

## 专题: 功能氧化物薄膜新奇物理性质

Pt/La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub> 异质结中的反常霍尔效应\*扈仕林<sup>1)</sup> 刘均华<sup>1)</sup> 邓志雄<sup>1)</sup> 肖文<sup>1)</sup> 杨瞻<sup>2)</sup> 陈凯<sup>1)</sup> 廖昭亮<sup>1)†</sup>

1) (中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

2) (郑州大学物理学院, 郑州 450001)

(2022 年 9 月 22 日收到; 2022 年 10 月 17 日收到修改稿)

非磁/铁磁异质结构中存在很多有趣的演生现象, 特别是, 铂/铁磁异质结构中的反常霍尔效应是一个研究热点. 采用脉冲激光沉积技术和射频磁控溅射技术制备出具有原子级接触界面的铂/锰酸锶镧异质结, 并对异质结的电输运性能进行了系统的研究. 实验发现, 铂/锰酸锶镧异质结中存在由铂贡献的反常霍尔效应, 这是由磁近邻效应诱导铂表现出铁磁性造成的. 反常霍尔电阻随着温度的降低而急剧增加, 并且在低于 40 K 时改变符号. 反常霍尔电阻随铂厚度的增加而急剧降低, 证实了铂的铁磁性起源于异质结界面. 此外, 异质结在低外加磁场下可能产生了拓扑霍尔效应, 这是由异质结界面处的 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用诱导产生手性磁畴壁结构引起的. 上述研究结果为进一步理解非磁/铁磁异质结构中的电子自旋和电荷输运之间的相互作用提供了实验基础.

**关键词:** 反常霍尔效应, 磁近邻效应, 拓扑霍尔效应, 外延生长

**PACS:** 75.70.Cn, 75.25.Dk, 76.30.He

**DOI:** 10.7498/aps.72.20221852

## 1 引言

非磁/铁磁异质结构中电子自旋和电荷输运之间的相互作用产生了很多有趣的现象, 例如自旋注入效应 (spin injection effect)<sup>[1,2]</sup>、自旋抽运效应 (spin pumping effect)<sup>[3-6]</sup>、自旋塞贝克效应 (spin seebeck effect)<sup>[7,8]</sup>、拓扑霍尔效应 (topological Hall effect, THE)<sup>[9,10]</sup>、反常霍尔效应 (anomalous Hall effect, AHE)<sup>[11-15]</sup>. 因此, 非磁/铁磁异质结构在过去数十年一直被广泛关注.

重金属铂 (Platinum, Pt) 因为 5d 电子的存在, 具有较强的自旋-轨道耦合, 可以将自旋流转换为电荷流. 于是, Pt 常被用来制备非磁/铁磁异质结, 例如 Pt/Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (YIG)<sup>[11-13]</sup>, Pt/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>[14]</sup>, Pt/LaCoO<sub>3</sub> (LCO)<sup>[15]</sup>. 在这些异质结中都发现了

显著的 AHE. 当前研究普遍认为 AHE 是由于磁近邻效应 (magnetic proximity effect, MPE) 引起的. 铁磁材料与 Pt 界面处电子发生交换相互作用, 使 Pt 界面处电子产生自旋极化, 所以, Pt 显示出铁磁性, 从而诱导产生 AHE<sup>[13]</sup>. 然而, 现有的理论仍有不足, 例如反常霍尔电阻 (anomalous Hall resistance,  $R_{\text{AHR}}$ ) 的符号及大小具有异常的温度依赖性<sup>[11]</sup>. 这说明非磁/铁磁异质结构的输运性质还远未被完全理解, 迫切希望发现新的非磁/铁磁异质结构为理论发展提供实验基础. 锰酸锶镧 (La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub>, LSMO) 薄膜作为性质优良的铁磁材料, 可以在大多数晶格失配小于 3% 的衬底上外延生长<sup>[16]</sup>, 其居里温度  $T_C \approx 350$  K, 与表现出极高居里温度 ( $T_C \approx 540$  K) 的 YIG 薄膜相比<sup>[17]</sup>, 更易研究异质结中顺磁态和铁磁态之间的自旋输运特性的差异. 因此, 本文对 Pt/LSMO 异质结的输运性质进行了系统的研究.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11974325) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: WK2030000035) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zliaoz@ustc.edu.cn

基于已报道的非磁/铁磁异质结构的相关研究,发现异质结的界面质量对 AHE 的幅值至关重要<sup>[18]</sup>. 本文制备了具有原子级接触界面的高质量 Pt/LSMO 异质结,在其中发现了由 Pt 贡献的显著 AHE. Pt/LSMO 异质结和 LSMO 薄膜的  $R_{\text{AHR}}$  具有明显差异,证实了 Pt 由于 MPE 显示出铁磁性. Pt/LSMO 异质结的  $R_{\text{AHR}}$  随着温度的降低而急剧增加,在低于 40 K 时改变符号,与其他非磁/铁磁异质结构中的  $R_{\text{AHR}}$  具有相似行为<sup>[11,15]</sup>. Pt/LSMO 异质结的  $R_{\text{AHR}}$  随 Pt 厚度的增加而急剧降低,证实了 Pt 的铁磁性起源于异质结界面. 并且,在 Pt/LSMO 异质结中发现了可能由 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (Dzyaloshinskii-Moriya interaction, DMI) 引起的 THE. 本文为理解非磁/铁磁异质结构中电子自旋和电荷输运之间的相互作用提供了基础.

