

## $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜的电输运特性研究

张媛媛<sup>1</sup>, 唐晓东<sup>1</sup>, 陈莹<sup>2</sup>, 王根水<sup>2</sup>, 董显林<sup>2</sup>

(1. 华东师范大学 信息科学技术学院, 上海 200241; 2. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

**摘 要:** 采用溶胶-凝胶法制备  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  (LCSMO) 薄膜, 探讨掺杂对结构、磁性能与电输运特性的影响机制。从 X 射线衍射(XRD)结果来看, 所有薄膜均具有典型钙钛矿结构。LCSMO 薄膜的居里温度( $T_C$ )和金属绝缘体转变温度( $T_{MI}$ )均随 Sr 掺杂浓度增加而单调增加。总体看来, 当  $x \leq 0.05$  时, LCSMO 薄膜磁阻率类似于窄带系 LCMO 系材料, 在  $T_{MI}$  周围较宽的温度区间内存在相分离, 而相分离过程中多相共存的无序状态是该类材料庞磁阻效应的主要来源。对特定温度下的磁阻率随磁场的变化进行分析, 当温度低于  $T_{MI}$  时, 磁阻率随磁场变化出现双梯度, 低磁场时晶界隧穿效应起主导, 该部分效应对磁场特别敏感, 高磁场时磁阻率主要来源于磁场对自旋波动的压制; 当温度接近或高于  $T_{MI}$  时, 晶界隧穿效应逐渐消失, 磁阻率随磁场线性变化, 磁场对自旋波动的压制起主导作用。

**关 键 词:** 锰氧化物; 溶胶-凝胶法; 电输运特性

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

## Electrical Transport Properties in $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ Thin Films

ZHANG Yuan-Yuan<sup>1</sup>, TANG Xiao-Dong<sup>1</sup>, CHEN Ying<sup>2</sup>, WANG Gen-Shui<sup>2</sup>, DONG Xian-Lin<sup>2</sup>

(1. School of Information Science Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** The influence of the chemical composition on the structure, magnetic and electrical transport properties of  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  (LCSMO,  $x \leq 0.05$ ) thin films was systematically studied. LCSMO thin films were prepared by Sol-Gel method. XRD results show that all the films have typical perovskite structure. With increase of Sr doping concentration, both Curie temperature  $T_C$  and metal-insulator transition temperature  $T_{MI}$  of LCSMO thin films increase monotonously. When Sr doping concentration  $x \leq 0.05$ , with increase of temperature, absolute value of MR decreases first, then increases to a maximum value around  $T_{MI}$ , and finally decreases, which indicates that the disorder coming from phase separation around  $T_{MI}$  contributes greatly to MR. The field dependence of MR values at certain temperature can be classified into two kinds. When the temperature is much lower than  $T_{MI}$ , dual gradient of MR with the magnetic field is shown. The tunneling effect on the grain boundaries plays a dominant part in the low magnetic field, and this effect is particularly sensitive to the magnetic field; the suppression of spin fluctuations by magnetic field is the main reason in the high magnetic field range. When the temperature is higher than  $T_{MI}$ , MR of LCSMO thin films changes almost linearly with the magnetic field which is mainly due to suppression of spin fluctuations by magnetic field.

**Key words:** manganese oxides; Sol-Gel method; transport properties

收稿日期: 2015-08-24; 收到修改稿日期: 2015-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(51302084, 11304097, 61176011, 61376129, 11374098)

National Natural Science Foundation of China (51302084, 11304097, 61176011, 61376129, 11374098)

