文章编号: 1007－4252(2025)01－0034－08 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0001

SiO_2 提升 ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 忆阻器的开关比和稳定性

徐 辛[1,2], 张 宏[1,2], 杨 峰[1], 张 勇[1,*]

(1. 西南交通大学电气工程学院, 磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室, 成都 610031; 2. 西南交通大学物理科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 导电细丝生长及其熔断的随机性一直是影响忆阻器开关比和稳定性的关键因素。本研究通过磁控溅射在 ITO 基底上制备了以 HfO_2/SiO_2 异质结为功能层的 ITO/HfO_2/SiO_2 /Ag 忆阻器。与单层 HfO_2 忆阻器相比, 开关比约提升 10 倍, 最大开关比达到了 50; 并且稳定性也有了较大提升, 在 6 000 s+的时间内开关比保持在 20 以上。使用 XPS 对器件断面进行了分析, 得到了器件断面的全谱图和 O1s 能级精细谱图。全谱图显示, SiO_2 功能层中的 Ag 含量多于 HfO_2 功能层, O1s 能谱图则表明氧空位含量较少。通过对器件的 *I-V* 曲线进行导电机理拟合分析, 发现器件在正电压区主要为欧姆导电机制, 在负电压区则符合空间电荷限制电流机制。在此基础上, 建立了一种倒锥型导电细丝模型来解释器件的复位/设置记忆行为。通过改变溅射时间来改变 SiO_2 层的厚度, 将不同溅射时间的 *I-V* 特性曲线图作对比, 确定了 SiO_2 的最佳溅射时间为 10 分钟。

关键词: 忆阻器; 倒锥型导电细丝; 空间电荷限制电流; 欧姆导电机制; 异质结

中图分类号: TB32;TB34 **文献标志码:** A

The switching ratio and stability of ITO/HfO_2/SiO_2/Ag memristors improved by SiO_2 functional layer

XU Xin[1,2], ZHANG Hong[1,2], YANG Feng[1], ZHANG Yong[1,*]

(1. School of Electrical Engineering, Key Laboratory of Magnetic Levitation Technologies and Maglev Trains, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China)

Abstract: The randomness of conductive filament growth and rupture has always been a key factor affecting the switching ratio and stability of memristors. In this paper, an ITO/HfO_2/SiO_2/Ag memristor with an HfO_2/SiO_2 heterojunction as the functional layer was fabricated on an ITO substrate via magnetron sputtering. Compared to single-layer HfO_2 memristors, the switching ratio was improved by

收稿日期: 2024−10−22; **修订日期:** 2024−11−13

基金项目: 国家重点研发计划国家磁约束核聚变专项基金 (2022YFE03020002).

作者简介: 作者简介: 徐 辛(1996—), 男, 硕士, 主要研究方向为半导体忆阻器(E-mail: xuxin111@my.swjtu.edu.cn).

通信作者: 张 勇 (1969—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为超导材料、半导体材料 (E-mail: yongzhang@swjtu.edu.cn).

approximately 10 times, reaching a maximum of 50, and the switching ratio remained above 20 for over 6000 seconds, showing significant enhancement in stability. XPS analysis was performed on the device cross-section, obtaining both the full spectrum and the fine spectrum of the O1s energy level. The full spectrum showed that the Ag content in the SiO_2 functional layer was higher than that in the HfO_2 layer, and the O1s spectrum indicated a lower concentration of oxygen vacancies. Through fitting the device's *I-V* curve to analyze its conduction mechanism, it was found that the conduction mechanism in the positive voltage region follows Ohmic conduction, while in the negative voltage region, it aligns with the space-charge-limited current mechanism. Based on this, a physical model was proposed to explain the reset/set memory behavior of the device. By varying the sputtering time to change the thickness of the SiO_2 layer and comparing the *I-V* characteristic curves for different sputtering times, the optimal sputtering time for SiO_2 was determined to be 10 minutes.

Key words: memristor; inverted conical conductive filament; space-charge-limited conduction (SCLC); ohmic conduction; heterojunction

0　引言

忆阻器是一种新型的电子元器件, 具有存算一体的优势, 是打破冯诺依曼传统架构限制的一种选择。这种新型非易失性存储器件具有结构简单、功耗低、存取速度快的特点, 在神经形态计算方面有着显著优势[1]。