## 2 实验

使用 KrF 准分子激光器,通过脉冲激光沉积技术,以高纯 (99.99%) LSMO 为靶材,在 (001) 取向的钛酸锶 ( $\text{SrTiO}_3$ , STO) 衬底 ( $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ ) 上外延生长 LSMO 薄膜. 通过化学腐蚀和高温退火的方法使衬底形成“台阶状”表面<sup>[19]</sup>. 在此基础上,使用原位反射式高能电子衍射 (reflection high-energy electron diffraction, RHEED) 监控薄膜的逐层生长情况,通过调控激光脉冲数目和 RHEED 振荡精确控制薄膜厚度. 沉积时衬底温度为  $650\text{ }^\circ\text{C}$ ,氧压为  $0.1\text{ mbar}$  ( $1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa}$ ),激光能量密度为  $1\text{ J/cm}^2$ ,激光频率为  $3\text{ Hz}$ . 为了避免氧空位对样品的影响,所有样品在生长之后原位退火  $20\text{ min}$ ,退火氧压为  $180\text{ mbar}$ . 室温下,采用射频磁控溅射法在 LSMO 薄膜上沉积 Pt 薄膜,在压力达到  $3 \times 10^{-5}\text{ mbar}$  以上的高真空环境中后,逐步通入氩气,使压力稳定保持在  $0.01\text{ mbar}$ ,进行预溅射之后,通过沉积功率和沉积时间来调控 Pt 厚度.

使用脉冲激光沉积技术和射频磁控溅射技术制备样品;使用原子力显微镜 (atomic force microscopy, AFM) 测试样品的表面形貌和粗糙度;使用 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 测试样品的晶体结构、外延情况和厚度;使用综合物性测量系统测试样品的磁学和电学性能.

## 3 结果与分析

图 1(a) 展示了 50 个单胞 (unit cell, u.c.) 厚度的 LSMO 薄膜在生长过程中的 RHEED 振荡,连续的振荡周期表明了 LSMO 薄膜的层状生长模式,这确保了 LSMO 薄膜厚度的原子级控制. 图 1(b) 和图 1(c) 分别是衬底和薄膜的 RHEED 衍射图,明锐的衍射斑表明 LSMO 薄膜具有良好的结晶性以及与衬底相类似的原子级平整的表面. 这保证了 Pt/LSMO 异质界面的原子级接触,有利于界面的 MPE<sup>[18]</sup>.

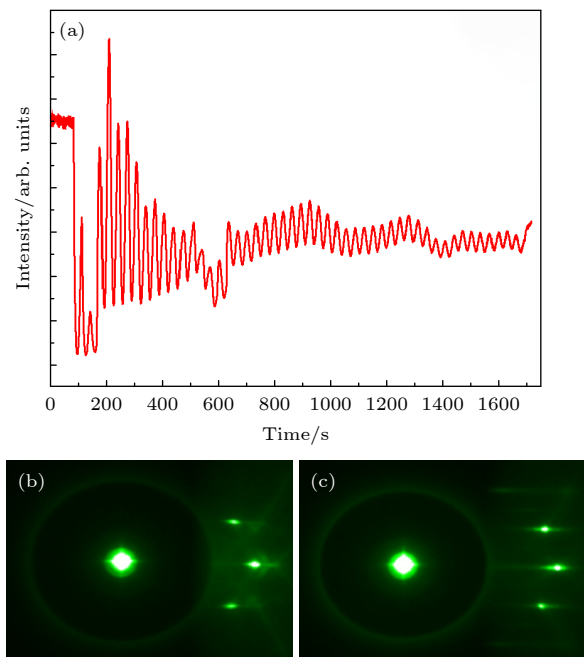


图 1 LSMO 薄膜生长 (a) RHEED 周期振荡; (b) 薄膜生长前的 RHEED 衍射图; (c) 薄膜生长后的 RHEED 衍射图  
Fig. 1. The LSMO thin film growth: (a) RHEED oscillation; (b) RHEED pattern before film growth; (c) RHEED pattern after film growth.

图 2(a)–(c) 为衬底和薄膜的 AFM 图,皆呈现“台阶状”表面,均方根粗糙度均小于  $0.5\text{ nm}$ ,表明样品具有原子级平整的表面. 图 2(b) 和图 2(c) 中表面的线扫描图如图 2(d) 和图 2(e) 所示,红色虚线代表了每一个“台阶”的位置,表明样品具有严格周期性的等高度“台阶”. 每一个“台阶”的高度约为  $0.4\text{ nm}$ ,正好对应 STO (001) 晶面的晶面间距.

