

$\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ 薄膜物性调控及基于 $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ 的透明 pn 结整流效应

王磊 周同 华恩达[†] 刘忠良 李兵 刘亲壮[‡]

(淮北师范大学物理与电子信息学院, 安徽省陶铝新材料产业共性技术研究中心, 淮北 235000)

图 S1 给出了不同厚度 LNO ($x = 0.07$) 薄膜的 XRD 线性扫描结果。扫描结果仅出现 LNO 薄膜和 MgO 衬底(002)和(004)的衍射峰, 均无杂相。这表明 LNO 膜优先沿 MgO 衬底的 c 轴生长。且随着厚度的增加, 薄膜的面外晶格常数分别为: 4.174, 4.152, 4.148, 4.145, 4.149, 4.147, 4.147 和 4.153 Å。

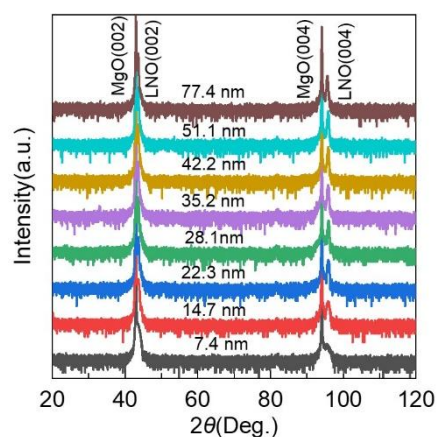


图 S1 不同厚度 LNO ($x = 0.07$) 薄膜 XRD 线性扫描结果

Fig. S1. XRD linear scanning results of the LNO ($x = 0.07$) films with varying thicknesses.

图 S2 给出了不同 Li 掺杂浓度的 50 nm LNO 薄膜的 XRD 线性扫描结果。扫描结果仅出现 LNO 薄膜和 MgO 衬底(002)和(004)的衍射峰。值得注意的是, 随着 Li 掺杂的增加, LNO 衍射峰逐渐向右移动, 表明面外晶格常数随着 Li 掺杂的增加而降低。

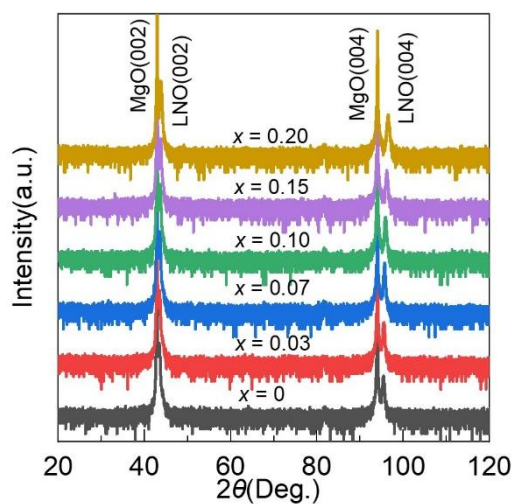


图 S2 不同 Li 掺杂浓度的 50 nm LNO 薄膜 XRD 线性扫描结果

Fig. S2. XRD linear scan results of 50 nm LNO films with varying Li doping concentrations.

图 S3 给出了不同厚度 LNO ($x = 0.07$) 薄膜 XRR 扫描结果。计算可得，生长时间为 5—60 min 的 LNO 膜的厚度分别为 7.4, 14.7, 22.3, 28.1, 35.2, 42.2, 51.1 和 77.4 nm，薄膜生长速率范围约为 1.3—1.5 nm/min。这表明脉冲激光沉积法制备的薄膜生长更均匀且可重复性高。

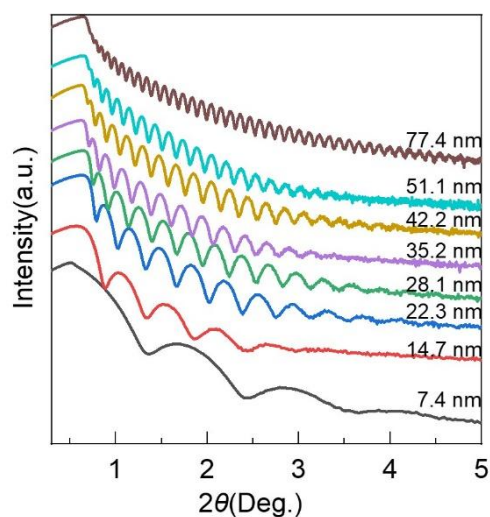


图 S3 不同厚度的 LNO ($x = 0.07$) 薄膜的 XRR 结果

Fig. S3. XRR results of LNO ($x = 0.07$) films with varying thicknesses.

