

不同衬底对La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃薄膜物理性能的影响研究

张裕祥^{1,2}, 叶颖¹, 叶晴莹^{1,2}, 王可^{1,2}, 霍冠忠^{1,2}, 林文青¹, 陈水源^{1,2*}

¹福建师范大学物理与能源学院, 福建 福州

²福建省量子调控与新能源材料重点实验室, 福建 福州

Email: *sychen@fjnu.edu.cn

收稿日期: 2021年2月3日; 录用日期: 2021年2月18日; 发布日期: 2021年2月25日

摘要

本论文利用脉冲激光沉积法在普通玻璃、SrTiO₃(100)单晶衬底上分别制备得到La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃/SiO₂和La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃/SrTiO₃(100)薄膜, 研究衬底对La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃物理特性的影响。实验结果表明: 在普通玻璃衬底上制备得到纯相多晶LSMO薄膜, 在SrTiO₃(100)单晶衬底上制备得到具有外延取向生长的LSMO薄膜; 在磁性方面, La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃/SiO₂薄膜的居里温度(T_c)低于LSMO/SrTiO₃(100)薄膜。在T_c以下, LSMO/SiO₂薄膜的矫顽力和磁化磁强度均大于LSMO/SrTiO₃(100)薄膜; 在电性方面, 两个样品的电阻率温度曲线存在明显区别: LSMO/SiO₂薄膜存在两个转变点, 并且在整个测量温区(5~400 K)均表现出明显的磁电阻效应, 最大磁电阻值达到-98%; 对于LSMO/SrTiO₃(100)样品, 电阻率温度曲线中仅在高温区(350 K附近)存在一个转变点。且仅在M-I转变温度附近有明显的磁电阻现象, 最大磁电阻值为-53.12%。从以上研究结果可以看出, 不同衬底条件对LSMO薄膜的微结构有明显影响, 进而对其磁性、磁电阻特性产生调制作用。这一结果在钙钛矿锰氧化物复合结构材料物理特性调制研究以及在自旋电子器件中的应用研究具有很好的参考意义。

关键词

脉冲激光沉积, La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃薄膜, 衬底, 磁特性, 磁电阻

Effect of Different Substrates on Physics Properties of La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ Thin Films

Yuxiang Zhang^{1,2}, Ying Ye¹, Qingying Ye^{1,2}, Ke Wang^{1,2}, Guanzhong Huo^{1,2}, Wenqing Lin¹, Shuiyuan Chen^{1,2*}

¹College of Physics and Energy, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian

²Fujian Provincial Key Laboratory of Quantum Manipulation and New Energy Materials, Fuzhou Fujian

*通讯作者。

文章引用: 张裕祥, 叶颖, 叶晴莹, 王可, 霍冠忠, 林文青, 陈水源. 不同衬底对 La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ 薄膜物理性能的影响研究[J]. 材料科学, 2021, 11(2): 160-167. DOI: 10.12677/ms.2021.112021

Email: *sychen@fjnu.edu.cn

Received: Feb. 3rd, 2021; accepted: Feb. 18th, 2021; published: Feb. 25th, 2021

Abstract

In this paper, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{SiO}_2$ (abbreviated as LSMO/ SiO_2) and $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3(100)$ (abbreviated as LSMO/STO) thin films were prepared by pulsed laser deposition method. The experimental results show that the two thin films present very different magnetic properties. The LSMO/ SiO_2 film shows obvious magnetoresistance (MR) effect in the whole measurement temperature range (5 K~400 K), and the maximum MR value up to -98% is obtained. However, the MR of LSMO/STO samples is obvious only near the M-I transition temperature, and the maximum MR value is up to -53.12%. These results indicate that different substrates have significant effect on the magnetic and MR properties of the LSMO films. It has good reference significance for further research on the modulation research of physical properties of LSMO-based composites and its application in spintronic devices.

