

Si(100)衬底上(110)取向 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜的制备与性能

李廷先¹, 张铭¹, 王光明¹, 郭宏瑞¹, 李扩社², 李喜露¹, 周文龙¹, 严辉¹

(1. 北京工业大学 材料学院, 北京 100124;

2. 北京有色金属研究总院 稀土材料国家工程中心, 北京 100088)

摘要: 用脉冲激光沉积法在 Si(100)衬底上制备了(110)择优取向的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜, 研究了环境氧压对薄膜结晶度、取向、表面形貌和微结构的影响。结果表明: 10 Pa 氧压下沉积的薄膜具有高结晶度的(110)择优取向, 晶粒分布均匀, 表面均方根粗糙度 R_{rms} 为 1.35 nm。与无明显择优取向的薄膜相比, (110)择优取向的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜具有较高的饱和磁化强度(M_s)、金属-绝缘体相变温度($T_{\text{M-I}}$)和较低的电阻率(ρ)。

关键词: 庞磁电阻; 磁性材料; 脉冲激光沉积; 择优取向

中图分类号: TB332

文献标志码: A

Preparation and properties of (110) preferred orientation $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ film deposited on Si (100) substrate

LI Ting-xian¹, ZHANG Ming¹, WANG Guang-ming¹, GUO Hong-rui¹,
LI Kuo-she², LI Xi-lu¹, ZHOU Wen-long¹, YAN Hui¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. National Engineering Research Central for Rare Earth Materials,
General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ films with highly (110) preferred orientation were deposited on Si (100) substrate without any buffer layer by using a pulsed laser deposition technique. The effects of oxygen pressure on crystallinity, preferred orientation, surface morphology, magnetic and electrical transport properties of the films were investigated. The results show that, comparing to the films deposited at other ambient oxygen pressure, $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ films deposited at 10 Pa presented highly (110) preferred orientation with highly crystalline quality and have more homogeneous grain size distribution as well as dense microstructure. Meanwhile, the roughness of the films also shows the smallest root mean square value (R_{rms}) of 1.35 nm. The film with the (110) preferred orientation shows higher saturated magnetization (M_s), higher metal-insulator transition temperature ($T_{\text{M-I}}$) and lower resistivity (ρ) than that without preferred orientation one.

Key words: colossal magnetoresistance; magnetic materials; pulsed laser deposition; preferred orientation

掺杂的稀土锰酸盐化合物由于具备庞磁电阻效应, 以及在磁电子学上的潜在应用, 可以用于磁场传感器、磁存储器件和磁盘读出等领域, 引起了人们极大的研究兴趣^[1-4]。其中的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 由于具有高于室温的居里温度和半金属特性, 成为这些材料中

的研究热点^[1]。为了满足上述应用, $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 应被制备成薄膜形式。目前, 大多数 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜为(001)取向, 有研究者发现, (110)取向的掺杂锰氧化物薄膜具有优于(001)取向薄膜的磁学性质^[2-4], 如较高的饱和磁化强度和居里温度以及较薄的界面磁学

死层等^[2-7]。因此,基于(110)取向 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜磁器件的性能应优于基于(001)取向器件的性能。

尽管国内外研究小组已经在 SrTiO_3 (STO)和 LaAlO_3 (LAO)单晶衬底上成功沉积了(110)取向 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜^[5, 8-10],但是,相对于 Si 衬底,这些衬底价格过于昂贵,而且很难与传统的半导体工艺兼容^[11],制约了 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜在器件上的应用。直接沉积在 Si 上的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜一般是多晶的,没有明显的择优取向,为了获得择优取向,往往需要在衬底和薄膜之间沉积复杂的缓冲层,从而加大工艺的复杂性。在本研究中,不加任何缓冲层,采用脉冲激光沉积技术,通过调节氧压,在 Si(100)衬底上沉积了(110)择优取向的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜,研究了氧压对薄膜的取向、表面形貌、磁学和电输运性能的影响。

1 实验

1.1 样品制备

多晶 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 粉末采用固相反应法制备,实验原料为化学纯 La_2O_3 、 SrCO_3 和 MnO_2 粉末。所得 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 粉末经 500 MPa 压力压制成直径为 30 mm 的圆片,并在 1 400 °C 下高温烧结 4 h 得到脉冲激光镀膜用靶材。实验所用 PLD 系统由两部分组成:一部分为中科院沈阳科学仪器厂生产的 PLD-II 型沉积系统,另一部分为德国 Coherent 公司生产的 Compex Pro 205 F 型 KrF 准分子激光器,激光波长 248 nm,脉冲宽度 25 ns,激光能量频率可调,激光束经透镜聚焦后导入沉积腔内。

