

Ag/BiFeO₃/Fe₂O₃/ITO 结构的 电阻开关和负微分电阻

舒海燕 夏姝颖 张兴文 何朝滔 李世昌 邱晓燕 陈鹏[†]

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2025 年 7 月 27 日收到; 2025 年 9 月 16 日收到修改稿)

本文采用磁控溅射法制备了 Ag/BiFeO₃/Fe₂O₃/ITO 多层结构, 并系统研究了 Fe₂O₃ 层厚度对其电学特性的调控作用. 实验发现, 不同 Fe₂O₃ 层厚度的器件均表现出稳定的双极性电阻开关行为. I - V 特性拟合分析表明, 其电阻转变机制源于 Ag 活性电极在外电场作用下形成/断裂的导电细丝. 此外, 器件在多次循环中均呈现可重复的负微分电阻现象, 该现象与氧空位迁移及局域焦耳热效应导致的细丝不稳定过程密切相关. 本研究为通过界面工程调控阻变存储器性能提供了可行的材料体系与物理机制理解.

关键词: 电阻开关, 负微分电阻, 导电细丝, 焦耳热

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

CSTR: 32037.14.aps.74.20251004

DOI: 10.7498/aps.74.20251004

1 引言

随着科学技术的不断进步, 人们对更高性能电子设备的追求是毋庸置疑的. 因此, 具有多种物理特性的电子器件逐渐成为研究的核心, 例如超高的存储密度、超快的读写速度、超低的制备成本、超长的使用寿命、超低的使用能耗、无污染的环境友好器件等^[1-3]. 在学者们不断努力之下, 新一代的非易失存储器件不断涌现, 铁电随机存储器 (FRAM)^[4]、相变随机存储器 (PCRAM)^[5,6]、磁阻随机存储器 (MRAM)^[7] 和电阻式随机存储器 (RRAM)^[8-10] 的研究都取得了长足的进步. 基于电阻开关 (RS) 现象的 RRAM 具有存储速度快、结构简单、功耗低等优点, 有望成为下一代新型存储器件^[11-13]. RS 效应是指在外加电压作用下, 材料的电阻可以在高阻状态 (HRS) 和低阻状态 (LRS) 之间可逆转换, 从而达到存储信息的目的^[14-18]. 与介电击穿不同

的是, 介电击穿会导致介电材料的电阻状态永久性降低, 对样品器件造成不可逆转的伤害, 使样品器件没有切换回原始状态的可能, 而电阻开关的过程是可逆的, 可以多次循环重复. 在目前所有具有潜在应用前景的多功能器件中, 电阻开关效应与负微分电阻 (NDR) 共存的器件显示出巨大的应用潜力^[19-25]. 对于 NDR 来说, 一个直观的现象是, 在一个电压区域内, 随着电压的升高, 其电流会明显减小. NDR 由于其在纳米电子器件中的潜在应用得到了广泛的研究, 近期利用 NDR 器件实现了优异的神经形态计算^[22,23], 在最近报道的反常相变忆阻器中 NDR 被用于图像加密等^[24]. 纳米器件中 NDR 效应和电阻开关效应的共存以及独特的数据存储能力将显示出良好的应用性能, 这很可能为我们开发新器件提供机会.

由于 BiFeO₃ 在室温下是一种多铁性材料, 其在数据存储、可见光区的光学利用以及突触功能等方面的潜在应用备受关注. 近年来, BFO 在电阻开

[†] 通信作者. E-mail: pchen@swu.edu.cn

关领域得到了广泛的研究. Shuai 等^[26]观察了 Au/BiFeO₃/Pt 结构中的非易失性双极电阻器开关, 并通过场诱导载流子捕获和去捕获来理解电阻器开关. Zheng 等^[27]报道了 BiFeO₃/ZnO 双层膜中通过光调节产生的 RS 现象和 NDR 效应. Lu 等^[28]报道了在具有不同厚度 Al₂O₃(AO) 层的 AO/BiFeO₃/Pt 结构中, 器件的开关行为随 AO 膜厚度的变化而变化的现象. Fe₂O₃ 因具有良好的光收集和电荷输运等物理性能而受到越来越多的关注. Tang 等^[29]研究了一些 Fe₂O₃ 基复合材料的白光控制电阻开关行为.