为进一步证明 Pt/LSMO/STO 样品的质量,还进行了 XRD 测试. 图 3(a) 和图 3(b) 为样品的室温  $2\theta$ - $\omega$  ( $20^\circ$ – $110^\circ$ ) 扫描,其中箭头标注了 LSMO

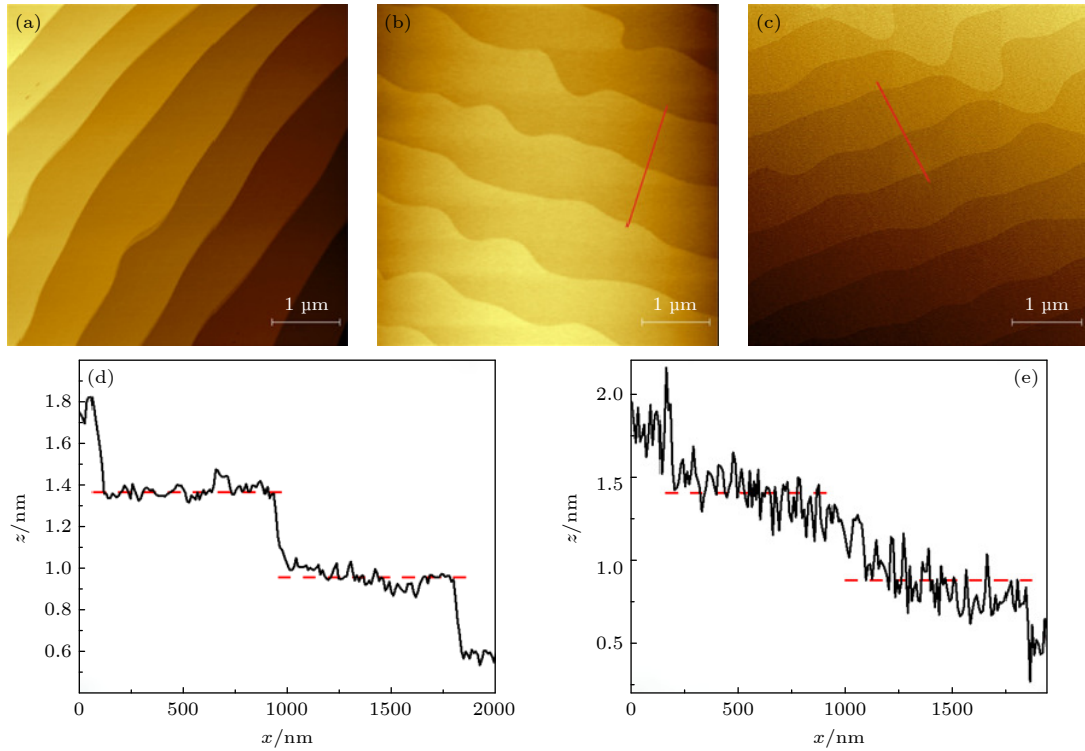


图 2 形貌表征 (a) STO (001) 衬底 AFM 图; (b) LSMO (40 u.c.) 薄膜 AFM 图; (c) Pt(2 nm)/LSMO(40 u.c.) 薄膜 AFM 图; (d) 和 (e) 分别为 (b) 和 (c) 中薄膜表面线扫描图

Fig. 2. Morphology characterization: (a) AFM image of STO (001) substrate; (b) AFM image of LSMO (40 u.c.) film; (c) AFM image of Pt(2 nm)/LSMO(40 u.c.) film; (d) and (e) line-scan of the LSMO film in (b); (e) line-scan of the Pt/LSMO film in (c).

的衍射峰, 连续的劳厄振荡表明薄膜的高外延质量和均匀性. LSMO (002) 衍射峰的摇摆曲线半峰宽仅有  $0.021^\circ$ , 再次验证了薄膜具有良好的结晶性. 图 3(c) 展示了样品在 (103) 晶面的倒易空间图, 薄膜和衬底的衍射峰具有相同的  $Q_x$  值, 表明薄膜与衬底晶格常数匹配且未发生应力松弛. 再通过拟合 X 射线反射 (X-ray reflection, XRR) 谱确定薄膜厚度, 如图 3(d) 所示, 从 XRR 谱中拟合得出的实际厚度与标称厚度几乎相同. RHEED, AFM 和 XRD 结果表明样品实现了高质量的可控生长.

图 4(a) 展示了 LSMO 薄膜磁化强度的温度依赖性, 测试时外加面内磁场  $\mu_0 H = 100$  Oe ( $1 \text{ Oe} = 10^3/(4\pi) \text{ A/m}$ ), 插图是磁化强度对温度的一阶微分. 场冷 (FC) 和零场冷 (ZFC) 曲线都在 250 K 附近有个小峰, 这是测试仪器信噪比的问题. 磁化强度在 350 K 时急剧增加, 表明 LSMO 薄膜的铁磁转变温度  $T_C \approx 350$  K, 这与 LSMO 块体 ( $T_C \approx 370$  K) 十分接近<sup>[20]</sup>. LSMO 薄膜的铁磁基态可以通过  $M(H)$  曲线中的磁滞回线进一步证实. 图 4(b) 展示了 LSMO 薄膜在不同温度下磁化强度的场依赖性, 插图是 3 K 时曲线的中心放大图, 具有明显

的磁滞回线, 饱和场约为 600 Oe, 饱和磁化强度约为  $3.2 \mu_B/\text{Mn}$ . 而 LSMO 块体饱和磁化强度约为  $3.6 \mu_B/\text{Mn}$ <sup>[21]</sup>, 薄膜与块体仅相差 11%. 这证明了所生长的 LSMO 薄膜具有能与 LSMO 块体相媲美的高质量.

