

## 残余应力对 $\text{SrRuO}_3$ 薄膜磁学及电输运性能的影响

朱明康<sup>1,2</sup>, 董显林<sup>2</sup>, 陈莹<sup>2</sup>, 丁国际<sup>1</sup>, 王根水<sup>2</sup>

(1. 上海大学 环境与化学工程学院, 上海 200436; 2. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

**摘 要:** 采用射频磁控溅射法在单晶  $\text{SrTiO}_3$  (STO) 衬底和硅(Si)衬底上制备出不同取向的  $\text{SrRuO}_3$  (SRO) 薄膜, 对薄膜的残余应力进行了分析, 并研究了应力对不同取向 SRO 薄膜磁学性能与电输运特性的影响。根据 X 射线衍射(XRD)结果分析可知, Si 基 SRO 薄膜为多晶单轴取向薄膜, 且应力来源主要为热失配拉应力; STO 基 SRO 薄膜为外延薄膜, 其应力主要为热失配压应力和外延压应力; 磁学性能测试表明, (001)取向 SRO 薄膜比(110)取向薄膜拥有更高的居里温度  $T_C$ ; 压应力提高了(001)取向 SRO 薄膜的  $T_C$ , 却降低了(110)取向薄膜的  $T_C$ 。电阻性能测试表明, 对于在同种类型衬底上沉积的 SRO 薄膜, (001)取向的薄膜的剩余表面电阻比( $RRR$ )高于(110)取向的薄膜。另外, 拉应力引起了薄膜微结构的无序度增加, 弱化了表面电阻率的温度依赖性, 提高了金属绝缘体转变温度( $T_{MI}$ )。

**关 键 词:** 钌酸锶; 取向; 残余应力; 磁学性能; 电输运特性

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

## Effect of Residual Stress on Magnetic and Electrical Transport Properties in $\text{SrRuO}_3$ Thin Films

ZHU Ming-Kang<sup>1,2</sup>, DONG Xian-Lin<sup>2</sup>, CHEN Yin<sup>2</sup>, DING Guo-Ji<sup>1</sup>, WANG Gen-Shui<sup>2</sup>

(1. Shanghai University, School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai 200436, China; 2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** A series of  $\text{SrRuO}_3$  (SRO) thin films with preferential orientations were grown on  $\text{SrTiO}_3$  (STO) and Si substrates respectively by radio frequency (RF) magnetron sputtering technique. XRD results show that STO-based SRO thin films are epitaxial which differ from the one-axis oriented Si-based films. Residual stress type of the deposited films and effect of the stress on magnetic and electrical transport properties were systematically analyzed and summarized. STO-based SRO films suffer from compressive stress due to the lattice and thermal mismatch, while the Si-based films are subjected to tensile stress which is only derived from the thermal mismatch. The compressive stress promotes the Curie temperature ( $T_C$ ) of (001)-oriented SRO films, but reduces the  $T_C$  of (110)-oriented SRO films, which may be due to the different states of rotation and tilt of  $\text{RuO}_6$  octahedron. Besides, the (001)-oriented SRO films possess higher  $T_C$  than the (110)-oriented SRO films all along. The results of temperature *versus* resistivity measurements reveal that residual resistivity ratio ( $RRR$ ) of (001)-oriented SRO films is higher than that of (110)-oriented SRO films which deposited on the same substrate. Moreover, the temperature of metal-insulator transition ( $T_{MI}$ ) increases from 16 K to 32 K while the temperature dependence of resistivity is suppressed by the tensile stress.