本文报道了不同 Fe₂O₃ 层厚度的 BFO/Fe₂O₃/ITO 结构中的 RS 行为和 NDR 现象. 随着 Fe₂O₃ 层厚度从 300 nm 减小到 100 nm, 器件中观察到的 RS 行为和 NDR 现象都有所增强.

2 实验

首先用砂纸打磨以前磁控溅射残留在样品托、掩模板、固定的压片和螺丝上的杂质薄膜; 其次把打磨之后的样品托、掩模板、固定的压片和螺丝放入烧杯, 同时将 ITO 衬底固定放在另一烧杯中, 并将两个烧杯放在频率为 40 kHz, 水温为 40 °C 的超声清洗机中, 依次使用酒精、丙酮、去离子水、丙酮、酒精, 每次对其进行 30 min 的清洗; 清洗完成之后将样品托、掩模板、固定的压片、螺丝和衬底使用高纯氮气吹干, 将吹干后的衬底固定在样品托上, 放入磁控溅射的腔体. 制备流程和主要参数如下: 镀膜背景真空为 3×10^{-4} Pa, 镀膜时会在腔内通入流速为 30.0 sccm (1 sccm = 1 mL/min) 的高纯氩气, 工作气压设定为 1 Pa. 采用磁控溅射技术在 ITO 衬底上制备了 BiFeO₃/Fe₂O₃ 结构. 首先

采用射频磁控溅射法在 ITO 衬底上沉积 Fe₂O₃ 薄膜, 溅射功率为 60 W. 再将 Fe₂O₃ 薄膜生长在 BiFeO₃ 薄膜之上, 溅射 Fe₂O₃ 薄膜的射频功率为 50 W. 最后用掩模板遮盖已经镀好的氧化物层, 掩模板上有直径约 1 mm 的孔隙, 在直流溅射功率为 30 W 的情况下在 Fe₂O₃ 薄膜上沉积了 Ag 金属点作为顶电极. 通过控制 Fe₂O₃ 层的溅射时间, 成功制备了不同 Fe₂O₃ 层薄膜厚度的样品: Ag/BiFeO₃(350 nm)/Fe₂O₃(100 nm)/ITO, Ag/BiFeO₃(350 nm)/Fe₂O₃(200 nm)/ITO, Ag/BiFeO₃(350 nm)/Fe₂O₃(300 nm)/ITO.

3 结果与讨论

器件的结构图如图 1(a) 所示. 采用扫描电子显微镜对器件截面的微观结构进行表征. 使用 Keithley 2400 测量器件的电流-电压 (I - V) 特性, 图 1(b) 为 BFO/Fe₂O₃/ITO 器件截面的 SEM 图像, 其中 Fe₂O₃ 层厚度约为 106 nm, 这与我们的预期非常接近.

在本文装置中, 通过施加从 0 → 1 V, 1 → -1 V 和 -1 → 0 V 的循环电压来测试其 RS 行为, 在测试期间设置截止电流 1×10^{-3} A 以防止薄膜被击穿. 对于 Fe₂O₃ 层厚度不同的器件, 一个周期内的 I - V 曲线及其对应的半对数尺度上的 I - V 曲线如图 2(a)–(f) 所示. 所有样品均表现出 RS 行为. 在 0 → 1 V 的扫描范围内, 对于 Fe₂O₃ 层厚度约为 100 nm 的样品, 当电压为 0.6 V 时, 电流突然急剧增大了接近两个量级, 使得样品从最初的高电阻态跃变到低电阻态. 在 1 → -1 V 扫描范围内, 电阻状态在电压为 -0.25 V 时, 从初始 LRS 连续切换到 HRS. Fe₂O₃ 层厚度约为 100 nm 时, 样品的高、

