

$\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ 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)

(2024 年 12 月 5 日收到; 2025 年 1 月 27 日收到修改稿)

透明导电氧化物 (TCO) 是光电子学中的关键材料, 与 n 型 TCO 相比, 关于 p 型 TCO 材料的选择较少, 其中 NiO 作为典型的 p 型 TCO 材料具有研发透明光电子器件的潜力. 本文使用脉冲激光沉积, 在 MgO(001) 衬底上成功地得到了不同厚度和 Li 掺杂浓度的 $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ 薄膜. 结果表明, 厚度和 Li 掺杂的增加都显著地降低了薄膜的电阻率, 并且厚度为 50 nm 与 3%Li 掺杂时, 薄膜的带隙最大. 在薄膜厚度与 Li 掺杂浓度对其物性调控研究的基础上, 选择带隙最大的 p 型 $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ 与 n 型 La 掺杂 ASnO_3 薄膜构造了透明电子器件. I - V 测试证实了该透明电子器件的整流特性以及基于透明导电材料 pn 结的成功构造. 这项工作通过将 p 型 NiO 与 n 型 ASnO_3 集成, 拓展了透明电子器件的研究与潜在应用.

关键词: 透明导电氧化物, 薄膜, 掺杂, pn 结

PACS: 68.55.-a, 72.80.Ga, 73.40.Kp, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.74.20241683

CSTR: 32037.14.aps.74.20241683

1 引言

pn 结是大多数半导体器件的基本结构^[1], 其独特的电学特性可实现整流等功能, 广泛应用于发光二极管、信号检测等设备中. 然而, 随着对器件尺寸与性能要求的不断提高, 高性能 pn 结材料的研发迫在眉睫. 此外, 透明电子技术是光电子技术的前沿领域之一^[2], 将两种透明导电氧化物 (TCO) 集成为 pn 结从而组成透明器件, 将为透明电子技术的发展提供新的可能性.

尽管基于 TCO 的器件研究已经取得了长足进展, 但大多数广泛研究的透明导电氧化物半

体 (TOS) 均为 n 型半导体^[3]. 然而, 大规模光电器件的研发同样需要 p 型透明半导体材料^[4], 在为数不多的 p 型 TOS 材料中, NiO 因其简单的成分和结构而受到广泛关注. “岩盐”晶体结构的 NiO 具有约 4.0 eV 的宽带隙, 是 p 型透明半导体的有力候选者^[5]. NiO 中的缺陷, 如镍空位和过量的氧, 会捕获电子并产生空穴, 从而导致 p 型行为. NiO 本身为绝缘体, 在室温下的电阻率约为 $10^{13} \Omega\cdot\text{cm}$, 掺杂一价阳离子可以显著地降低其电阻率^[6], 比如 Li 掺杂 $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ (LNO) 是一种可用作高性能电致变色器件、紫外线检测器和气体传感器的新型 p 型透明半导体材料^[7-9].

另一方面, 在众多 n 型 TCO 半导体材料中,

* 国家自然科学基金 (批准号: 11974127)、中青年教师培养行动学科 (专业) 带头人培育项目 (批准号: DTR2023022)、安徽省教育厅优秀科研创新团队 (批准号: 2024AH010027)、安徽省教育厅科研基金 (批准号: 2024AH051674)、淮北师范大学盈余资金拓展研究项目 (批准号: 2023ZK052, RE230426, 2023ZK065, 2024ZK09) 和安徽省高校协同创新计划 (批准号: GXXT-2022-086) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: huaed@chmu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: qzliu@mail.ustc.edu.cn

碱土锡酸盐 (ASnO_3) 在可见光谱中表现出高透明度, 并且对各种衬底具有很强的适应性, 其中在 MgO 衬底上生长的 $\text{La}_{0.05}\text{Sr}_{0.95}\text{SnO}_3$ 与 $\text{La}_{0.05}\text{Ba}_{0.95}\text{SnO}_3$ 薄膜分别具有 4.63 eV 和 4.18 eV 的宽带隙^[10], 使其成为光电应用的理想选择材料之一. 此前的研究表明由 p 型 NiO 和 n 型 BaSnO_3 制成的 pn 结具有良好的结晶度, 并且基于该异质结构的二极管表现出整流比为 500 的整流行为^[3]. 虽然已经有一些基于 p 型 NiO 的 pn 结研究, 如 1.5%Li 掺杂 p- $\text{NiO}/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 多晶双层薄膜 pn 结具有较高的开关耐久性^[11]; Nb 掺杂的 $\text{LNO}/\text{Nb-SrTiO}_3$ 异质结具有较大的整流比和 4.3 的理想因子^[12]; 在 p- NiO/ZnO 异质结中通过插层有效减小了漏电流, 改善电学特性^[13]. 但是, 基于 p 型 Li 掺杂 NiO 薄膜与 n 型 ASnO_3 薄膜的透明电子器件仍缺乏深入研究.