**Key words:**  $\text{SrRuO}_3$ ; orientation; residual stress; magnetic properties; transport properties

收稿日期: 2016-04-28; 收到修改稿日期: 2012-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(61376086); 国家重点基础研究发展计划(2012CB619406)

National Natural Science Foundation of China (61376086); National Important Basic Research Project (2012CB619406)

作者简介: 朱明康(1990-), 男, 硕士研究生. E-mail: mingkangzhu@163.com

通讯作者: 王根水, 研究员. E-mail: genshuiwang@mail.sic.ac.cn

$\text{SrRuO}_3$  (SRO) 是 4d 过渡金属氧化物中唯一既具有铁磁性又具有金属导电特性的物质, 其结构为正交畸变钙钛矿结构( $a=0.557$  nm,  $b=0.553$  nm,  $c=0.784$  nm), 也可看作是轻微扭曲的立方结构( $a=0.393$  nm)<sup>[1]</sup>。室温下, SRO 表现为顺磁性, 但当温度低于 160 K, 则表现出巡游铁磁性<sup>[2]</sup>。铁磁性的 SRO 垂直剩余磁化强度大, 因而可在磁性隧道结和磁存储器件中得到应用<sup>[3]</sup>。此外, SRO 还具有较高的电导率、较好的化学和热稳定性, 并且其钙钛矿结构与目前广泛研究的铁电材料( $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ )晶格匹配良好<sup>[4-6]</sup>。因此 SRO 成为铁电薄膜器件理想的电极材料, 而广泛应用于铁电随机存储器(FeRAM)、微电子机械系统(MEMS)以及非制冷红外焦平面阵列等器件中<sup>[7-8]</sup>。

针对 SRO 薄膜的研究已开展多年, 研究表明薄膜磁学及电学性能会受到表面形貌、生长温度、薄膜厚度、氧空位和衬底应力等因素的影响<sup>[9-12]</sup>。人们一般选择  $\text{SrTiO}_3$ 、 $\text{NdGaO}_3$ 、 $\text{SmScO}_3$ 、 $\text{KTaO}_3$ <sup>[13-15]</sup> 等单晶氧化物衬底, 生长外延结构的 SRO 薄膜, 重点研究外延应力对 SRO 薄膜的影响。而对于广泛应用于半导体集成电路中的硅(Si)衬底上生长的 SRO 薄膜的应力及性能的研究则鲜见报道。本工作采用射频磁控溅射法, 分别在  $\text{SrTiO}_3$  (STO) 单晶衬底和 Si 衬底上制备了不同取向的 SRO 薄膜, 对其应力状态进行了分析, 并系统研究了残余应力对 SRO 薄膜磁学及电输运特性的影响。

## 1 实验方法

首先, 采用直流磁控溅射法在二氧化硅/硅( $\text{SiO}_2/\text{Si}$ )衬底上制备了一层具有高度(001)择优取向的  $\text{LaNiO}_3$  (LNO)薄膜作为缓冲层来诱导  $\text{SrRuO}_3$  薄膜的取向生长。接着, 采用射频磁控溅射法分别在 (100) $\text{SrTiO}_3$  (STO)、(110) $\text{SrTiO}_3$ 、 $\text{SiO}_2/\text{Si}$  和 LNO/ $\text{SiO}_2/\text{Si}$  衬底上制备厚度均为 240 nm 的 SRO 薄膜。通过传统固相法制备溅射用靶材, SRO 靶材为成分符合化学计量比的  $\text{SrRuO}_3$  陶瓷。原料为  $\text{SrCO}_3$  和  $\text{RuO}_x$  ( $\text{Ru} \geq 75.0\%$ )。靶材烧结条件为 1500℃ 保温 12 h, 升降温速率均为 1℃/min。沉积薄膜之前, 首先将衬底材料进行清洗, 依次在丙酮、酒精等有机溶剂中超声清洗并用去离子水冲洗, 以除去衬底表面的灰尘和有机杂质。LNO 和 SRO 薄膜的溅射工艺如表 1 所示。溅射完毕后, 腔体中通入氧气, 关闭衬底加热装置使之自然冷却至室温。

采用日本理学公司的高分辨 X 射线衍射仪(HDXRD, SmartLab)对薄膜的结构进行分析( $\theta$ - $2\theta$  模

表 1 LNO 薄膜和 SRO 薄膜的溅射工艺

Table1 Sputtering parameters of LNO and SRO films

Sputtering parameters	LNO	SRO
Base pressure /Pa	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
Deposition pressure/Pa	3	10
Power/W	80	80
$\text{O}_2/(\text{Ar}+\text{O}_2)$	20%	20%
Substrate temperature/℃	450	600