(100)取向的 Si 片按甲苯、丙酮、乙醇的顺序各超声清洗 15 min,放入沉积腔体之前在 HF 与水的体积比为 1:4 的溶液中浸泡 2 h 除去表面的 SiO_2 。沉积前,先将腔内气压抽到 4×10^{-4} Pa,然后通入 O_2 气,开始激光沉积薄膜,氧压 1~50 Pa。试验过程中脉冲激光频率固定在 5 Hz,靶与衬底之间的距离为 50 mm,衬底温度 700 °C,沉积时间 5 min,薄膜厚度约 50 nm。沉积结束后,所有样品均在 1 kPa 氧压的气氛中原位退火 30 min。

1.2 测试

薄膜样品的晶体结构和取向用 Bruker-D8 Advance 型 X 射线衍射仪($\text{Cu K}\alpha$, 0.154 060 nm)表征。薄膜厚度用 Seimitsu Surfcom 480A profiler 台阶仪检测。用 Hitachi S3500N 扫描电子显微镜和 Solver P47 Pro 原子力显微镜观察薄膜的表面形貌,薄膜的磁学

性能和电输运性能用 PPMS 测试(Quantum Design Inc, PPMS-9),测试磁场方向平行于薄膜表面。

2 结果与讨论

在氧压分别为 1、5、10、20 和 50 Pa 的条件下制备了 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜,薄膜厚度经 Seimitsu Surfcom 480A profiler 台阶仪测试约 200 nm。图 1 所示为不同氧压下沉积的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜的 XRD 谱。从图 1 可以看出,除沉积氧压为 1 Pa 的样品外,其他薄膜都呈现结晶状态。其中 5 Pa 氧压下薄膜无明显择优取向,10 Pa 氧压下沉积的薄膜具有(110)择优取向,衍射峰的积分强度最高。氧压大于 10 Pa 后,随着氧压的升高,(110)衍射峰的积分强度逐渐降低,当沉积氧压为 50 Pa 时,(110)取向的衍射峰几乎消失。

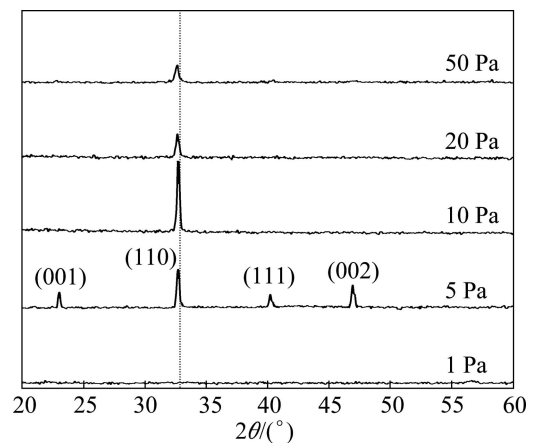


图 1 不同氧压下沉积的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜的 XRD 谱

Fig.1 XRD patterns of $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ films directly deposited on Si substrate at various oxygen pressures

为了解释 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜沿(110)方向生长的现象,计算 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜和 Si 衬底之间的晶格失配度(λ),其计算公式如下:

$$\lambda = |a_f - a_s| / a_s \times 100\% \quad (1)$$

式中: a_f 和 a_s 分别是薄膜和衬底的晶格常数。Si 的晶格常数是 0.543 nm, $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 的是 0.388 nm。通过计算发现, Si(100)面和 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (100)面的晶格失配是 7.2%;而在 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (110)面内,沿(110)和(001)晶向的原子间距分别是 0.546 和 0.579 nm,与 Si(100)面的(010)和(001)晶向的失配度为 0.5%和 6.6%,小于 Si 与 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (001)面之间的晶格失配度。因此, $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 在 Si 衬底上易于沿(110)