为表征 Pt 在 Pt/LSMO 异质结的电输运中贡献的大小, 分别测量了 LSMO 薄膜和 Pt/LSMO 薄膜电阻随温度的变化, 如图 5 所示. 两条曲线都表现出典型的金属行为, 随着温度的升高, 电阻逐渐增加. 然而, 温度高于 200 K 后, 两条曲线的差值大于一个量级, 说明在 Pt/LSMO 薄膜中, 电输运主要由 Pt 贡献, 这为通过霍尔电阻来研究 Pt 的磁特性提供了可能性.

测量霍尔电阻时使用完整的薄膜进行 van der Pauw 方法测试, 施加的垂直磁场最大为 90 kOe, 温度范围为 2—120 K. 从测量的横向霍尔电阻 (transverse Hall resistance,  $R_{xy}$ ) 中减去与外加磁场成正比的普通霍尔电阻 (ordinary Hall resistance,  $R_{OHR}$ ), 即可得到  $R_{AHR}$ :

$$R_{AHR} = R_{xy} - R_{OHR} \times \mu_0 H. \quad (1)$$

在铁磁金属中,  $R_{AHR}$  与平面外磁化强度成正比.

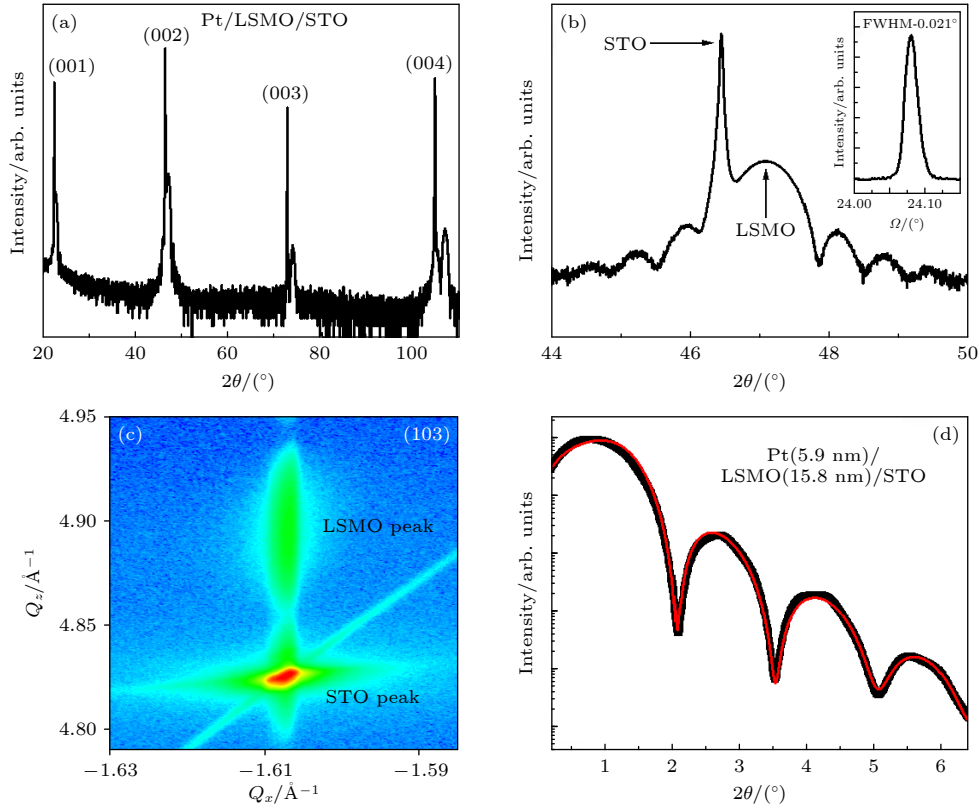


图 3 结构表征 (a) Pt(6 nm)/LSMO(40 u.c.) 薄膜的  $2\theta$ - $\omega$  扫描; (b) 为 (a) 中 (002) 衍射峰的放大图, 插图为 LSMO 薄膜 (002) 衍射峰的摇摆曲线; (c) Pt/LSMO 薄膜在 (103) 衍射峰附近的倒易空间图; (d) Pt/LSMO 薄膜的 XRR 谱, 拟合的红线与实验数据相符

Fig. 3. Structure characterization: (a)  $2\theta$ - $\omega$  scan of Pt(6 nm)/LSMO(40 u.c.) thin films; (b) enlarged view of the (002) diffraction peak in panel (a), and the inset is a rocking curve of LSMO film around (002) diffraction peak; (c) reciprocal space map of Pt/LSMO film around (103) diffraction peak; (d) XRR spectrum of Pt/LSMO film, and the red line is a fit to the experimental data.

