

偏轴磁控溅射法外延 BiFeO₃ 薄膜的介电性能与阻变效应

宋建民^{1,2}, 代秀红¹, 梁杰通¹, 赵磊¹, 周阳¹,
葛大勇¹, 孟旭东³, 刘保亭¹

(1. 河北大学 物理科学与技术学院, 保定 071002; 2. 河北农业大学 理学院, 保定 071001; 3. 河北北方学院 理学院, 张家口 075000)

摘要: 利用偏轴射频磁控溅射法, 在(001) SrTiO₃(STO)单晶基片上制备了 Pt/BiFeO₃/La_{0.5}Sr_{0.5}CoO₃/STO (Pt/BFO/LSCO/STO)异质结电容器。研究了 BiFeO₃ 薄膜的结构和物理性能。原子力显微镜(AFM)和 X 射线衍射(XRD)分析表明: BFO 薄膜结晶质量良好, 且为单相(001)外延钙钛矿结构。介电性能测试结果发现: 在 5 V 驱动电压下, Pt/BFO/LSCO 电容器呈现饱和的蝶形回线, 调谐率和介电损耗分别为 14.1%和 0.19。此外, 阻变机制研究表明: 在 0→5→0 V 正向电压和 0→-5→0 V 负向电压下, 阻变均为高阻向低阻转变规律, 呈现为铁电二极管的阻变开关行为。通过 $I-V$ 曲线拟合, 得到 0→5→0→-5 V 时阻变机制为空间电荷限制电流陷阱能级的填充和脱陷, 而-5→0 V 时符合界面限制的 F-N 隧穿机制。

关键词: 铁酸铋薄膜; 介电常数; 阻变效应; 导电机制

中图分类号: O484 文献标识码: A

Resistive Switching Effect and Dielectric Property of Epitaxial BiFeO₃ Thin Films by Off-axis Magnetron Sputtering

SONG Jian-Min^{1,2}, DAI Xiu-Hong¹, LIANG Jie-Tong¹, ZHAO Lei¹,
ZHOU Yang¹, GE Da-Yong¹, MENG Xu-Dong³, LIU Bao-Ting¹

(1. College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. College of Science, Agriculture University of Hebei, Baoding 071001, China; 3. College of Science, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: The Pt/BiFeO₃/La_{0.5}Sr_{0.5}CoO₃/SrTiO₃(Pt/BFO/LSCO/STO) heterostructures were fabricated on (001) SrTiO₃ substrate by off-axis RF magnetron sputtering, on which epitaxial BiFeO₃ (BFO) thin films were successfully grown. The BFO thin film shows good crystal quality with (001) epitaxial growth as confirmed by the atomic force microscope (AFM) and X-ray diffraction (XRD). Pt/BFO/LSCO capacitor exhibits a saturated butterfly loop with tuning rate of 14.1% and dielectric loss of 0.19 at 5 V driving voltage. Moreover, the resistance changes from high value to low value with positive voltage 0→5→0 V and negative voltage 0→-5→0 V, which displays switch behavior of ferroelectric diode resistance-change. Based on the $I-V$ fitting curves, the resistance change mechanism fits the space charge limited current trap level when 0→5→0→-5 V and the interface limit F-N tunneling mechanism as -5→0 V, respectively.

Key words: BiFeO₃ thin films; dielectric constant; resistive effect; conduction mechanism

收稿日期: 2017-12-20; 收到修改稿日期: 2018-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(11374086, 11474174); 河北省自然科学基金(E2014201188, E2014201063, A2018201168); 河北省教育厅基金(2016058); 河北农业大学理工基金(ZD20160614)

National Natural Science Foundation of China (11374086, 11474174); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2014201188, E2014201063, A2018201168); Foundation of Education Bureau of Hebei Province (2016058); Science and Technology Fund of Hebei Agriculture University (ZD 20160614)