方向生长。

图 2 所示为 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ 薄膜(110)峰的衍射角 2θ 和半高宽(Full width at half maximum, FWHM)随氧压的变化情况。(110)择优取向 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ 薄膜的 FWHM 值在沉积氧压 10 Pa 时最小, 氧压大于 10 Pa 时, 随着压强的升高, FWHM 值增大, 这说明该工艺条件下制备的 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ 薄膜的结晶质量最好。随着氧压的升高, (110)取向 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ 薄膜的结晶度降低。主要原因有以下两个: 首先, 当沉积氧压较低时, 由于缺氧容易导致薄膜中氧含量偏离正常化学比, 导致晶格常数小于正常化学比时的晶格常数。随着环境氧压的升高, 晶格中氧含量增加, 薄膜晶格常数有增大的趋势^[12]。在本研究中, 随着环境氧压的升高, 更多氧原子混入生长中的 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ 薄膜, 导致 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ 晶格常数变大。氧压越高, 混入薄膜晶格中的氧原子越多, 薄膜的晶格常数逐渐增大。使 Si(100)面和 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ (110)面的晶格失配在 10 Pa 氧压时达到最小值。此时的 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ 薄膜具有(110)择优取向, 结晶质量最好。这个现象可以用(110)衍射峰的位置随氧压的变化来解释, 如图 2 所示, (110)择优取向 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ 薄膜的(110)峰的位置随着氧压的增加向小角度方向移动, 根据布拉格公式

$$2d\sin\theta=n\lambda \quad (2)$$

式中: d 为晶面间距; θ 为衍射角; λ 为 X 射线波长; n 为正整数。衍射角的减小意味着晶面间距的增大, 也就是晶格常数的变大, 即 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ 晶格常数随氧压的增大而增大, 导致 Si(100)面和 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃

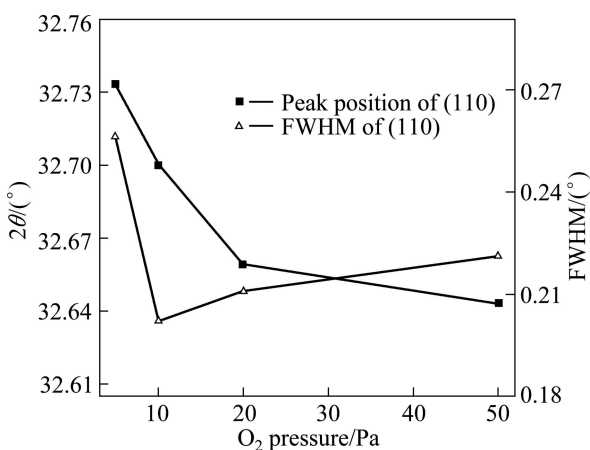


图 2 (110)衍射峰的角度与半高宽(FWHM)随氧压的变化曲线

Fig.2 Oxygen pressure dependence of diffraction peak and FWHM for (110) peak

(110)面的晶格失配度在 10 Pa 氧压时达到最小值, 结晶质量最高。而当沉积氧压为 1 Pa 时薄膜呈现非晶状态, 与氧缺乏导致的氧偏离化学计量比有关。

另一个可能的原因来自于沉积过程中氧原子与剥蚀粒子之间的碰撞。根据原子碰撞机制^[13-15], 随着环境氧压的增加, 由于与氧原子的频繁碰撞, 到达衬底表面的剥蚀粒子能量降低, 使粒子没有足够的能量扩散至稳定的晶格位置^[16], 导致薄膜的结晶质量下降。

图 3 所示为不同氧压下沉积的 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ 薄膜表面的 SEM 像。由图 3 可知, 10 Pa 氧压下沉积的 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ 薄膜晶粒尺寸约 50 nm, 颗粒大小均匀、分布致密、颗粒间空隙小。随着氧压的升高, 薄膜的晶粒尺寸变小。

用原子力显微镜研究了薄膜的表面形貌和粗糙度, 如图 4 所示, 所有薄膜均显示颗粒状结构, 10 Pa 氧压时晶粒大小分布均匀, 晶粒之间排布紧密。随着氧压的升高, 晶粒尺寸变小。

薄膜中的晶粒大小和晶粒尺寸分布与到达薄膜表面沉积原子的能量有关, 这些到达薄膜表面的原子对薄膜表面碰撞剥蚀减小晶粒尺寸, 使晶粒之间排列变得疏松; 或者经表面扩散进入晶格位置, 使晶粒进一步增大。当氧压低于 10 Pa 时, 沉积原子进入晶格位置, 使薄膜晶粒增大的效应大于表面剥蚀造成的晶粒减小的效应。反之, 当氧压高于 10 Pa 时, 沉积原子进入晶格位置使薄膜晶粒增大的效应小于表面剥蚀使晶粒减小的效应。最终使得 10 Pa 氧压下沉积样品的晶粒尺寸最大。