本文使用脉冲激光沉积技术 (PLD) 在 MgO (001) 衬底上制备了一系列 LNO 薄膜. 基于厚度与 Li 掺杂对 LNO 薄膜性能调控的研究, 选择了 50 nm 与 3%Li 掺杂的 LNO 薄膜与 n 型 ASnO_3 薄膜组合, 制备了 $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}/\text{La}_{0.05}\text{Sr}_{0.95}\text{SnO}_3$ (LNO/LSSO) 和 $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}/\text{La}_{0.05}\text{Ba}_{0.95}\text{SnO}_3$ (LNO/LBSO) 异质结构, 并研究了透明异质结构的整流特性, 为透明电子设备的发展提供了新的见解与潜在的应用前景.

2 实验步骤

$\text{La}_{0.05}\text{Sr}_{0.95}\text{SnO}_3$ (LSSO), $\text{La}_{0.05}\text{Ba}_{0.95}\text{SnO}_3$ (LBSO) 和 $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ (LNO, $x = 0, 0.03, 0.07, 0.10, 0.15, 0.20$) 陶瓷靶材采用高温固相法在箱式高温炉 (KSL1700X) 烧结完成. 通过控制 PLD 的沉积时间制备了不同厚度的薄膜.

对于透明电子结构的制造, 首先在 MgO (001) 衬底上生长 ASnO_3 薄膜作为 n 型材料; 然后将生长温度降低至 450 °C 后, 生长 p 型 LNO 薄膜. 薄膜均在 10 Pa 的氧压下制备, 激光频率为 10 Hz, 能量为 450 mJ. 待沉积完成, 样品原位退火 15 min 后自然冷却至室温. 最后, 将直径为 200 μm 的 Pt 点电极镀在薄膜表面.

样品的结构和形貌使用了高分辨率 X 射线衍射仪 (XRD, PANalytical, Empyrean)、透射电子显微镜 (TEM, FEI Talos F200X)、原子力显微镜 (AFM, MFP-3D) 和扫描电子显微镜 (SEM, Reg-

ulus 8220) 进行表征. 薄膜电子结构由 X 射线光电子能谱 (XPS, AXIS SUPRA+) 进行表征. LNO 薄膜的透射率则由紫外可见分光光度计 (Lambda 950) 完成, 输运特性与 pn 结整流特性的测量由霍尔效应测试系统 (HMS-3000) 和 I - V 测试平台 (Metatest E2&Keithley 6482) 完成.

3 结果与讨论

在制备透明异质结构之前, 我们研究了厚度和 Li 掺杂对 LNO 薄膜物理性能的影响. 所有 LNO 薄膜均表现出单晶结构, LNO 薄膜的 (001) 线性扫描表明, 所有薄膜均无异相, 面外晶格常数随着厚度与 Li 掺杂浓度的增加而降低 (如图 S1 和图 S2 (online) 所示). 图 S3 (online) 提供了不同沉积时间的 7%Li 掺杂 LNO 薄膜的 X 射线反射率 (X-ray reflectivity, XRR) 图谱, 以此确认了薄膜厚度. 并且, LNO 单层膜的 φ 扫描证明了薄膜与衬底之间的外延关系 (如图 S4 (online) 所示). 所有 LNO 薄膜的摇摆曲线 (图 S5 和图 S6 (online)) 均表明样品的结晶质量良好. 此外, 我们使用 AFM 分析了 LNO 薄膜的表面粗糙度, 结果如图 S7 和图 S8 (online) 所示, 所有样品均方根 (RMS) 总体上低于 1.2 nm, 基本满足研发光电器件薄膜的平整度要求^[14].

首先, 我们研究了厚度对 LNO 单层膜 ($x = 0.07$) 物理性能的影响. 室温下使用霍尔效应仪进行了输运性能的表征, 研究了 LNO 薄膜载流子浓度 n 、迁移率 μ 和电阻率 ρ 随厚度的变化规律, 如图 1(a) 所示. 正的载流子浓度与霍尔效应系数表明薄膜具有 p 型半导体输运特性. 载流子浓度随着厚度的增加而迅速增加, 并在 42.2 nm 附近稳定, 这与晶格质量随着厚度的增加逐渐提高有关. 迁移率降低可能是由于较高载流子浓度导致电离杂质的散射, 从而降低了空穴的平均自由程而引起的^[15]; 并且由于 $\mu = 1/qn\rho$ (q 为载流子的电荷量), LNO 薄膜载流子浓度 n 上升比电阻率 ρ 下降更快, 因此迁移率呈现下降趋势; 此外, 随厚度增加, 薄膜表面粗糙度增大, 更大的表面粗糙度意味着更多的无序结构与缺陷, 从而导致电子局域化增强, 载流子在界面附近散射加剧, 不利于载流子传输^[10].