作者简介: 宋建民(1976-), 男, 博士研究生. E-mail: sjm@hebau.edu.cn

通讯作者: 刘保亭, 教授. E-mail: btliu@hbu.edu.cn

电致阻变效应随机存储器是极具前景的新一代非易失性存储器,具有高存储密度、低功耗、读写速度快和结构简单等优点,引起了广泛关注^[1-3]。在许多钙钛矿结构氧化物如 $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BST)、 $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (PZT)和 BiFeO_3 (BFO)中均发现了阻变效应^[4-6]。铁酸铋 BiFeO_3 (BFO)是一种室温下兼具铁电性和铁磁性的多铁性材料,且具有较窄的禁带宽度(2.67 eV),为形成高低阻转变提供了更大的可能,因此 BFO 成为近年研究的热门阻变材料之一^[7-8]。

目前,国内外学者对新型非易失性 BFO 铁电阻变存储器进行了较为广泛而深入的研究。Li 课题组^[9]研究了 $\text{Metal}/\text{Bi}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{FeO}_3/\text{Pt}$ 结构的阻变特性,将阻变效应归因于导电细丝的形成与断裂。Zhu 等^[10]将 $\text{Pt}/\text{BFO}/\text{SrRuO}_3$ 异质结中的阻变现象归因于陷阱能级对电荷的俘获或释放。Park 课题组^[11]利用极化调节 Schottky 势垒理论解释了 BFO 薄膜的阻变现象。Yamada 等^[12]将 BFO 薄膜的阻变效应归因于异质结的铁电隧穿。总而言之, BFO 薄膜的阻变效应可归结为四种机制:陷阱电荷的捕获与脱陷,铁电隧穿,导电细丝的形成与断裂,极化调节 Schottky 势垒。各种机制研究表明电极/氧化物界面在阻变反转中起着至关重要的作用。不同接触电极和不同界面都会使阻变特性不尽相同。然而,根据器件表现的阻变特性的不同,其主导机制仍然未形成统一论。此外,阻变存储器通常采用(上电极/介质/底电极/基片)薄膜异质结构架结构^[13],可见,阻变介质材料、电极材料、薄膜取向及制备工艺也是影响阻变存储器性能的因素。而在电极和介质层的制备过程中,薄膜的控制生长是最关键的环节。目前,制备 BFO 薄膜的方法主要包括溶胶-凝胶法^[14]、脉冲激光沉积法(PLD)^[15]和磁控溅射法(MS)^[16]等。磁控溅射法具有溅射工艺重复性好、薄膜质量高、与基片结合较好、膜厚可控等诸多优点。然而,此方法沉积速率相对较低,偏轴磁控溅射技术(OMS)恰好可以弥补此缺点,提高溅射产额,并且可以有效减少电子的二次溅射,使沉积出来的薄膜层具有非常好的均匀性和致密性^[17-18]。因此 OMS 已成为沉积高质量 BFO 薄膜及其它氧化物薄膜的主流工艺之一。

截至目前,虽然一些科研人员已对 BFO 薄膜阻变效应进行了诸多研究,但是在(001)STO 衬底上,以 LSCO 作为底电极, Pt 作为上电极,系统研究外延 BFO 薄膜的微观结构、介电性能和铁电阻变效应的导电机理未见报道。本工作采用偏轴磁控溅射法,在(001)STO 衬底上,制备了 $\text{Pt}/\text{BFO}/\text{LSCO}$ 异质结

阻变器件,研究了 5 V 电压作用下外延 BFO 薄膜的介电性能及其阻变效应的产生机制。

1 实验方法

1.1 样品制备

采用射频磁控溅射法制备了 $\text{Pt}/\text{BFO}/\text{LSCO}/\text{STO}$ 异质结,具体制备步骤如下:

(1)基片准备

将钛酸锶(001) SrTiO_3 单晶基片先后放入高纯丙酮和无水乙醇中,利用超声波清洗 10 min,以此去除基片表面的污染,然后迅速将基片放入磁控溅射实验仪的真空腔中。

(2)偏轴射频磁控溅射法制备 LSCO 薄膜

利用机械泵和分子泵将放有基片的磁控溅射仪腔体中的内背底真空度抽至 2.0×10^{-4} Pa 以下;打开流量计和进气阀使腔体充入高纯氩气和氧气,调节流量计设置流量为 100 sccm, $\text{Ar}:\text{O}_2$ 比例为 3:1;调节闸板阀,使腔体中压强保持在 1.4 Pa;调节射频功率旋钮,功率为 50 W;保持靶衬间距为 55 mm,且成 45° 角度,沉积温度保持为 550°C ;为了去除靶材表面的污染物,高纯(99.99%)LSCO 靶材预溅射 20 min,正式溅射 30 min, STO 基片上外延生长厚度约为 40 nm LSCO 薄膜。

