

Tuning Structural and Magnetoresistance Properties of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ Thin Films by Epitaxial Strains

Panpan Yao^{1*}, Hongguang Dong^{2*#}, Yi Luo¹, Haizhong Guo^{1#}

¹School of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan

²Higher Education Press, Beijing

Email: #donghg@hep.com.cn, #hguo@zzu.edu.cn

Received: Jul. 17th, 2018; accepted: Jul. 30th, 2018; published: Aug. 6th, 2018

Abstract

Structural, transport, magnetic, and magnetoresistance properties of the epitaxial $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ thin films on different substrates grown by pulsed laser deposition were investigated. The results of X-ray diffraction show that all the $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ thin films are epitaxial growth and at single phase, and the lattice parameter c changes with the epitaxial strain due to the lattice mismatch between the thin film and the different substrates. The results of the magnetization and the electrical transport measurements indicate that the $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ thin films grown on different substrates have different Curie temperature T_C and metal-to-insulator transition temperature T_R , respectively. Moreover, the resistivity $\rho(T)$ and corresponding magnetoresistance of the $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ thin films change with the epitaxial strain. Our findings show that the epitaxial strain is a powerful tool for tuning the properties of the epitaxial thin films.

Keywords

$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ Thin Film, Pulsed Laser Deposition, Epitaxial Strain, Magnetoresistance

用外延应力来调控不同衬底上的 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜的结构性质和磁电阻性质

姚盼盼^{1*}, 董洪光^{2*#}, 罗毅¹, 郭海中^{1#}

¹郑州大学物理工程学院, 河南 郑州

²高等教育出版社, 北京

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 姚盼盼, 董洪光, 罗毅, 郭海中. 用外延应力来调控不同衬底上的 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜的结构性质和磁电阻性质[J]. 应用物理, 2018, 8(8): 353-361. DOI: 10.12677/app.2018.88045

Email: #donghg@hep.com.cn, #hguo@zzu.edu.cn

收稿日期: 2018年7月17日; 录用日期: 2018年7月30日; 发布日期: 2018年8月6日

摘要

在这个工作中,我们研究了利用脉冲激光沉积技术在不同衬底上外延生长出 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 外延薄膜的结构、输运、磁性、及磁电阻性质。用X射线衍射技术测量的结果表明在不同衬底上制备的 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜是外延生长并且是单相的。 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜的晶格常数 c 随由于薄膜与衬底的晶格失配引起的外延应力的变化而变化。磁性性质和电输运性质的测量结果分别表明不同衬底上的 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜具有不同的顺磁-铁磁转变温度(居里温度 T_C)和金属-绝缘体转变温度(T_R)。此外,不同衬底上 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜的电阻率 $\rho(T)$ 和磁电阻也随着外延应力而变化。我们的实验说明了外延应力是调控外延薄膜物性很有力的工具。

关键词

$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜, 脉冲激光沉积, 外延应力, 磁电阻

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

随着人类社会的发展和进步,科技界对材料科学和器件提出了越来越多新的要求。比如往往需要将具有电学、光学、磁学等完全不同物理性质的材料复合、集成在一起,从而开发出具有崭新性能的新型材料和器件。但传统半导体材料,由于物理性质较为单一,无法满足这种要求。而过渡金属氧化物具有比半导体材料更复杂的晶体结构、化学配比关系和价态变化、以及相图等,其内部还存在晶格/电荷/自旋/轨道等多个自由度之间的竞争耦合关系,因此也呈现出更为丰富的物理性质,从而有望满足并促进新一代微电子技术的要求与发展[1][2]。尽管现今半导体器件仍然是电子器件的主流,这些具有快速、庞大响应及高电容特性的氧化物材料,通过对多种自由度,包括自旋、电荷、轨道、和晶格的调控而具有的多功能氧化物器件,将会是下一代理想器件。氧化物的研究不仅给自旋、电荷、轨道、晶格相互耦合体系赋予了新的意义,引起了基础凝聚态物理和材料科学的伟大进步,并且促进了关联电子体系的技术应用[3]。

现代高科技产业的发展,除了要求多种物性的交叉与组合外,还需要电子器件更加微型化、集成化。这就使得薄膜材料逐渐成为现在研究的热点。由于尺寸效应的影响,薄膜材料往往具有不同于其体材料的性质。在氧化物薄膜中,不同物性的氧化物外延生长在一起,一个晶体结构对另一个的影响能够改变界面处的原子位置、电子数量甚至电子电荷在原子周围的分布。由于维度降低,相应的特殊电子态被限制在尺度小于电子平均自由程的体系中,电子电荷/自旋/轨道/晶格之间的关联作用更加明显,因而导致氧化物界面上出现新奇的、与体材料的行为特征相关却又截然不同的新奇的物理性质和效应。

界面应力是凝聚态材料中调控晶体场能的主要手段之一。应力可以改变材料的晶格常数,可以展开能带中简并的能级,改变材料的电子结构,发生轨道重构、自旋-轨道耦合强度改变、电子-声子耦合强度