Keywords

Pulsed Laser Deposition, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ Thin Films, Substrates, Magnetic Properties, Magnetoresistance

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钙钛矿结构锰氧化物材料因其丰富的磁性、电子输运及其电、磁耦合等物理特性而得到人们的广泛研究。早在 1954 年, Volger 在 $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ 多晶样品中首次测量到了约 10% 的磁电阻效应[1]。而直到 1988 年, Baibich 等人在磁性多层膜发现了巨磁电阻效应(giant magnetoresistivity effect, GMR) [2]。特别是在 1993 年, Helholt 等人[3]在 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜样品中观测到了庞磁电阻效应(colossal magnetoresistivity effect, CMR), 比在磁性多层膜中得到的巨磁电阻效应大得多。由此, 人们对具有磁电阻效应的氧化物材料(如钙钛矿结构锰基氧化物 $\text{La}_{1-x}\text{M}_x\text{MnO}_3$ ($\text{M} = \text{Sr}, \text{Ca}, \text{Ba}$ 等))开展了更为广泛而深入的研究[4]-[9]。其中 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 体系由于拥有铁磁性, 较高的居里温度和高的自旋极化率, 以及具有新奇电子输运等优异特性而得到人们的极大关注[4] [10], 包括其中的基本物理特性研究以及其在自旋电子器件的应用研究。研究表明, 这一体系的磁性、电输运特性对微结构变化、应力等外界条件变化较为敏感[11]。为了得到这一问题更为详细的信息, 我们通过选择不同衬底材料, 利用脉冲激光沉积法制备得到不同微结构的 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜, 从实验上研究其中的磁性、电性和磁电阻特性的变化情况, 为后续开展此类材料在自旋电子、场效应及传感等领域的器件研究提供更丰富的实验基础。

2. 实验

在实验上, 我们通过脉冲激光沉积法, 分别在普通玻璃(SiO_2)、 $\text{SrTiO}_3(100)$ 单晶(简称为 STO)衬底上

制备得到 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (简称为 LSMO) 薄膜。具体实验过程如下。

2.1. $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 靶材制备

通过溶胶-凝胶法(sol-gel)制备 LSMO 靶材: 以六合水硝酸镧(>99.99%)、硝酸锶(>99.99%)及醋酸锰(>99.9%)为原材料, 取适量的去离子水为溶剂, 按照理论化学计量比称取且进行溶解, 形成 A 溶液; 同时以柠檬酸为材料溶解于适量的乙二醇为溶剂, 形成 B 溶液。将 B 溶液加入 A 溶液中, 并在 80℃ 的温度下水浴 120 mins, 形成凝胶; 将 LSMO 湿凝胶经过一系列步骤(陈化、干燥、研磨、去有机物、压靶及烧结)得到适用于 PLD 法制备薄膜的 LSMO 靶材。其中烧结温度和时间分别为 1150℃、540 mins。

2.2. $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜制备

以上述方法制备得到 LSMO 多晶块体为靶材, 利用脉冲激光沉积系统制备出以 SiO_2 和 SrTiO_3 为衬底的 LSMO 薄膜。制备参数如下: 激光器的工作气体: KrF 气体; 衬底温度: 750℃, 腔体氧压: 40 Pa; 激光波长: 248 nm; 激光工作能量: 350 mJ, 工作频率: 5 Hz; 薄膜沉积时间: 120 mins。沉积结束后, 对薄膜原位退火 10 mins。

2.3. $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜结构及物性测量

使用日本理学生产的型号为 MinFlex-II 的 X 射线衍射仪($\text{CuK}\alpha$ 靶, 波长 $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$)对 LSMO 薄膜样品进行结构特性的测试; 通过天美公司生产的型号为日立 SU8010 的扫描电子显微镜对上述薄膜样品进行表面与截面形貌上的表征; 利用 QuantumDesign 公司的材料综合物性测量系统(PPMS DynaCool-9)测试样品的磁特性及电学特性。