(3)偏轴射频磁控溅射法制备 BFO 薄膜

利用与 LSCO 薄膜相同的沉积设备,在 LSCO/STO 异质结上外延生长约 220 nm 厚的 BFO 薄膜。为了避免 Bi 的挥发造成 BFO 薄膜偏析,采用 Bi 过量 10mol%的 $\text{Bi}_{1.1}\text{FeO}_3$ 靶材。磁控溅射沉积条件如下:沉积温度为 625°C ;腔体压强为 2 Pa;气体流量为 100 sccm; $\text{Ar}:\text{O}_2$ 比例为 3:1;功率为 50 W;溅射时间为 4 h。

(4)磁控溅射法在 $\text{BFO}/\text{LSCO}/\text{STO}$ 异质结上生长 Pt 电极

利用掩膜技术在异质结 $\text{BFO}/\text{LSCO}/\text{STO}$ 上生长 Pt 电极,其面积为 $7.85 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$,然后将样品放入快速退火炉中,在 550°C 氧气气氛中退火 1 min。

1.2 样品性能表征

采用 AFM(Bruker)原子力显微镜观察 BFO 薄膜表面形貌。采用丹东 TD-3700 型 X 射线衍射仪($\text{Cu K}\alpha$ 辐射,管压为 30 kV,电流为 20 mA)对样品进行相结构分析, 2θ 扫描范围 $20^\circ \sim 50^\circ$,步长 0.02° 。采用 AgilentE4980 LCR 介电测试仪测试样品的介电性能。采用 Kiethley2602 多功能数字表对 $\text{Pt}/\text{BFO}/\text{LSCO}$ 异质结进行 $I-V$ 测试。

2 结果与讨论

2.1 BFO/LSCO/STO 异质结微结构表征

图 1(a)为 BFO 薄膜的 AFM 表面形貌图, AFM 的扫描模式为接触模式。由图 1(a)可以看出, 在 LSCO/STO 异质结上外延生长的 BFO 薄膜结构致密, 具有层状的表面和均匀细小的晶粒, 表面平均粗糙度(RMS)仅为 0.775 nm, 表明 BFO 薄膜结晶质量较高。为了分析制备的 BFO 薄膜外延结构, 对 BFO/LSCO/STO 异质结进行了 θ - 2θ 的 XRD 图谱扫描, 如图 1(b)所示。由图 1(b)可以看出, 衍射角 2θ 在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 扫描范围内仅出现了 LSCO 和 BFO 薄膜的 (001) 和 (002) 两个特征峰, 且与基底 STO (001) 晶向相同, 表明在 LSCO 底电极上实现了 BFO 薄膜的外延生长。(001) BFO 峰较小的半宽高为 0.259, 从另一个层面说明 BFO 薄膜具有良好的结晶质量。为了进一步确定 BFO 薄膜的外延性, 通过 XRD 对 BFO 薄膜的 (110) 面进行了 ϕ 扫描, 如图 1(b)插图所示, 图谱中仅有四个等角相距为 90° 的尖锐衍射峰, 说明 BFO 薄膜是以 $[100]_{\text{BFO}}/[100]_{\text{LSCO/STO}}$ 的取向方式异质外延生长, BFO 薄膜表面与 LSCO/STO 表面呈现为四重对称性匹配。