式和  $\phi$ -scan 模式)。采用综合物性测试系统(PPMS-9, Quantum Design, San Diego, CA)测量样品磁化强度和表面电阻率随温度的变化特性(温度范围为 5~300 K), 其中磁性测量过程中采用的是有场冷却升温测量的方式(测试磁场方向与样品表面垂直), 表面电阻率则通过标准四探针法获得。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结构特性

图 1 所示为不同衬底上制备的 SRO 薄膜的 X 射线衍射(XRD)图谱, 从图中可以看出所有 SRO 薄膜均为纯钙钛矿相, 并无杂相出现。(100)  $\text{SrTiO}_3$  和 LNO/ $\text{SiO}_2/\text{Si}$

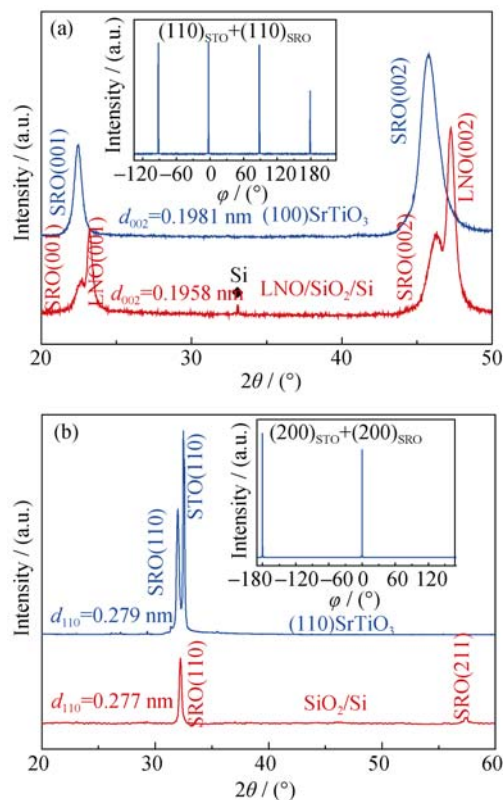


图 1 不同衬底上沉积的 SRO 薄膜的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of  $\text{SrRuO}_3$  thin films deposited on different substrates

(a) (100) $\text{SrTiO}_3$  and LNO/ $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ; (b) (110)  $\text{SrTiO}_3$  and  $\text{SiO}_2/\text{Si}$

Si 上生长的 SRO 薄膜具有高度的(001)择优取向, 而(110)SrTiO<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub>/Si 上生长的 SRO 薄膜则具有高度的(110)取向。同时, 还可发现硅基 SRO 薄膜的衍射峰相对 STO 基 SRO 薄膜发生了明显右移, 说明薄膜受到不同应力作用。根据 XRD 衍射峰的位置, 利用布拉格公式可以计算出薄膜的面外晶格常数。对于硅基(001)SRO 薄膜, 其面外晶格常数  $c=0.3916$  nm; 而 STO 基(001)SRO 薄膜的面外晶格常数  $c=0.3961$  nm。同样地, 对于(110)取向的 SRO 薄膜, 硅基薄膜的<110>面的晶面间距  $d_{110}=0.277$  nm, 而 STO 基薄膜的<110>面的晶面间距  $d_{110}=0.279$  nm。另外, 根据  $\varphi$ -scan 的结果可以确定 STO 基 SRO 薄膜为外延结构; 而 Si 基 SRO 薄膜, 虽然具有面外方向上的高度取向, 却由于晶格不匹配, 难以实现外延生长, 形成的是多晶的单轴取向薄膜。