3. 实验结果与分析

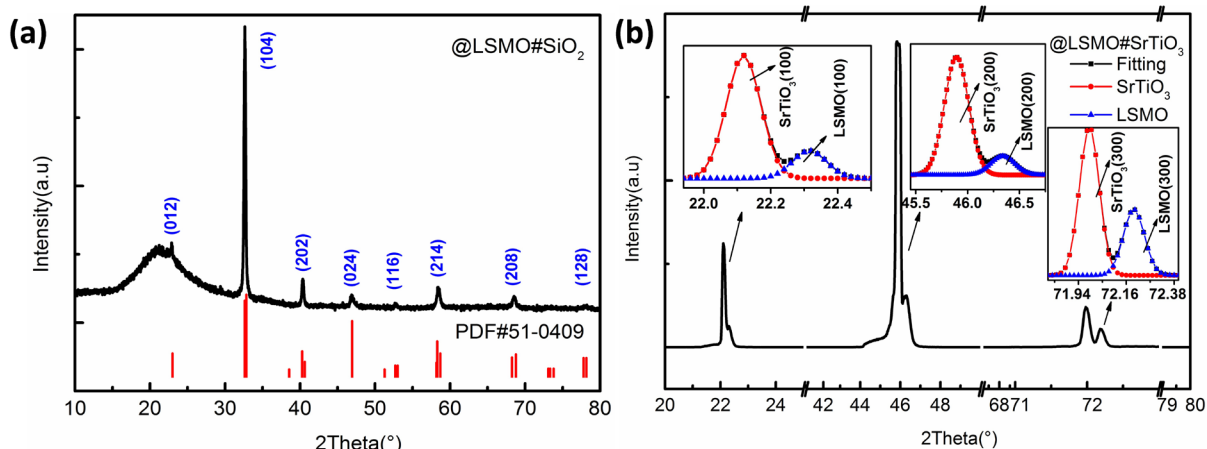
3.1. 结构分析

3.1.1. XRD 图谱分析

图 1 给出 LSMO/ SiO_2 及 LSMO/STO 两类薄膜样品的 X 射线衍射(XRD)图谱。由图 1(a)可以看到, 所测得的 LSMO/ SiO_2 薄膜 XRD 衍射峰与 ABO_3 钙钛矿结构 PDF 标准卡片有很好的对应, 在 $2\theta = 20^\circ$ 附近出现的宽衍射是 SiO_2 玻璃的无定型衍射峰, 在 X 射线探测灵敏度下, 没有其它杂相产生。这一结果表明通过溶胶凝胶法和 PLD 法可以在普通玻璃衬底上制备得到纯相 LSMO 薄膜; 相比于 LSMO/ SiO_2 的 XRD 图谱, 图 1(b)中展示的 LSMO/STO 薄膜 XRD 衍射呈现出不一样的结果: 在衬底 SrTiO_3 的三个单晶衍射峰(001)、(002)、(003)边上有明显的伴随衍射峰。我们所使用的 SrTiO_3 单晶(100)面间距为 3.905 \AA , 而 LSMO 薄膜(100)方向晶格常数约为 3.900 \AA , 与衬底有很好的晶格匹配, 初步表明所制备的 LSMO/STO 薄膜中, LSMO 沿 SrTiO_3 单晶衬底(001)方向取向生长。