忆阻器的性能主要取决于功能层材料的选择以及功能层的结构。忆阻器的功能层材料有多种选择: 金属氧化物[2]、二维材料[3]、钙钛矿[4]、有机材料[5] 等。其中金属氧化物材料具有可扩展性强、兼容性高、原料容易制备、成本低、适合大规模工业生产等优点, 是忆阻器功能层的热门材料。当前主流观点认为, 忆阻器的阻变机制主要有三种: 阴离子迁移机制、阳离子迁移机制和电子迁移机制[6]。目前, 根据阻变机制的不同, 人们设计出了许多结构不同的忆阻器: 以阳离子迁移机制为基础的电化学氧化还原忆阻器[7]、以自旋极化隧穿效应为基础的隧道磁阻忆阻器[8-9]、以铁电极化效应为基础的铁电忆阻器[10-11]、以材料相变为基础的相变忆阻器[12-13]、以及以量子隧穿效应为基础的浮栅忆阻器[14]。尽管各种忆阻器的研究都已取得重大进展, 但目前影响忆阻器实际应用的仍然是开关比和稳定性[15]。

在基于阳离子迁移的氧化物功能层忆阻器中, 导电细丝生长的长度、直径和熔断区域都直接影响忆阻器的忆阻特性。单氧化物功能层忆阻器的导电细丝的生长和熔断都具有很强的随机性, 导致其开关比和稳定性都不能让人满意[16]。为了提高忆阻器的开关比和稳定性, 研究者们使用了双层膜作为忆阻器的功能层: ZrO_x/HfO_x、ZrO_2/AlON、AlO_x/HfO_2、Ta_2O_{5-x}/TaO_{2-x}、AlO_x/Al_2O_3 和 SiO_2/Ta_2O_5[17-24]。但这些双层氧化物功能层忆阻器的性能与稳定性还有待提升, 且对于双氧化物功能层如何影响导电细丝的生长和熔断, 尚缺乏详细的说明与理论计算方面的论证。

因此, 为了改善单氧化物功能层忆阻器导电细丝生长和熔断随机性强的问题, 本文采用了 SiO_2 和 HfO_2 作为忆阻器的功能层。SiO_2 具有高电阻, 离子扩散性差等特点, 作为较厚的功能层有利于其内部沉积较多 Ag^+以形成导电突触, 进而提高忆阻器的开关比; HfO_2 具有较高的离子迁移率, 作为较薄的功能层可减少导电细丝生长和熔断的随机性。利用两种材料不同的电化学性质并调控其膜厚, 减少了导线细丝生长和熔断的随机性, 增强了忆阻器的开关比和稳定性。

1　实验

1.1　器件制备

本研究使用多功能溅射装置(FJL450), 先使用 HfO_2 靶材在氧化铟锡(ITO, 185 nm)衬底上溅射一层厚度为 40 nm(溅射时间为 120 秒)的 HfO_2 薄膜, 再使用 SiO_2 靶材在 HfO_2 薄膜上溅射一层厚度为 110 nm(溅射时间为 600 秒)的 SiO_2 薄膜, 最后使用 Ag 靶材溅射一层厚度为 100 nm(溅射时间为 120 秒)的 Ag 薄膜作为顶电极。引入流速为 20

sccm 的高纯氩气作为工作气体，工作压强 2.0 Pa。SiO_2 和 HfO_2 均采用射频溅射，溅射功率 100 W；Ag 采用直流溅射，溅射功率 100 W。器件的结构示意图如图 1 所示，其实物断面图如图 2 所示。另外，制备了 Ag/HfO_2/ITO 氧化物单介质功能层忆阻器，来作为对照组（Ag 溅射条件为 100 W，2 分钟，HfO_2 层的溅射条件为 100 W，30 秒-120 秒）；在其他制备条件不变的情况下，通过改变 SiO_2 层的溅射时间，来考察器件的开关比变化。

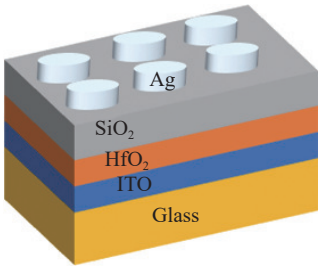

图 1 ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 忆阻器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ITO/HfO_2/SiO_2/Ag memristor

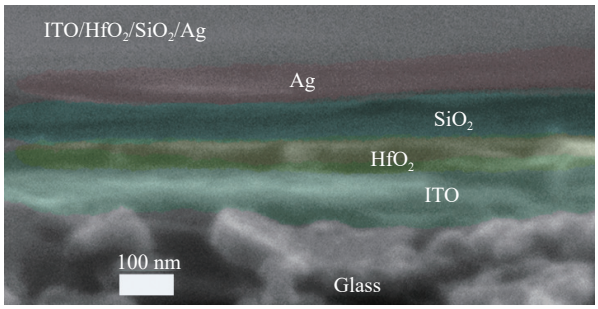

图 2 ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 忆阻器 SEM 断面图

Fig. 2 SEM cross-section of ITO/HfO_2/SiO_2/Ag Memristor

1.2 测试仪器

使用 CHI-660E 电化学工作站测试该系列器件的电化学性能和忆阻性能。本实验所有电化学测试扫描速率均为 0.1 V/s。使用日本电子 JEOL 生产的扫描式电子显微镜对器件进行表面和断面的形貌分析。使用 PANalytical PW3040/60 型 X 射线衍射仪对镀膜前后器件功能层进行了 X 射线衍射（XRD）测试。使用美国 Thermo Scientific-