作者简介: 张媛媛(1982-), 女, 讲师. E-mail: yyzhang@ee.ecnu.edu.cn

通讯作者: 唐晓东, 教授. E-mail: xdtang@sist.ecnu.edu.cn

钙钛矿结构锰氧化物( $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ ,  $\text{A}=\text{Sr}, \text{Ca}, \text{Ba}$  等)具有庞磁阻效应、磁致伸缩效应等丰富物理特性,在磁存储器件、磁传感器件和自旋阀等方面具有潜在应用价值,并且该体系又是电荷、自旋、晶格和轨道等自由度高度关联的强关联体系,蕴藏着十分丰富的物理内容,是凝聚态物理研究热点<sup>[1-3]</sup>。1950年,Jonker和Van Santen<sup>[4-6]</sup>研究掺杂 $\text{LaMnO}_3$ 系列材料(二价碱金属离子,如:  $\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$  等)的磁学和电学性质,发现铁磁性和金属导电性的强烈耦合。1951年,Zener<sup>[7]</sup>提出了双交换模型(DE, Double Exchange),可以定性解释磁性和导电性的变化。1955年,Goodenough<sup>[8]</sup>提出了半共价键理论,该理论基于Mn离子的3d电子和O离子的2p电子杂化,并解释不同掺杂程度的各类型锰氧化物的磁有序结构,预测了在不同组分下 $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ 的晶体结构和磁结构。随后年代里由于实验条件的限制,锰氧化物的研究没有发现太多新的实验现象以及理论创新。直至1979年,Reinen等<sup>[9]</sup>提出锰氧化物中 $\text{MnO}_6$ 八面体的Jahn-Teller效应是解释该类材料物性的重要因素。1993年,Helmolt等<sup>[10]</sup>发现室温下 $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3$ 在外加磁场7T下有50%~60%巨磁阻效应,引起了巨大的反响。接着Jin等<sup>[6-7]</sup>发现掺杂水平 $x\sim 0.3$ 时, $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ 的磁阻率MR(定义为 $\rho(0)-\rho(H)/\rho(H)$ ,  $\rho(0)$ 和 $\rho(H)$ 分别表示零场和外加磁场H的电阻率)在77K时高达127000% ( $\Delta\rho/\rho(H)$ ),更加激起了人们对该类材料的关注。

$\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSMO)和 $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ (LCMO)材料是钙钛矿结构锰氧化物的典型代表。当掺杂量 $x=0.3$ 时,体系的居里温度相对较高,有利于庞磁阻效应在室温下获得应用,具有较高的研究价值。尽管 $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ 具有较高的磁阻率,但是其居里温度仅有230K左右,在居里温度以上磁阻率迅速下降,即工作温度较低,这大大限制了该材料在器件中的应用。 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 的居里温度较高( $\sim 360^\circ\text{C}$ ),但是磁阻率MR较低。Hwang和Fontcuberta等<sup>[11-12]</sup>发现随着A位平均离子半径的减小,居里温度明显降低,而电阻率和磁阻率明显增大。Dagotto等<sup>[13]</sup>指出,高居里温度与高磁阻率存在相互制约。在 $\text{La}_{0.7}(\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x)\text{MnO}_3$ (LCSMO)中用 $\text{Sr}^{2+}$ 取代部分 $\text{Ca}^{2+}$ 可以同时调节材料的居里温度和磁阻率MR<sup>[8-9,14]</sup>。本课题组前期工作通过对 $x\geq 0.1$ 的LCSMO体系进行了系统研究,结果表明随着Sr掺杂量的增加,LCSMO磁性增强,居里温度显著升高,电阻及磁阻率特性都类似于LSMO,磁阻率随温度的升高逐渐降低,与LCMO材料明显不同<sup>[14]</sup>。本工作选取低

Sr掺杂量 $x\leq 0.05$ 的LCSMO组分,选用晶向为(100)的硅(Si)衬底,采用溶胶-凝胶法制备薄膜,系统研究低Sr掺杂对LCSMO薄膜结构、磁学和电输运性质的影响规律,并期望获得在室温下具有高磁阻率的材料。