图 1(b) 显示了薄膜在 200—800 nm 波长范围内的光学透射率. LNO 薄膜的透射率受厚度的

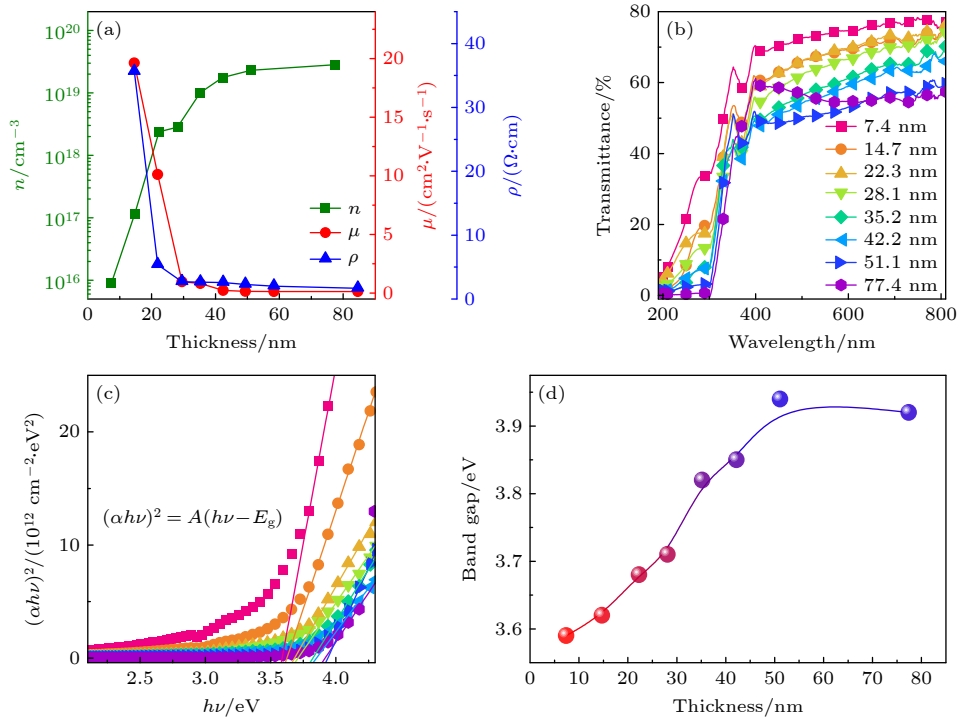


图 1 厚度对 LNO 单层膜 ($x = 0.07$) 物性的影响 (a) 载流子浓度、迁移率和电阻率随厚度的变化; (b) 光学透射率与厚度的关系; (c) $h\nu$ 与 $(\alpha h\nu)^2$ 的关系; (d) 光学带隙随薄膜厚度的变化

Fig. 1. Properties of LNO monolayers ($x = 0.07$) with varying thicknesses: (a) Variations of carrier concentration, mobility and resistivity of films with different thicknesses; (b) optical transmittance characterization of films with varying thicknesses; (c) plots of $h\nu$ vs. $(\alpha h\nu)^2$; (d) relationship between optical band gap values and film thickness.

影响较大, 透射率在 7.4 nm 厚度时超过 70%, 但在 77.4 nm 厚度时降至 55%. 透射率的下降是因为厚度的增加, 一方面会增加光传播的路径, 另一方面薄膜表面粗糙度的增加, 从而提高光的散射概率. 所有 LNO 薄膜在波长 300 nm 附近都显示出明显的由于电子激发引起的光学吸收边^[10]. 薄膜的带隙可以使用 Tauc^[16] 方程估算:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g), \quad (1)$$

其中 α 是吸收系数, $h\nu$ 表示光子能量, A 是常数. 图 1(c) 显示了 $h\nu$ 与 $(\alpha h\nu)^2$ 的关系. 薄膜带隙可由曲线切线推断, 图 1(d) 显示了光学带隙随厚度的变化规律. 随着厚度的增加, 由于载流子浓度的增加, 光学带隙增大, 最终随着厚度的进一步增加而稳定.