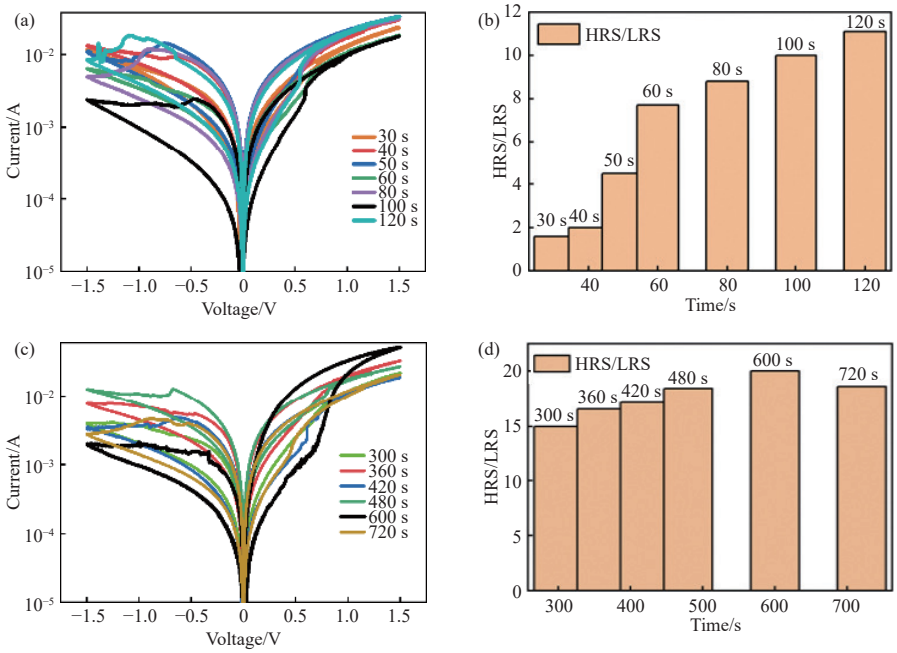

图 3 （a）不同的 HfO_2 层溅射时间下（固定 Ag 电极溅射时间为 120 秒），单功能层忆阻器 ITO/HfO_2/Ag 的 *I-V* 特性曲线图；（b）图 3（a）中器件的开关比随溅射时间变化的柱状图；（c）不同 SiO_2 溅射时间（HfO_2 功能层溅射时间固定为 120 秒）下，双功能层忆阻器 ITO/HfO_2/SiO_2 /Ag 忆阻器的 *I-V* 特性曲线图；（d）图 3（c）中器件的开关比随 SiO_2 功能层溅射时间变化的柱状图

Fig. 3 (a) *I-V* characteristic curves of the single-layer memristor ITO/HfO_2/Ag with varying sputtering times of the HfO_2 single functional layer (with a fixed Ag electrode sputtering time of 120 seconds); (b) Bar graph of the switching ratio (HRS/LRS) of the device in Figure 3a as a function of sputtering time; (c) *I-V* characteristic curves of the bifunctional memristor ITO/HfO_2/SiO_2/Ag with varying sputtering times of the SiO_2 single functional layer (with a fixed sputtering time of 120 seconds for the HfO_2 functional layer; (d) Bar graph of the switching ratio (HRS/LRS) of the device in Figure 3c as a function of sputtering time of the SiO_2 functional layer

ESCALAB Xi+型 X 射线光电子能谱仪对器件功能层断面进行了 X 射线光电子能谱(XPS)测试。

2　结果与讨论

2.1　功能层材料层数以及厚度对 HfO_2 忆阻器性能的影响

使用磁控溅射在 100 W 的相同溅射功率下, 通过改变溅射时间来改变功能层的膜厚。图 3(a)为不同溅射时间下 ITO/HfO_2/Ag 单功能层忆阻器的 *I-V* 特性曲线图。图 3(b)为图 3(a)中 7 种不同器件的开关比(HRS/LRS)随溅射时间变化的柱状图。溅射时间在 30-50 秒时, 器件的开关比较低, 忆阻性能稳定性较强。此时器件功能层膜较薄, 导电细丝的生长和熔断的随机性较低, 所以忆阻性能较为稳定; 但 Ag 电极在溅射时渗透进功能层较多, 导致开关比较差。溅射时间在 60-120 秒时, 器件功能层厚度逐渐增加, 高阻态阻值增加, 开关比增大。但此时导电细丝生长和熔断的随机性增加, 器件忆阻稳定性有降低的趋势。图 3(c)为改变 SiO_2 功能层溅射时间的条件下(HfO_2 功能层溅射时间固定为 120 秒), ITO/HfO_2/SiO_2 /Ag 忆阻器的 *I-V* 特性曲线图。图 3(d)为图 3(c)中 6 种不同器件的开关比随 SiO_2 功能层溅射时间变化的柱状图。可见, SiO_2功能层溅射时间在 600 s 时器件的性能最好。

