO 与 TE Cu 之间还会形成较高的肖特基势垒, 这些因素导致 Cu 导电细丝的窄处很有可能在 TE Cu 和 MgO 的界面处^[34-36]. 当然, 如果是图 8(c) 和图 8(d) 中的 Cu/MoS₂/MgO/Cu 结构, 离子在迁移过 MgO 层之后还需要迁移一层 MoS₂ 介质, 那么细丝窄处很可能就在 TE Cu 和 MoS₂ 界面处. 同时, 基于以上原因, 细丝的形状很有可能是图 8 中的倒圆锥形^[23].

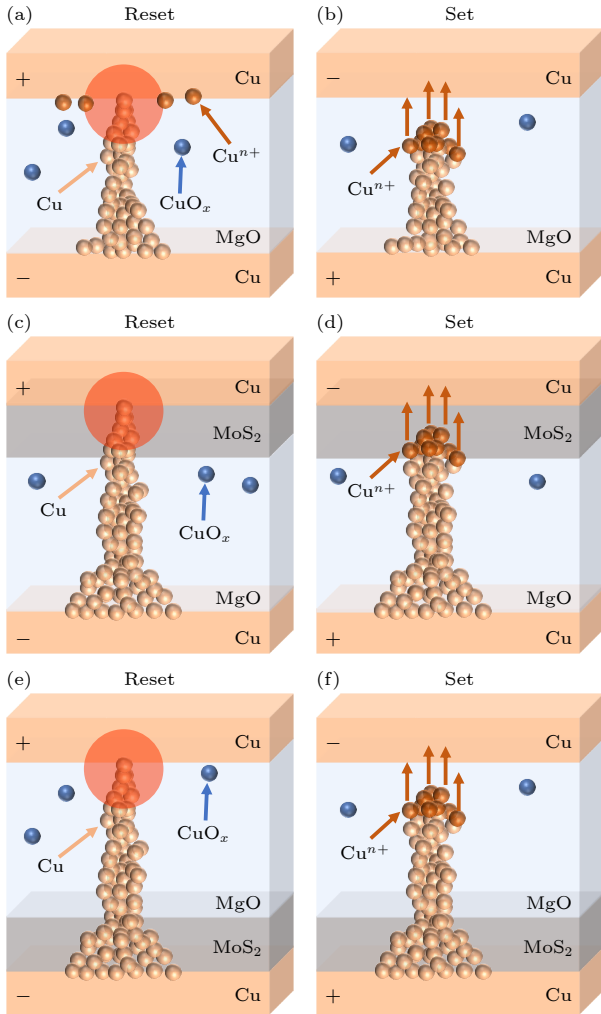


图 8 三种器件的机理解释示意图 (a) Cu/MgO/Cu 的 reset 过程; (b) Cu/MgO/Cu 的 set 过程; (c) Cu/MoS₂/MgO/Cu 的 reset 过程; (d) Cu/MoS₂/MgO/Cu 的 set 过程; (e) Cu/MgO/MoS₂/Cu 的 reset 过程; (f) Cu/MgO/MoS₂/Cu 的 set 过程

Fig. 8. Schematic diagram of the mechanism explanation of the three devices: (a) Reset process of Cu/MgO/Cu; (b) set process of Cu/MgO/Cu; (c) reset process of Cu/MoS₂/MgO/Cu; (d) set process of Cu/MoS₂/MgO/Cu; (e) reset process of Cu/MgO/MoS₂/Cu; (f) set process of Cu/MgO/MoS₂/Cu.

在复位过程中, 单层器件与双层器件的 V_{Reset} 有明显的差别. 如图 8(a) 和图 8(b) 的原理图所示,

在正电压下, 正极附件的 Cu 被氧化形成 Cu^{n+} , 并在电场的作用下向负极迁移, 导致 CF 在 TE Cu 和 MgO 界面处断裂, 即为图中红色阴影部分. 但是由于中间只有 MgO 层的阻隔, 所以单层器件的 CF 可能宽度较大, 需要较大的电压来使 CF 从窄处断裂, 从而使器件从 LRS 回到 HRS. 相反, 双层器件在两层阻挡层的作用下, CF 在形成的时候更困难, 细丝的宽度也就较小, 因此在断裂时所需的电压更小.