用 AFM 仪器自带的 NoVa RC1 软件计算了薄膜的均方根粗糙度(R_{rms})。均方根粗糙度(R_{rms})由下式定义

$$R_{\text{rms}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - Z_a)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: Z_i 是第 i 个数据点的垂直高度; Z_a 是所有点高度的算术平均值。

在 50、20、10 和 5 Pa 氧压下沉积的 La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃ 薄膜的均方根粗糙度(R_{rms})如图 5 所示。可以发现, 10 Pa 氧压下沉积的薄膜具有最小的 R_{rms} 值 1.35 nm。由于吸附原子到达某确定晶面的稳定晶格位置需要克服相应的势垒, 而氧压增大时吸附原子能量减小, 使吸附原子没有足够的能量克服这个势垒到达该晶面的稳定位置, 从而使新核的形成, 导致薄膜表面的平整度降低, R_{rms} 增加。氧压为 5 Pa 时薄膜的 R_{rms} 比 10 Pa 的略高, 这与薄膜变成(110)择优取向有关, 与 WANG 等^[17]报道的薄膜表面粗糙度随薄膜沿某个晶面择优取向生长而降低一致。

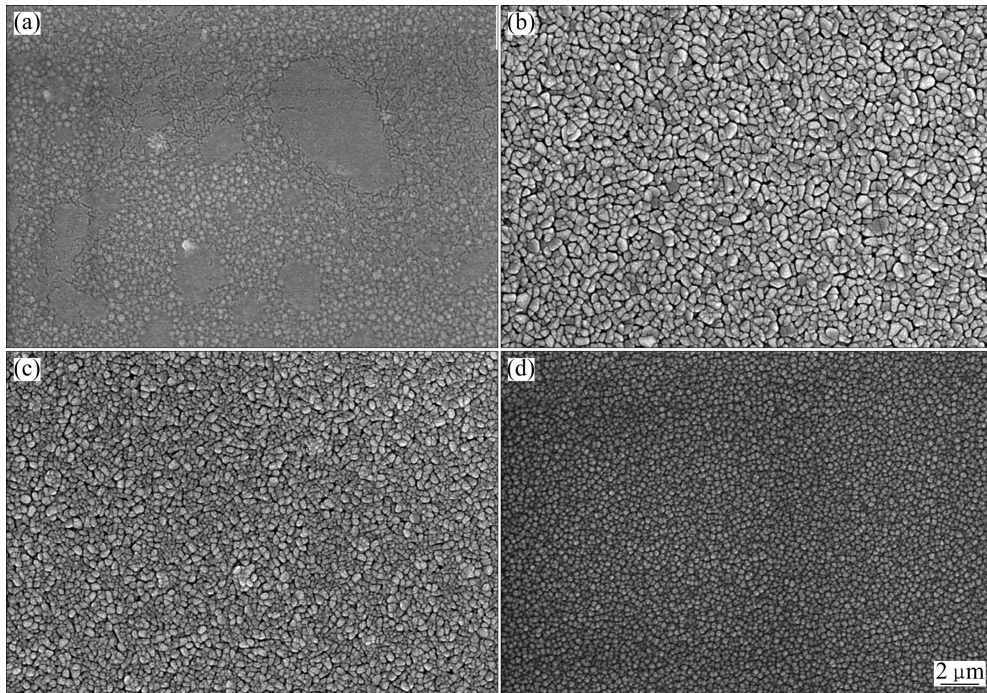


图3 不同氧压下沉积的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜的 SEM 像

Fig.3 SEM images of pulsed laser deposited $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ films grown at various oxygen pressures: (a) 5 Pa; (b) 10 Pa; (c) 20 Pa; (d) 50 Pa