改变等微观机制, 实现诸如金属-绝缘体相变、顺电-铁电相变等宏观物理现象。因此应力是调控氧化物低维结构物性一种非常有效的手段。另一方面, 过渡金属氧化物中, 钙钛矿稀土锰氧化物以其超大的磁电阻值和丰富的物理内涵而备受瞩目。界面应力对锰氧化物低维结构的磁性影响巨大, 在 $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3$ 薄膜中可以通过应力来调控薄膜中 Mn 的电子轨道排列, 从而改变磁性[4]。此外, 在平行于 $\text{La}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{MnO}_3$ 薄膜界面方向的拉应力会导致其居里温度 T_C 增大, 而界面方向的拉应力会导致 $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ 和 $\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{MnO}_3$ 薄膜的居里温度 T_C 减小[5]。已经被证明衬底引起的拉应力和压应力会使 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜的居里温度 T_C 减小[6], 并且界面方向的应力也能够调控 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$ 超晶格的磁电性质[7]。更多的实验已经证实衬底引起的应力会影响外延锰氧化物薄膜的磁各向异性、电阻率和居里温度 T_C [8] [9] [10] [11] [12]。另外, 通过氧空位也能够调控 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ 外延薄膜的磁性和输运性质[13]。

虽然前期有许多用应力来调控锰氧化物低维结构的性质的报道, 但是更系统的用界面应力(包括从张应力逐渐变到压应力)对超薄锰氧化物薄膜(50 个原胞层厚, ~17 nm)的物性调控的报道还没有。在本工作中, 我们使用脉冲激光沉积技术在不同的衬底上(不同的晶格常数)生长出具有不同外延应力(从张应力到压应力)的高质量的 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO)超薄外延薄膜, 薄膜厚度为 50 个原胞层厚, ~17 nm。探究不同的外延应力对 LSMO 薄膜的晶格结构、输运、磁性及磁电阻性质, 揭示应力对氧化物薄膜的晶格结构、输运性质、磁性及磁电阻性质的影响, 进一步揭示 LSMO 薄膜中自旋/晶格/电荷/轨道等自由度之间的相互作用, 并探索用外延应力调控氧化物薄膜物性的途径。我们的实验说明了 LSMO 外延薄膜的晶格常数取决于薄膜下面的衬底(晶格常数不同)。磁化 $M(T)$ 曲线表明不同衬底(外延应力不同)上的 LSMO 薄膜具有不同的顺磁-铁磁转变温度 T_C 。电阻率 $\rho(T)$ 曲线表明不同衬底上的 LSMO 薄膜具有不同的金属-绝缘体转变温度 T_R , 即外延应力能够调控 LSMO 薄膜的电阻率 $\rho(T)$ 。 $MR(T)$ 曲线表明不同衬底上的 LSMO 薄膜有不同的磁电阻, 即外延应力能够调控 LSMO 薄膜的磁电阻。最终结论是我们的实验说明了外延应力是调控外延薄膜物性很有力的工具, 以便我们能够更好的利用外延应力来调控超薄氧化物外延薄膜的物理性质和功能, 为功能氧化物低维结构材料的应用打下基础。

2. 实验结果及讨论

我们利用脉冲激光沉积技术在不同衬底上生长出高质量的 LSMO 外延薄膜, 单晶衬底分别为 LaAlO_3 (LAO, $a_c = 3.789 \text{ \AA}$)、 $(\text{LaAlO}_3)_{0.29}(\text{Sr}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{TaO}_3)_{0.71}$ (LSAT, $a_c = 3.867 \text{ \AA}$)、 SrTiO_3 (STO, $a_c = 3.903 \text{ \AA}$)、 DyScO_3 (DSO, $a_c = 3.937 \text{ \AA}$)、 BaTiO_3 (BTO, $a_c = 3.990 \text{ \AA}$)、 $(\text{PbMg}_{0.33}\text{Nb}_{0.67})_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$ (PMN-PT, $a_c = 4.019 \text{ \AA}$) 和 MgO ($a_c = 4.209 \text{ \AA}$), 其中 a_c 是其立方晶格常数。此外, LSMO 块材具有三角晶体结构, 其立方晶格常数 $a_c = 3.894 \text{ \AA}$ 。如图 1 所示, 把块材 LSMO 的平面内晶格常数和不同氧化物衬底之间的晶格常数相比较, 并计算出其两者之间的由于晶格失配引起的应力。从图 1 可以看出, 随着衬底晶格常数的增大, 外延应力压应力逐渐变小, 然后变为张应力, 并且张应力随着晶格常数增大而增大。例如 LSMO 外延在 LAO ($a_c = 3.789 \text{ \AA}$) 和 LSAT ($a_c = 3.867 \text{ \AA}$) 上受到压应力的作用, 分别为 -2.67% 和 -0.59%。随着衬底晶格常数增大, 逐渐变为张应力, 在 STO、DSO、BTO、PMN-PT、和 MgO 上分别为 0.33%、1.19%、2.50%、3.20% 和 7.60%。