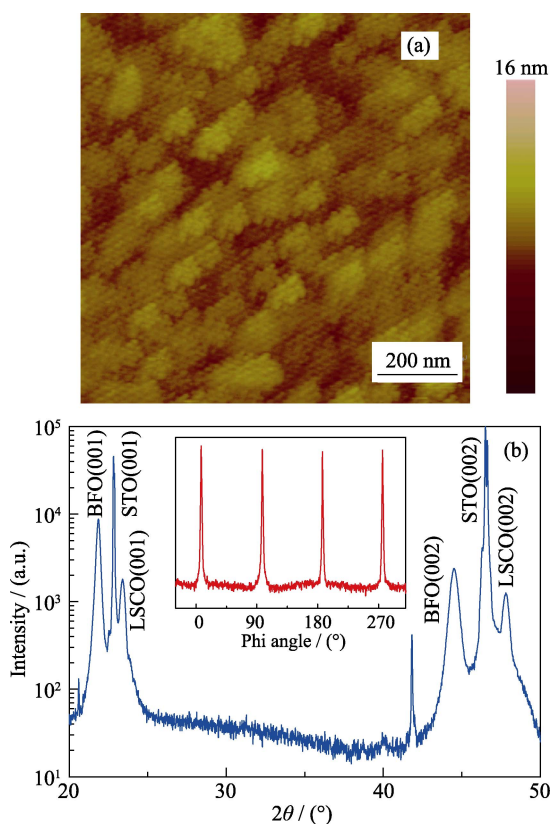


图 1 (a) BFO 薄膜的 AFM 图; (b) BFO/LSCO/STO 异质结的 X 射线衍射图谱

Fig. 1 (a) AFM image of BFO thin film and (b) XRD pattern of BFO/LSCO/STO heterostructures

2.2 Pt/BFO/LSCO/STO 异质结的介电性能

介电常数和介电损耗是表征电容器介电性能的两个重要参数。图 2(a)为 Pt/BFO/LSCO 电容器介电常数和介电损耗随频率的变化曲线, 由图可以看出, 频率低于 1 MHz 时, 介电常数随频率的增大而成线性减小, 而介电损耗变化不大, 保持在 0.12; 当频率大于 1 MHz 时, 介电常数下降较快, 且介电损耗开始增大。文献报道铁电材料的介电性能与异质结界面效应和极化机制相关^[19-20], 介电材料的极化机制可以归结为四种: 电子极化、离子极化、偶极子极化和空间电荷极化。频率较低时, 由于 Pt/BFO/LSCO 电容器上电极 Pt 易生成氧化层, 等同于电容器串联了一个电阻, 从而导致介电常数减小, 介电损耗影响不大。另外, 低频率时, 极子极化翻转可以与外加信号频率同步, 对介电性能影响小, 表明低频率时界面电阻效应为主导作用。当测试频率大于 1 MHz 时, 随着频率的升高, 某些极子的极化跟不上频率的变化, 例如离子比电子对电场的响应慢, 而产生极化弛豫, 此时, 电阻效应和极子极化弛豫效应共

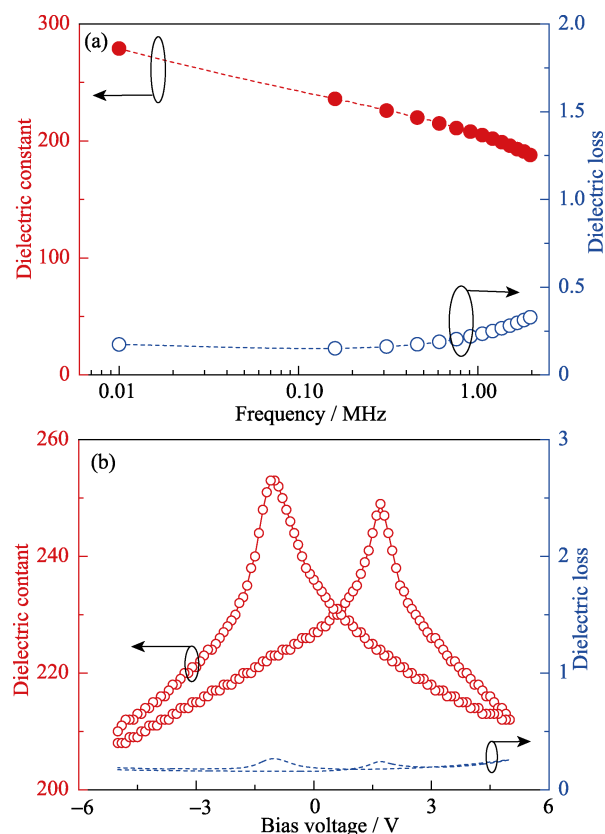


图 2 (a) Pt/BFO/LSCO 异质结中 BFO 薄膜的介电频谱; (b) Pt/BFO/LSCO 异质结中 BFO 薄膜的介电常数和介电损耗随电压的变化曲线