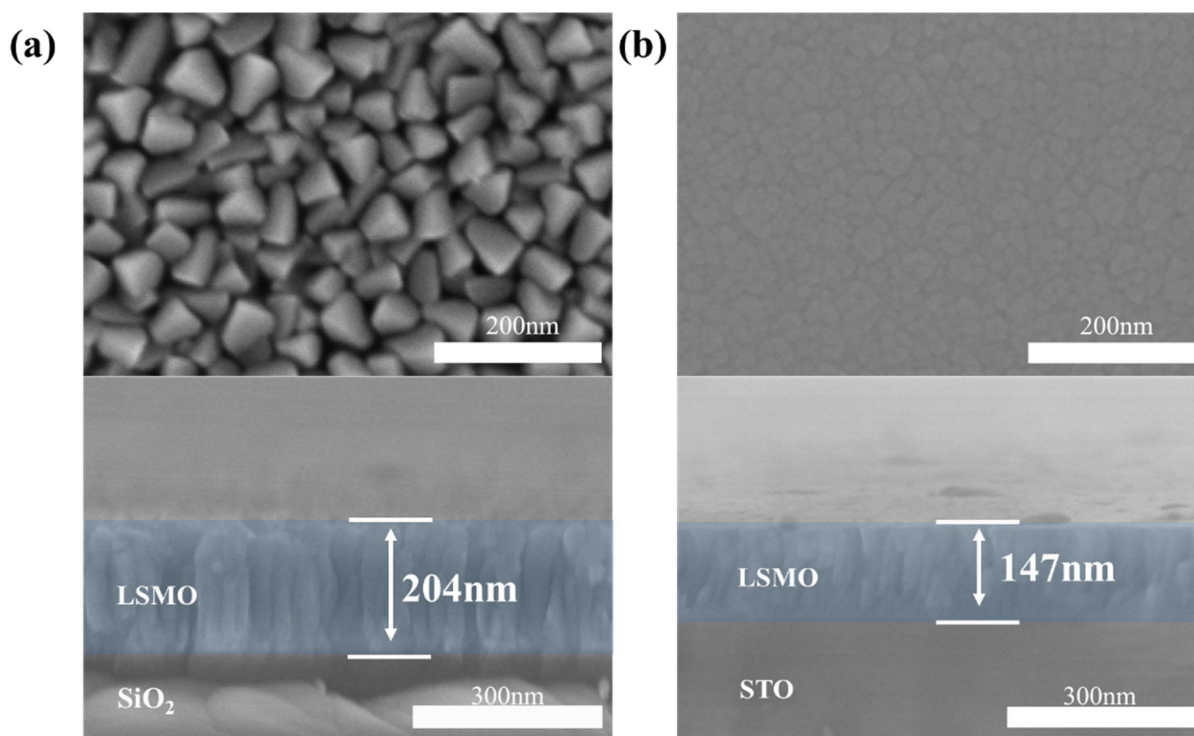
3.1.2. SEM 图谱分析

为了分析薄膜样品的形貌, 得到其微结构信息, 我们使用日立 SU8010 的扫描电子显微镜对上述薄膜样品进行表面与截面形貌表征。图 2 给出了 LSMO/ SiO_2 和 LSMO/STO 薄膜的 SEM 测试结果。从图 2(a)中的 LSMO/ SiO_2 表面形貌图(上)及截面形貌图(下)可以看出, 薄膜厚度约为 204.0 nm, 形状规则的柱状 LSMO 均匀生长在 SiO_2 衬底表面, 表面颗粒间的空隙较多且较大, 有明显的晶界, 表面颗粒尺寸约为 55.6 nm。从图 2(b)中 LSMO/STO 薄膜的表面形貌图(上)及截面形貌图(下)可以看出, 表面平整, 有明显的晶界生成, 表面晶粒尺寸约为 24.2 nm, 薄膜厚约为 147.0 nm。在截面形貌图中可以看出 LSMO 薄膜在 STO 单晶衬底上均匀生长, 具有一定的择优取向性。



图(b)中插图分别给出了 STO 单晶衬底三个衍射峰位置分峰拟合局部放大图。

Figure 1. XRD patterns of the LSMO/SiO₂ thin film (a) and LSMO/STO thin film (b)
图 1. 薄膜样品的 XRD 衍射图。(a) LSMO/SiO₂ 薄膜, (b) LSMO/ SrTiO₃(001) 薄膜



(上)表面形貌图 (下)断面形貌图。

Figure 2. SEM morphology of the LSMO/SiO₂ thin film (a) and LSMO/STO thin film (b)
图 2. LSMO/SiO₂ 薄膜(a)和 LSMO/STO 薄膜(b)的扫描电镜图。

3.2. 磁特性表征

为了分析不同衬底条件对 LSMO 薄膜磁特性的影响, 我们采用 PPMS 系统对 LSMO/SiO₂ 和 LSMO/SrTiO₃ 两个薄膜样品的磁特性进行测量。图 3 给出了两个样品在不同温度或磁场下磁化强度变化的实验结果。其中, 图 3(a)是在 5 K 和 300 K 温度下, 两个薄膜样品的磁滞回线。图 3(b)是在外加磁场为 1000e 下两个样品的 M-T 曲线。从图中可以看到, 生长在不同衬底上的 LSMO 薄膜磁特性有很大差