在利用脉冲激光沉积技术制备薄膜的过程中, 氧气压和衬底温度分别为 5 Pa、600°C。薄膜生长时, 用高能电子衍射(RHEED)观察到大概每 12 脉冲制备一个原胞层厚的 LSMO 薄膜, 共生长 50 个原胞层厚度(50.u.c.), 即 LSMO 薄膜厚 17 nm。在沉积结束后, LSMO 薄膜在 950°C 下通氧气退火 5 小时。

我们用上海光源的同步辐射 X 射线衍射技术(X-ray diffraction, XRD)来测量 LSMO 薄膜的晶格质量和晶格结构。图 2(a)~图 2(g) 显示了不同衬底上 LSMO 薄膜的 XRD θ -2 θ 扫描结果, 插图显示 LSMO 薄膜与 STO 衬底(013)面的 Φ 扫描结果。从图 2 看出, 除了衬底和薄膜的(001)衍射峰, 并没有发现有杂质峰或者其它相的衍射峰, 表明了在不同衬底上的 LSMO 薄膜是外延生长并且是单相的。另外, 我们发现 LSMO

薄膜的衍射峰在衬底(LAO, LSAT)衍射峰的左边, 其原因在于 LSMO 薄膜受到衬底的压应力; LSMO 薄膜的衍射峰在衬底(STO, DSO, BTO, PMN-PT, MgO)衍射峰的右边, 其原因在于 LSMO 薄膜受到衬底的拉应力。由于薄膜与衬底的晶格失配引起的外延应力, LSMO 薄膜的晶格常数 c 随外延应力变化而变化(如图 3(b)所示)。正如图 3(b)所示, 当 LSMO 薄膜受到压应力(LAO 和 LSAT 衬底上)时, 其 c 轴晶格常数增大; 当 LSMO 薄膜受到拉应力时, 其 c 轴晶格常数减小。所以我们可以得到外延薄膜的晶格常数取决于薄膜下面的衬底[9] [14]。另外, 我们用球差校正扫描透射电镜(STEM)对在 STO 衬底上生长的 LSMO 薄膜进行了表征, 如图 3(a)所示。从图 3(a)可以看出, 从图中可以看出, LSMO/STO 界面非常明锐清晰, 没有位错、杂相等缺陷存在, 揭示了我们制备的薄膜和衬底是外延的, 晶体质量非常好。

为了进一步研究不同衬底上 LSMO 外延薄膜的输运和磁性等性质, 我们用物性综合测试系统(PPMS)分别测量了磁化强度、电阻率 $\rho(T)$ 和磁电阻随温度变化的关系。图 4(a)~图 4(f)显示了不同衬底上 LSMO

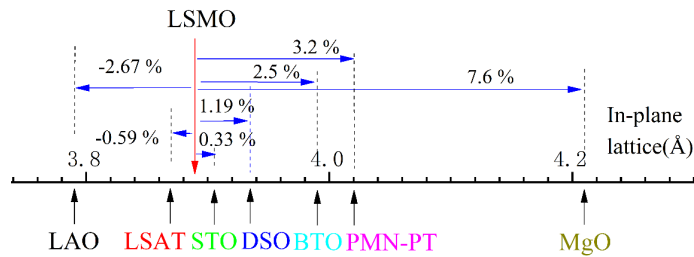


Figure 1. Comparison of pseudo-cubic, in-plane lattice parameter of LSMO with various oxide substrates
图 1. LSMO 与多种氧化物衬底的赝立方、平面内 a 轴晶格常数的比较