Fig. 2 (a) Frequency dependence of dielectric constant and dielectric loss of BFO thin film in Pt/BFO/LSCO heterostructures, and (b) voltage dependence of dielectric constant and dielectric loss of BFO thin film in Pt/BFO/LSCO heterostructures

同作用于 BFO 薄膜, 且极化弛豫效应起主导作用, 从而造成介电常数和介电损耗变化较快。

图 2(b) 为 Pt/BFO/LSCO 电容器的相对介电常数和介电损耗随电压的变化曲线, 测试采用循环扫描的方式 $-5 \rightarrow 5 \rightarrow -5$ V, 测试频率 1 MHz。由图 2(b) 可以看出, 介电常数与电压的关系呈现典型的饱和蝶形曲线, 表明 BFO 薄膜具有铁电性能和极化反转特性。在正负矫顽电压分别为 1.7 V 和 -1.1 V 时, 介电常数分别为 249 和 253, 不具有对称性, 这是由于不同的 Pt/BFO 和 BFO/LSCO 界面形成了不同的界面势垒造成的。在实际应用中, 人们希望得到高调谐率低损耗的薄膜, 由图 2(b) 可以得出, 在 5 V 电压作用下, Pt/BFO/LSCO 电容器的调谐率和介电损耗分别为 14.1% 和 0.19, 显示出优异的介电性能。

2.3 Pt/BFO/LSCO/STO 异质结的阻变机制

图 3 为 Pt/BFO/LSCO 异质结阻变存储器在 5 V 作用下的 I - V 曲线, 其中图 3 (a) 为线性坐标, 图 3 (b) 为对数坐标。由图 3(a) 可知, 在 $0 \rightarrow 5 \rightarrow 0$ V 的电压扫描中, Pt/BFO/LSCO 异质结阻变器件从高阻态变为低阻态, 而在随后的 $0 \rightarrow -5 \rightarrow 0$ V 的电压扫描中, 阻变器件再次从高阻态转变为低阻态, 未表现出零偏压时交叉形式的逆时针滞后回线(电致阻变现象)。

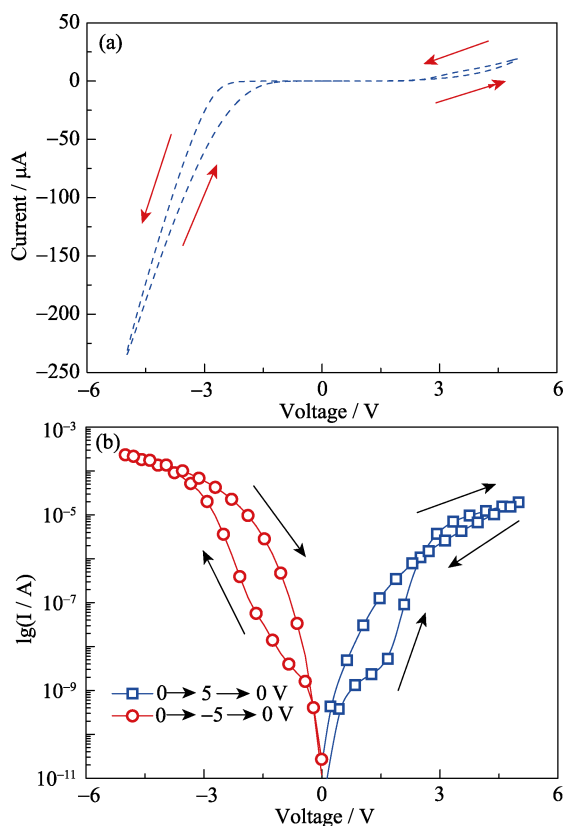


图 3 Pt/BFO/LSCO 异质结 I - V 曲线

Fig. 3 I - V curves of Pt/BFO/LSCO heterostructures
(a) Linear coordinate; (b) Logarithmic coordinate