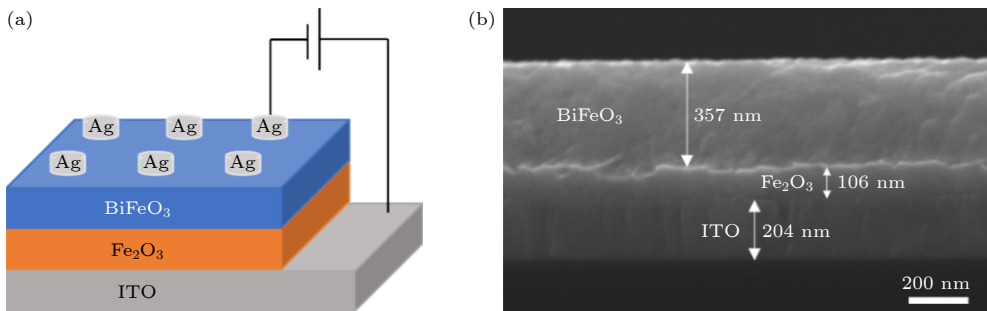


图 1 (a) Ag/BiFeO₃/Fe₂O₃/ITO 的结构图; (b) Fe₂O₃ 层厚度约为 100 nm 时器件的 SEM 截面

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the Ag/BiFeO₃/Fe₂O₃/ITO structure; (b) cross-sectional SEM image of the device with Fe₂O₃ layer thickness of approximately 100 nm.