图 S4 给出了 $\text{Li}_{0.15}\text{Ni}_{0.85}\text{O}$ 薄膜与 MgO 衬底(220)面的 φ 扫描图谱。每隔 90° 薄膜与衬底均存在相互对应的峰，表明了 LNO 薄膜与 MgO 衬底的外延关系。

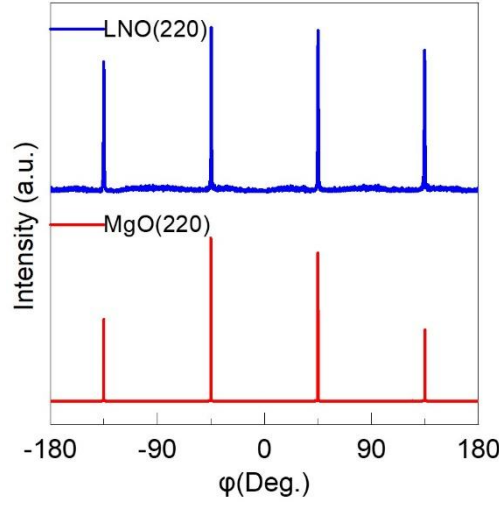


图 S4. $\text{Li}_{0.15}\text{Ni}_{0.85}\text{O}$ 薄膜与 MgO 衬底(220)的 φ 扫描图谱

Fig. S4. φ scan pattern of $\text{Li}_{0.15}\text{Ni}_{0.85}\text{O}$ (220) film on MgO (220) substrate.

图 S5 给出了不同厚度的 LNO ($x = 0.07$) 薄膜的摇摆曲线，插图则显示了半高宽(FWHM)随厚度的变化。随着膜厚从 7.4 nm 增加到 35.2 nm，(002)衍射峰的 FWHM 从 0.15° 降低至 0.10° ，表明结晶性提高。然而，随着厚度的进一步增加，FWHM 上升，在 77.4 nm 的厚度处达到最大 0.29° 。较厚薄膜的晶体质量下降可能是为了释放厚度累积应力而形成的各种结构缺陷引起的。

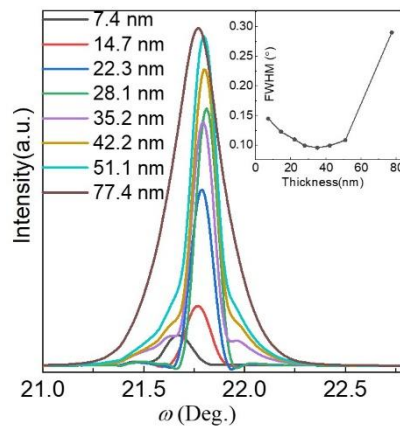


图 S5 不同厚度的 LNO ($x = 0.07$) 薄膜的摇摆曲线，插图显示了半高宽(FWHM)随厚度的变化

Fig. S5. Rocking curves of LNO ($x = 0.07$) films with varying thicknesses. Inset shows the evolution of thickness-dependent full width at half maximum (FWHM).

图 S6 给出了不同 Li 掺杂浓度，厚度为 50 nm 的 LNO 薄膜的摇摆曲线。对于 $x = 0—0.07$ 的掺杂浓度，(002)衍射峰的 FWHM 从 0.36° 降低至 0.21° ，表明结晶性逐渐提高。然而，随着 Li 掺杂的不断增大，FWHM 开始增大，在 $x = 0.20$ 处达到最大值 0.47° ，结晶质量的下降可能是由于过量 Li 掺杂导致的缺陷而导致的。