然后, 我们研究了 Li 掺杂浓度对 50 nm LNO 薄膜物性的影响. 图 2(a) 显示了 LNO 薄膜 Ni 2p $_{3/2}$ 的 XPS. 可以看出, 随着 Li 掺杂的增加, Ni 2p $_{3/2}$ 峰向较小的结合能移动, 且峰的强度逐渐降低. 854.23 eV 处的峰对应于未掺杂 NiO 的 Ni $^{2+}$ 电子状态. 855.89 eV 处的肩峰是由于关联效应引起的

Ni $^{3+}$ 态的多重分裂所造成的^[17]. Ni $^{3+}$ 的存在可能是由于样品暴露在空气中以及包含空穴的 Ni $^{2+}$ 离子结构而造成的^[18], 所有观察到的 Ni 2p $_{3/2}$ 电子态的结合能值均与 Yang 等^[17] 报道的数据一致. 另外 Ni $^{2+}$ 和氧之间发生反应, 形成了镍空位和 Ni $^{3+}$, 而镍空位的增加形成 Ni $^{3+}$ 和氧的“配位空穴”, 从而提高薄膜的导电性.

图 2(b) 展示了室温下不同 Li 掺杂的 LNO 薄膜载流子浓度、迁移率和电阻率与掺杂浓度之间的关系, 其变化趋势与不同厚度的薄膜变化趋势相近. 随着 Li 掺杂的增多, 薄膜的载流子浓度增加. 这是由于 Li $^{+}$ 取代了 Ni $^{2+}$, 产生了更多的空穴载流子导致的. 当掺杂浓度超过 15% 时, 载流子浓度趋于恒定, 可能是由于过量掺杂导致的载流子无序度与活化能升高^[19,20]. 随着 Li 掺杂的增加, 薄膜的迁移率从 7.23 cm 2 ·V $^{-1}$ ·s $^{-1}$ 降低至 0.05 cm 2 ·V $^{-1}$ ·s $^{-1}$. 掺杂原子可以充当散射中心, 随着 Li 含量的增加, 载流子的迁移会面临更多障碍, 增强散射, 从而导致迁移率降低. 此外, 随着 Li 掺杂的增多, 更多正常晶体点位的 Ni $^{2+}$ 被 Li $^{+}$ 取代, 形成空穴, 这也会在一定程度上影响载流子迁移率. 未掺杂 NiO 薄膜

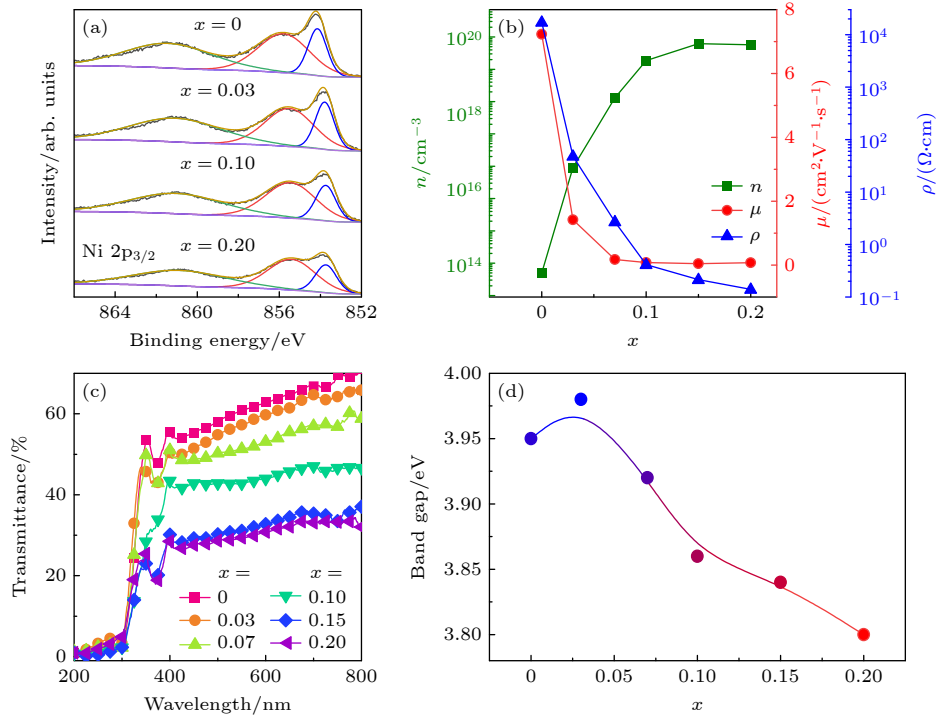


图 2 Li 掺杂对 LNO 单层膜物性的影响 (a) LNO 薄膜 Ni 2p_{3/2} 的 XPS; (b) LNO 薄膜的载流子浓度、迁移率和电阻率随 Li 掺杂的变化; (c) 薄膜的光学透射率随 Li 掺杂的变化; (d) 光学带隙随 Li 掺杂的变化