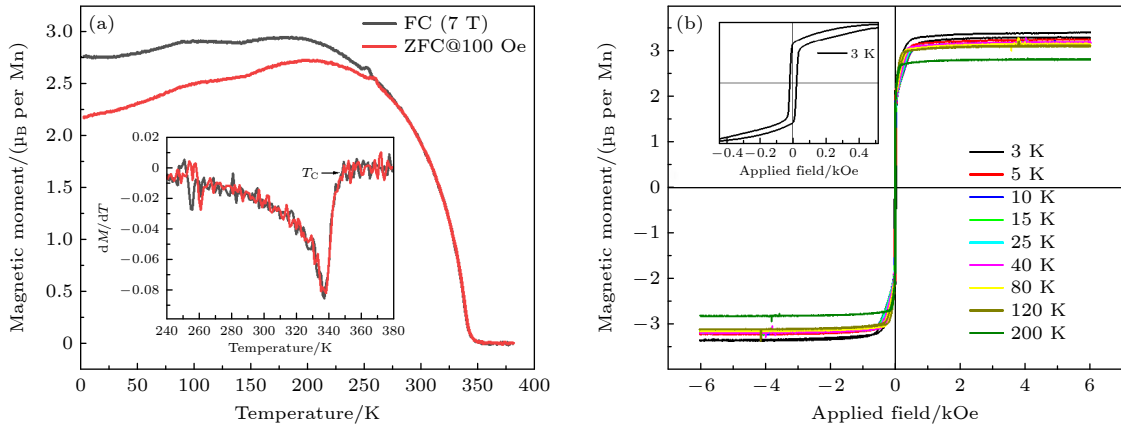


图 4 (a) LSMO (40 u.c.) 薄膜的磁化强度的温度依赖性, 插图为磁化强度对温度的一阶微分; (b) LSMO (40 u.c.) 薄膜不同温度下的磁化强度的场依赖性, 插图为 3 K 时曲线的中心放大图

Fig. 4. (a) Temperature dependence of magnetization of LSMO (40 u.c.) films, the inset is the first derivative of magnetization versus temperature; (b) field dependence of the magnetization of LSMO (40 u.c.) films at different temperatures, and the inset is an enlarged view of the curve at 3 K.

图 6(a) 展示了测得的 LSMO 薄膜的  $R_{\text{AHR}}$ , 它具有一定的温度依赖性, 一直存在于二四象限, 并未发生符号的改变. 图 6(b) 展示了测得的 Pt/LSMO 薄膜的  $R_{\text{AHR}}$ , 在  $\mu_0 H > 40$  kOe 后  $R_{\text{AHR}}$  达到饱和.

并且, Pt/LSMO 薄膜的  $R_{\text{AHR}}$  显著依赖于温度, 在 40 K 以下随着温度的降低而急剧增加, 在 40 K 时改变符号. 之前在 Pt/YIG 体系中也报道了类似的行为<sup>[11,22]</sup>. LSMO 薄膜与 Pt/LSMO 薄膜的  $R_{\text{AHR}}$

的明显差异,证明了 Pt/LSMO 异质结中 Pt 由于 MPE 显示出铁磁性,进而引起  $R_{\text{AHR}}$  的显著变化.

图 7(a) 展示了 2 K 下不同 Pt 厚度的 Pt/LSMO 薄膜的  $R_{\text{AHR}}$ . 随着 Pt 厚度的增加,  $R_{\text{AHR}}$  显著降低. 当 Pt 厚度大于 6 nm 后,  $R_{\text{AHR}}$  几乎可以忽略不计,之前在 Pt/LCO 体系中也报道了类似的行为 [15].  $R_{\text{AHR}}$  随 Pt 厚度增加而快速下降的趋势清楚地表明了引起 AHE 的磁矩起源于界面. LSMO 与 Pt 界面处电子由于交换相互作用发生自旋极化,自旋极化产生位于界面层的磁矩,使得界面层贡献反常霍尔信号. 因此,当 Pt 厚度远大于界面层时,测得的反常霍尔电压因 Pt 薄膜的平面电阻减小而迅速降低.

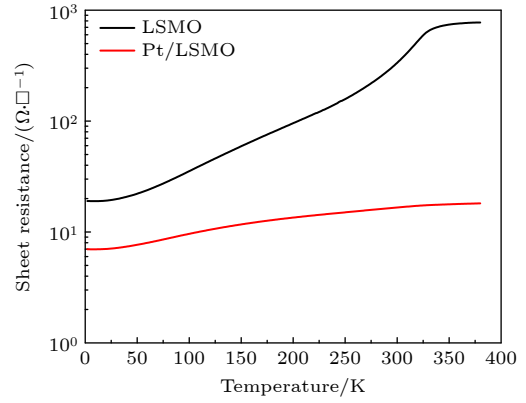


图 5 LSMO(40 u.c.) 薄膜与 Pt(2 nm)/LSMO(40 u.c.) 薄膜电阻的温度依赖性

Fig. 5. Temperature dependence of resistance of LSMO (40 u.c.) film and Pt(2 nm)/LSMO(40 u.c.) film.