## 1 实验方法

采用溶胶-凝胶法分别在(100)晶向的硅(Si)衬底上制备不同Sr掺杂( $x=0, 0.025, 0.05$ )的LCSMO系列薄膜。薄膜的前驱体溶液所用的化学原料为分析纯醋酸镧 $\text{La}(\text{CH}_3\text{COO})_3\cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ 、醋酸钙 $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ 、醋酸锶 $\text{Sr}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 和醋酸锰 $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,试剂均购于西格玛奥德里奇公司(Sigma-Aldrich)。溶剂为冰醋酸和去离子水,稳定剂则采用分析纯乙酰丙酮,溶液浓度为0.15 mol/L。制备前驱体溶液完成两天后,用孔径0.2  $\mu\text{m}$ 的注射过滤器过滤,以除去在制备过程中可能引入的灰尘和微粒,即可得到色泽透明、均一稳定的前驱体溶液。旋涂前驱体溶液之前,首先将硅衬底进行清洗,依次浸入三氯乙烯、丙酮、酒精等有机溶剂进行超声清洗并用去离子水冲洗,除去硅衬底上的灰尘和有机物杂质。旋涂(spin-coating)过程匀胶机转速为5000 r/min,保持0.5 min。退火程序采用三段法,200 $^\circ\text{C}$ 保温3 min,450 $^\circ\text{C}$ 保温3 min,最后850 $^\circ\text{C}$ 保温3 min。重复6次上述旋涂及退火步骤,获得薄膜厚度约为120 nm。最后将薄膜在850 $^\circ\text{C}$ 空气中后退火30 min,以使薄膜获得更加优异的结晶性能。

采用多晶X射线粉末衍射仪(Bruker D8 Discover)分析薄膜成相情况与晶体结构,采用综合物性测试系统(Quantum Design, PPMS 9)测量样品磁性和电阻特性,其中磁性测量过程中样品表面与磁场平行,电阻测试过程中样品表面与磁场垂直。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结构特性

图1所示为850 $^\circ\text{C}$ 空气中退火3 min后的LCSMO薄膜的X射线衍射图谱,从图中可以看出所有薄膜均具有明显的钙钛矿型衍射峰,不存在其他杂质相,这表明在Si衬底上生长的LCSMO薄膜均具有良好的结晶性。对最强峰(110/104)的数值进行深入分析还可以发现,随着 $\text{Sr}^{2+}$ 掺杂浓度的增加,三方晶胞参数依次为3.852、3.835、3.838 nm,即

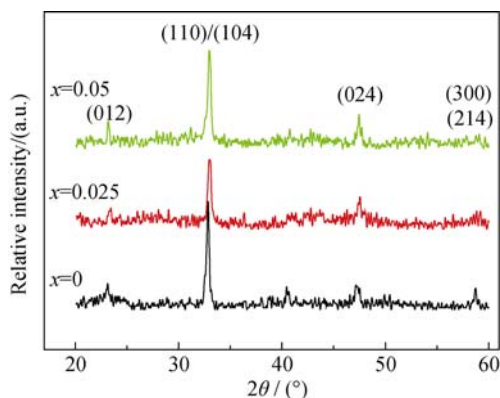


图 1  $\text{La}_{0.7}(\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x)\text{MnO}_3$  薄膜的 XRD 图谱  
Fig. 1 XRD patterns of  $\text{La}_{0.7}(\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x)\text{MnO}_3$  thin films  
(a)  $x=0$ ; (b)  $x=0.025$ ; (c)  $x=0.05$

先减小后略有增加。有研究表明,在 LCSMO 陶瓷中,随着 Sr 含量增加,晶体结构从正交转变为三方<sup>[15]</sup>。这是由于  $\text{Sr}^{2+}$  的离子半径比  $\text{Ca}^{2+}$  大,  $\text{Sr}^{2+}$  掺杂浓度的增加会造成 Mn-O 八面体中 Mn-O 键的扭曲和键角的变化,进一步导致晶体结构及晶格参数的变化。该相变过程有待于进一步研究。

## 2.2 磁学特性

图 2 所示为在外加磁场 500 Oe 情况下 LCSMO 薄膜的磁化强度归一化后与温度的关系,从图中可以发现,随着 Sr 掺杂浓度的增加,居里温度  $T_C$  (磁化强度  $M$  对温度  $T$  的求导  $(dM/dT)$  的最大值)从 233 K ( $x=0$ ) 增加至 270 K ( $x=0.05$ )。这是由于自旋和晶格之间的强耦合作用,锰氧化物中  $\text{Ca}^{2+}$  位置被离子半径更大的  $\text{Sr}^{2+}$  取代而导致 Mn-O-Mn 键角的增大,  $\text{Mn}^{3+}$ -O-Mn<sup>4+</sup> 间双交换作用的加强以及居里温度  $T_C$  的升高<sup>[16-17]</sup>。