## 2.2 应力分析

根据由 XRD 结果得到的面外晶格常数值  $c_{\#}$  以及 SRO 块材的晶格常数  $c_0=0.393$  nm, 结合面内应变  $\varepsilon$  的公式: #

$$\varepsilon=(c-c_0)/c_0 \times 100\%$$

计算出不同 SRO 薄膜的应变值, 如表 2 所示。从表 2 可以看出, STO 基薄膜的  $\varepsilon>0$ , 说明薄膜受到压应力的作用; 而 Si 基薄膜的  $\varepsilon<0$ , 说明薄膜受到拉应力的作用。并且, Si 基上不同取向的 SRO 薄膜的  $\varepsilon$  值较为接近, 而 STO 基上不同取向的 SRO 薄膜的  $\varepsilon$  值则差距较大, 这可能是因为前者是单轴取向薄膜, 面内方向上无择优取向, 各向异性较弱; 而后者为外延薄膜, 在面内方向上具有较强的各向异性。

为了进一步分析不同 SRO 薄膜的应力来源, 我们绘制了如图 2 所示的示意图。一般来说, SRO 薄

表 2 不同 SRO 薄膜的晶格常数和应变值

Table 2 Lattice parameters and strain of different SRO films

SRO	$c/\text{nm}$	$\varepsilon/\%$
(001) on STO	0.3962	0.814
(001) on Si	0.3916	-0.356
(110) on STO	0.3945	0.383
(110) on Si	0.3917	-0.336

膜的应力/应变主要来自于三个方面: (1)由于薄膜内部缺陷, 如氧空位导致的应力; (2)外延薄膜存在晶格失配导致的外延应力; (3)由于衬底与薄膜的热膨胀系数不匹配导致的热应力。具体到实验制备的 SRO 薄膜, 由于所有薄膜采用相同的溅射工艺, 因此薄膜的缺陷引起的内应力可不考虑。对于硅基 SRO 薄膜而言, 因其是多晶单轴取向薄膜, 不是外延薄膜, 所以外延应力可以忽略, 只考虑热应力对薄膜的影响。根据相关文献<sup>[16-18]</sup>, STO 的热膨胀系数约为  $11 \times 10^{-6}/\text{K}$ , SiO<sub>2</sub>/Si 的热膨胀系数约为  $(2.6 \sim 4) \times 10^{-6}/\text{K}$ , 而 SRO 自身的热膨胀系数约为  $10.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。因此, Si 基 SRO 薄膜只受到热应力作用。STO 衬底材料的晶格常数为 0.390 nm, 这与 SRO 块体材料的晶格常数(0.393 nm)非常相近, 其晶格失配率为-0.64%。所以对于 STO 基 SRO 薄膜而言, 除了受到热应力作用外, 由于其是外延薄膜, 还会受到外延压应力的作用。

## 2.3 磁学特性

图 3(a)所示为在外加磁场 0.5 T 情况下(磁场方向垂直于样品表面), SRO 薄膜的磁化强度与温度的关系, 从图中可以发现, 无论衬底类型, (001)取向的薄膜的磁化强度在较宽的温度范围内均大于(110)取向的薄膜, 这说明前者的易磁化方向更接近面外方向, 即所加磁场方向。为了深入了解 SRO 薄膜的

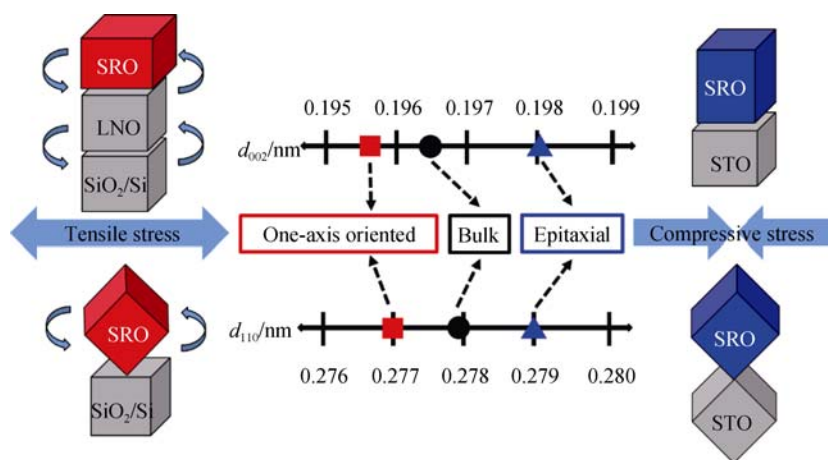


图 2 不同衬底上生长的 SRO 薄膜的应力示意图

Fig. 2 Schematic illustration of stress state for different oriented SRO films on various substrates