别：在 5 K 温度下，生长在玻璃衬底上的 LSMO 薄膜矫顽力远大于生长在 SrTiO₃ 单晶衬底上的 LSMO 薄膜，可以认为 LSMO 薄膜与 SiO₂ 的晶格常数的失配度较大，因此 LSMO/SiO₂ 薄膜中 LSMO 晶格畸变较大，这导致 LSMO/SiO₂ 薄膜在磁化过程中需要克服的部分磁弹性能大于 LSMO/SrTiO₃，导致矫顽力增大。从图 3(b) 的 M-T 曲线测试结果可以看出，生长在不同衬底上的两个样品铁磁居里温度(T_c)有明显差别。LSMO/SiO₂ 薄膜的 T_c = 276.01 K，远低于 LSMO/SrTiO₃ 的居里温度(310.65 K)。我们知道，居里温度是磁有序(自发磁化)在温度上的分界点，体现自旋交换耦合与热涨落之间的竞争。实验结果表明，生长在 SrTiO₃ 单晶衬底上的 LSMO 薄膜中，Mn³⁺和 Mn⁴⁺之间通过 O²⁻的双交换作用强于生长在玻璃衬底上的 LSMO 薄膜。这与不同衬底对 LSMO 薄膜的晶格微结构、原子间距产生的变化不同有关[4] [5]。此外，从图中可以看到，T_c 以下，LSMO/SiO₂ 薄膜的磁化强度远大于 LSMO/SrTiO₃ 的磁化强度，表明在 LSMO/SiO₂ 薄膜在居里温度以下的自发磁化高于 LSMO/SrTiO₃ 薄膜，而且，LSMO/SiO₂ 薄膜由于无序生长而引起相对较弱的磁各向异性使得在同样的外磁场(100 Oe)作用下产生的磁化程度高于在 LSMO/SrTiO₃ 薄膜的磁化程度。以上实验结果及其分析表明了不同衬底引起的界面应力导致 LSMO 薄膜微结构变化，从而产生不同的磁特性及序参量变化。表 1 给出了的两个样品实验测得的磁特性参数对比结果。

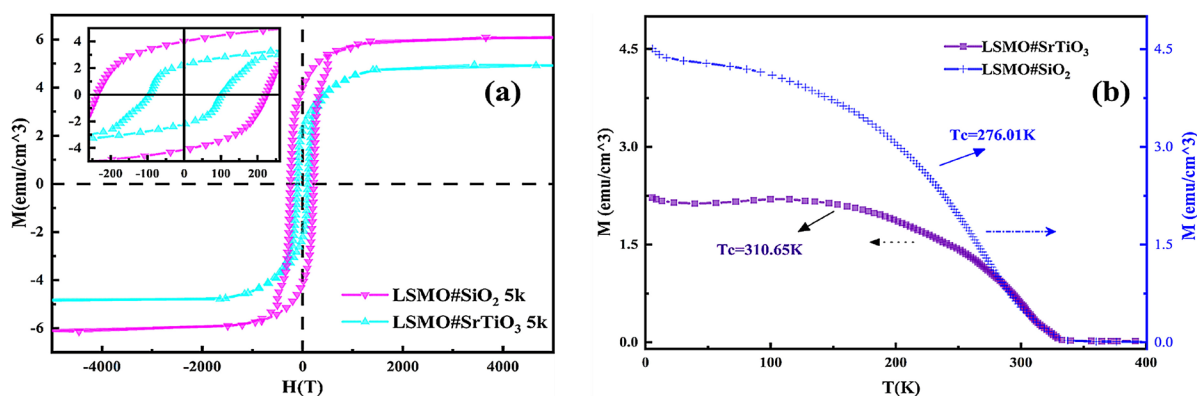


Figure 3. M-H loops with different temperatures (a) and M-T curves with H=100 Oe (b) for the LSMO/SiO₂ and LSMO/STO thin films

图 3. LSMO/SiO₂ 和 LSMO/STO 样品的在不同温度下的磁滞回线(a)和 100 Oe 外磁场下的磁化曲线(b)

Table 1. Physical parameters related to magnetic properties in different states for LSMO thin films

表 1. LSMO 在不同状态下的磁性能相关物理量

名称	饱和磁化强度 M _s (emu/cm ³)		矫顽力 H _c (Oe)		居里温度 T _c (K)
	5 K	300 K	5 K	300 K	
LSMO#SiO ₂	4.13	0.78	236.21	8.76	276.01
LSMO#SrTiO ₃	3.91	1.72	94.03	16.67	310.65

3.3 磁电阻性能

LSMO 材料体系中的磁特性与其电特性有很强的关联性，从以上磁特性的分析发现衬底对 LSMO 薄膜的磁性能有重要影响。且在 LSMO 材料体系中拥有优异的庞磁阻效应(CMR)。为此，有必要开展不同磁场及温度下两个样品的电阻特性，以分析不同衬底条件对 LSMO 薄膜的电阻特性的影响。我们用磁电阻变化率来衡量磁场对电阻率的调制程度。定义磁电阻 MR(%)如下：

$$MR(\%) = \frac{R(H,T) - R(0,T)}{R(H,T)} \times 100\%$$

其中 $R(0,T)$ 是指在外加磁场为 0 Oe 时, 电阻随温度的变化的函数值; $R(H,T)$ 是指在外加磁场为 H Oe 时, 电阻随温度的变化的函数值。