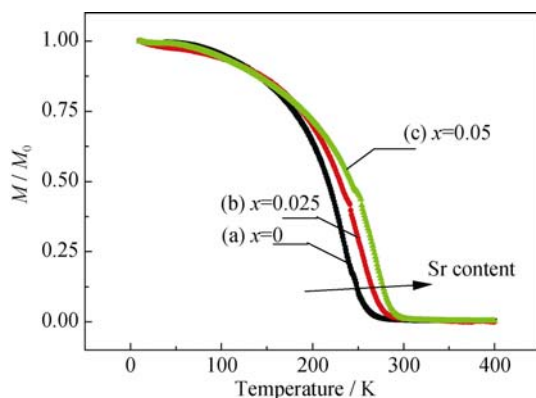


图 2 在外加磁场 500Oe 时,  $\text{La}_{0.7}(\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x)\text{MnO}_3$  薄膜归一磁化率随温度变化曲线  
Fig. 2 Temperature dependence of the magnetizations under an external magnetic field of 500 Oe of  $\text{La}_{0.7}(\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x)\text{MnO}_3$  thin films  
(a)  $x=0$ ; (b)  $x=0.025$ ; (c)  $x=0.05$

## 2.3 电输运特性

图 3(a)所示为无外加磁场情况下 LCSMO 系列薄膜的电阻率与温度的关系,由图可知,随着 Sr 掺杂的增加,电阻先增加后急剧降低。低温时薄膜的电阻率对温度导数  $d\rho/dT > 0$ , 呈现出金属导电行为。随着温度升高,薄膜经历了金属相向绝缘相的转变,用金属-绝缘转变温度  $T_{MI}$  进行表征,  $T_{MI}(d\rho/dT=0)$  随 Sr 掺杂量的增加,从 221 K 升高到 242 K。图 3(b)为 LCSMO 薄膜在外加 3T 磁场下的磁阻率 MR (定义为  $(\rho(3T)-\rho(0))/\rho(0)$ , 其中  $\rho(0)$  和  $\rho(3T)$  分别表示零场和外加磁场 3T 的电阻率)与温度的关系。结果显示,随着 Sr 掺杂的增加,  $T_C$  和  $T_{MI}$  虽然得到提高,但是磁阻率 MR 却在降低。这也说明高居里温度与高磁阻率存在着相互制约。从图中还可以发现,随着 Sr 掺杂浓度的增加, LCSMO 薄膜的磁阻率极值对应的温度,与居里温度  $T_C$  变化情况相一致,即随着 Sr 掺杂量的增加而升高<sup>[18-19]</sup>。这是由于在多晶薄膜中,电阻除了与磁性相关外,还很大程度受到晶界等因素的影响。由图 3(b)磁阻率随温度的变化特性可见,当  $x \leq 0.05$  时,随着温度升高,其磁阻率的绝