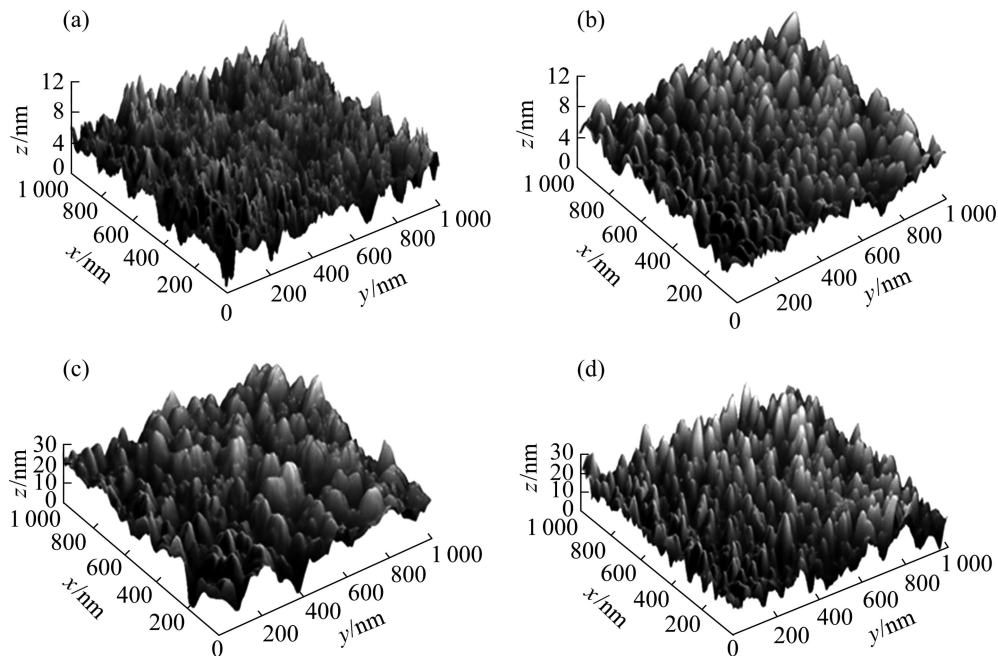


图4 不同氧压下沉积的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜的 3D-AFM 像

Fig.4 3D-AFM images of pulsed laser deposited $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ films grown at various oxygen pressures: (a) 5 Pa; (b) 10 Pa; (c) 20 Pa; (d) 50 Pa

图6所示为温度为300 K时 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜的磁滞回线。由图6可看出, 10 Pa 氧压下制备的(110)取向薄膜的饱和磁化强度约 105.5 kA/m; 5 Pa 氧压下

制备的无择优取向薄膜的饱和磁化强度约 75.5 kA/m。由于(110)取向生长的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜与 Si 衬底的晶格失配小, 晶格失配造成的垂直于薄膜生长方向的

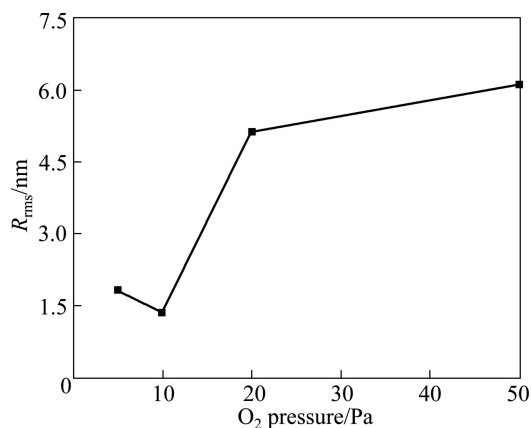


图 5 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜的均方根粗糙度随氧压的变化

Fig.5 Oxygen pressure dependence of root mean square values of $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ film

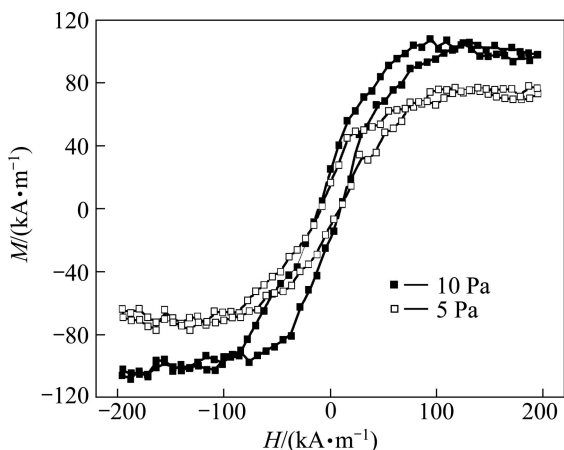


图 6 不同氧压下沉积的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜的室温磁滞回线

Fig.6 Room temperature $M-H$ curves of $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ film deposited at different oxygen pressures