磁性能, 对低温下归一化的磁化强度  $M(T)/M(0)$  随  $T^{3/2}$  的变化关系进行了分析, 如图 2(a) 中的插图所示。可以发现  $M(T)/M(0)$  与  $T^{3/2}$  呈线性关系, 符合 Bloch 定律  $M(T)/M(0)=1-AT^{3/2}$  ( $A$  为自旋波常数), 这说明薄膜中自旋波激发占据主导。根据上述得到的自旋波常数  $A$ , 并结合公式:  $A=(0.0587/S)(k_B/2JS)^{3/2}$  ( $S$  为  $\text{Ru}^{4+}$  的总自旋数, 这里  $S$  取 1<sup>[19]</sup>;  $k_B$  为玻耳兹曼常数), 可以计算出表征相邻  $\text{Ru}^{4+}$  离子交换作用的  $J$  值。(001)取向的 STO 基和 Si 基薄膜的  $J$  值分别为  $11.99k_B \text{ K}$  和  $10.24k_B \text{ K}$ ; (110)取向的 STO 基和 Si 基薄膜的  $J$  值分别为  $8.53k_B \text{ K}$  和  $9.29k_B \text{ K}$ 。

图 3(b) 是磁化强度  $M$  对温度  $T$  的求导 ( $dM/dT$ ) 随温度的变化关系图,  $dM/dT$  最小值对应的温度即为该薄膜的居里温度 ( $T_C$ )。从图中可以看出, (001) 取向的 STO 基薄膜的  $T_C=81 \text{ K}$ , 高于 (001) 的 Si 基薄膜的  $T_C=78 \text{ K}$ ; 但是对于 (110) 取向的薄膜来说, STO 基薄膜的  $T_C=64 \text{ K}$ , 低于 Si 基薄膜的  $T_C=66 \text{ K}$ 。结合前文应力分析的结果可知, 对于 (001) 取向的薄膜, 压应力有助于提高  $T_C$ ; 而对 (110) 取向的薄膜而

言, 压应力却降低了  $T_C$ 。虽然处于相同的应力状态下, 但是由于薄膜取向的差异, 不同 SRO 薄膜中  $\text{RuO}_6$  八面体的旋转和倾斜情况不一样, 这就造成 Ru-O 键长和键角的差别, 进而导致相邻的  $\text{Ru}^{4+}$  离子的交换作用不同, 引起了相同应力条件下不同取向薄膜的  $T_C$  变化趋势的差异<sup>[20]</sup>。

## 2.4 电输运特性

图 4(a) 所示为无外加磁场情况下 SRO 薄膜的归一化电阻率 ( $\rho(T)/\rho(5\text{K})$ ) 与温度 ( $T$ ) 的关系。通过归一化处理, 可以直观地获得不同 SRO 薄膜表面电阻率的温度依赖性。STO 基 (001) 和 (110) SRO 薄膜的剩余电阻比 ( $RRR=\rho(300\text{K})/\rho(5\text{K})$ ) 分别为 1.62 和 1.57; Si 基 (001) 和 (110) SRO 薄膜的  $RRR$  值分别为 1.33 和 1.27。可以看出, 无论 SRO 薄膜的取向如何, STO 基薄膜的表面电阻率均比 Si 基薄膜呈现出更强的温度依赖性, 即压应力能够提高电阻的温度依赖性, 而拉应力会弱化这种依赖性, 这与 Kan 等<sup>[21]</sup>报道的结论相一致。同时, 对于同一类型衬底上的薄膜而言, (001) 取向的薄膜的  $RRR$  值均略大于 (110) 薄膜。从图 4(a) 中还可以发现, 所有 SRO 薄膜均出现了