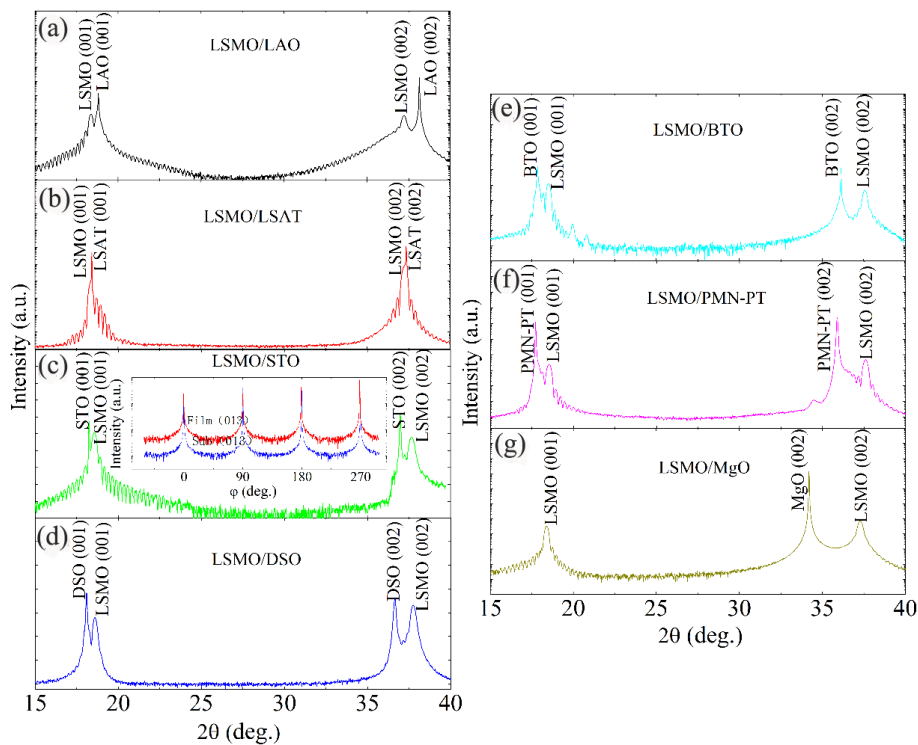


Figure 2. The results of XRD θ - 2θ scan of LSMO thin films grown on different substrates (a)~(g). The inset shows the result of (013) Φ -scan of LSMO thin film grown on STO substrate
图 2. (a)~(g)不同衬底上 LSMO 薄膜的 XRD θ - 2θ 扫描结果, 插图表示 LSMO 薄膜与 STO 衬底(013)面的 Φ 扫描结果

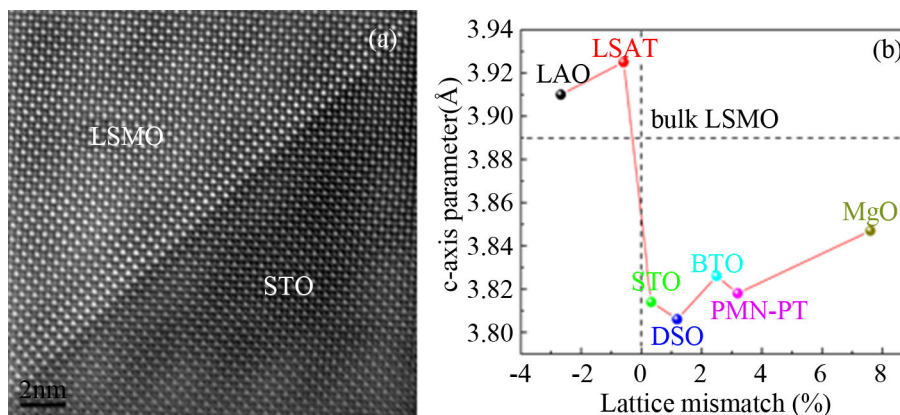


Figure 3. The STEM micrograph of LSMO thin film grown on STO substrate (a). c-axis lattice constants of the LSMO thin films are deduced from the XRD data (b). The dashed line indicates the lattice constant of the bulk LSMO

图 3. (a) STO 衬底上生长的 LSMO 薄膜的 STEM 图像。(b)利用 XRD 数据推导出 LSMO 薄膜的 c 轴晶格常数。虚线表示块材 LSMO 的晶格常数

薄膜的在加磁场冷却(实心圆)和零磁场冷却(空心圆)的磁化 $M(T)$ 曲线, 插图表示 $T = 10$ K 下的不同衬底上 LSMO 薄膜的磁滞回线, 图 4(g) 表示衬底 DSO 的磁化 $M(T)$ 曲线。从图 4(a)~图 4(f) 中我们可以看到 LSMO 薄膜从高温到低温过程中发生铁磁 - 顺磁相变(相变温度 T_C)。低温时, 场冷却下的磁化强度曲线和零场冷却的曲线分离, 并且比零场冷却的大, 原因在于 LSMO 薄膜中存在着自旋玻璃态。另外, 从图 4(d) 中我们可以看到在 $T = 200$ K 处, LSMO 薄膜的磁化存在跳变, 原因在于 BTO 衬底发生三斜到四方的结构相变。然而, 在图 4(g) DSO 衬底上, 我们没有测量出 LSMO 薄膜的磁化强度, 原因在于衬底 DSO 具有较大的磁性[14]。图 4(h) 显示了 LSMO 薄膜的 T_C 和饱和磁矩随晶格失配的变化曲线。

图 5(a)~图 5(g) 显示了不同衬底上 LSMO 薄膜的电阻率 $\rho(T)$ 曲线, 黑线、红线和蓝线分别表示在外加磁场 $H = 0$ T、3 T 和 5 T 下的电阻率 $\rho(T)$ 曲线, 其磁场垂直于薄膜表面。图 5(h) 表示 LSMO 薄膜的金属 - 绝缘体相变温度 T_R 随晶格失配的变化曲线。从图 5(a)~图 5(g) 中我们可以看到在 T_R 处发生金属 - 绝缘体相变, 温度低于 T_R 时, 电阻率随着温度的升高而增加, 呈金属性; 温度高于 T_R 时, 电阻率随温度的升高而减小, 呈绝缘体性质。在较高温度区域, 相同温度下的电阻率随外加磁场的增大而减小, 原因在于外加磁场使其电子自旋规则排列从而减小散射。另外, 也可以看到在相同的外加磁场下, 不同衬底上 LSMO 薄膜的电阻率 $\rho(T)$ 变化不同, 原因在于 LSMO 薄膜受到的应力不同, 其电阻率变化也不同。我们的实验说明了外延应力能够调控 LSMO 薄膜的电阻率 $\rho(T)$ 。