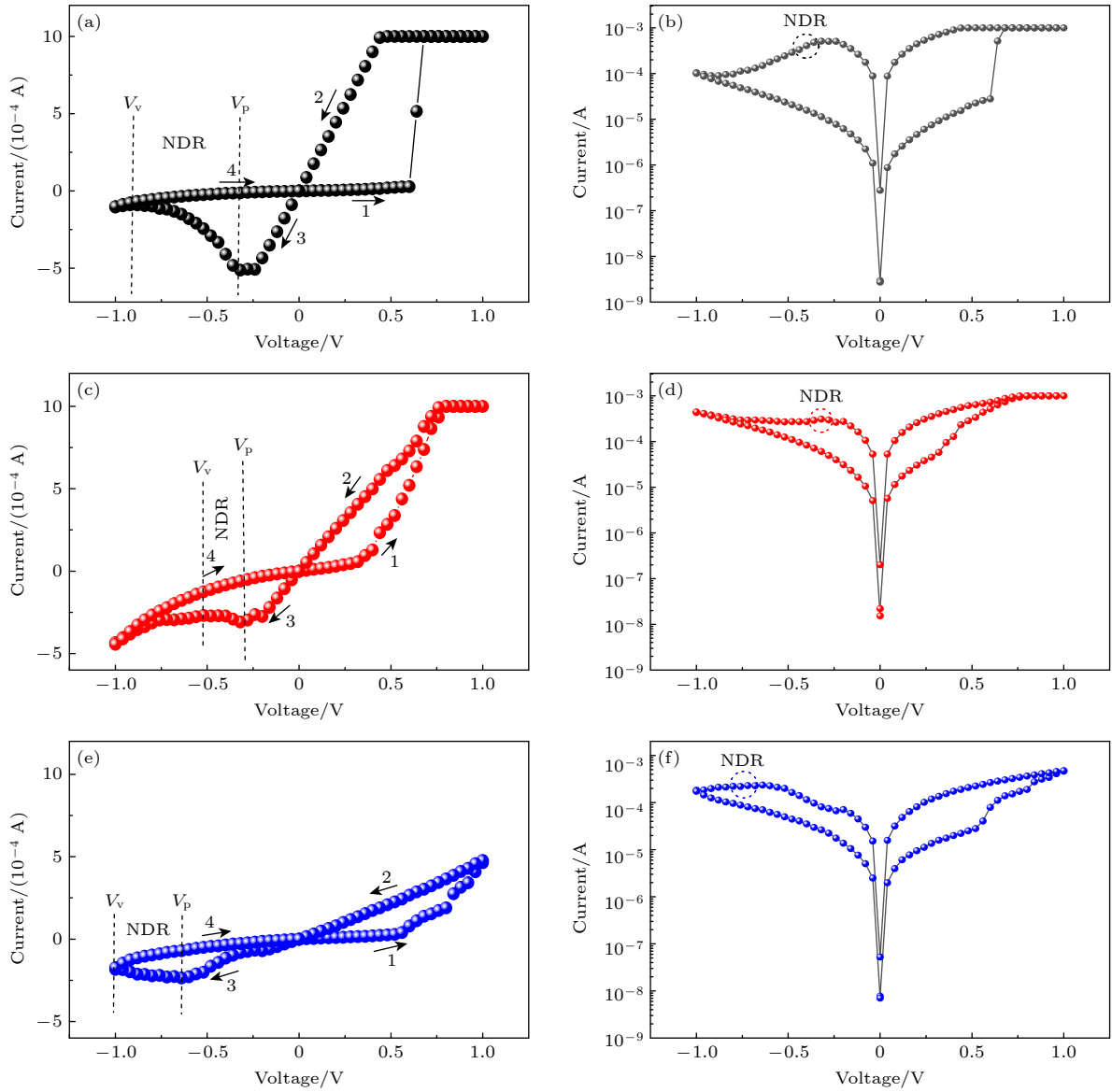


图 2 (a) Fe_2O_3 层厚为 100 nm 的 $\text{BFO}/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ 的 I - V 曲线; (b) 对应于 (a) 周期的半对数尺度 I - V 曲线; (c) Fe_2O_3 层厚为 200 nm 器件的 $\text{BFO}/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ 的 I - V 曲线; (d) 对应于 (c) 周期的半对数尺度 I - V 曲线; (e) Fe_2O_3 层厚为 300 nm 器件中 $\text{BFO}/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ 的 I - V 曲线; (f) 对应于 (e) 周期的半对数尺度 I - V 曲线

Fig. 2. (a) I - V characteristics of $\text{BFO}/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ with 100 nm-thick Fe_2O_3 ; (b) semi-log scale I - V curve corresponding to (a); (c) I - V characteristics of $\text{BFO}/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ device with 200 nm-thick Fe_2O_3 ; (d) semi-log scale I - V curve corresponding to (c); (e) I - V characteristics of $\text{BFO}/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ in the device with 300 nm-thick Fe_2O_3 ; (f) semi-log scale I - V curve corresponding to (e).

低电阻比大于一个数量级, 开关电压较低. 器件的 RS 效应随着 Fe_2O_3 层厚度的增大而减小, 说明 Fe_2O_3 层厚度对器件的 RS 现象有调节作用. 同时, 我们在测试过程中发现了一个有趣的现象, 所有样品都表现出负微分电阻 (NDR) 效应. 对于 Fe_2O_3 层厚约为 300 nm 的样品, 当电压从 -0.7 V 增至 -1.0 V, 电流却从 2.20×10^{-4} 不断减小到 1.84×10^{-4} . 对于 Fe_2O_3 层厚约 200 nm 的样品, 当电压从 -0.35 V 增至 -0.5 V, 电流却从 2.91×10^{-4} 减小到 2.69×10^{-4} . 对于 Fe_2O_3 层厚约为 100 nm 的样品,

当电压从 -0.35 V 增至 -0.9 V, 电流却从 4.81×10^{-4} 到 9.02×10^{-5} 连续下降约 80%. Fe_2O_3 层厚在 100 nm 左右的样品负微分电阻效应最显著.

为了研究器件的导电机理, 将 Fe_2O_3 层厚度分别为 100, 200, 300 nm 的 3 种器件的 I - V 曲线置于双对数坐标系中, 并在正扫描电压下进行拟合. 拟合结果如图 3(a)—(c) 所示. 在 LRS 下, 所有曲线的斜率都在 1 左右, 说明导电机理为欧姆接触, 对应导电细丝的形成. HRS 下的传导机制由两部分组成, 在欧姆接触后的低偏置区, 两部分的拟合

斜率均接近 1, 而在高压区, 斜率值 > 1.5. 这表明存在空间电荷限制电流 (SCLC) 传导机制, 这可能是由于空穴载流子从 BFO 向 Fe_2O_3 层扩散所致.