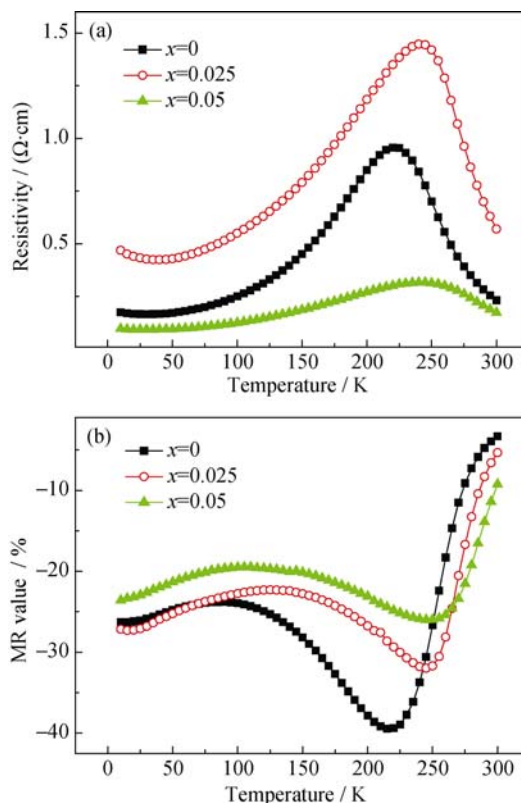


图 3  $\text{La}_{0.7}(\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x)\text{MnO}_3$  薄膜(a)零磁场时电阻率和(b)外加 3T 磁场时的磁阻率  $(\rho(3T)-\rho(0T))/\rho(0T)\%$  随温度变化曲线  
Fig. 3 (a) Temperature dependence of the resistivity without external magnetic field and (b) temperature dependence of magneto-resistance (MR) ratio (here defined as  $(\rho(3T)-\rho(0T))/\rho(0T)\%$ ) of  $\text{La}_{0.7}(\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x)\text{MnO}_3$  thin films

对值先缓慢减小后增大, 在  $T_{\text{MI}}$  附近达到最大值, 然后再减小。此前的研究结果中, 当  $x \geq 0.1$  时, 随着温度的升高, 其磁阻率单调减小<sup>[14]</sup>, 这主要是由于随着 Sr 含量的增加, LCSMO 材料中庞磁阻效应的主要成因略有不同。Dagotto 等<sup>[13]</sup>指出, 相比 LSMO 宽带系锰氧化物材料, LCMO 系材料在金属绝缘体相变温度周围较宽的温度区间内发生明显的微米、亚微米大尺度的相分离, 在此相分离的过程中存在多相共存, 此多相共存的无序状态是该类材料庞磁阻效应的主要来源。

图 4 所示为不同温度下 LCSMO 薄膜的磁阻率 MR(定义为 $(\rho(H)-\rho(0))/\rho(0)$ , 其中  $\rho(0)$  和  $\rho(H)$  分别表示零场和外加磁场  $H$  的电阻率)与磁场的关系。当温度较低时(远小于  $T_{\text{MI}}$ )(即图 4(a)), 磁阻率随外加磁场的变化表现出双梯度, 据文献[11, 20]研究表明, 在多晶 LSMO 材料中, 磁阻率主要来源于晶界隧穿效应和磁场对自旋波动的压制, 低温区低磁场段主要来源于晶界隧穿效应, 高磁场段主要对应磁场对自旋波动的压制。当温度较高(接近或大于  $T_{\text{MI}}$ )时(如图 4(c)、(d)), 磁阻率随外加磁场成线性变化, 这主要是随着温度升高, 低磁场段晶界隧穿效应减弱,

磁阻率来源于磁场对自旋波动的压制, 而在  $T_{\text{MI}}$  附近, 磁场对相变过程中无序结构的调控对磁阻率的贡献也与磁场呈线性关系, 且斜率与磁场对自旋波动压制的相近。由图 4(b)可以看出, 当  $x < 0.05$  时, MR 随磁场增加呈线性变化; 当  $x = 0.05$  时, MR 随磁场变化仍表现为双梯度, 这主要是由于  $x = 0.05$  时居里温度较高, 125 K 时仍有微弱的晶界隧穿效应。

### 3 结论

采用溶胶-凝胶法在(100)取向的 Si 衬底制备出纯相的  $\text{La}_{0.7}(\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x)\text{MnO}_3$  ( $x = 0, 0.025, 0.05$ )系列薄膜, 并进一步研究它们的结构、磁学和电输运性质。

1) XRD 测试结果表明, 所有薄膜无杂相, 且均具有典型的钙钛矿结构, 随着 Sr 掺杂浓度的增加, 赝立方晶胞参数依次为 3.852、3.835、3.838 nm, 即先减小后略有增加;

2) 通过对其磁性能的研究表明, 随着 Sr 掺杂浓度的增加, LCSMO 薄膜居里温度  $T_{\text{C}}$  从 233 K ( $x = 0$ ) 单调升高至 270 K ( $x = 0.05$ );