拉应变小, 而无明显择优取向生长的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜由于较大的拉应变导致晶格畸变增加, 破坏了磁畴方向的一致性, 使体系的磁有序度降低, 从而降低了饱和磁化强度。因此, (110)取向薄膜具有较高的饱和磁化强度。

图 7 所示为 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜的 $R-T$ 曲线, 1 Pa 氧压下制备的无定形 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 的 $R-T$ 曲线如 7(b)所示, 薄膜在整个测量温度区间显示绝缘体行为, 电阻随温度的升高而降低。5 Pa 和 10 Pa 氧压下制备的结晶态的薄膜在 250 K 左右存在明显的金属绝缘体相变, 且 10 Pa 氧压下制备的(110)择优取向薄膜, 具有高于 5 Pa 氧压下制备的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜的绝缘体-金属相变温度和低的电阻, 与文献[18-19]报道一致。

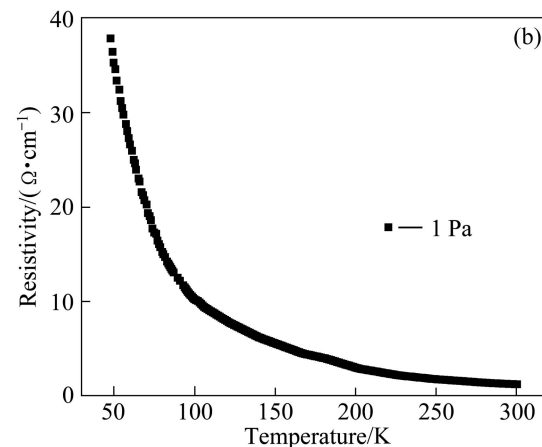
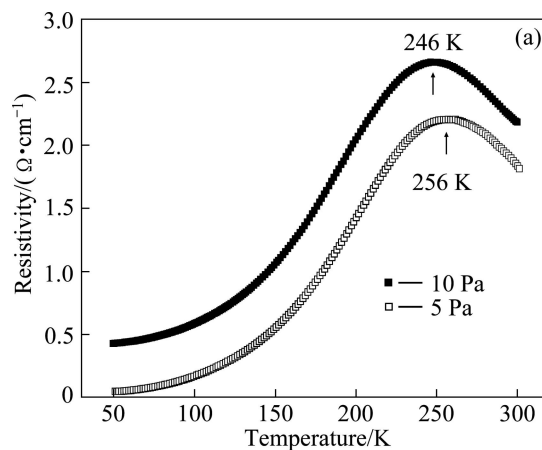


图 7 不同氧压下沉积的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜的电阻随温度变化

Fig.7 Temperature dependence of resistivity for $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ films at different oxygen pressures

10 Pa 氧压下制备的(110)取向 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜的晶粒尺寸相对较大, 晶粒大小分布均匀, 因此, 晶界散射对载流子输运造成的影响小, 使该条件下的薄膜具有较低的电阻率; 另一方面, 自旋无序散射对电阻的贡献由于饱和磁化强度的升高而减小, 因而使(110)取向薄膜的电阻率下降。此外, 由晶格失配造成的拉应变, (110)取向薄膜小于无择优取向薄膜, 使薄膜中 Mn^{3+} 和 Mn^{4+} 之间的双交换作用强于无择优取向薄膜, 因此(110)取向薄膜的 T_{MI} 略高于无择优取向薄膜的。

3 结论

1) 在 10 Pa 氧压下沉积的(110)取向的 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜具有较高的结晶质量、均匀的晶粒大小和致密的微结构。且随着氧压的增加, 结晶质量

下降,晶粒分布变得不均匀,微结构变得疏松。

2) AFM 测量结果显示,在 10 Pa 氧压下沉积的 (110)择优取向 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 薄膜具有最小的均方根粗糙度 R_{rms} 值。