我们利用综合物性测量系统及标准四引线法测试了不同温度条件下两个样品的电阻率在外磁场作用下的变化情况。图 4 给出了不同磁场下两个样品的电阻率随温度的变化结果。可以看到, 不同衬底条件对电阻率特性及磁电阻效应有重要影响。LSMO/SiO₂ 样品的电阻率 - 温度曲线存在两个转变温度(T_{p1} 和 T_{p2} , 如图 4(a)所示), 在无外场作用下, $T_{p1} = 223$ K 即为金属 - 绝缘体转变温度; $T_{p2} = 60$ K, 在此处出现了低温区电阻极小值, $T < T_{p2} = 60$ K 情况下, 出现了随温度的升高而降低, 这在其它体系中也有相类似地报道[7] [8] [11], 如蔡之让等人在 Dy 高掺杂对 La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ 体系磁电性质的影响研究中也发现类似的现象[10], 这一现象猜测可能与其拥有自旋团簇玻璃态有关[12], 而部分学者认为可能是由于晶界处自旋极化隧穿效应导致的[8] [11], 本实验中观察到的这一现象有待进一步分析。从图中我们可以看到, LSMO/SiO₂ 样品在测量温区(5 K~400 K)均表现出明显的磁电阻效应, 电阻在磁场作用下明显减小: 在 5 K 温度下, 外磁场为 8 T 时磁电阻值达到 -98%。在 300 K 下, 该样品在 4 T 和 8 T 外磁场下对应的 MR 值分别达到了 -32% 和 -42%。从不同磁场下的电阻率随温度变化曲线可以看出, 外加磁场对 T_{p1} 和 T_{MI} 处的电阻率峰值有抑制作用, 电阻率峰值随着外加磁场增大而向较高温度方向漂移。这表明, 外部磁场促进了相邻 Mn 离子的 e_g 电子之间的跳跃, 这与 DE 模型一致[13] [14] [15]。

与 LSMO/SiO₂ 样品不同, LSMO/STO 样品的电阻率 - 温度曲线(图 4(b))仅在高温区(350 K 附近)有一金属 - 绝缘体转变。与生长在玻璃衬底上的 LSMO 薄膜样品明显不同, LSMO/STO 样品仅在转变温度附近有明显的磁电阻效应, 磁电阻在转变温度时达到最大值。在 309.33 K、8 T 磁场下达到 -53% 左右。一般来说, 在锰基钙钛矿氧化物中, 存在性质不同的两种磁电阻效应。一种是源于双交换作用的本征磁电阻, 锰基钙钛矿氧化物单晶样品就体现了本征磁电阻。其特点是磁电阻在铁磁相变温度附近达到最大值, 而在其它温区均随着温度的上升或下降而减小; 另外一种是来源于晶界处自旋极化隧穿效应, 称为外在磁电阻(或隧穿磁电阻 TMR), 这在多晶样品中表现明显, 其特点是磁电阻随着温度的升高而降低[8], 随晶粒尺寸的降低而增加。据此, 在 LSMO/STO 样品中观察到的磁电阻效应更多属于本征磁电阻; 而在 LSMO/SiO₂ 样品测量得到的磁电阻则属于源隧穿效应的外在磁电阻。