2.2　器件的忆阻器性能

以 Ag 为电极的 ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 器件, *I-V* 特性曲线如图 4(a)所示。当第一圈扫描电压由 0 V 至 1.5 V 时(曲线 1), 器件处于高阻态(HRS); 当扫描电压由 1.5 V 至 0 V 时(曲线 2), 器件的电流突然增大, 阻值减小, 器件转变为低阻态(LRS)。曲线 2 为设置(Set)过程。当扫描电压由 0 V 至−1.5 V 时(曲线 3)器件仍保持低阻态(LRS), 当扫描电压从−1.5 V 至 0 V 时(曲线 4)器件电流突然减小, 阻值增大, 器件转变为高阻态(HRS), 曲线 4 为重置

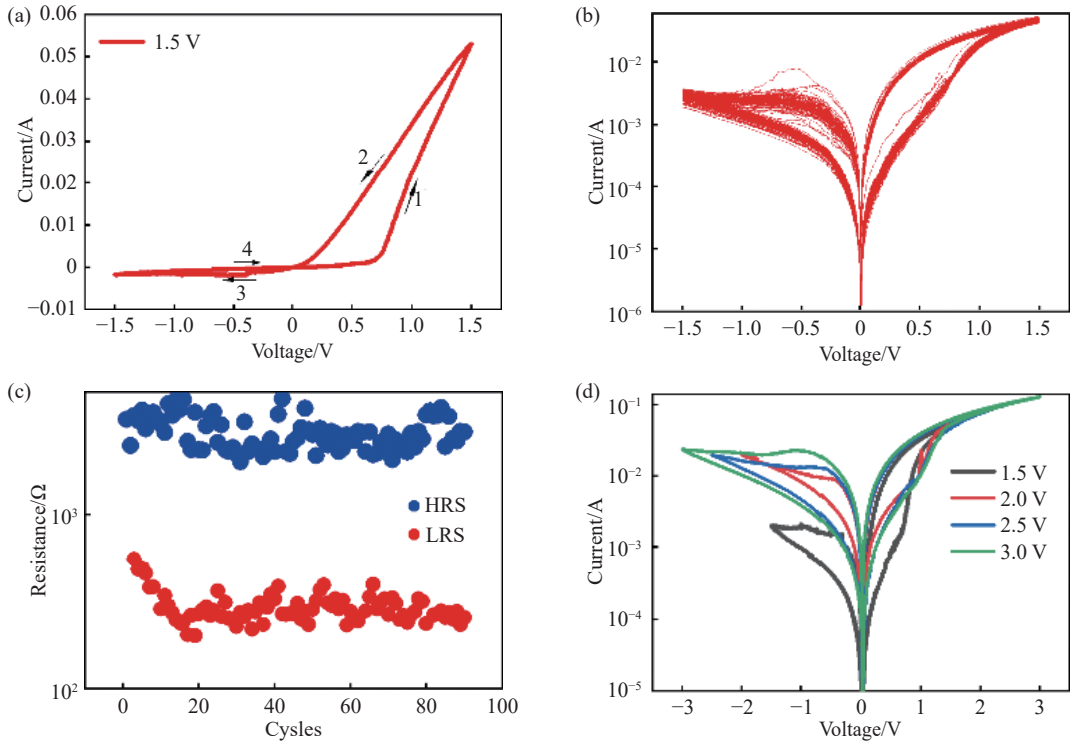

图 4　(a) ITO/HfO_2/SiO_2 /Ag 忆阻器的 *I-V* 特性曲线(扫描电压为 1.5 V); (b) ITO/HfO_2/SiO_2 /Ag 忆阻器的 6000+s 耐久测试循环 *I-V* 特性曲线图(扫描电压为 1.5 V); (c) 图 4(b) 中 HRS 与 LRS 的阻值分布图(读取电压为−0.05V); (d) ITO/HfO_2/SiO_2 /Ag 忆阻器在不同扫描电压下的 *I-V* 特性曲线图

Fig. 4 (a) *I-V* characteristic curve of ITO/HfO_2/SiO_2/Ag memristor (scan voltage: 1.5 V); (b) *I-V* characteristic curve of ITO/HfO_2/SiO_2/Ag memristor during 6000+s endurance test (scan voltage: 1.5 V); (c) Resistance distribution of HRS and LRS in figure 4 (b) (read voltage: −0.05 V); (d) *I-V* characteristic curve of ITO/HfO_2/SiO_2/Ag memristor under different scan voltages