3) 与无择优取向薄膜相比, (110)取向薄膜具有较高的饱和磁化强度和金属绝缘体相变温度以及较低的电阻率。

REFERENCES

- [1] RAMIREZ A P. Colossal magnetoresistance [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1997, 9: 8171–8199.
- [2] BERNDT L M, BALBARIN V, SUZUKI Y. Magnetic anisotropy and strain states of (001) and (110) colossal magnetoresistance thin films [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77: 2903–2905.
- [3] BOSCHKER H, MATHEWS M, HOUWMAN E P, NISHIKAWA H, VAILIONIS A, KOSTER G, RIJNDERS G, BLANK D H A. Strong uniaxial in-plane magnetic anisotropy of (001) and (011)-oriented $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ thin films on NdGaO_3 substrates [J]. *Physical Review B*, 2009, 79: 214425.
- [4] PI L, ZHU H, XU X J, ZHANG Y H. Effect of the substrate orientation on the transport properties of $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ epitaxial films [J]. *Chinese Physics Letters*, 2001, 18: 111–113.
- [5] VEIS M, VISNOVSKY S, LECOEUR P, HAGHIRI-GOSNET M, RENARD J P, BEAUVILLAIN P, PRELLIER W, MERCEY B, MISTRICK J, YAMAGUCHI T. Magneto-optic spectroscopy of $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ films on SrTiO_3 (100) and (110) substrates [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42: 195002.
- [6] MINOHARA M, FURUKAWA Y, YASUHARA R, KUMIGASHIRA H, OSHIMA M. Orientation dependence of the schottky barrier height for $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$ heterojunctions [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94: 242106.
- [7] MA J X, LIU X F, LIN T, GAO G Y, ZHANG J P, WU W B, LI X G, SHI J. Interface ferromagnetism in (110)-oriented $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$ ultrathin superlattices [J]. *Physical Review B*, 2009, 79: 174424.
- [8] QI X Y, MIAO J, DUAN X F, ZHAO B R. Microstructure of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ epitaxial films grown on (001) SrTiO_3 substrate [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 277: 218–222.
- [9] LIANG Y C, LIANG Y C. Strain-dependent surface evolution and magneto-transport properties of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ epilayers on SrTiO_3 substrates [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2007, 304: 275–280.
- [10] 金克新, 谭兴毅, 赵省贵, 陈长乐. $\text{LaAlO}_3(100)$, (110)和(111)衬底上 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜的输运和光诱导特性研究[J]. *中国稀土学报*, 2008, 26(12): 709–712.
- [11] JIN Ke-xin, TAN Xing-yi, ZHAO Sheng-gui, CHEN Chang-le. Transport and photoinduced properties of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ thin films deposited on $\text{LaAlO}_3(100)$, (110) and (111) substrates[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2008, 26(12): 709–712.
- [12] VISPUTE R D, TALYANSKY V, TRAJANOVIC Z, CHOOPUN S, DOWNES M, SHARMA R P, VENKATESAN T, WOODS M C, LAREAU R T, JONES K A, ILIADIS A. High quality crystalline ZnO buffer layers on sapphire (001) by pulsed laser deposition for III–V nitrides [J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70: 2735–2737.
- [13] ZHU Y T, BALDONADO P S, PETERSON E J, PARK Y S, MANTHIRAM A, BUTT D P, PETERSON D E, MUELLER F M. Variation of oxygen content and crystal chemistry of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.5+\delta}$ [J]. *Physica C*, 1998, 298: 29–36.
- [14] THORNTON J A. The microstructure of sputter-deposited coatings[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology A*. 1986, 4: 3059–3065.
- [15] ESTE G, WESTWOOD W D. Stress control in reactively sputtered AlN and TiN films [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 1987, 5: 1892–1897.
- [16] NIX W D. Mechanical-properties of thin films[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 1989, 20: 2217–2245.
- [17] ZHANG J, CUI D F, LU H B, CHEN Z H, ZHOU Y L, LI L. Structural behavior of thin BaTiO_3 film grown at different conditions by pulsed laser deposition [J]. *Japanese Journal of Applied Physics: Part 1*, 1997, 36: 276–283.
- [18] WANG C, CHENG B L, WANG S Y, LU H B, ZHOU Y L, CHEN Z H, YANG G Z. Effects of oxygen pressure on lattice parameter, orientation, surface morphology and deposition rate of $(\text{Ba}_{0.02}\text{Sr}_{0.98})\text{TiO}_3$ thin films grown on MgO substrate by pulsed laser deposition [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 485: 82–89.
- [19] MURUGAVEL P, PADHAN P, PRELLIER W. Effect of oxygen pressure on the interface related magnetic and transport properties of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{BaTiO}_3$ super-lattices [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2006, 18: 3377–3384.
- [20] SIGNORINI L, RIVA M, CANTONI M, BERTACCO R, CICCACCI F. Epitaxial $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ thin films with unconventional magnetic and electric properties near the Curie temperature [J]. *Thin Solid Films*, 2006, 515: 496–499

(编辑 李艳红)