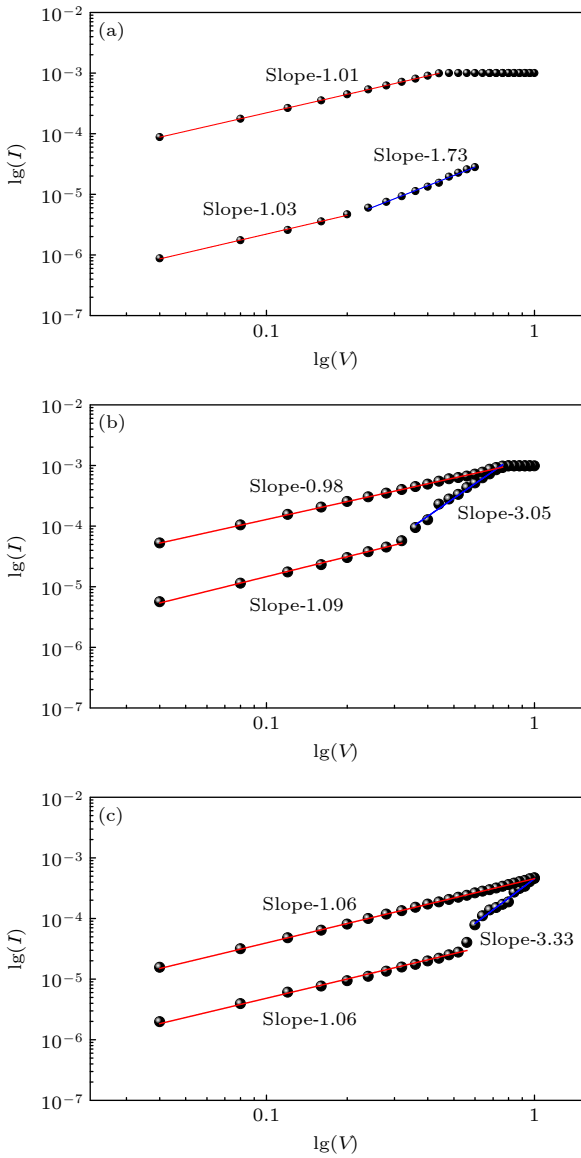


图 3 正扫描电压下 BFO/ Fe_2O_3 /ITO 的 I - V 双对数拟合图 (a) Fe_2O_3 层的厚度约为 100 nm; (b) Fe_2O_3 层的厚度约为 200 nm; (c) Fe_2O_3 层的厚度约为 300 nm
Fig. 3. Double-logarithmic fitting plots of I - V characteristics for BFO/ Fe_2O_3 /ITO under forward voltage scanning, with Fe_2O_3 layer thicknesses of (a) ~ 100 nm, (b) ~ 200 nm, and (c) ~ 300 nm.

为了进一步澄清上述讨论, 我们提出了 Ag 导电丝和氧空位的物理模型来解释 RS 行为. 当一个正电压加到顶部电极上时, Ag 被电离产生 Ag^+ , 然后 Ag^+ 在外加电场的作用下穿过氧化层向底部电极 (ITO) 移动. 因此, Ag^+ 在底部电极处逐渐积累, Ag^+ 被还原为单质 Ag, 形成银导电丝. 但由于

Ag 与 BFO 在顶电极处仍有一定距离, 因此会在间隙中不断形成氧空位. 最后将银导电丝与氧空位结合形成如图 4(b) 所示的导电通道, 导致图 2(a) 中的电流跳变, 电阻态从 HRS 切换到 LRS. 当电压反转时, 阴极附近的氧空位开始捕获氧离子, 导致氧空位形成的导电通道逐渐断裂, 电流开始逐渐减小. 而在反向电压逐渐增大的过程中, 通过导电细丝的电流也逐渐增大, 逐渐增大的电流导致导电细丝的焦耳热效应逐渐增强, 这样一种增强的焦耳热效应会逐渐破坏导电细丝稳定性, 导致导电细丝逐渐断裂. 反向电压逐渐增大, 导致氧空位形成的导电通道与 Ag 导电细丝逐渐断裂, 因而使得电压增大的过程中电流却逐渐减小, 从而显示出 NDR 现象. 当反向电压增至最大值, 导电通道完全断裂, 器件从 LRS 彻底切换到 HRS.