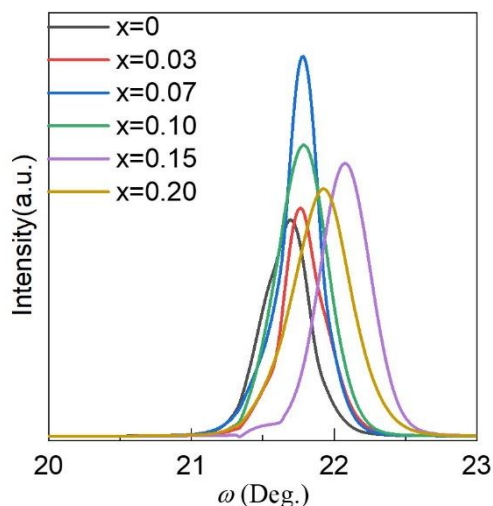


图 S6 不同 Li 掺杂浓度 50 nm LNO 薄膜的摇摆曲线

Fig. S6. Rocking curves of 50 nm LNO films with varying Li doping concentrations.

图 S7(a)–(h)显示了厚度由小到大的 LNO 薄膜的 AFM 图像，扫描面积为 $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$ 。厚度在 7.39 nm 的薄膜表现出更多的多孔结构，而厚度在 14.7 nm 及以上的薄膜表现出光滑致密的形态，没有明显的孔隙和裂纹。图 S7(i)显示了均方根(RMS)粗糙度值随着厚度增大的变化趋势，RMS 值分别为 0.562, 0.546, 0.602, 0.707, 0.724, 0.755, 0.991 和 0.92 nm。粗糙度最初略有降低，然后随着厚度的增加而逐渐增加，在较高的厚度下稳定下来。薄膜较薄时粗糙度降低可归因于薄膜初始生长过程中孔隙的填充；较厚薄膜的粗糙度增加可能是由于颗粒无法有效地迁移和扩散而形成团簇导致的。