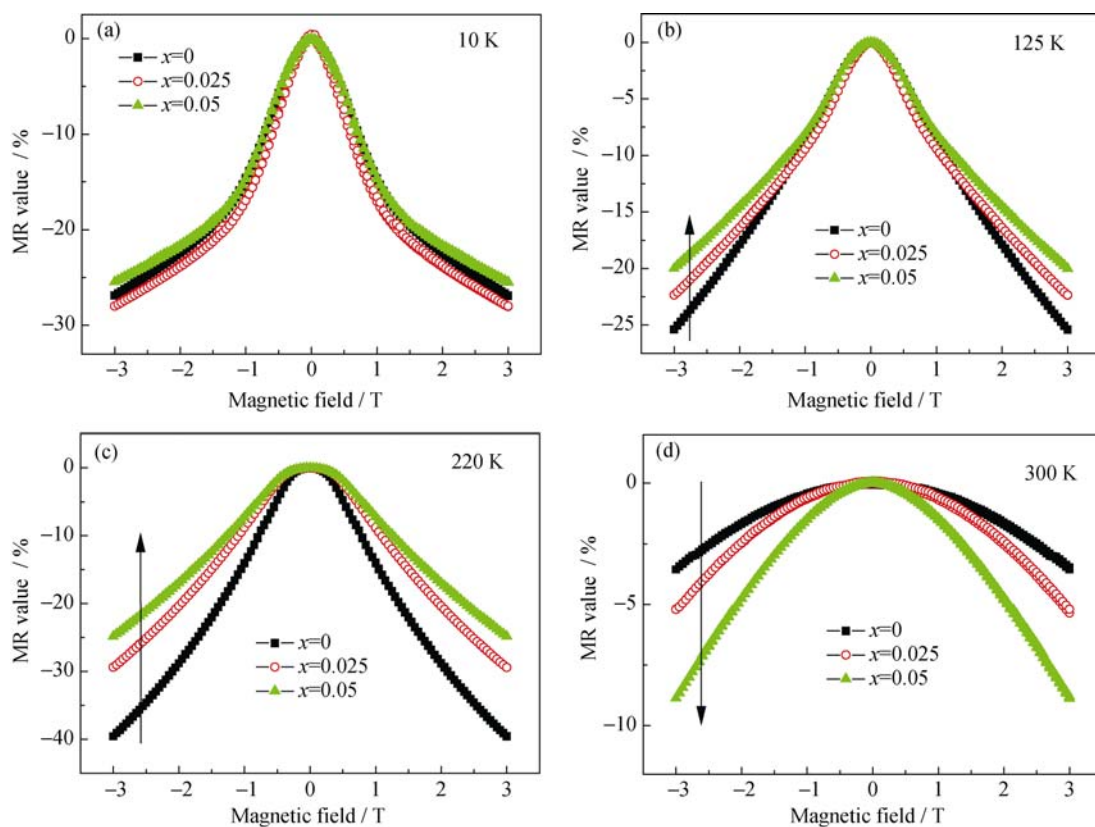


图 4 不同温度下 LCSMO 薄膜的磁阻率 MR 曲线

Fig. 4 Magnetic field dependence of the MR values at different temperatures  
(a) 10 K; (b) 125 K; (c) 220 K; (d) 300 K

3) 对其电阻性能的研究表明, 金属-绝缘转变温度  $T_{\text{MI}}$  和 MR 最大值对应的温度都随着 Sr 的掺杂不断升高;

4) LCSMO 薄膜的磁阻率随温度的变化特性, 当  $x \leq 0.05$  时, 磁阻率类似于窄带系 LCMO 系材料, 在  $T_{\text{MI}}$  周围较宽的温度区间内存在相分离, 而相分离过程中的多相共存的无序状态是该类材料庞磁阻效应的主要来源;

5) LCSMO 薄膜的磁阻率随磁场的变化特性, 当温度低于  $T_{\text{MI}}$  时, 磁阻率随磁场变化出现双梯度; 而当温度接近或高于  $T_{\text{MI}}$  时, 磁阻率随磁场线性变化。