象)。此种转变是典型的铁电二极管的阻变开关行为。另外, 在正向偏压一侧表现出明显的整流效应, 这是由于 Pt/BFO 和 BFO/LSCO 界面具有不同肖特基势垒造成的。Pt、BFO 和 LSCO 的功函数分别为 5.36、4.7 和 4.65 eV^[8, 21]。根据功函数数据分析可知, 上界面 Pt/BFO 肖特基势垒远高于 BFO/LSCO 界面。也就是说, 上界面处内建电场较强, 正电荷密度较大, 因此正电压作用下的漏电流要比负电压下小。对比图 3(a) 正负偏压下的曲线可以看出, 阻变窗口在正负偏压下表现出明显的非对称性, 在正向偏压下回滞窗口较小, 负向偏压下回滞窗口较大, 图 3(b) 的 $\lg I$ - V 曲线清晰地显示出这种差异。

为了探讨样品的导电机理, 对 $\lg I$ - $\lg V$ 曲线进行了线性拟合, 图 4(a) 和 (b) 分别是正向偏压和负向偏压下的拟合曲线。图 4(a) 曲线表明, $0 \rightarrow 5 \rightarrow 0$ V 正向电压作用下, 高阻态和低阻态均符合空间电荷限制电流(SCLC)理论^[22-24], 随着电压的增大, $\lg I$ 随 $\lg V$ 曲线依次遵循: 线性欧姆导电($S \sim 1$)、平方率导电($S \sim 2$)以及陷阱能级的填充和脱陷导电($S \gg 2$), 其中 S 表示曲线斜率, 这与其它文献报道的 Au/BFO/SrRuO₃ 异质结阻变机制相同^[25]。此外, 由图 4(b) 曲线可以看出, $0 \rightarrow -5$ V 负向电压作用下, Pt/BFO/LSCO 阻变器处于高阻态, 且具有与正向电压相同的阻变

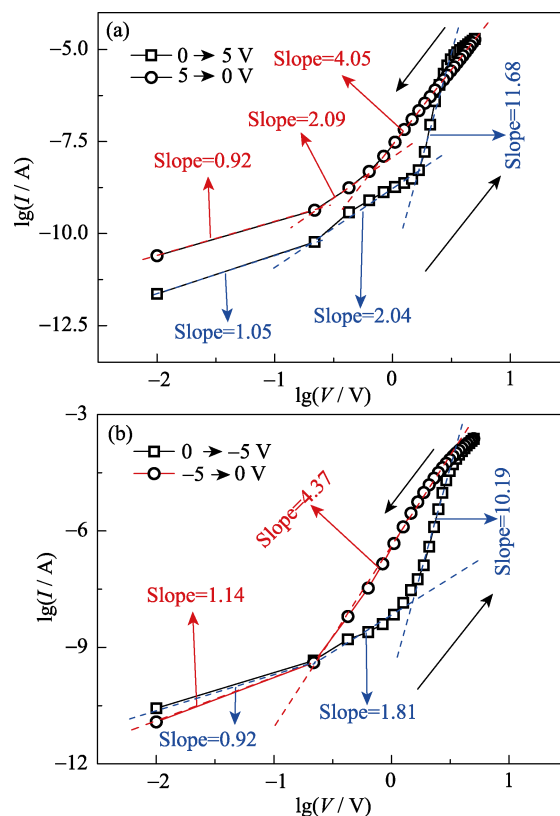


图 4 Pt/BFO/LSCO 异质结 $\lg I$ - $\lg V$ 拟合曲线

Fig. 4 $\lg I$ - $\lg V$ fitting curves of Pt/BFO/LSCO heterostructures

机制, 即空间电荷限制电流理论。然而, $-5 \rightarrow 0$ V 负向电压作用下, 低阻态在 SCLC 机制下也具有良好的线性度, 但高压时斜率($S \sim 4$)与 SCLC 理论中斜率($S \sim 2$)不符, 因此, 可以推断 $-5 \rightarrow 0$ V 作用下的低阻态为其它类型导电机制。图 5 为 Pt/BFO/LSCO 异质结在 $-5 \rightarrow 0$ V 作用下 $\ln(J/V^2)$ 与 V^{-1} 拟合曲线, J 表示电流密度, 由图 5 拟合曲线可以看出, 当偏压 $|V|$ 大于 0.8 V 时, $\ln(J/V^2)$ 与 V^{-1} 满足线性关系, 表明 Pt/BFO/LSCO 异质结在 $-5 \rightarrow 0$ V 作用下的低阻态由界面限制的 F-N 隧穿机制主导^[26]。