Fig. 2. Properties of LNO films with varying Li-doping levels: (a) XPS of LNO films focusing on Ni 2p_{3/2}; (b) relationship of carrier concentration, mobility, and resistivity of LNO films to Li doping levels; (c) optical transmittance characterization of the films; (d) relationship between optical band gap values and Li doping levels.

的电阻率在室温下明显较高, 为 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$; 随着 Li 离子的引入而逐渐降低, 在 20% 的 Li 掺杂浓度下达到最低 $0.14 \Omega \cdot \text{cm}$. 这表明 Li 掺杂可以有效地降低薄膜的电阻率. 紫外-可见光谱测试结果如图 2(c) 所示, 薄膜的透射率随着 Li 掺杂的增多而降低. 未掺杂薄膜的可见光透射率超过 70%, 但在 Li⁺掺杂下, 会产生 Ni³⁺, 导致薄膜表面呈现棕色或黑色, 从而降低了薄膜的光学透过率. 当掺杂浓度达到 10% 时, 透射率降至 50% 以下, 这不利于透明电子器件的制备. 我们同样使用 Tauc 方程计算样品的带隙, 样品在整个掺杂范围 ($x = 0-0.20$) 的带隙如图 2(d) 所示, 分别为 3.95, 3.98, 3.92, 3.86, 3.84 和 3.80 eV. 与未掺杂的 NiO 相比, 少量 Li⁺的引入增加了薄膜的光学带隙, 因为适度的掺杂会将费米能级引入导带 [21,22]. 随着掺杂浓度的不断升高, 由于掺杂剂能级的引入, 光学带隙减小 [23].

在对 LNO 薄膜物性调控的基础上, 综合考虑带隙、导电性以及透光率等因素, 选择了厚度为 50 nm 和 Li 掺杂浓度为 3% 的 LNO 薄膜作为 p 型材料, LSSO 和 LBSO 锡酸盐作为 n 型材料, 在 MgO(001) 衬底上制备了透明异质结. 图 S9 (online) 和图 3(a)

显示了异质结构 XRD(00 l) 线性扫描图谱. 结合异质结的 ω 扫描曲线 (图 S10 和图 S11 (online)) 表明, 薄膜均具有较高的结晶质量, 其中 LNO/LBSO 表现出比 LNO/LSSO 异质结构更好的结晶质量. 图 S12 (online) 显示了 LNO/LBSO 结构的 φ 扫描, 图中薄膜和衬底的四重对称峰, 表明了薄膜与衬底间的外延关系. 图 3(b) 和图 3(c) 显示了 LNO/LSSO 结构的横截面明场图像和能量色散 X 射线光谱 (EDX) 图像. 明场图像清楚地显示了各层之间清晰的界面, LNO 薄膜的厚度约为 47 nm, LSSO 薄膜的厚度约为 67 nm, 并且元素分布均匀, 没有明显的扩散. 为了更好地了解这些透明异质结和衬底之间的结构关系, 我们对 LNO(002) 进行了倒易空间衍射 (RSM) 扫描, 如图 3(d) 和图 3(e) 所示. RSM 结果表明, LNO/LBSO 透明异质结构衍射斑点较为聚集, 表明衍射峰强度较高, 结晶质量好; 而 LNO/LSSO 的衍射斑点相对比较分散, 结晶质量较低, 这与摇摆曲线结果一致. 这些发现表明, 与 LNO/LSSO 相比, 在 MgO(001) 衬底上外延生长的 LNO/LBSO 具有更好的结晶质量. 图 3(f) 和图 3(g) 显示了高分辨率透射电子显微镜 (HRTEM)