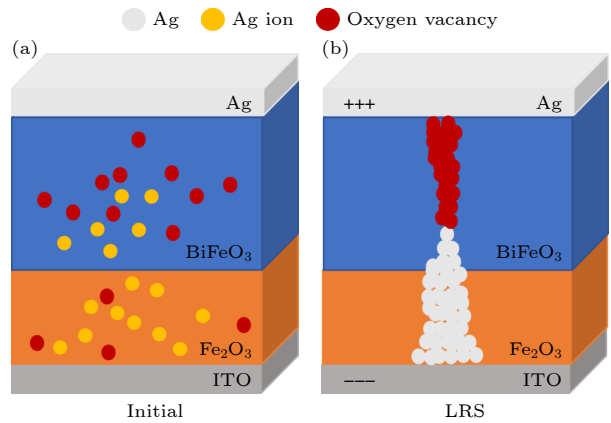


图 4 Fe_2O_3 层厚度约为 100 nm 的 BFO/ Fe_2O_3 /ITO 器件表现出优异的 RS 行为和稳定的 NDR 效应, 具有 RRAM 器件的潜力, 设备的稳定性是衡量设备性能的标准之一
Fig. 4. The BFO/ Fe_2O_3 /ITO device with ~ 100 nm-thick Fe_2O_3 layer demonstrates excellent resistive switching (RS) behavior and stable negative differential resistance (NDR) effect, indicating potential for RRAM applications. Device stability serves as a key performance metric.

为了研究器件电阻开关与 NDR 特性的稳定性, 所有器件的 I - V 曲线都进行 70 次循环测试. 图 5(a) 是 Fe_2O_3 厚度为 100 nm 的 BFO/ Fe_2O_3 /ITO 器件的 70 个连续循环的 I - V 曲线. 由图 5(a) 可知, 经过 70 次的循环测试, 器件的电阻开关特性与 NDR 特性保持稳定, 没有出现衰减. 图 5(b) 是 Fe_2O_3 厚度为 100 nm 的 BFO/ Fe_2O_3 /ITO 器件的 70 个连续循环中的高阻态与低阻态的电阻分布. 由此可见, 器件的高低阻态都比较稳定, 器件开关比在 40 到 74 之间波动. 许多报道中的 NDR

发生的偏压范围比较窄, 大概在 0.1 V^[22-25]. 而本文 Fe_2O_3 厚度为 100 nm 的样品在偏压 -0.35—-0.9 V 范围里都表现出 NDR 行为, 这样宽的范围 (~ 0.5 V) 对于该器件 NDR 的相关应用带来了优势.

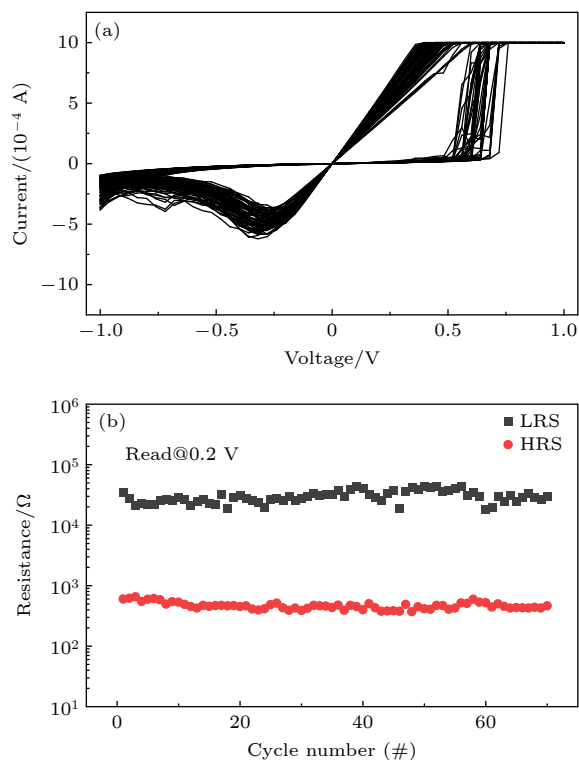


图 5 厚度为 100 nm 的 BFO/ Fe_2O_3 /ITO 器件的 70 个连续开关周期 (a) 70 循环的 I - V 曲线; (b) 70 次循环的高低电阻比

Fig. 5. Seventy consecutive resistive switching cycles of the BFO/ Fe_2O_3 /ITO device with ~ 100 nm-thick Fe_2O_3 layer: (a) I - V curves for seventy cycles; (b) high-to-low resistance ratio.