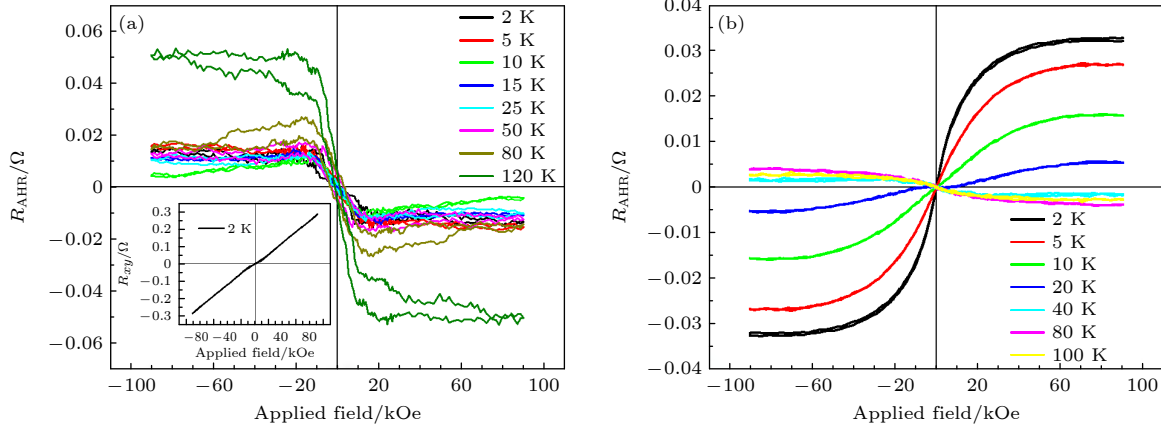


图 6 (a) LSMO(40 u.c.) 薄膜和 (b) Pt(2 nm)/LSMO(40 u.c.) 薄膜在不同温度下的  $R_{\text{AHR}}$ , 图 (a) 插图为 2 K 时测量的 LSMO 薄膜的  $R_{xy}$

Fig. 6.  $R_{\text{AHR}}$  of (a) LSMO (40 u.c.) film and (b) Pt(2 nm)/LSMO(40 u.c.) film at different temperatures. The inset in panel (a) is  $R_{xy}$  of the LSMO film measured at 2 K.

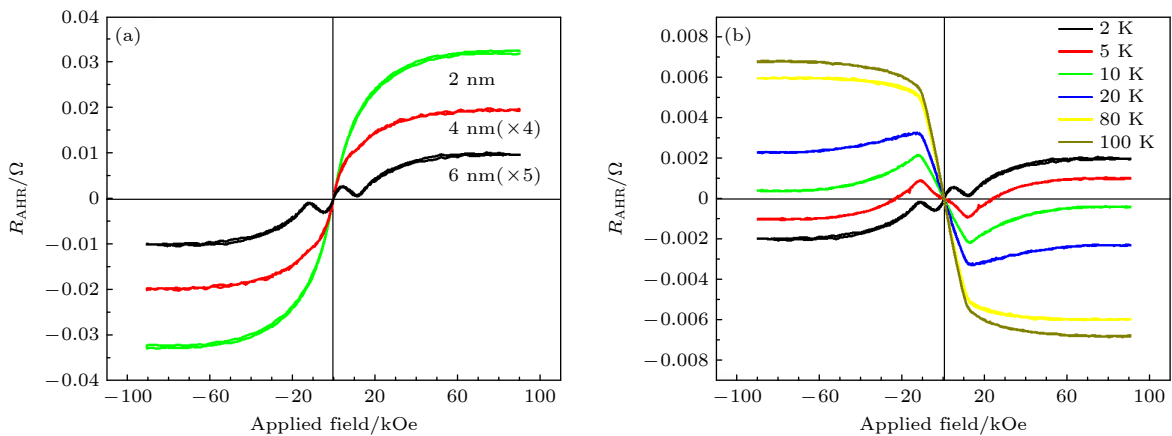


图 7 (a) 在 2 K 时不同 Pt 厚度的 Pt/LSMO(40 u.c.) 薄膜的  $R_{\text{AHR}}$ , 其中 4 和 6 nm 曲线的  $R_{\text{AHR}}$  分别扩大了 4 倍和 5 倍; (b) Pt(6 nm)/LSMO(40 u.c.) 薄膜在不同温度下的  $R_{\text{AHR}}$

Fig. 7. (a)  $R_{\text{AHR}}$  of Pt/LSMO(40 u.c.) film with different Pt thickness, which were measured at 2 K.  $R_{\text{AHR}}$  of the 4 and 6 nm curves are enlarged by a factor of four and five, respectively; (b)  $R_{\text{AHR}}$  of Pt(6 nm)/LSMO(40 u.c.) films at different temperatures.