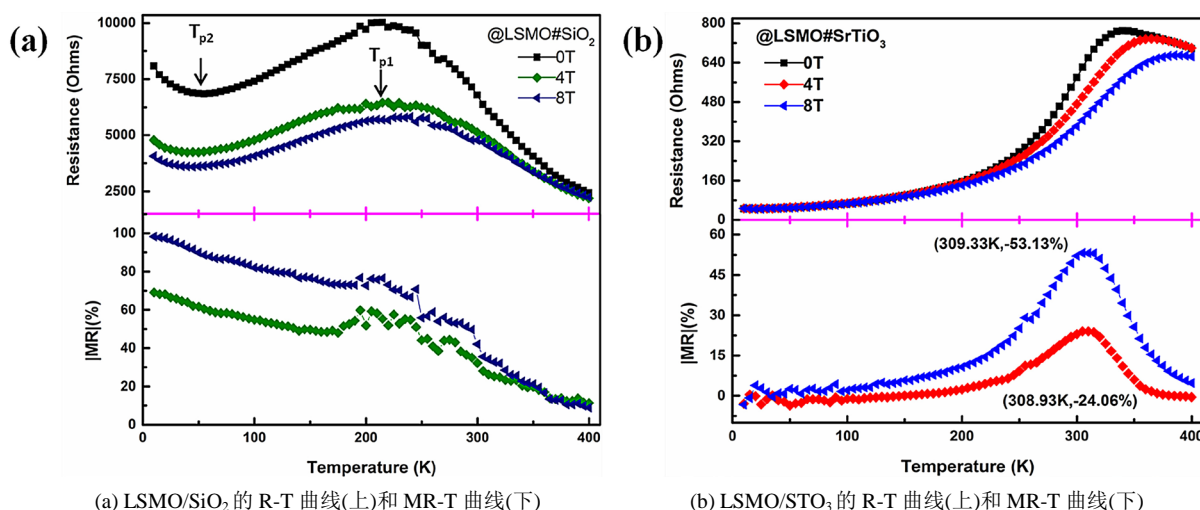


Figure 4. R-T and MR-T curves of the tow thin films with different external magnetic fields

图 4. 不同外磁场下两个样品的电阻及磁电阻随温度的变化关系

4. 结论

本文采用脉冲激光沉积法在普通玻璃和 SrTiO₃ 单晶衬底上分别制备得到 La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ 薄膜, 研究不同衬底条件对 La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ 物理特性的影响。结构测试结果表明, 在玻璃衬底上所制备得到的多晶 LSMO 薄膜具有很好的纯相 ABO₃ 钙钛矿结构; 而在 SrTiO₃ 单晶衬底上的 LSMO 薄膜具有明显的延衬底晶向取外延生长特征; 磁特性测量结果表明, 由于衬底晶格常数与 LSMO 晶格常数匹配程度不同, LSMO 薄膜呈现不一样的物理特性: 磁性方面, LSMO/SiO₂ 薄膜的居里温度为 276.01 K, 低于 LSMO/SrTiO₃(100) 薄膜的 T_c (310.65 K)。在 T_c 以下, LSMO/SiO₂ 薄膜的矫顽力和磁化磁强均大于 LSMO/SrTiO₃(100) 薄膜, 这与 LSMO 薄膜生长在不同衬底时的微结构变化引起的双交换作用和磁各向异性变化有关; 磁电阻特测量结果表明, 两个样品表现出不同的电阻、磁电阻特性: LSMO/SiO₂ 样品的电阻率温度曲线存在两个转变点, T_{p1} = 223 K 即为金属 - 绝缘体转变温度, T_{p2} = 60 K 处, 出现了低温区电阻极小值; 在测量温区 (5 K~400 K), 该样品均表现出明显的磁电阻效应, 在 5 K、8 T 条件下的磁电阻值达到-98%。在室温附近, 8 T 磁场下的磁电阻值仍达到-42%。分析表明这一磁电阻现象更多属于晶界处的隧穿磁电阻效应。对于 LSMO/SrTiO₃(100) 样品, 仅在高温区 (350 K 附近) 存在金属 - 绝缘体 (M-I) 转变温度。且仅在 M-I 转变温度附近有明显的磁电阻现象, 在 M-I 转变温度处、8 T 磁场下的磁电阻值为-53.12%, 这一结果比 LSMO/SiO₂ 样品小很多。本文的实验结果表明, 不同衬底条件对 LSMO 薄膜的磁性、磁电阻特性有重要影响。这一结果为钙钛矿锰氧化物在复合结构材料构建及其物理特性调制, 以及在自旋电子器件中的应用研究提供重要的参考。

基金项目

本工作得到了国家自然科学基金(11004031)、福建省自然科学基金(2020J01192)和国家级大学生创新创业训练计划项目(202010394015、cxxl-2021250)的资助。