(Reset)过程。图 4(b)为图 4(a)器件 6000 s 耐久测试 *I-V* 特性曲线图，图 4(c)为图 4(b)中在−0.05 的读取电压下的 HRS 和 LRS 分布图。可见，器件的性能相对稳定，最大开关比达到 50 且在 6000 s+的时间内保持在 20 以上。图 4(d)为在器件上施加不同扫描电压(±1.5 V、±2 V、±2.5 V、±3 V)的 *I-V* 特性曲线图。对器件施加的扫描电压为±1.5 V 时，器件的开关比最大，忆阻性能相对稳定。当施加在器件上的扫描电压逐渐增加时，器件的开关比并无明显减小，也无击穿现象，这说明 SiO_2 功能层对器件起到了一定的保护作用，可以在器件上施加较大工作电压，这有利于器件在电路中的实际应用和延长其工作寿命。

2.3 ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 器件导电机制

在器件处于低阻态时，对 ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 忆阻器件功能层进行了 XPS 测试。图 5(a)为 SiO_2 和 HfO_2 功能层的 XPS 全谱图，SiO_2 功能层中 Si 占比大约为 10.51%，Ag 占比大约为 0.25%，O 占比大约为 32.93%。SiO_2 层中 Ag 的存在说明了 Ag 沉积在 SiO_2 层中形成了 Ag 导电突触。HfO_2 功能层中 Hf 大约 13.48%，Ag 占比大约 0.37%，In 占比大约 2.38%，O 占比大约 39.26%。因为 HfO_2 功能层厚度只有 SiO_2 功能层的 1/3，所以 HfO_2 功能层中的 Ag 少于 SiO_2 功能层中的 Ag，说明 Ag 导电细丝呈倒锥型且 Ag 导电细丝的熔断主要发生在 HfO_2 功能层中。图 5(b)为 SiO_2 和 HfO_2 功能层中的 O1s 的分峰拟合图，其中 SiO_2 功能层中 SiO_2 的结合能为 532.9 eV，与金属结合的氧的结合能为 529 eV-530 eV，几乎不存在氧空位。这说明SiO_2 层中的导电机制是由 Ag 导电细丝主导的。HfO_2功能层中与金属结合的氧的结合能为 529 eV-530 eV，游离氧的结合能为 531 eV-532 eV。HfO_2 层中存在部分氧空位，但还是 Ag 导电细丝在导电机制中起主导作用。图 5(c)为 ITO 基底在溅射前后的 XRD 对比图，ITO 基底在溅射前后未出现新的衍射峰，说明器件功能层为非晶层。

2.4 ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 器件 *I-V* 曲线拟合

图 6(a-b) 为对图 4(a) 中数据结合不同传导模型的拟合图。将图 4(a)所示的 *I-V* 曲线分为正压区和负压区两个部分，对两个电压区的横纵坐标分

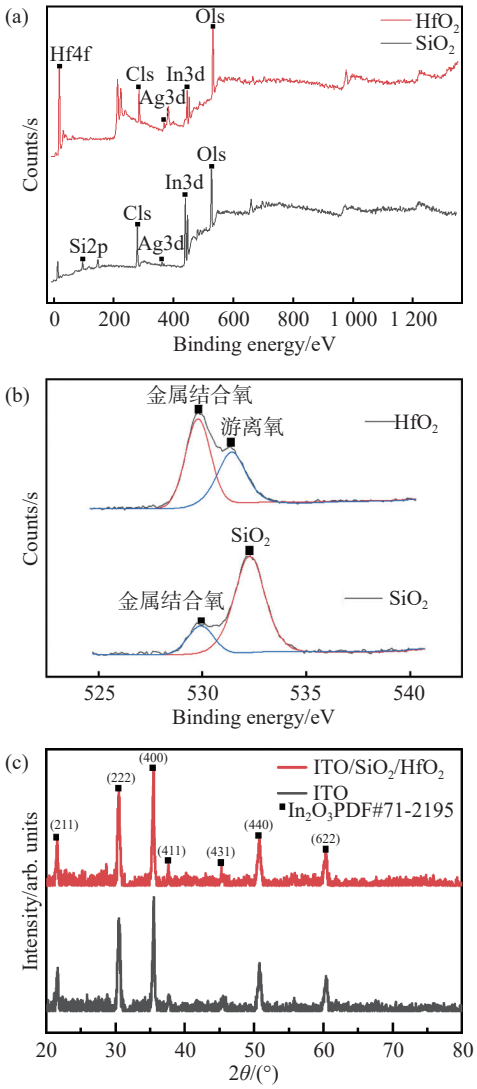

图 5 (a) ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 忆阻器中 SiO_2 与 HfO_2 功能层的 XPS 扫描图；(b) ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 忆阻器中 SiO_2 与 HfO_2 功能层的 O1s 能级拟合图；(c) ITO 基底在溅射前后的 XRD 扫描图