图 6 显示了不同衬底上 LSMO 薄膜的 $MR(T)$ 曲线, 红线和蓝线分别表示在磁场强度 $H = 3$ T 和 5 T 下的 $MR(T)$ 曲线。从图 6 中我们可以看到在相同的外加磁场及等温度下, 不同衬底上 LSMO 薄膜的磁电阻变化是不同的, 原因在于 LSMO 薄膜受到的应力不同, 其磁电阻变化也不同。因此, 我们的实验说明了外延应力是调控薄膜性能很有力的工具。另外, 图 6(e) 中, BTO 衬底上生长的 LSMO 外延薄膜, 其 $MR(T)$ 曲线与其他的 $MR(T)$ 曲线明显不同, 原因在于 BTO 衬底在 $T = 200$ K 处发生三斜到四方的结构相变, 曲线有个很大的跳变, 不是很平滑的曲线。在计算 $MR(T)$ 时候造成了其 $MR(T)$ 曲线出现了很大的跳变, 因此和其它样品的曲线有很大的区别。

最后, 在表 1 中我们总结了不同衬底上 LSMO 薄膜的 c 轴晶格常数、 T_C 、饱和磁矩、 T_R 和 $MR_5(\%)$ 的变化。

3. 总结

本工作主要内容是使用脉冲激光沉积技术在不同的衬底上生长出具有不同外延应力的高质量

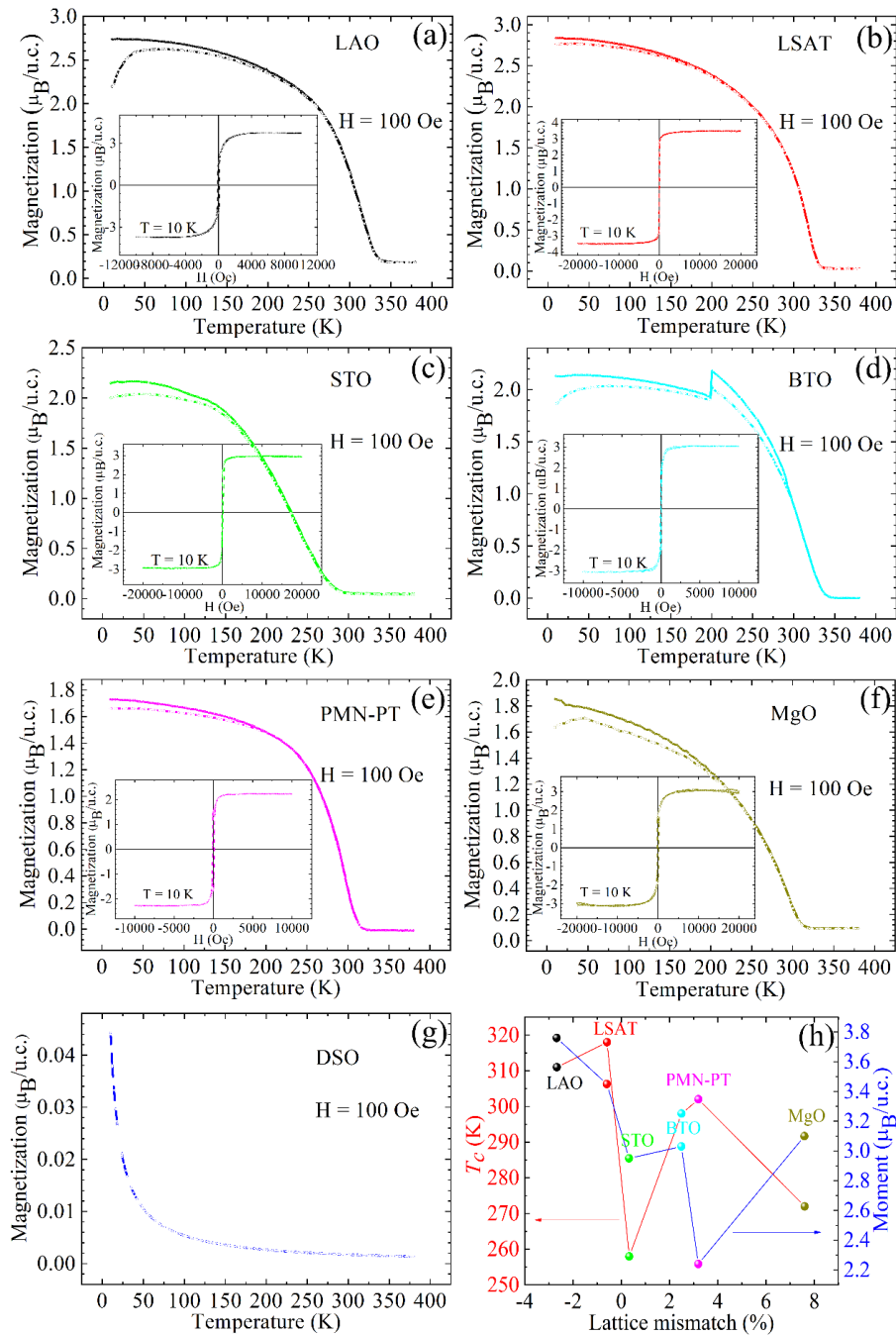


Figure 4. The FC (solid symbols) and ZFC (open symbols) temperature-dependent magnetization $M(T)$ curves of LSMO thin films on various substrates (a)~(f). The insets show the hysteresis loops of LSMO thin films on different substrates under $T = 10$ K. Figure 4(g) shows temperature-dependent magnetization $M(T)$ curves of DSO substrate. Figure 4(h) shows T_c and Moment of LSMO thin films as a function of lattice mismatches

图 4. (a)~(f)表示不同衬底上 LSMO 薄膜的场冷却(实心圆)和零场冷却(空心圆)的磁化 $M(T)$ 曲线, 插图表示 $T = 10$ K 下的不同衬底上 LSMO 薄膜的磁滞回线。图 4(g)表示衬底 DSO 的磁化 $M(T)$ 曲线, 图 4(h)表示 LSMO 薄膜的 T_c 和饱和磁矩随晶格失配的变化

LSMO 外延薄膜。研究 LSMO 薄膜的晶格结构、输运、磁性及磁电阻性质, 揭示应力对氧化物薄膜的晶格结构、输运性质、磁性及磁电阻性质的影响, 进一步揭示 LSMO 薄膜中自旋/晶格/电荷/轨道等自由度