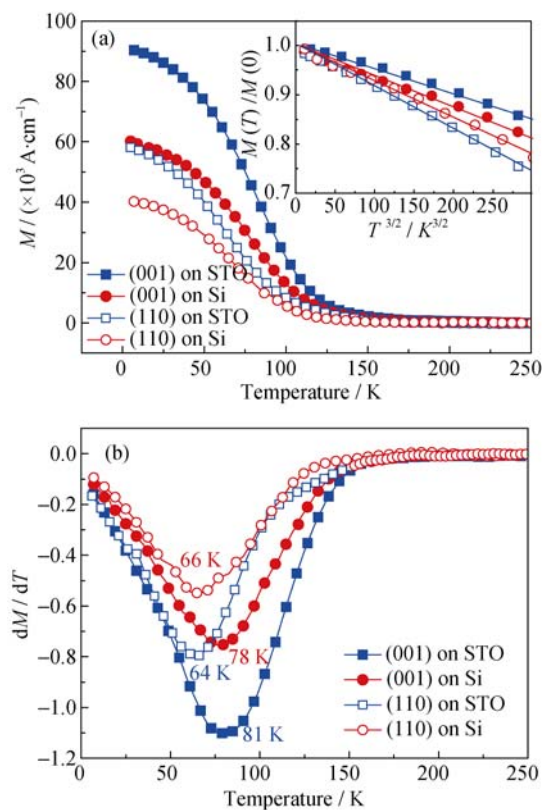


图 3 不同衬底上生长的不同取向的 SRO 薄膜的 (a) 磁化强度随温度的变化曲线和 (b) 磁化强度对温度的求导值随温度的变化曲线

Fig. 3 (a) Temperature versus magnetization under field cooling (FC) conditions and (b) the  $dM/dT$  vs temperature for different oriented SRO films on various substrates

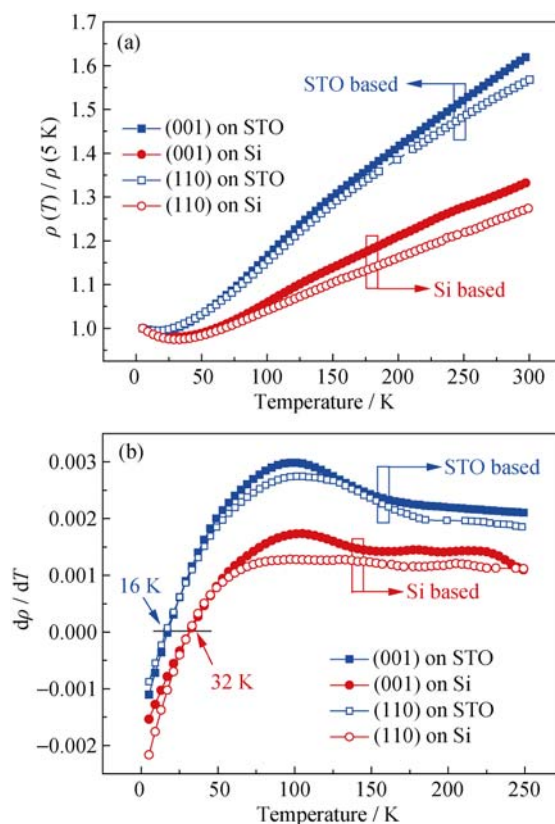


图 4 不同 SRO 薄膜的 (a) 归一化表面电阻率随温度的变化曲线和 (b) 表面电阻对温度的求导随温度的变化曲线

Fig. 4 (a) Temperature versus normalized resistivity and (b) the  $d\rho/dT$  values vs temperature for different oriented SRO films on various substrates