在设置过程中, 三种器件的机理基本相同. 首先, 在负电压下, Cu 被氧化形成的 Cu^{n+} 开始向负极迁移, 并在 CF 窄处被还原, 重新连接断裂的 CF, 使器件从 HRS 转换到 LRS. 同时, 需要注意的是, Cu/MgO/MoS₂/Cu 的电流在 V_{Set} 附近增长极快, 这可能与细丝的窄处位置和界面势垒的调控有关.

另一方面, 关注到三种器件都是对称结构, 但是只有单层器件呈现出较为对称的 I - V 曲线^[37]. 基于此, 着重分析 Cu/MoS₂/MgO/Cu 和 Cu/MgO/MoS₂/Cu 的差异之处. 两者主要的区别在于 MoS₂ 层的位置, 这导致了漏电流的不同, 即 HRS 的电阻值不同, 这可以归因于 MgO/MoS₂ 界面势垒的调控作用^[38]. 载流子从 MgO 迁移到 MoS₂ 比从 MoS₂ 迁移到 MgO 要更容易一些, 这主要是因为 MgO 的带隙比 MoS₂ 要大, 而且非晶 MgO 的功函数一般较大, 这导致 MgO 一侧势垒高于 MoS₂ 一侧, 从而导致所需能量的高低, 在器件中对应的就是电压的高低, 这就是双层器件 I - V 曲线不对称的主要原因^[39]. 同时, 两种器件在 reset 过程后, 器件所处的 HRS 不同. 从图 8(c) 和图 8(e) 中可以看出, Cu/MoS₂/MgO/Cu 器件的 reset 过程 Cu^{n+} 是从 MoS₂ 到 MgO, 迁移难度较大, 而 Cu/MgO/MoS₂/Cu 器件的 reset 过程 Cu^{n+} 是从 MgO 到 MoS₂, 迁移难度较小, 这导致 Cu/MgO/MoS₂/Cu 器件的漏电流明显降低, HRS 阻值变大. 但是正因为迁移难度的下降, 导致器件的 HRS 随机性大幅度上升, 最终导致图 6(c) 中 HRS 较为分散的结果.

4 结 论

总之, 本文采用磁控溅射的方法制备了以 MgO 为主体的三种堆栈结构, 发现 MoS₂ 插入层对单层 MgO 器件的电阻开关性能影响较大, 并且与插入的位置有关. 其中, Cu/MgO/MoS₂/Cu 器

件的开关比性能最优. 通过分析 XPS 表征的结果, 结合器件的 $I-V$ 曲线, 将 MoS_2 插入层对 $\text{Cu}/\text{MgO}/\text{Cu}$ 器件的电阻开关特性的影响主要归因于 Cu 导电细丝以及界面势垒的调控作用. 另一方面, 在可靠性和稳定性方面, $\text{Cu}/\text{MoS}_2/\text{MgO}/\text{Cu}$ 器件的表现最优, 符合阻变存储器的商用价值和基本标准. 在以前的工作中, 我们发现 MoS_2 的厚度变化对 BTO/MoS_2 堆栈器件的电阻开关特性有较大的影响, 厚度增加会导致更多的缺陷态, 从而降低器件的高阻态电阻值^[40]. 同时, 我们调研了相关文献, 发现 MgO 层的厚度对器件的电阻开关特性的影响通常与形成电压有关, 对器件整体性能影响较小, 并且相关文献报道较少^[38,41]. 本研究的工作将研究 $\text{Cu}/\text{MgO}/\text{MoS}_2/\text{Cu}$ 器件中 MgO 与 MoS_2 的比例或者厚度变化对器件性能的影响规律.