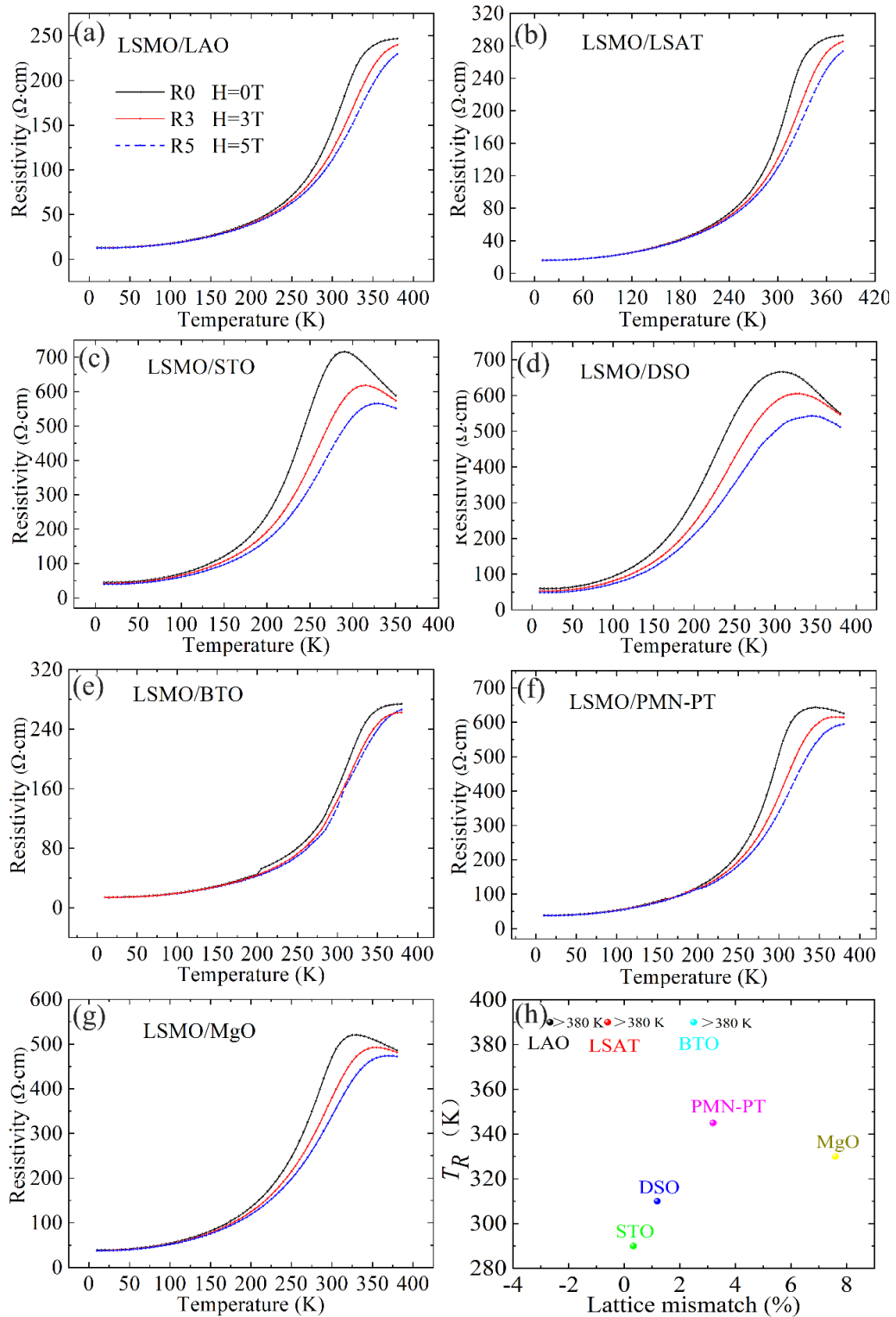


Figure 5. Resistivity $\rho(T)$ curves of LSMO films on various substrates (a)–(g). The black, red and blue line indicate resistivity $\rho(T)$ curves at $H = 0\text{ T}$, 3 T and 5 T , respectively. Figure 5(h) shows T_R of LSMO thin films as a function of lattice mismatches