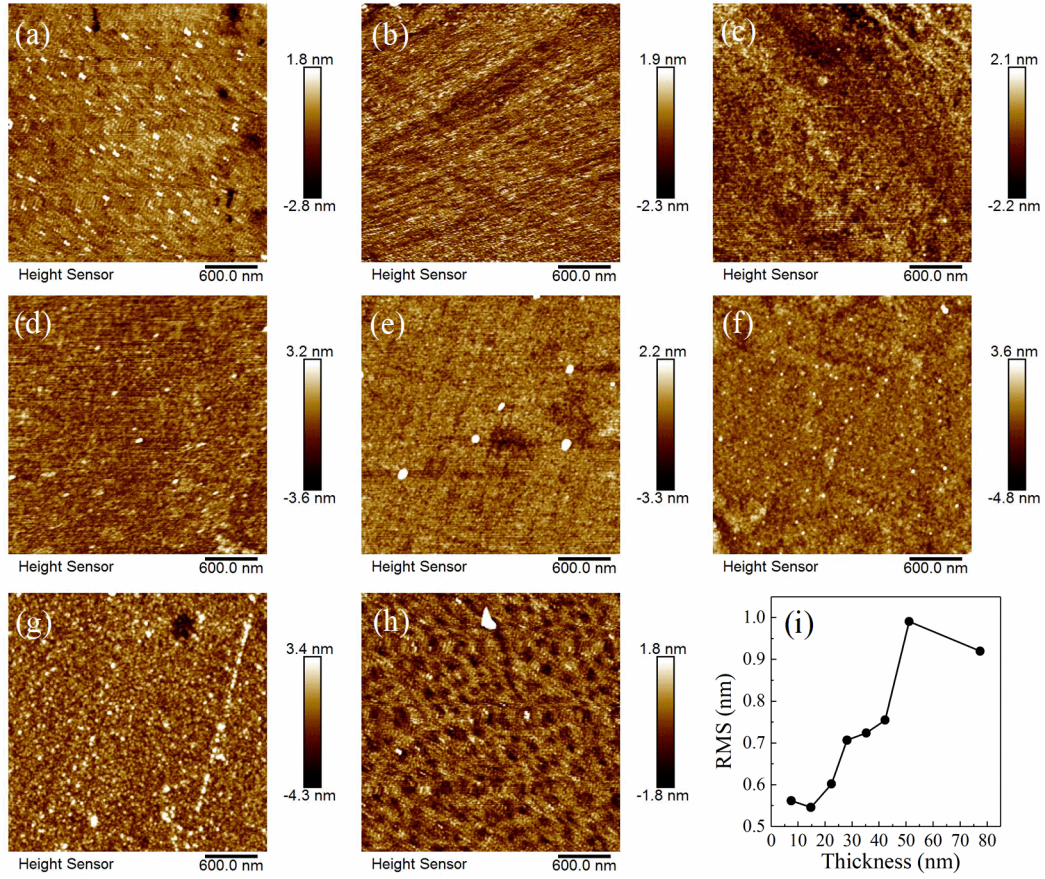


图 S7. 不同厚度的 LNO ($x = 0.07$) 薄膜的表面形貌表征 (a)–(h) 厚度由小到大的 LNO 薄膜的 AFM 图像; (i) 均方根(RMS)粗糙度值随着厚度增大的变化趋势

Fig. S7. Surface morphology characterizations of LNO ($x = 0.07$) films with varying thicknesses: (a)–(h) AFM images of LNO films, ranging from thinner to thicker films; (i) the root-mean-square (RMS) roughness values.

图 S8(a)–(f) 显示了 Li 掺杂浓度从低到高的 LNO 薄膜的 AFM 图像, 扫描面积为 $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$, 所有样品均表现出光滑的形态结构, 孔隙和裂纹极少。图 S8(g) 显示了 RMS 粗糙度随掺杂浓度的变化趋势, RMS 值分别为 0.28, 0.40, 0.42, 0.84, 1.08 和 1.11 nm。随着 Li 含量的增加, 表面更粗糙, 但所有样品均能够满足光电子器件对于薄膜光滑度与致密度的要求。