本文研究了 MoS_2 插入层对 $\text{Cu}/\text{MgO}/\text{Cu}$ 器件电阻开关性能的影响, 相关工作未见报道. 另一方面, 传统的 MgO 基电阻开关器件的机理解释一般只引入了导电细丝模型, 而本文的研究工作显示界面势垒还对器件的电阻开关特性有调控作用. 本文对 MgO 在 RRAM 领域的研究有一定的参考价值, 并给 MgO/MoS_2 堆栈器件的研究提供了新的思路.

数据可用性说明

本篇论文的关联数据可在科学数据银行 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00086> 中访问获取.

参考文献

- [1] Sun B, Xiao M, Zhou G, Ren Z, Zhou Y N, Wu Y A 2020 *Mater. Today Adv.* **6** 100056
- [2] Zahoor F, Azni Zulkifli T Z, Khanday F A 2020 *Nanoscale Res. Lett.* **15** 90
- [3] Wang Z J, Song Y X, Zhang G B, Luo Q, Xu K, Gao D W, Yu B, Loke D, Zhong S, Zhang Y S 2024 *Int. J. Extreme Manuf.* **6** 032006
- [4] Udaya Mohanan K 2024 *Nanomaterials* **14** 527
- [5] Sehgal A, Dhull S, Roy S, Kaushik B K 2024 *J. Mater. Chem. C* **12** 5274
- [6] Pan F, Gao S, Chen C, Song C, Zeng F 2014 *Mater. Sci. Eng., R* **83** 1
- [7] Pan J Y, He H Y, Li T J, Gao Y L, Yang S Y, Lin X Y J 2023 *Phys. Status Solidi A* **220** 2300416
- [8] Lee J S, Lee S, Noh T W 2015 *Appl. Phys. Rev.* **2** 031303
- [9] Kumar B, Kaushik B K, Negi Y S 2013 *J. Mater. Sci. -Mater. Electron.* **25** 1
- [10] Duan X G, Cao Z L, Gao K K, Yan W T, Sun S Y, Zhou G D, Wu Z H, Ren F G, Sun B 2024 *Adv. Mater.* **36** 2310704
- [11] Dias C, Guerra L M, Bordalo B D, Lü H, Ferraria A M, Botelho do Rego A M, Cardoso S, Freitas P P, Ventura J 2017 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **19** 10898
- [12] Guo Z Q, Liu G J, Sun Y, Zhang Y X, Zhao J H, Liu P, Wang H, Zhou Z Y, Zhao Z, Jia X T, Sun J M, Shao Y D, Han X, Zhang Z X, Yan X B 2023 *ACS Nano* **17** 21518
- [13] He C T, Lu Y, Tang Y Y, Li X L, Chen P 2021 *Appl. Phys. A* **127** 484
- [14] Hsu C C, Shrivastava S, Pratik S, Chandrasekaran S, Tseng T Y 2023 *IEEE Trans. Electron Devices* **70** 1048
- [15] Saini S, Lodhi A, Dwivedi A, Khandelwal A, Tiwari S P 2023 *IEEE Trans. Electron Devices* **70** 53
- [16] Das O P, Pandey S K 2022 *Phys. Status Solidi B* **259** 2200103
- [17] Kumar D, Kalaga P S, Ang D S 2020 *IEEE Trans. Electron Devices* **67** 4274
- [18] Lee J, Lee S, Kwak M, Choi W, Mosendz O, Hwang H 2022 *IEEE Electron Device Lett.* **43** 220
- [19] Lee S R, Kang B S 2024 *Curr. Appl. Phys.* **61** 75
- [20] Huang H H, Shih W C, Lai C H 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 193505
- [21] Guerra L M, Dias C, Pereira J, Lv H, Cardoso S, Freitas P P, Ventura J 2017 *J. Nanosci. Nanotechnol.* **17** 564
- [22] Aziz I, Ciou J H, Kongcharoen H, Lee P S 2022 *J. Appl. Phys.* **132** 014502
- [23] Chow S C W, Dananjaya P A, Ang J M, Loy D J J, Thong J R, Hoo S W, Toh E H, Lew W S 2023 *Appl. Surf. Sci.* **608** 155233
- [24] Hu G, Yu Z D, Qu H, et al. 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 142109
- [25] Xiong X Y, Wu F, Ouyang Y, Liu Y M, Wang Z G, Tian H, Dong M D 2023 *Adv. Funct. Mater.* **34** 2213348
- [26] Ling Y Y, Li J X, Luo T, Lin Y, Zhang G X, Shou M H, Liao Q 2023 *Nanomaterials* **13** 3117
- [27] Jiao Z P, Lan X Y, Zhou X L, Wang K J, Zong H R, Zhang P, Xu B H 2023 *J. Mater. Chem. C* **11** 17050
- [28] Li S C, He C T, Shu H Y, Chen P 2024 *Mod. Phys. Lett. B* **38** 2450331
- [29] Guo J J, Ren S X, Wu L Q, Kang X, Chen W, Zhao X 2018 *Appl. Surf. Sci.* **434** 1074
- [30] Chen T, Yang S W, Wang J, Chen W, Liu L F, Wang Y, Cheng S J, Zhao X 2021 *Adv. Electron. Mater.* **7** 2000882
- [31] Qi L Q, Shen J J, Xu Q, Lu P P, Feng P, Sun H Y 2022 *Chem. Phys. Lett.* **799** 139560
- [32] Menghini M, Quinteros C, Su C Y, Homm P, Levy P, Kittl J, Locquet J P 2014 *Phys. Status Solidi C* **12** 246
- [33] Yang Y C, Gao P, Gaba S, Chang T, Pan X Q, Lu W 2012 *Nat. Commun.* **3** 732
- [34] Chiu F C 2014 *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2014** 1
- [35] Chiu F C, Shih W C, Feng J J 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 094104
- [36] Loy D J J, Dananjaya P A, Hong X L, Shum D P, Lew W S 2018 *Sci. Rep.* **8** 14774
- [37] Fang S L, Liu W H, Li X, Wang X L, Geng L, Wu M S, Huang X D, Han C Y 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 244102
- [38] Wang S S, Dang B J, Sun J, Zhao M M, Yang M, Ma X H, Wang H, Hao Y 2021 *IEEE Electron Device Lett.* **42** 700
- [39] Wang S S, Dang B J, Sun J, Song F, Zhao M M, Yang M, Ma X H, Wang H, Hao Y 2020 *IEEE Electron Device Lett.* **41** 553
- [40] Li S C, He C T, Shu H Y, Chen P 2024 *Appl. Phys. A* **130** 534
- [41] Lü J X, Wang S S, Li F F, Liang Q, Yang M, Ma X H, Wang H, Hao Y 2021 *IEEE Electron Device Lett.* **42** 1599