有趣的是, 当 Pt 为 6 nm 时,  $R_{\text{AHR}}$  存在两个驼峰, 这可能是 THE 参与贡献的结果<sup>[23]</sup>. 在非磁/铁磁异质结构中, 界面处的 DMI 会诱导诸如磁性斯格明子等手性磁畴壁结构的形成. 当巡游电子通过手性磁畴壁结构时, 会获得一个贝里相位<sup>[24]</sup>, 相应的贝里曲率则等效于一个外加磁场, 它将诱导额外的霍尔效应, 即 THE. 图 7(b) 展示了此样品 2—100 K 的  $R_{\text{AHR}}$ , 外加磁场高于 20 kOe 后, THE 完全消失. 因为当外加磁场足够大时, 手性磁畴壁结构将会消失<sup>[25]</sup>, 此时  $R_{\text{AHR}}$  完全来源于材料的铁磁性质. 此外, 在 3d 过渡族金属和 5d 过渡族金属组成的异质结中, DMI 的大小和符号由界面处的轨道杂化直接决定<sup>[26]</sup>. Mn 原子 3d 壳层电子是半满状态, 电子占据态和非占据态之间所有可能的跃迁都将贡献于 DMI, 因此 Mn 原子与 5d 过渡族金属界面处的 DMI 很强. 在 Pt/MnGa 异质结中已经发现了显著的 THE<sup>[27]</sup>, 这为 Pt/LSMO 异质结中产生 THE 提供了合理解释.

## 4 结 论

本文使用脉冲激光沉积技术和射频磁控溅射技术制备出高质量的 Pt/LSMO 异质结, AFM 结果表明异质结具有原子级平整的“台阶状”表面, XRD 结果表明异质结具有确定的外延取向和未松弛的面内应力. 磁性测试结果表明 LSMO 薄膜具有和 LSMO 块体媲美的铁磁基态. 实验发现, Pt/LSMO 异质结中 Pt 由于 MPE 显示出铁磁性.  $R_{\text{AHE}}$  随 Pt 厚度的增加而急剧降低, 证实了 Pt 的铁磁性起源于异质结界面. 此外, 在 Pt/LSMO 异质结中发现了可能由 DMI 引起的 THE. 这些实验结果可对相关理论提供一些支撑, 也对进一步理解非磁/铁磁异质结构中电子自旋和电荷运输之间的相互作用提供了实验基础.

## 参考文献

[1] Ohno Y, Young D K, Beschoten B, Matsukura F, Ohno H, Awschalom D D 1999 *Nature* **402** 790  
 [2] Jedema F J, Filip A T, Wees B J V 2001 *Nature* **410** 345  
 [3] Heinrich B, Tserkovnyak Y, Woltersdorf G, Brataas A, Urban R, Bauer G E W 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 187601

[4] Kajiwara Y, Harii K, Takahashi S, Ohe J, Uchida K, Mizuguchi M, Umezawa H, Kawai H, Ando K, Takanashi K, Maekawa S, Saitoh E 2010 *Nature* **464** 262  
 [5] Heinrich B, Burrowes C, Montoya E, Kardasz B, Girt E, Song Y Y, Sun Y Y, Wu M Z 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 066604  
 [6] Rezende S M, Rodriguez S R L, Soares M M, Vilela L L H, Ley D D, Azevedo A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 012402  
 [7] Uchida K, Takahashi S, Harii K, Ieda J, Koshibae W, Ando K, Maekawa S, Saitoh E 2008 *Nature* **455** 778  
 [8] Uchida K, Xiao J, Adachi H, Ohe J, Takahashi S, Ieda J, Ota T, Kajiwara Y, Umezawa H, Kawai H, Bauer G E W, Maekawa S, Saitoh E 2010 *Nat. Mater.* **9** 894  
 [9] Weng H M, Yu R, Hu X, Dai X, Fang Z 2015 *Adv. Phys.* **64** 03227  
 [10] Takahashi S, Maekawa S 2008 *Sci. Technol. Adv. Mater.* **9** 014105  
 [11] Miao B F, Huang S Y, Qu D, Chien C L 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 236601  
 [12] Althammer M, Meyer S, Nakayama H, Schreier M, Altmannshofer S, Weiler M, Huebl H, Geprags S, Opel M, Gross R, Meier D, Klewe C, Kuschel T, Schmalhorst J M, Reiss G, Shen L M, Gupta A, Chen Y T, Bauer G E W, Saitoh E, Goennenwein S T B 2013 *Phys. Rev. B* **87** 224401  
 [13] Lu Y M, Choi Y, Ortega C M, Cheng X M, Cai J W, Huang S Y, Sun L, Chien C L 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 147207  
 [14] Isasa M, Pinto A B, Velez S, Golmar F, Sanchez F, Hueso L E, Fontcuberta J, Casanova F 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 142402  
 [15] Shang T, Zhan Q F, Yang H L, Zuo Z H, Xie Y L, Zhang Y, Liu L P, Wang B M, Wu Y H, Zhang S, Li R W 2015 *Phys. Rev. B* **92** 165114  
 [16] Liao Z L, Li F M, Gao P, Li L, Guo J D, Pan X Q, Jin R, Plummer E W, Zhang J D 2015 *Phys. Rev. B* **92** 125123  
 [17] Uchida K, Qiu Z Y, Kikkawa T, Uguchi R L, Saitoh E 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 052405  
 [18] Putter S, Geprags S, Schlitz R, Althammer M, Erb A, Gross R, Goennenwein S T B 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 012403  
 [19] Biswas A, Yang C H, Ramesh R, Jeong M H 2017 *Prog. Surf. Sci.* **92** 02117  
 [20] Peng R, Xu H C, Xia M, Zhao J F, Xie X, Xu D F, Xie B P, Feng D L 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 081606  
 [21] Snyder G J, Hiskes R, DiCarolis S, Beasley M R, Geballe T H 1996 *Phys. Rev. B* **53** 14434  
 [22] Huang S Y, Fan X, Qu D, Chen Y P, Wang W G, Wu J, Chen T Y, Xiao J Q, Chien C L 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 107204  
 [23] Soumyanarayanan A, Raju M, Oyarce A L G, Tan A K C, Im M Y, Petrovi A P, Ho P, Khoo K H, Tran M, Gan C K, Ernult F, Panagopoulos C 2017 *Nat. Mater.* **16** 898  
 [24] Zhang S, Zhang S S L 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 086601  
 [25] Li Y, Kanazawa N, Yu X Z, Tsukazaki A, Kawasaki M, Ichikawa M, Jin X F, Kagawa F, Tokura Y 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 117202  
 [26] Belabbes A, Bihlmayer G, Bechstedt F, Blügel S, Manchon A 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 247202  
 [27] Meng K K, Zhao X P, Liu P F, Liu Q, Wu Y, Li Z P, Chen J K, Miao J, Xu X G, Zhao J H, Jiang Y 2018 *Phys. Rev. B* **97** 060407