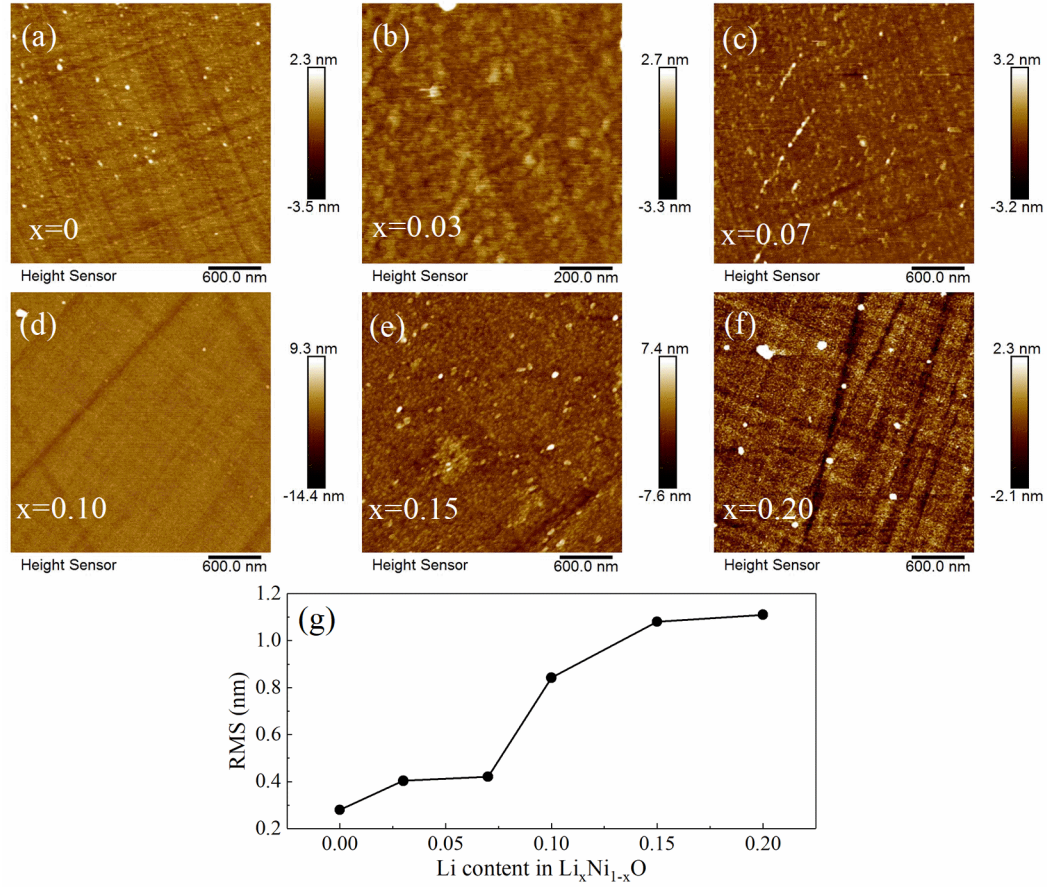


图 S8 不同 Li 掺杂浓度的 LNO 薄膜(厚度 50 nm)的表面形貌表征 (a)–(f) Li 掺杂浓度从低到高的 LNO 薄膜的 AFM 图像; (g)均方根(RMS)粗糙度随掺杂浓度的变化趋势

Fig. S8. Surface morphology characterizations of 50 nm LNO films with varying Li doping concentrations: (a)–(f) AFM 2D images of LNO films with varying Li-doping concentrations; (g) the trend of root-mean-square (RMS) roughness relative to doping content.

图 S9 给出了透明异质结构的 XRD 线扫描图谱。扫描结果仅显示 LSSO(001) 和 LBSO (001)的衍射峰，以及 LNO/LSSO/MgO 和 LNO/LBSO/MgO 异质结构的 (004)的衍射峰。从 10° 到 120° 的长距离扫描没有显示其他杂相，表明均为异质外延生长。

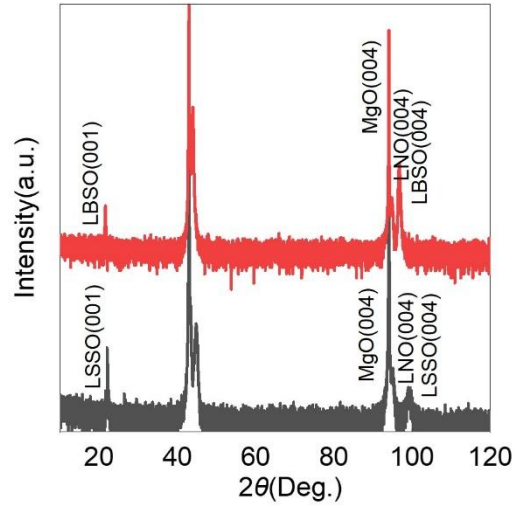


图 S9 透明异质结构的 XRD 线扫描图谱

Fig. S9. XRD linear scan results of the transparent heterostructure.

图 S10 给出了 LNO/LSSO 透明异质结构的摇摆曲线。LNO 薄膜的半高半宽 (FWHM) 为 1.61° ，而 LSSO 薄膜的 FWHM 为 2.09° 。

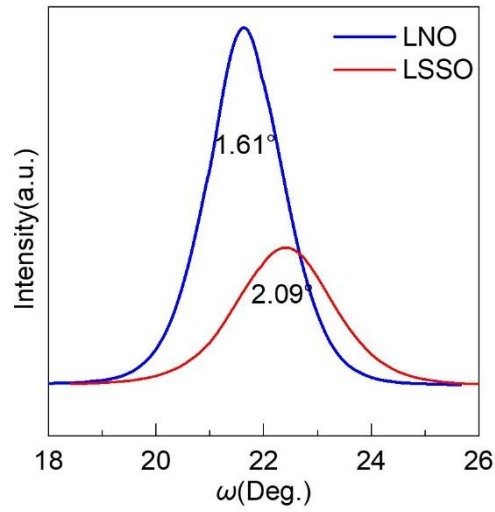


图 S10 LNO/LSSO(002)透明异质结构的摇摆曲线

Fig. S10. Rocking curves of the LNO/LSSO(002) transparent heterostructure.