4 结 论

综上所述, Fe_2O_3 层的厚度可以调节 BFO/ Fe_2O_3 /ITO 器件的 RS 效应和 NDR 效应. 我们用导电丝模型来解释器件的 RS 行为效应. 它们的 NDR 效应是由氧空位捕获氧离子与焦耳热效应导致导电细丝断裂共同引起的. 由于该结构具有优良的开关比、低的开关电压、良好的耐用性和稳定的 NDR 效果, 因此在 RRAM 中具有很大的应用潜力.

参考文献

- [1] Weitz R T, Walter A, Engl R, Sezi R, Delm C 2006 *Nano Lett.* **6** 2810
- [2] Li X L, Jia J, Li Y C, Bai Y H, Li J, Shi Y N, Wang L F, Xu X H 2016 *Sci. Rep.* **6** 31934
- [3] Bibes M, Barthélémy A 2008 *Nat. Mater.* **7** 425
- [4] Miyake M, Scott J F, Lou X J, Morrison F D, Nonaka T, Motoyama S, Tatsuta T, Tsuji O 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 064112
- [5] Jensen W B 1997 *J. Chem. Edu.* **74** 1063
- [6] Neale R G, Nelson D L, Moore G E 1970 *Electronics* **43** 56
- [7] Jeong D S, Thomas R, Katiyar R S, Scott J F, Kohlstedt H, Petraru A, Hwang C S 2012 *Rep. Prog. Phys.* **75** 076502
- [8] Jeong D S, Choi B J, Hwang C S 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 113724
- [9] Yu S M, Guan X M, Wong H S P 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 063507
- [10] Hui F, Grustan-Gutierrez E, Long S B, Liu Q, Ott A K, Ferrari A C, Lanza M 2017 *Adv. Electron. Mater.* **3** 1600195
- [11] Waser R 2012 *J. Nanosci. Nanotechnol.* **12** 7628
- [12] Kim D C, Seo S, Ahn S E, Suh D S, Lee M J, Park B H, Yoo I K, Baek I G, Kim H J, Yim E K, Lee J E, Park S O, Kim H S, Chung U I, Moon J T, Ryu B I 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 202102
- [13] Mahapatra R, Maji S, Horsfall A B, Wright N G 2015 *Microelectron. Eng.* **138** 118
- [14] Lee J S, Lee S, Noh T W 2015 *App. Phys. Rev.* **2** 031303
- [15] Yoo H G, Kim S, Lee K J 2014 *RSC Adv.* **4** 20017
- [16] Zhang W B, Wang C, Liu G, Wang J, Chen Y, Li R W 2014 *Chem. Commun.* **50** 11496
- [17] He C T, Lu Y, Li X L, Chen P 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 086102 [何朝滔, 卢羽, 李秀林, 陈鹏 2022 物理学报 **71** 086102]
- [18] Zhang X W, He C T, Li X L, Qiu X Y, Zhang Y, Chen P 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 187303 [张兴文, 何朝滔, 李秀林, 邱晓燕, 张耘, 陈鹏 2022 物理学报 **71** 187303]
- [19] Guo T, Sun B, Zhou Y, Zhao H B, Lei M, Zhao Y 2018 *PCCP* **20** 20635
- [20] Prakash C, Yadav A K, Dixit A 2023 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **25** 19868
- [21] Zhang K J, Ren K, Qin X Z, Zhu S H, Yang F, Zhao Y, Zhang Y 2021 *IEEE Trans. Electron Dev.* **68** 3807
- [22] Kumar S, Strachan J P, Williams R S 2017 *Nature* **548** 318
- [23] Kumar S, Williams R S, Wang Z 2020 *Nature* **585** 518
- [24] Zhou G D, Gu D S, Ye J, Sun B, Shi H, Ran H, Ji'e M, Hu X, Wang L, Duan S, Ling H 2025 *Adv. Mater.* **37** e08107
- [25] Zhou G D, Duan S K, Li P, Sun B, Wu B, Yao Y Q, Yang X D, Han J J, Wu J G, Wang G, Liao L P, Lin C Y, Hu W, Xu C Y, Liu D B, Chen T, Chen L J, Zhou A K, Song Q L 2018 *Adv. Electron. Mater.* **4** 1700567
- [26] Shuai Y, Zhou S Q, Bürger D, Helm M, Schmidt H 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 124117
- [27] Zheng P P, Sun B, Chen Y Z, Elshekh H, Yu T, Mao S S, Zhu S H, Wang H Y, Zhao Y, Yu Z 2019 *Appl. Mater. Today* **14** 21
- [28] Lu Y, Tang Y Y, Li X L, He C T, Chen P 2022 *App. Phys. A-Mater.* **128** 229
- [29] Tang M, Sun B, Huang J, Gao J, Li C M 2016 *RSC Adv.* **6** 25028