“金属-绝缘体相变”。薄膜电阻率随温度的上升而先下降后上升, 先后呈现出绝缘体和金属导电的特性。

图 4(b)所示为电阻率对温度的求导( $d\rho/dT$ )随温度的变化曲线。 $d\rho/dT=0$  处对应的温度, 即为金属绝缘体转变温度( $T_{MI}$ )。由图可知, (001)和(110)取向的 STO 基 SRO 薄膜有着相近的  $T_{MI}$ , 约为 32 K; 而两种取向的 Si 基 SRO 薄膜的  $T_{MI}$  值也较为相近, 约为 16 K, 低于 STO 基薄膜。根据 Kumar 等<sup>[22]</sup>提出的微观模型, SRO 薄膜金属-绝缘体转变的出现与薄膜微结构的失序有关。无序度越大, “局域化效应”越明显, 进而弱化了表面电阻率对温度的依赖性, 同时  $T_{MI}$  也会向高温移动。SRO 薄膜微观结构的无序度除了与应力有关外, 还与 STO 基薄膜以及 Si 基薄膜的晶体结构有关。前者是一种近似于单晶结构的外延薄膜, 而后者是一种只在面外方向上具有择优取向的多晶薄膜, 这种结构上的差异导致了不同衬底上 SRO 薄膜电阻的温度依赖性的差异。

### 3 结论

采用磁控溅射法在 STO 衬底和 Si 衬底上制备出不同取向的 SRO 薄膜, 分析了不同衬底上薄膜的应力状态, 并进一步研究了剩余应力对薄膜磁学及电输运特性的影响。

XRD 测试结果表明, 所有 SRO 薄膜均为典型的钙钛矿结构, 无杂相。(100)SrTiO<sub>3</sub>、(110) SrTiO<sub>3</sub> 衬底上生长的薄膜分别为(001)和(110)取向的外延薄膜, LNO/SiO<sub>2</sub>/Si 和 SiO<sub>2</sub>/Si 衬底上生长的薄膜分别为(001)和(110)取向的多晶单轴取向薄膜;

通过对 SRO 薄膜的应力分析发现, Si 基 SRO 薄膜受到拉应力作用, 其应力主要为热失配应力, STO 基薄膜受到压应力作用, 其应力除了热失配应力外, 还有外延应力;

通过对其磁学性能的研究表明, (001)取向薄膜比(110)取向薄膜拥有更高的居里温度  $T_C$ ; 压应力提高了(001)取向 SRO 薄膜的  $T_C$ , 却降低了(110)取向薄膜的  $T_C$ ;