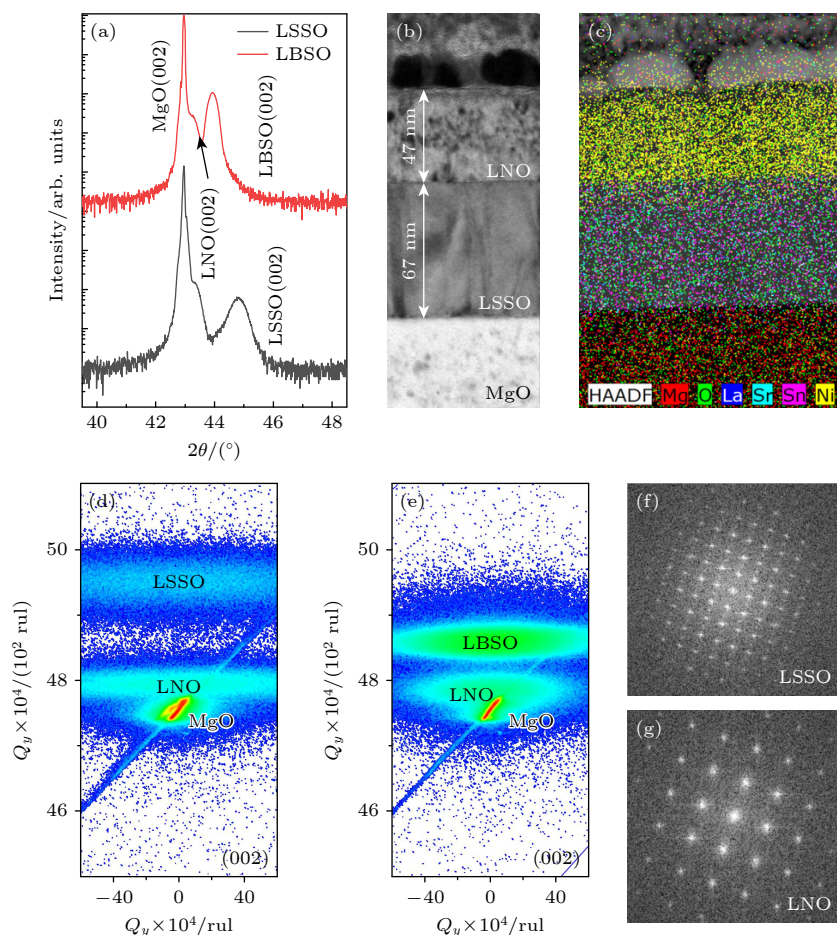


图 3 透明异质结的结构表征 (a) LNO/LSSO 和 LNO/LBSO 异质结构的 (001) 面的 XRD 线性扫描; (b) LNO/LSSO 异质结构的横截面明场像和 (c) 各元素分布图像; (d), (e) 异质结构的倒易空间衍射图; (f) LSSO 和 (g) LNO 的快速傅里叶变换图案

Fig. 3. Structural characterization of heterostructures: (a) XRD (001) linear scans of LNO/LSSO and LNO/LBSO heterostructures; (b) cross-sectional bright field image and (c) energy dispersive X-ray spectroscopy image of the LNO/LSSO heterostructure; (d), (e) RSM results for heterostructures; (f), (g) FFT patterns of (f) LSSO and (g) LNO.

的快速傅里叶变换 (FFT) 图案. LSSO 和 LNO 薄膜均表现出清晰的单晶图案, 相似的衍射图案也进一步证实了异质结构的外延生长关系.

最后, 我们研究了透明异质结构的整流特性. LNO, LSSO, LBSO 单层膜的 I - V 图像如图 S13 (online) 所示, 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. LNO/LSSO 和 LNO/LBSO 的 I - V 测试曲线如图 4(a)—(d) 所示, 插图展示了结构示意图与测试实物图. 图 4(a) 和图 4(b) 中正向和反向偏置电压之间的不对称 I - V 曲线表明该结构具有良好的整流特性. 这证实了 pn 结的形成^[24], 其开启电压为 1.0 V, 通过正向和反向偏压下的电阻计算出整流比约为 11. 图 4(c) 和图 4(d) 是基于 7%Li 掺杂的 LNO 薄膜制备的异质结构, 整流比分别约为 2 和 1. 可以看出随着 Li 掺杂量的增加异质结构的反向偏压下的

击穿电压减小, 漏电流增大. 为了进一步研究透明异质结构的性能, 我们应用 Shockley 方程来描述其电流行为^[25]. 通过计算, 推导出了理想因子 n 的公式 (理想二极管中的 $n = 1$):

$$n = \frac{q}{k_B T} \frac{dV}{d \ln I}. \quad (2)$$

理想因子 n 可以根据半对数 I - V 曲线中线性部分的斜率计算得出. 图 4(e) 和图 4(f) 分别显示了 3%Li 掺杂 LNO/LSSO 和 LNO/LBSO pn 结的 I - V 曲线半对数图. 其中 LNO/LSSO 结构的理想因子在 2.3—15 之间, LNO/LBSO 异质结构的理想因子在 1.9—10 之间. 由于高注入效应的存在以及理想因子的估算方法, 会使理想因子最大值偏离真实值, 所以 LNO/LSSO(LNO/LBSO) 结构的理想因子实际值应当更接近 2.3(1.9). 在其他几种基于氧化物的 pn 异质结构中也观察到较大的理想