Fig. 5 (a) XPS spectra of SiO_2 and HfO_2 functional layers in the ITO/HfO_2/SiO_2/Ag memristor; (b) O1s energy level fitting of SiO_2 and HfO_2 functional layers in the ITO/HfO_2/SiO_2/Ag memristor; (c) XRD spectra of the ITO substrate before and after sputtering

别取对数，然后进行拟合。图 6(a)为正压区的拟合结果：正压区曲线 1 过程的斜率为 0.86，曲线 2 的斜率为 1.06。经过分析对比，器件 *I-V* 曲线正压区的曲线 1 和曲线 2 均符合欧姆传导模型(Ohmic Conduction)。这说明，尽管氧化物的带隙在理论上比较大，但通过热激发，仍然有一部分电子产生，这些电子导致了器件的导电机制为欧姆导电机制。在这种机制中电流密度与电场强度成正比，并且在器

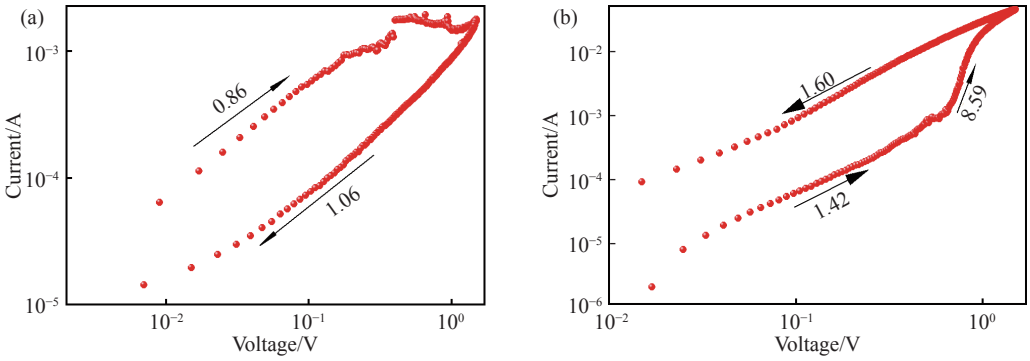

图 6　(a) ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 忆阻器 *I-V* 循环中正压区横纵坐标取对数后的拟合结果; (b) ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 忆阻器 *I-V* 循环中负压区横纵坐标取对数后的拟合结果

Fig. 6 Fig. (a) Fitting results of the *I-V* cycle with the logarithmic scale in the positive voltage region of the ITO/HfO_2/SiO_2/Ag memristor; (b) Fitting results of the *I-V* data in the negative voltage region

件处于高阻态(HRS)时, 正比效果更加明显。方程(1)表示了欧姆导电机制的电流密度计算公式[25]:

$$J_{\text{ohmic}} = \sigma E = q\mu N_c E \exp\left[\frac{-(E_c - E_F)}{kT}\right] \tag{1}$$

式中σ为电导率, μ为电子迁移率, N_c为导带的有效态密度, E_c为导带态, E_F为费米能级。

图 6(b)为负压区横纵坐标取对数的拟合结果, 结果显示: 曲线在负压区进行 *I-V* 循环(曲线 3-4)时, 拟合的斜率共分为三段: 在低压区分别为 1.42 和 1.60, 在高压区为 8.59。经过分析对比发现, 曲线在负压区进行 *I-V* 循环时, 导电机制与空间电荷限制电流(SCLC)机制相一致。即: 在 SCLC 电流传导模型中, 电流的传导由电介质中存在的大量陷阱所控制, 其模型主要由三个部分组成: 欧姆区($I \propto V$)、Child 平方定律区($I \propto V^2$)、以及在高场区斜率陡增的部分。当在低压区观察到欧姆传导机制时, 该机制很容易被识别, 然后在高压区中观察到电流密度呈现出$I \propto V^2$。在低压区, 器件的导电机制主要由氧化膜中热激发产生的自由电子主导。当电压超过平方定律的起始电压时, Ag 电极被氧化后的 Ag+大量进入功能层, Ag+的浓度逐渐超过功能层中的平衡浓度, 并开始主导导电机制。欧姆区和 Child 平方区的电流密度模型可分别由式(2)和(3)进行描述[25-26]:

$$J_{\text{ohmic}} = qn_0\mu\frac{V}{d} \tag{2}$$

$$J_{\text{Child}} = \frac{9}{8}\varepsilon_i\mu\theta\frac{V^2}{d^3} \tag{3}$$

式中J_{ohmic}和J_{Child}分别表示低压欧姆区与 Child 平方区的电流密度, n_0是热平衡状态下自由载流子的浓度, V为施加电压的大小, d为介质层薄膜厚度, ε为静态介电常数, μ为电子迁移率, θ为自由电荷与俘获电荷的比值。