图 S11 给出了 LNO/LBSO 透明异质结构的摇摆曲线。LNO 薄膜的 FWHM 为 0.64° ，而 LBSO 薄膜的 FWHM 为 0.61° 。图 S10 和 S11 表明沉积在 MgO 衬

底上的 LBSO 薄膜具有更好的结晶质量，在 LBSO 上生长的 LNO 薄膜也将表现出更好的结晶质量。

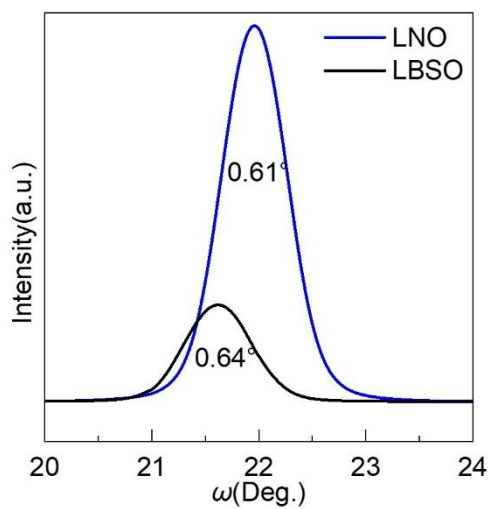


图 S11 LNO/LBSO (002) 透明异质结构的摇摆曲线

Fig. S11. Rocking curves of the LNO/LBSO(002) transparent heterostructure.

图 S12 给出了 LNO/LBSO/MgO 异质结构(202)的 φ 扫描。结果表明，薄膜和衬底具有四重对称峰，存在外延关系。

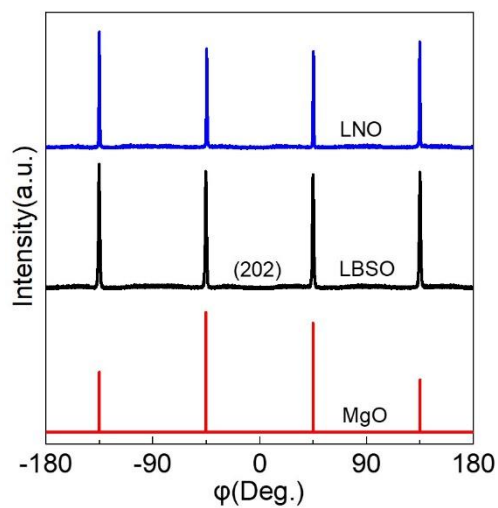


图 S12 LNO/LBSO/MgO 异质结构(202)的 φ 扫描

Fig. S12. φ scan of the LNO/LBSO/MgO (202) heterostructure.

图 S13 给出了 LNO, LSSO 和 LBSO 单层膜的 I - V 曲线和测试示意图。 I - V 曲线呈线性特征, 表明了 Pt 电极与各单层膜界面形成了良好的欧姆接触。

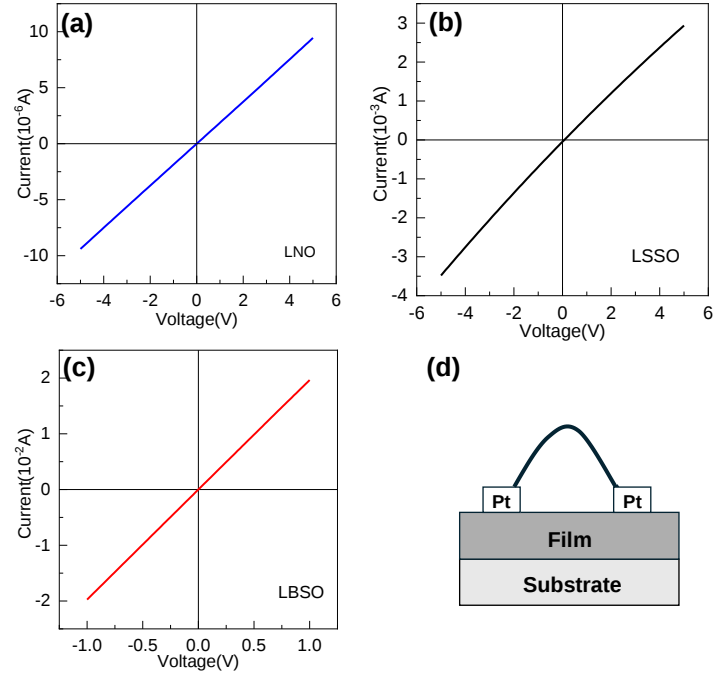


图 S13 单层膜的 I - V 图像 (a)–(c)分别为 LNO, LSSO 和 LBSO 单层膜的 I - V 图像; (d)测试示意图

Fig. S13. I - V results of single-layer films: (a)–(c) the I - V curves of LNO, LSSO, and LBSO single-layer films; (d) the schematic of the test.