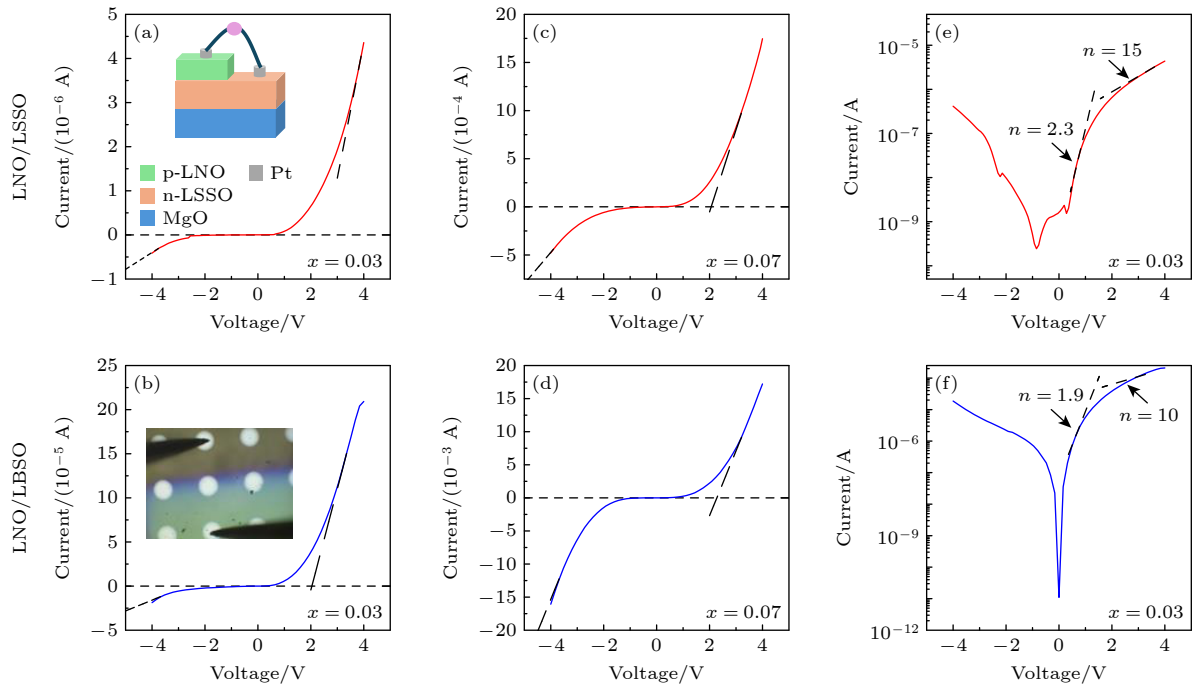


图4 透明异质结构的整流特性 (a) LNO/LSSO ($x=0.03$) 的 I - V 曲线, 插图展示了样品的结构示意图; (b) LNO/LBSO ($x=0.03$) 的 I - V 曲线, 插图为测试示意图; (c) LNO/LSSO ($x=0.07$) 的 I - V 曲线; (d) LNO/LBSO ($x=0.07$) 的 I - V 曲线; (e) LNO/LSSO ($x=0.03$) 的 I - V 曲线半对数图; (f) LNO/LBSO ($x=0.03$) 的 I - V 曲线半对数图

Fig. 4. Rectification characteristics of heterostructures: (a) I - V curve of LNO/LSSO ($x=0.03$), with an inset showing the schematic of the heterostructure; (b) I - V curve of LNO/LBSO ($x=0.03$), with an inset illustrating the tested sample; (c) I - V curve of LNO/LSSO ($x=0.07$); (d) I - V curve of LNO/LBSO ($x=0.07$); (e) I - V curve semilogarithmic plot of LNO/LSSO; (f) I - V curve semilogarithmic plot of LNO/LBSO.

因子, NiO/ZnO^[26], NiO/SrTiO₃^[12], NiO/BaSnO₃^[3] pn 结的理想因子分别为 2, 4.3, 7.7. 较大的理想因子表明存在额外的电荷传输机制, 例如界面复合或界面态相关的电流隧穿、耦合缺陷能级复合和空间电荷限制导电等^[27]. 由于 LBSO 更好的结晶质量以及 LNO 和 LBSO 之间更匹配的晶格相容性, 减少了界面缺陷, 从而降低了理想因子.