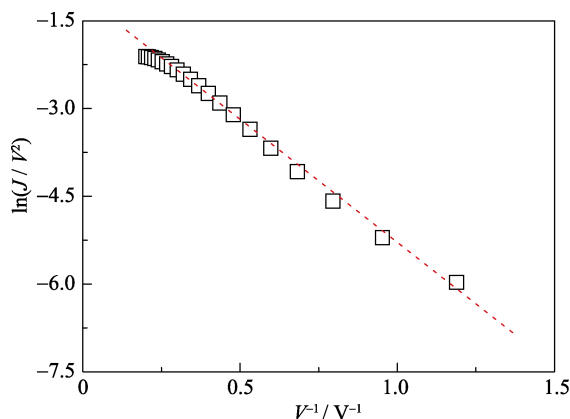


图 5 Pt/BFO/LSCO 异质结 $-5 \rightarrow 0$ V 电压下 $\ln(J/V^2)$ - V^{-1} 拟合曲线

Fig. 5 $\ln(J/V^2)$ - V^{-1} fitting curve of Pt/BFO/LSCO heterostructures at $-5 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V}$

3 结论

以 LSCO 作为底电极, 利用偏轴射频磁控溅射法在(001)STO 衬底上成功制备了 Pt/BFO/LSCO/STO 铁电电容器异质结。AFM 图和 X 射线衍射图谱表明, BFO 薄膜具有良好的结晶质量, 且沿(001)方向生长的外延结构。介电性能测试表明, 在 5 V 驱动电压下, 电容器呈现饱和的蝶形回线, 介电常数和调谐率分别为 253 和 14.1%。阻变机制研究发现, $0 \rightarrow 5 \rightarrow 0 \rightarrow -5 \text{ V}$ 时为空间电荷限制电流陷阱能级的填充和脱陷, $-5 \rightarrow 0 \text{ V}$ 时符合界面限制的 F-N 隧穿机制。此实验结果可为无铅铁酸铋电阻变存储器件的开发与研究提供数据参考。

参考文献:

- [1] WEN Z, LI C, WU D, *et al.* Ferroelectric-field-effect-enhanced electroresistance in metal/ferroelectric/semiconductor tunnel junctions. *Nature Mater.*, 2013, **12**(7): 617–621.
- [2] TIAN B B, LIU Y, CHEN L F, *et al.* Space-charge effect on electroresistance in metal-ferroelectric-metal capacitors. *Sci. Rep.*, 2015, **5**: 18297–1–9.
- [3] ABUWASIB M, LU H, LI T, *et al.* Scaling of electroresistance effect in fully integrated ferroelectric tunnel junctions. *Appl. Phys.*