图 5. (a)–(g)不同衬底上 LSMO 薄膜的电阻率 $\rho(T)$ 曲线, 黑线、红线和蓝线分别表示在磁场强度 $H = 0\text{ T}$ 、 3 T 和 5 T 下的电阻率 $\rho(T)$ 曲线。图 5(h)表示 LSMO 薄膜的 T_R 随晶格失配的变化

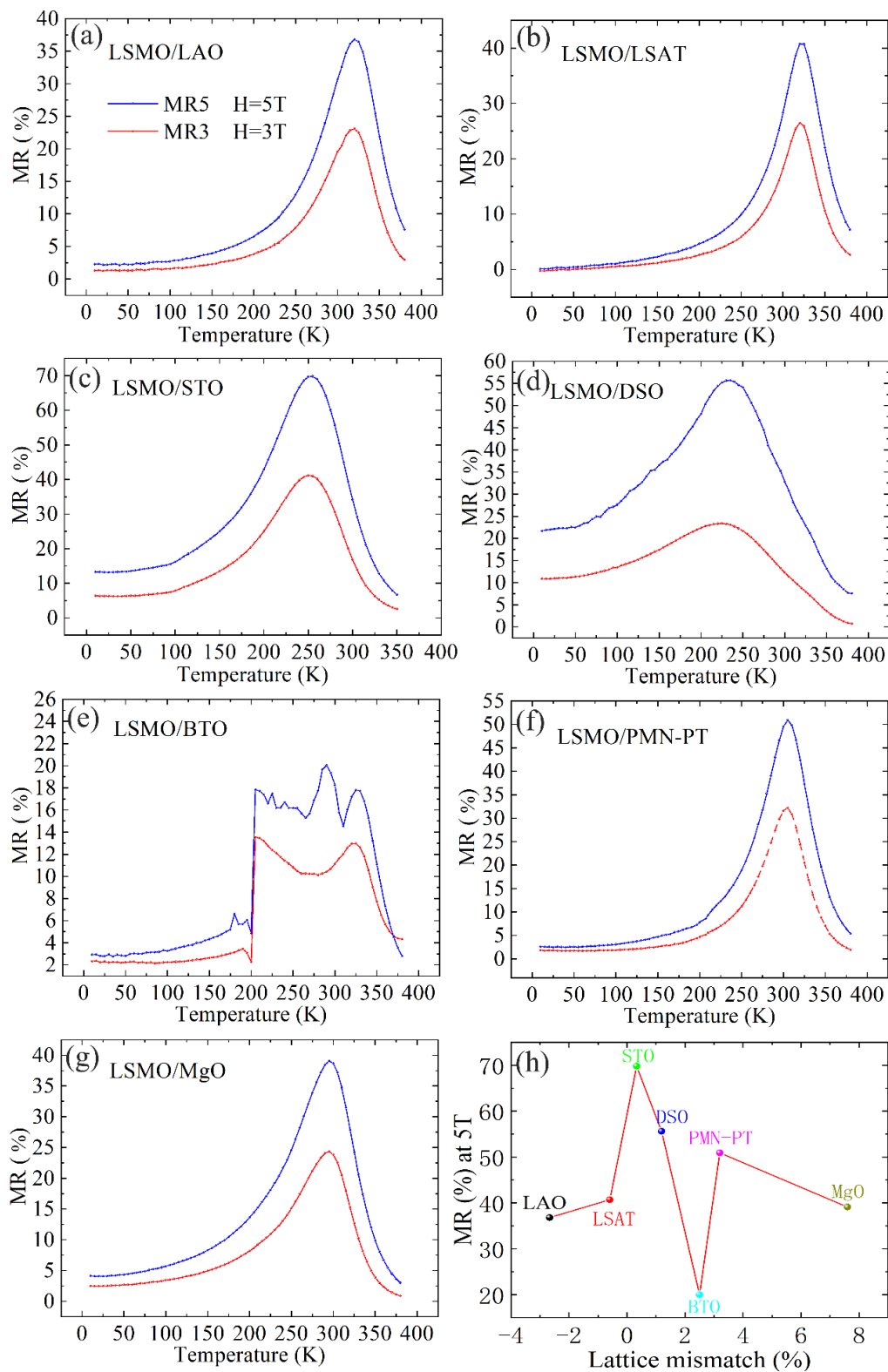


Figure 6. The $MR(T)$ curves of LSMO thin films on various substrates, the red and blue line indicate $MR(T)$ curves at $H = 3\text{ T}$ and 5 T , respectively