参考文献

- [1] Volger, J. (1954) Further Experimental Investigations on Some Ferromagnetic Oxidic Compounds of Manganese with Perovskite Structure. *Physica*, **20**, 49-66. [https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(54\)80015-2](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(54)80015-2)
- [2] Baibich, M.N., Broto, J.M., Fert, A., Nguyen Van Dau, F., Petroff, F., Etienne, P., *et al.* (1988) Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices. *Physical Review Letters*, **61**, 2472. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2472>
- [3] Helmolt, R.V., Wecker, J., Holzappel, B., Schultz, L. and Samwer, K. (1993) Giant Negative Magnetoresistance in Perovskitelike La_{2/3}Ba_{0.3}MnO_x Ferromagnetic Films. *Physical Review Letters*, **71**, 2331. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.2331>
- [4] Hwang, H.Y., Cheong, S.-W., Ong, N.P. and Batlogg, B. (1996) Spin-Polarized Intergrain tunneling in La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃. *Physical Review Letters*, **77**, 2041. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.2041>
- [5] Kim, J.H. and Grishin, A.M. (2006) Microfabrication of Epitaxial La_{1-x}(Sr,Ca)_xMnO₃ IR Bolometer on Si. *Integrated Ferroelectrics*, **80**, 47-54. <https://doi.org/10.1080/10584580600656171>
- [6] Searle, C.W. and Wang, S.T. (1970) Studies of the Ionic Ferromagnet (LaPb)MnO₃ Electric Transport and Ferromagnetic Properties. *Canadian Journal of Physics*, **48**, 2023-2031. <https://doi.org/10.1139/p70-257>
- [7] Rao, C.N.R. (1998) Colossal Magnetoresistance in Rare Earth Manganates. *Materials Today*, **1**, 9-13. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(98\)80004-7](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(98)80004-7)
- [8] Yang, J., Song, W.H., Ma, Y.Q., Zhang, R.L., Zhao, B.C., Sheng, Z.G., *et al.* (2004) Structural, Magnetic and Transport Properties in the Pr-Doped Manganites La_{0.9-x}Pr_xTe_{0.1}MnO₃ (0 ≤ x ≤ 0.9). *Physical Review B*, **70**, 144421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.144421>
- [9] Rozilah, R., Ibrahim, N., Mohamed, Z., Yahya, A.K., Khan, N.A. and Nasir Khan, M. (2017) Inducement of Ferromagnetic-Metallic Phase in Intermediate-Doped Charge-Ordered Pr_{0.75}Na_{0.25}MnO₃ Manganite by K⁺ Substitution. *Physica B: Condensed Matter*, **521**, 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2017.07.001>

-
- [10] 蔡之让, 刘宁, 童伟, 张裕恒. Dy 的高掺杂对 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 体系磁电性质的影响[J]. 物理学报, 2005, 54(2): 920-929. <http://dx.chinadoi.cn/10.3321/j.issn:1000-3290.2005.02.072>
- [11] Thoma, P., Monecke, M., Buja, O.-M., Solonenko, D., Dudric, R., Ciubotariu, O.-T., *et al.* (2018) Polycrystalline $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ Films on Silicon: Influence of Post-Deposition Annealing on Structural, (Magneto-)Optical, and (Magneto-)Electrical Properties. *Applied Surface Science*, **427**, 533-540. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.046>
- [12] Feng, Y., Jin, K.-J., Gu, L., He, X., Ge, C., Zhang, Q.-H., He, M., Guo, Q.-L., Wan, Q., He, M., Lu, H.-B. and Yang, G. (2016) Insulating Phase at Low Temperature in Ultrathin $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ Films. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 22382. <https://doi.org/10.1038/srep22382>
- [13] Zouari, S., Ranno, L., Cheikh-Rouhou, A., Pernet, M. and Strobel, P. (2001) Effect of A-Cation Size Variance on Structural and Physical Properties of Praseodymium Manganites $\text{Pr}_{0.85}(\text{Na}_{1-x}\text{K}_x)_{0.15}\text{MnO}_3$. *Solid State Communications*, **119**, 517-521.
- [14] Regaieg, Y., Koubaa, M., Cheikhrouhou Koubaa, W., Cheikhrouhou, A. and Mhiri, T. (2010) Magnetocaloric Effect above Room Temperature in the K-Doped $\text{La}_{0.8}\text{Na}_{0.2-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$ Manganites. *Journal of Alloys and Compounds*, **502**, 270-274. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.04.167>
- [15] Millis, A.J., Littlewood, P.B. and Shraiman, B.I. (1995) Double Exchange Alone Does Not Explain the Resistivity of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$. *Physical Review Letters*, **74**, 5144. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.5144>