对薄膜电输运性能的研究表明, 拉应力引起了薄膜微结构无序度的增加, 弱化了电阻的温度依赖性。

### 参考文献:

- [1] JONES C W, BATTLE P D, LIGHTGOOT P, *et al.* The structure of SrRuO<sub>3</sub> by time-of-flight neutron powder diffraction. *Acta Crystallographica Section C*, 1989, **45**(3): 365–367.
- [2] ALLEN P B, BERGER H, CHAUVET O, *et al.* Transport properties, thermodynamic properties, and electronic structure of SrRuO<sub>3</sub>. *Phys Rev B Condens Matter*, 1996, **53**(8): 4393–4398.
- [3] CHENG H, LIU Z, YAO K, Rectifying behavior in La<sub>2/3</sub>Sr<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub>/MgO/SrRuO<sub>3</sub> magnetic tunnel junctions, *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(17): 172107.
- [4] EOM C B, VANDOVER R B, PHILLIPS J M, *et al.* Fabrication and properties of epitaxial ferroelectric heterostructures with (SrRuO<sub>3</sub>) Isotropic Metallic Oxide Electrodes. *Applied Physics Letters*, 1993, **63**(18): 2570–2572.
- [5] TANG Z H, TANG M H, LV X S, *et al.* Enhanced magnetoelectric effect in La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub>/PbZr<sub>0.52</sub>Ti<sub>0.48</sub>O<sub>3</sub> multiferroic nanocomposite films with a SrRuO<sub>3</sub> buffer layer. *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**(16): 164106.
- [6] SINGAMANENI S R, PUNUGUPATI S, PRATER J T, *et al.* Ferroelectric and ferromagnetic properties in BaTiO<sub>3</sub> thin films on Si (100). *Journal of Applied Physics*, 2014, **116**(9): 094103.
- [7] GRIGERA S, PERRY R, SCHOFIELD A, *et al.* Magnetic field-tuned quantum criticality in the metallic ruthenate Sr<sub>3</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. *Science*, 2001, **294**(5541): 329–332.
- [8] HERRANZ G, SANCHEZ F, FONTCUBERTA J, *et al.* Domain structure of epitaxial SrRuO<sub>3</sub> thin films. *Physical Review B*, 2005, **71**(17): 174411.
- [9] HERRANZ G, MARTINEZ B, Fontcuberta J, *et al.* Enhanced electron-electron correlations in nanometric SrRuO<sub>3</sub> epitaxial films. *Physical Review B*, 2003, **67**(17): 174423.
- [10] SHEN X, QIU X B, SU D, *et al.* Thickness-dependent metal-insulator transition in epitaxial SrRuO<sub>3</sub> ultrathin films. *Journal of Applied Physics*, 2015, **117**(1): 015307.
- [11] LU W L, HE K H, SONG W D, *et al.* Effect of oxygen vacancies on the electronic structure and transport properties of SrRuO<sub>3</sub> thin films. *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**(17): 17E125.
- [12] WANG X W, WANG X, ZHANG Y Q, *et al.* Magnetic anisotropy and metal-insulator transition in SrRuO<sub>3</sub> thin films at different growth temperatures. *Journal of Applied Physics*, 2010, **107**(11): 113925.
- [13] PALAI R, HUHTINEN H, SCOTT J F, *et al.* Observation of spin-glass-like behavior in SrRuO<sub>3</sub> epitaxial thin films. *Physical Review B*, 2009, **79**(10): 104413.
- [14] ASO R, KAN D, FUJIYOSHI Y, *et al.* Strong dependence of oxygen octahedral distortions in SrRuO<sub>3</sub> films on types of substrate-induced epitaxial strain. *Crystal Growth & Design*, 2014, **14**(12): 6478–6485.
- [15] LU W L, SONG W D, HE K H, *et al.* The role of octahedral tilting in the structural phase transition and magnetic anisotropy in SrRuO<sub>3</sub> thin film. *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**(6): 064106.

- 063901.
- [16] NGUYEN M D, DEKKERS M, HOUWMAN E, *et al.* Misfit strain dependence of ferroelectric and piezoelectric properties of clamped (001) epitaxial  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$  thin films. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(25): 252904.
- [17] XU B, YE Y, Cross L E, Dielectric properties and field-induced phase switching of lead zirconate titanate stannate antiferroelectric thick films on silicon substrates. *Journal of Applied Physics*, 2000, **87**(5): 2507–2515.
- [18] YAMANAKA S, MAEKAWA T, MUTA H, *et al.* Thermophysical properties of  $\text{SrHfO}_3$  and  $\text{SrRuO}_3$ . *Journal of Solid State Chemistry*, 2004, **177**(10): 3484–3489.
- [19] KLEIN L, DODGE J, GEBALLE T, *et al.* Perpendicular magnetic anisotropy and strong magneto-optic properties of  $\text{SrRuO}_3$  epitaxial films. *Applied physics letters*, 1995, **66**(18): 2427–2429.
- [20] LU W, SONG W, YANG P, *et al.* Strain engineering of octahedral rotations and physical properties of  $\text{SrRuO}_3$  films. *Sci. Rep.*, 2015, **5**: 10245.
- [21] KAN D, ASO R, KURATA H, *et al.* Epitaxial strain effect in tetragonal  $\text{SrRuO}_3$  thin films. *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**(17): 173912.
- [22] KUMAR S, MAJUMDAR P. Singular effect of disorder on electronic transport in strongly coupled electron-phonon systems. *Physical Review Letters*, 2005, **94**(13): 136601.