图 6. 不同衬底上 LSMO 薄膜的 $MR(T)$ 曲线，红线和蓝线分别表示在磁场强度 $H = 3\text{ T}$ 和 5 T 下的 $MR(T)$ 曲线

Table 1. Summary of the LSMO thin films grown on different substrates
表 1. 不同衬底上 LSMO 薄膜的总结

Substrate	c-axis parameter(Å)	T_c (K)	Moment (μ_B /u.c.)	T_R (K)	MR5(%)
LAO	3.91	311	3.76	>380	36.8
LSAT	3.925	318	3.45	>380	40.7
STO	3.814	258	2.95	290	69.8
DSO	3.806	-	-	310	55.6
BTO	3.826	298	3.03	>380	20
PMN-PT	3.818	302	2.24	345	50.9
MgO	3.847	272	3.1	330	39.1

之间的相互作用，并探索用外延应力调控氧化物薄膜物性的途径。我们的实验说明了外延应力是调控外延薄膜物性很有力的工具。

参考文献

- [1] Heber, J. (2009) Materials Science: Enter the oxides. *Nature News*, **459**, 28-30. <https://doi.org/10.1038/459028a>
- [2] Habermeier, H.U. (2007) Thin Films of Perovskite-Type Complex Oxides. *Materials Today*, **10**, 34-43. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(07\)70243-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70243-2)
- [3] Maekawa, S., Tohyama, T., Barnes, S.E., *et al.* (2013) Physics of Transition Metal Oxides. Springer, Berlin.
- [4] Wang, C., Jin, K.J., Gu, L., Lu, H.B., *et al.* (2014) Magnetoelectric Transport and Quantum Interference Effect in Ultrathin Manganite Films. *Applied Physics Letters*, **104**, Article ID: 162405. <https://doi.org/10.1063/1.4873337>
- [5] Kanki, T., Tanaka, H. and Kawai, T. (2001) Anomalous Strain Effect in $\text{La}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{MnO}_3$ Epitaxial Thin Film: Role of the Orbital Degree of Freedom in Stabilizing Ferromagnetism. *Physical Review B*, **64**, Article ID: 224418. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.224418>
- [6] Haghiri-Gosnet, A.M., Wolfman, J., Mercey, B., *et al.* (2000) Microstructure and Magnetic Properties of Strained $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ Thin Films. *Journal of Applied Physics*, **88**, 4257-4264. <https://doi.org/10.1063/1.1309040>
- [7] Guo, H., Li, Q., Yang, Z., *et al.* (2017) Manipulating Magnetoelectric Properties by Interfacial Coupling in $\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{MnO}_3/\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$ Superlattices. *Scientific Reports*, **7**, 7693. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08260-y>
- [8] Kwon, C., Robson, M.C., Kim, K.C., *et al.* (1997) Stress-Induced Effects in Epitaxial $(\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{MnO}_3$ Films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **172**, 229-236. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(97\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(97)00058-9)
- [9] Gutiérrez, D., Radaelli, G., Sánchez, F., *et al.* (2014) Bandwidth-Limited Control of Orbital and Magnetic Orders in Half-Doped Manganites by Epitaxial Strain. *Physical Review B*, **89**, Article ID: 075107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.075107>
- [10] Tsui, F., Smoak, M.C., Nath, T.K., *et al.* (2000) Strain-Dependent Magnetic Phase Diagram of Epitaxial $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ Thin Films. *Applied Physics Letters*, **76**, 2421-2423. <https://doi.org/10.1063/1.126363>
- [11] Yeh, N.C., Vasquez, R.P., Beam, D.A., *et al.* (1997) Effects of Lattice Distortion and Jahn-Teller Coupling on the Magnetoresistance of and Epitaxial Films. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **9**, 3713. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/9/18/010>
- [12] Takamura, Y., Chopdekar, R.V., Arenholz, E., *et al.* (2008) Control of the Magnetic and Magnetotransport Properties of $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ Thin Films through Epitaxial Strain. *Applied Physics Letters*, **92**, Article ID: 162504. <https://doi.org/10.1063/1.2908051>
- [13] Guo, H., Wang, J.O., He, X., *et al.* (2016) The Origin of Oxygen Vacancies Controlling $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ Electronic and Magnetic Properties. *Advanced Materials Interfaces*, **3**, Article ID: 1500753. <https://doi.org/10.1002/admi.201500753>
- [14] Dho, J., Kim, Y.N., Hwang, Y. S., *et al.* (2003) Strain-Induced Magnetic Stripe Domains in $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ Thin Films. *Applied Physics Letters*, **82**, 1434-1436. <https://doi.org/10.1063/1.1556967>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7567，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：app@hanspub.org