Resistive switching characteristics of Cu/MgO/MoS₂/Cu structure

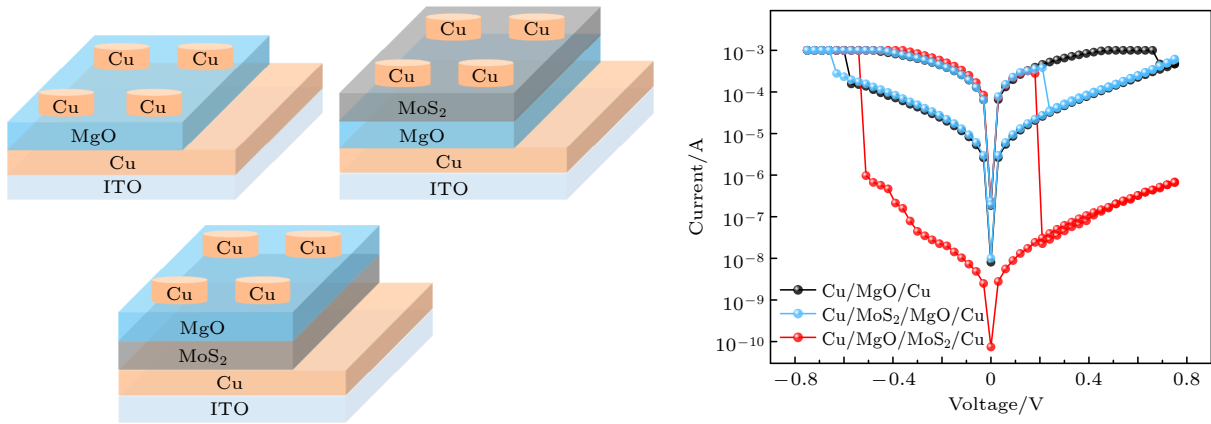
HE Xiaolong CHEN Peng[†]