2.5　ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 器件工作原理模型

通过以上电化学测试和各种仪器测试的结果, 本研究提出了 ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 忆阻器的工作原理模型。如图 7 所示, 当对 ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 忆阻器施加正向电压时, Ag 电极附近的 Ag 失去电子被氧化为 Ag+, 在外加电场的作用下, Ag+开始向阴极移动, 由于 SiO_2 功能层离子扩散性较差, Ag+大部分沉积在 Ag 电极附近形成导电突触, 并逐渐向阴极生长, 最终形成两功能层交界面处的 Ag 导电细丝突触(曲线 1)。当 Ag+扩散至 HfO_2 功能层中

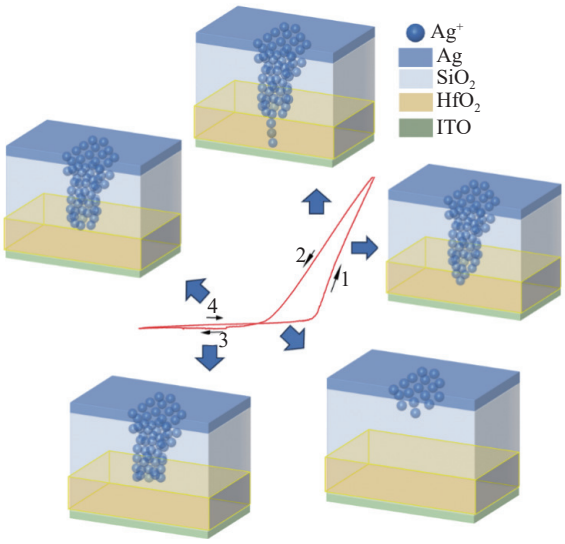

图 7　ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 忆阻器 *I-V* 曲线工作模型

Fig. 7 The working model of the *I-V* curve for the ITO/HfO_2/SiO_2/Ag memristor

时，Ag+逐渐接近阴极并被还原为 Ag，导电细丝通路形成，器件切换为低阻态，完成设置（SET）过程。由于 HfO_2 功能层超薄，导电细丝的生长和熔断随机性较低，保证了器件忆阻性能的稳定（曲线 2）。在施加反向电压时，HfO_2 功能层中的 Ag 含量较少，导电细丝更易熔断，所以导电细丝的生长和熔断都发生在超薄的 HfO_2 功能层中，这显著提高了忆阻器件的开关比和稳定性（曲线 4）。

3 结论

本论文使用磁控溅射的方法制备了 ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 氧化物双介质功能层忆阻器，与未溅射 SiO_2 功能层的 HfO_2 单介质功能层忆阻器相比，双介质功能层忆阻器在开关比和耐久性方面表现出更好的性能。当在器件两端施加正向电压时，Ag+离子沉积在 SiO_2 功能层中形成导电突触。SiO_2 功能层较薄时，无法形成稳定的导电突触，导电细丝的随机性较大，器件的稳定性较差；SiO_2 功能层过厚时导电细丝难以连通，器件的开关比较差。通过改变 SiO_2 功能层的溅射时间来改变 SiO_2 功能层的厚度，得出其最佳溅射时间为 10 分钟。HfO_2 功能层较薄，导电细丝的生长和熔断主要发生在 HfO_2 功能层中。结合 SEM, XRD 和 XPS 的测试和表征，从微观和 Ag 含量的角度分析了 ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 氧化物双介质功能层忆阻器的导电机制，并对 ITO/HfO_2/SiO_2/Ag 忆阻器的 *I-V* 特性曲线图进行了拟合，分析出了正压区和负压区的导电机理分别为欧姆导电和空间电荷限制电流机制，并提出了一种基于倒锥型导电细丝的忆阻器工作模型。本研究为研究忆阻器的导电机制和减少导电细丝生长及熔断的随机性做出了具有借鉴意义的工作。

参考文献：

[1] Cao Z, Sun B, Zhou G, et al. Memristor-based neural networks: a bridge from device to artificial intelligence[J]. Nanoscale Horizons, 2023, 8(6): 716-745.

[2] Zhao Y, Lou Z, Hu J, et al. Scalable Layer - Controlled Oxidation of Bi_2O_2Se for Self - Rectifying Memristor Arrays With sub - pA Sneak Currents[J]. Advanced Materials, 2024: 2406608.

[3] Liao K, Lei P, Tu M, et al. Memristor based on inorganic and organic two-dimensional materials: mechanisms, performance, and synaptic applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(28): 32606-32623.