Resistive switching and negative differential resistance effects in Ag/BiFeO₃/Fe₂O₃/ITO structures with various thicknesses of Fe₂O₃ layer

SHU Haiyan XIA Shuying ZHANG Xingwen HE Chaotao LI Shichang
QIU Xiaoyan CHEN Peng[†]

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

(Received 27 July 2025; revised manuscript received 16 September 2025)

Abstract

In this paper, the resistive switching characteristics of Ag/BiFeO₃/Fe₂O₃/ITO multilayer film deposited on ITO by magnetron sputtering are investigated. The Ag/BiFeO₃/Fe₂O₃/ITO devices all exhibit superior resistive switching behaviors due to the formation of Ag conducting filaments. The resistive switching ratio of the device is close to 10 for the sample with 100 nm-thick Fe₂O₃ film. The current value of the device increases sharply at 0.56 V when the voltage is swept forward, and the device switches from LRS back to HRS at -0.3 V when a voltage of opposite polarity is applied. The *I-V* curves of the device are fitted in double logarithmic coordinates. It is found that the device is controlled by an Ohmic conduction model in the low resistance state and by two conduction models in the high resistance state: Ohmic conduction in the low bias region, and the SCLC conduction model at higher voltages. Such a resistive switching characteristic with very low switching voltage and a high resistance ratio is particularly important for the application of resistive stochastic storage. In addition, all samples show an obvious negative differential resistance effect, which is caused by Joule heating. The Ag/BiFeO₃/Fe₂O₃/ITO device show both resistive switching characteristics and a negative differential resistance effect, which have important applications.

Keywords: resistive switching, negative differential resistance, conductive filament, Joule heat

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

DOI: [10.7498/aps.74.20251004](https://doi.org/10.7498/aps.74.20251004)

CSTR: [32037.14.aps.74.20251004](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20251004)

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



Ag/BiFeO₃/Fe₂O₃/ITO结构的电阻开关和负微分电阻

舒海燕 夏姝颖 张兴文 何朝滔 李世昌 邱晓燕 陈鹏

Resistive switching and negative differential resistance effects in Ag/BiFeO₃/Fe₂O₃/ITO structures with various thicknesses of Fe₂O₃ layer

SHU Haiyan XIA Shuying ZHANG Xingwen HE Chaotao LI Shichang QIU Xiaoyan CHEN Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 248501 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251004

CSTR: 32037.14.aps.74.20251004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251004>

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

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>

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>

石墨烯电极弯折对2-苯基吡啶分子器件负微分电阻特性的调控和机理

Regulation and mechanism of graphene electrode bending on negative differential resistance of 2-phenylpyridine molecular devices

物理学报. 2023, 72(3): 038502 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221212>

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>

基于氧空位调控的HfO_x忆阻器稳定性研究

Stability of HfO_x memristors based on oxygen vacancy regulation

物理学报. 2025, 74(21): 217301 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250971>

HfO₂/NiO_x/HfO₂堆栈的三电阻态开关特性与导电机制

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>