(School of Physics Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(Received 14 September 2024; revised manuscript received 1 December 2024)

Abstract

During the study of resistive switching devices, researchers have found that the influence of the insertion layer cannot be ignored. Many reports have confirmed that the appropriate insertion layer can significantly improve the performance of the resistive switching devices. Therefore, in this work, we use magnetron sputtering to fabricate three devices: Cu/MgO/Cu, Cu/MgO/MoS₂/Cu and Cu/MoS₂/MgO/Cu. Through the characterization test of each device and the measurement of the I - V curve, it is found that the resistive switching characteristics of the Cu/MgO/Cu device will change greatly after adding an MoS₂ insertion layer. The analysis results show that the inserted MoS₂ layer does not change the main transmission mechanism (space charge limited conduction) of the device, but affects the regulating function of interfacial potential barrier, the effect also is related to the location of MoS₂ inserted into the layer. Among the Cu/MgO/Cu, Cu/MgO/MoS₂/Cu and Cu/MoS₂/MgO/Cu devices, the Cu/MgO/MoS₂/Cu device exhibits a larger switching ratio (about 10^3) and a lower reset voltage (about 0.21 V), which can be attributed to the regulation of the interface barrier between MgO and MoS₂. In addition, when the MoS₂ layer is inserted between the bottom electrodes Cu and MgO, the leakage current of the device is significantly reduced. Therefore, Cu/MoS₂/MgO/Cu device has the highest commercial value from the point of view of practical applications. Finally, according to the XPS results and XRD results, we establish the conductive filament models for the three devices, and analyze the reasons for the different resistive switching characteristics of the three devices.



Keywords: resistive switching characteristic, interface barrier, switching ratio

PACS: 85.25.Hv, 81.07.-b, 73.40.Qv, 85.35.-p

DOI: 10.7498/aps.74.20241298

CSTR: 32037.14.aps.74.20241298

[†] Corresponding author. E-mail: pchen@swu.edu.cn

Cu/MgO/MoS₂/Cu结构的电阻开关特性

何小龙 陈鹏

Resistive switching characteristics of Cu/MgO/MoS₂/Cu structure

HE Xiaolong CHEN Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 028501 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241298

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241298>

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

尺寸调控SnO₂量子点的阻变性能及调控机理

Size-controlled resistive switching performance and regulation mechanism of SnO₂ QDs

物理学报. 2021, 70(19): 197301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210608>

光电协控多层MoS₂记忆晶体管的阻变行为与机理研究

Resistive switching behavior and mechanism of multilayer MoS₂ memtransistor under control of back gate bias and light illumination

物理学报. 2021, 70(21): 217302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210750>

HfO₂/NiO_x/HfO₂堆栈的三电阻态开关特性与导电机理

Tri-level resistive switching characteristics and conductive mechanism of HfO₂/NiO_x/HfO₂ stacks

物理学报. 2023, 72(14): 148401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230331>

Ni/ZnO/BiFeO₃/ZnO多层膜中磁场调控的电阻开关效应

Resistance switching effect regulated by magnetic field in Ni/ZnO/BiFeO₃/ZnO multilayers

物理学报. 2022, 71(18): 187303 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220609>

限制电流对Ta/BaTiO₃/Al₂O₃/ITO忆阻器的开关比和稳定性调控

Facilitation of compliance current for resistive switching and stability of Ta/BaTiO₃/Al₂O₃/ITO

物理学报. 2022, 71(8): 086102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211999>

ReSe₂/WSe₂记忆晶体管的光电调控和阻变特性

Photoelectric modulation and resistive switching characteristic of ReSe₂/WSe₂ memtransistor

物理学报. 2022, 71(21): 217302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221154>