[4] Xiao X, Hu J, Tang S, et al. Recent advances in halide perovskite memristors: materials, structures, mechanisms, and applications[J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5(6): 1900914.

[5] Mao S, Sun B, Zhou G, et al. Applications of biomemristors in next generation wearable electronics[J]. Nanoscale Horizons, 2022, 7(8): 822-848.

[6] YaFeng D, ZiJan W, Dong W. Research progress in resistive switching mechanism and materials of memristor[J]. Computer Engineering & Science, 2022, 44(1): 103969.

[7] Kang J, Kim T, Hu S, et al. Cluster-type analogue memristor by engineering redox dynamics for high-performance neuromorphic computing[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 4040.

[8] Shih M C, Wang C Y, Lee Y H, et al. Reliability study of perpendicular STT-MRAM as emerging embedded memory qualified for reflow soldering at 260° C[C]. 2016 IEEE Symposium on VLSI Technology. 2016: 1-2.

[9] Manchon A, Železný J, Miron I M, et al. Current-induced spin-orbit torques in ferromagnetic and antiferromagnetic systems[J]. Reviews of Modern Physics, 2019, 91(3): 035004.

[10] Huang Y T, Chen N K, Li Z Z, et al. Two - dimensional In_2Se_3: A rising advanced material for ferroelectric data storage[J]. InfoMat, 2022, 4(8): e12341.

[11] 徐华义, 邬海龙, 何业法, 等. La 掺杂 $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ 薄膜铁电性能研究 [J]. 功能材料与器件学报, 2022, 28(6): 549-554.

[12] Wright C D, Wang L, Aziz M M, et al. Phase - change processors, memristors and memflectors[J]. Physica Status Solidi B, 2012, 249(10): 1978-1984.

[13] Yoshida M, Suzuki R, Zhang Y, et al. Memristive phase switching in two-dimensional 1T-TaS_2 crystals[J]. Science Advances, 2015, 1(9): e1500606.

[14] Vu Q A, Kim H, Nguyen V L, et al. A high - on/off - ratio floating - gate memristor array on a flexible substrate via CVD - grown large - area 2D layer stacking[J]. Advanced Materials, 2017, 29(44): 1703363.

[15] Yoon J H, Song S J, Yoo I H, et al. Highly uniform, electroforming - free, and self - rectifying resistive memory in the Pt/Ta_2O_5/HfO_{2-x}/TiN structure[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(32): 5086-5095.

[16] Ismail M, Abbas H, Mahata C, et al. Optimizing the thickness of Ta_2O_5 interfacial barrier layer to limit the oxidization of Ta ohmic interface and ZrO_2 switching layer for multilevel data

storage[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 106: 98-107.

[17] Valov I, Linn E, Tappertzhofen S, et al. Nanobatteries in redox-based resistive switches require extension of memristor theory[J]. Nature Communications, 2013, 4(1): 1771.

[18] Zhao X, Zhang X, Shang D, et al. Uniform, fast, and reliable $Li_xSiO_{y\text{-based}}$ resistive switching memory[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(4): 554-557.

[19] Lee J, Bourim E M, Lee W, et al. Effect of ZrO_x/HfO_x bilayer structure on switching uniformity and reliability in nonvolatile memory applications[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(17): 172105.

[20] Tsai T L, Chang H Y, Lou J J C, et al. A high performance transparent resistive switching memory made from ZrO_2/AlON bilayer structure[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(15): 153505.

[21] Chang C F, Chen J Y, Huang G M, et al. Revealing conducting filament evolution in low power and high reliability Fe_3O_4/Ta_2O_5 bilayer RRAM[J]. Nano Energy, 2018, 53: 871-879.

[22] Woo J, Moon K, Song J, et al. Improved synaptic behavior under identical pulses using AlO_x/HfO_2 bilayer RRAM array for neuromorphic systems[J]. IEEE Electron Device Letters, 2016, 37(8): 994-997.

[23] Lee M J, Lee C B, Lee D, et al. A fast, high-endurance and scalable non-volatile memory device made from asymmetric Ta_2O_{5-x}/TaO_{2-x} bilayer structures[J]. Nature Materials, 2011, 10(8): 625-630.

[24] Guo X, Wang Q, Lv X, et al. SiO_2/Ta_2O_5 heterojunction ECM memristors: physical nature of their low voltage operation with high stability and uniformity[J]. Nanoscale, 2020, 12(7): 4320-4327.

[25] Lim E W, Ismail R. Conduction mechanism of valence change resistive switching memory: a survey[J]. Electronics, 2015, 4(3): 586-613.

[26] Yan X, Pei Y, Chen H, et al. Self - assembled networked PbS distribution quantum dots for resistive switching and artificial synapse performance boost of memristors[J]. Advanced Materials, 2019, 31(7): 1805284.