### 参考文献:

- [1] MILLIS A J, LITTLEWOOD P B, SHRAIMAN B I. Double exchange alone does not explain the resistivity of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ . *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(25): 5144–5147.
- [2] DAGOTTO E, HOTTA T, MOREO A. Colossal magnetoresistant materials: the key role of phase separation. *Phys. Rep.*, 2001, **344**(1–3): 1–153.
- [3] TOKURA Y, NAGAOSA N. Orbital physics in transition-metal oxides. *Science*, 2000, **288**(5465): 462–468.
- [4] JONKER G H, VAN SANTEN J H. Ferromagnetic compounds of manganese with perovskite structure. *Physica*, 1950, **16**(3): 337–349.
- [5] JONKER G H, VAN SANTEN J H. Magnetic compounds with perovskite structure III. ferromagnetic compounds of cobalt. *Physica*, 1953, **19**(1–12): 120–130.
- [6] WOLLAN E O, KOEHLER W C. Neutron diffraction study of the magnetic properties of the series of perovskite-type compounds  $[(1-x)\text{La}, x\text{Ca}]\text{MnO}_3$ . *Phys. Rev.*, 1955, **100**(2): 545–563.
- [7] ZENER C. Interaction between the d shells in the transition metals. *Phys. Rev.*, 1951, **81**(3): 440–444.
- [8] GOODENOUGH J B. Theory of the role of covalence in the perovskite-type manganites  $[\text{La}, \text{M(II)}]\text{MnO}_3$ . *Phys. Rev.*, 1955, **100**(2): 564–573.
- [9] REINEN D. The Jahn-Teller effect in solid state chemistry of transition metal compounds. *J. Solid State Chem.*, 1979, **27**(1): 71–85.
- [10] VON HELMOLT R, WECKER J, HOLZAPFEL B. Giant negative magnetoresistance in perovskitelike  $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_x$  ferromagnetic films. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71** (14): 2331–2333.
- [11] HWANG H Y, CHEONG S W, ONG N P, *et al.* Spin-polarized intergrain tunneling in  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ . *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**: 2041–2044.
- [12] FONTCUBERTA J, MARTINEZ B, SEFFAR A, *et al.* Colossal magnetoresistance of ferromagnetic manganites: structural tuning and mechanisms. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(7): 1122–1125.
- [13] DAGOTTO E, HOTTA T, MOREO A. Colossal magnetoresistant materials: the key role of phase separation. *Phys. Rep.*, 2001, **344**(1/2/3): 1–153.
- [14] DANYAN CAO, YUANYUAN ZHANG, WENXIA DONG, *et al.* Structure, magnetic and transport properties of  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  thin films by Sol-Gel method. *Ceram. Int.*, 2015, **41**: S381–S386.
- [15] RADAELLI P G, MAREZIO M, HWANG H Y, *et al.* Charge localization by static and dynamic distortions of the  $\text{MnO}_6$  octahedra in perovskite manganites. *Phys. Rev. B*, 1996, **54**(13): 8992–8995.
- [16] THANH T D, NGUYEN L H, MANH D H, *et al.* Structural, magnetic and magnetotransport behavior of  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_x\text{Ca}_{0.3-x}\text{MnO}_3$  compounds. *Physica*, B 2012, **407**: 145–152.
- [17] PHAN M H, YU S C, HUR N H. Excellent magnetocaloric properties of  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $0.05 \leq x \leq 0.25$ ) single crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(7): 072504.
- [18] CHEN Y, ZHU J Y, ZHANG S, *et al.* Preparation and characterization of lanthanum strontium manganite thin films by metal-organic chemical liquid deposition. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2011, **94**(9): 2783–2787.
- [19] GU J Y, OGALE S B, RAJESWARI M, *et al.* In-plane grain boundary effects on the magnetotransport properties of  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_{3-\delta}$ . *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(9): 1113–1115.
- [20] CHENG S L, LIN J G. Low-field magnetoresistance in nanocrystalline  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  films. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(11): 114318.