SPECIAL TOPIC—Novel physical properties of functional oxide thin films

**Anomalous Hall effect in Pt/La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub> heterojunctions\***Hu Shi-Lin<sup>1)</sup> Liu Jun-Hua<sup>1)</sup> Deng Zhi-Xiong<sup>1)</sup> Xiao Wen<sup>1)</sup>Yang Zhan<sup>2)</sup> Chen Kai<sup>1)</sup> Liao Zhao-Liang<sup>1)†</sup>1) (*National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China*)2) (*School of Physics and Microelectronics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

( Received 22 September 2022; revised manuscript received 17 October 2022 )

**Abstract**

Many emergent and novel phenomena occur in nonmagnetic/ferromagnet heterostructures. In particular, Pt/ferromagnet heterostructures where the Pt has strong spin-orbit coupling and thus can convert spin current into charge current, has attracted a great attention recently. The anomalous Hall effect (AHE) has been found in many Pt/ferromagnet heterostructures. However, the underlying physics remains elusive, so it is necessary to find more heterostructures in order to provide more experimental data. In this work, we investigate anomalous Hall resistances (AHRs) in Pt thin films sputtered on epitaxial La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub> (LSMO) ferromagnetic films. High-quality Pt/LSMO heterojunctions are fabricated by pulsed laser deposition and RF-magnetron sputtering. The physical properties of LSMO films are characterized by the measurements of magnetic and transport properties. The AHR mainly contributed by Pt in the Pt/LSMO heterojunction increases sharply with temperature decreasing and changes its sign below 40 K. Furthermore, the AHR decreases sharply with the increase of Pt thickness. Those facts suggest that the ferromagnetism of Pt originates from interface due to magnetic proximity effect. Interestingly, this heterojunction can exhibit possible signal of topological Hall effect under low applied magnetic field. The above results provide an experimental basis for further understanding the interactions between electron spin and charge transport in nonmagnetic/ferromagnetic heterostructures.

**Keywords:** anomalous Hall effect, magnetic proximity effect, topological Hall effect, epitaxial growth**PACS:** 75.70.Cn, 75.25.Dk, 76.30.He**DOI:** 10.7498/aps.72.20221852

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11974325) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. WK2030000035).

† Corresponding author. E-mail: [zliao@ustc.edu.cn](mailto:zliao@ustc.edu.cn)



Pt/La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub>异质结中的反常霍尔效应

扈仕林 刘均华 邓志雄 肖文 杨瞻 陈凯 廖昭亮

**Anomalous Hall effect in Pt/La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub> heterojunctions**

Hu Shi-Lin Liu Jun-Hua Deng Zhi-Xiong Xiao Wen Yang Zhan Chen Kai Liao Zhao-Liang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 097503 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221852

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221852>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

铁磁/非磁金属异质结中的拓扑霍尔效应

Topological Hall effect in ferromagnetic/non-ferromagnetic metals heterojunctions

物理学报. 2018, 67(13): 131202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180369>

具有大磁晶各向异性性能的单层BaPb的室温量子反常霍尔效应

Room-temperature quantum anomalous Hall effect in monolayer BaPb with large magnetocrystalline anisotropy energies

物理学报. 2021, 70(15): 157502 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210014>

拓扑半金属ZrSiSe器件中面内霍尔效应的观测

Observation of planar Hall effect in topological semimetal ZrSiSe device

物理学报. 2019, 68(22): 227203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191501>

掺铌SrTiO<sub>3</sub>中的逆自旋霍尔效应

Inverse spin Hall effect in Nb doped SrTiO<sub>3</sub>

物理学报. 2019, 68(10): 106101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190118>

高超声速磁流体力学控制霍尔效应影响

Influence of Hall effect on hypersonic magnetohydrodynamic control

物理学报. 2020, 69(21): 214703 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200630>

自旋轨道耦合系统中的整数量子霍尔效应

Integer quantum Hall effect in a spin-orbital coupling system

物理学报. 2019, 68(11): 117101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190037>