- Lett.*, 2016, **108**(15): 152904–1–5.
- [4] SILVA J P B, KAMAKSHI K, SEKHAR K C, *et al.* Light-controlled resistive switching in laser-assisted annealed Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃ thin films. *Physica. Status. Solidi. A*, 2016, **213**(4): 1082–1087.
- [5] BARRIONUEVO D, ZHANG L, ORTEGA N, *et al.* Enhanced tunneling electroresistance in Pt/PZT/LSMO ferroelectric tunnel junctions in presence of magnetic field. *Integr. Ferroelectr.*, 2016, **174**(1): 174–185.
- [6] WANG C, JIN K J, XU Z T, *et al.* Switchable diode effect and ferroelectric resistive switching in epitaxial BiFeO₃ thin films. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(19): 192901–1–3.
- [7] XU H M, WANG H C, SHEN Y, *et al.* Photocatalytic and magnetic behaviors of BiFeO₃ thin films deposited on different substrates. *J. Appl. Phys.*, 2014, **116**(17): 174307–1–5.
- [8] MOUBAH R, ROUSSEAU O, COLSON D, *et al.* Photoelectric effects in single domain BiFeO₃ crystals. *Adv. Funct. Mater.*, 2012, **22**(22): 4814–4818.
- [9] LI M, ZHUGE F, ZHU X, *et al.* Nonvolatile resistive switching in metal/La-doped BiFeO₃/Pt sandwiches. *Nanotech.*, 2010, **21**(42): 425202–1–5.
- [10] ZHU H, ZHANG Y, JIANG A, *et al.* Effect of poling process on resistive switching in Au/BiFeO₃/SrRuO₃ structures. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, **109**(25): 252901–1–4.
- [11] HONG S, CHOI T, JEON J H, *et al.* Large resistive switching in ferroelectric BiFeO₃ nano-island based switchable diodes. *Adv. Mater.*, 2013, **25**(16): 2339–2343.
- [12] YAMADA H, GARCIA V, FUSIL S, *et al.* Giant electroresistance of super-tetragonal BiFeO₃-based ferroelectric tunnel junctions. *ACS Nano.*, 2013, **7**(6): 5385–5390.
- [13] LIN Y B, YAN Z B, LU X B, *et al.* Temperature-dependent and polarization-tuned resistive switching in Au/BiFeO₃/SrRuO₃ junctions. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, **104**(14): 143503–1–5.
- [14] WANG Y, JIANG Q H, HE H C, *et al.* Multiferroic BiFeO₃ thin films prepared via a simple Sol-Gel method. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(14): 142503–1–3.
- [15] TRASSIN M, CLARKSON J D, BOWDEN S R, *et al.* Interfacial coupling in multiferroic-ferromagnet heterostructures. *Phys. Rev. B*, 2013, **87**(13): 134426–1–6.
- [16] QI X, TSAI P C, CHEN Y C, *et al.* Ferroelectric properties and dielectric responses of multiferroic BiFeO₃ films grown by RF magnetron sputtering. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, **41**(23): 232001–1–5.
- [17] WU J, WANG J. BiFeO₃ thin films of (111)-orientation deposited on SrRuO₃ buffered Pt/TiO₂/SiO₂/Si(100) substrates. *Acta Mater.*, 2010, **58**(5): 1688–1697.
- [18] HAO Y L, LIU B T, PENG Z W, *et al.* Effect of retained temperature on the structure and property of BiFeO₃ thin film prepared by off-axis magnetron sputtering method. *J. Synth. Cryst.*, 2013, **42**(2): 246–250.
- [19] FAN X M, LIAN J S, GUO Z X, *et al.* Microstructure and photoluminescence properties of ZnO thin films grown by PLD on Si(111) substrates. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **239**(2): 176–181.
- [20] WANG C, CHEN Z, HU H, *et al.* Effect of the oxygen pressure on the microstructure and optical properties of ZnO films prepared by laser molecular beam epitaxy. *Phys. B*, 2009, **404**(21): 4075–4082.
- [21] NAGARAJ B, AGGARWAL S, RAMESH R. Influence of contact electrodes on leakage characteristics in ferroelectric thin films. *J. Appl. Phys.*, 2001, **90**(1): 375–382.
- [22] SHANG D S, WANG Q, CHEN L D, *et al.* Effect of carrier trapping on the hysteretic current-voltage characteristics in Ag/La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃/Pt heterostructures. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(24): 245427–1–7.
- [23] WANG S Y, CHENG B L, WANG C, *et al.* Reduction of leakage current by Co doping in Pt/Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃/Nb-SrTiO₃ capacitor. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(20): 4116–4118.
- [24] CHEN X, WU G, JIANG P, *et al.* Colossal resistance switching effect in Pt/spinel-MgZnO/Pt devices for nonvolatile memory applications. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(3): 033501–1–3.
- [25] ZHU H, ZHANG Y Q, WANG P F, *et al.* Resistive switching effect and conduction mechanism of BiFeO₃ thin films. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2017, **45**(4): 467–471.
- [26] EBRAHIMPOUR Z, MANSOUR N. Annealing effects on electrical behavior of gold nanoparticle film: conversion of ohmic to non-ohmic conductivity. *Appl. Surf. Sci.*, 2017, **394**: 240–247.