4 总 结

我们在 MgO(001) 衬底上制备了不同厚度与 Li 掺杂浓度的 $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ ($x=0-0.20$) 薄膜. 研究表明, 厚度在 50 nm 与 3%Li 掺杂的 LNO/MgO(001) 薄膜具有高结晶质量和 p 型半导体特性. 在此基础上, 通过将 LNO 薄膜与 ASnO_3 薄膜结合构造了透明导电 pn 结. 结果表明, 异质结构具有出色的外延关系与结晶质量, TEM 证实了薄膜之间的清晰界面, 而 I - V 特性证明了稳定的整流特性, LNO/LSSO 的理想因子为 2.3, LNO/LBSO 的理想因子为 1.9, 理想因子的差异可归因于界面效应. 这项

研究为透明电子器件开辟了新的途径, ASnO_3 薄膜与 NiO 薄膜结合的透明异质结构可能在未来的光电应用中发挥关键作用.

参考文献

- [1] Xia H, Luo M, Wang W, Wang H, Li T, Wang Z, Xu H, Chen Y, Zhou Y, Wang F, Xie R, Wang P, Hu W, Lu W 2022 *Light-Sci. Appl.* **11** 170
- [2] Mistry B V, Bhatt P, Bhavsar K H, Trivedi S J, Trivedi U N, Joshi U S 2011 *Thin Solid Films* **519** 3840
- [3] Zhang J, Han S, Luo W, Xiang S, Zou J, Oropeza F E, Gu M, Zhang K H L 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 171605
- [4] Joshi U S, Matsumoto Y, Itaka K, Sumiya M, Koinuma H 2006 *Appl. Surf. Sci.* **252** 2524
- [5] Yang A, Sakata O, Yamauchi R, Katsuya Y, Kumara L S R, Shimada Y, Matsuda A, Yoshimoto M 2014 *Appl. Surf. Sci.* **320** 787
- [6] Jang W L, Lu Y M, Hwang W S, Chen W C 2010 *J. Eur. Ceram. Soc.* **30** 503
- [7] Garduño-Wilches I, Alonso J C 2013 *Int. J. Hydrogen Energy* **38** 4213
- [8] Moulki H, Park D H, Min B K, Kwon H, Hwang S J, Choy J H, Toupance T, Campet G, Rougier A 2012 *Electrochim. Acta* **74** 46
- [9] Ohta H, Hirano M, Nakahara K, Maruta H, Tanabe T, Kamiya M, Kamiya T, Hosono H 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83**

- 1029
- [10] Zhou T, Yang X M, Yuan J, Liu Q Z 2024 *J. Alloys Compd.* **984** 173953
- [11] Sikdar S, Sahu B P, Dhar S 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 023501
- [12] Zhang K H L, Wu R, Tang F, Li W, Oropeza F E, Qiao L, Lazarov V K, Du Y, Payne D J, MacManus-Driscoll J L, Blamire M G 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 26549
- [13] Dutta T, Gupta P, Gupta A, Narayan J 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 083715
- [14] Jung M C, Leyden M R, Nikiforov G O, Lee M V, Lee H K, Shin T J, Takimiya K, Qi Y 2015 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7** 1833
- [15] Park K H, Ur S C, Kim I H, Choi S M, Seo W S 2010 *J. Korean Phys. Soc.* **57** 1000
- [16] Tauc J 1968 *Mater. Res. Bull.* **3** 37
- [17] Yang S, Kim J, Choi Y, Kim H, Lee D, Bae J S, Park S 2020 *J. Alloys Compd.* **815** 152343
- [18] Li Y, Li X H, Wang Z X, Guo H J, Li T 2016 *Ceram. Int.* **42** 14565
- [19] Liu Q Z, Liu J J, Li B, Li H, Zhu G P, Dai K, Liu Z L, Zhang P, Dai J M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 241901
- [20] Shanthi E, Dutta V, Banerjee A, Chopra K L 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 6243
- [21] Burstein E 1954 *Phys. Rev.* **93** 632
- [22] Moss T S 1954 *Proc. Phys. Soc. London, Sect. B* **67** 775
- [23] Dakhel A A 2012 *J. Alloys Compd.* **539** 26
- [24] Gupta R K, Ghosh K, Kahol P K 2009 *Physica E* **41** 617
- [25] Shah J M, Li Y L, Gessmann T, Schubert E F 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 2627
- [26] Ohta H, Kamiya M, Kamiya T, Hirano M, Hosono H 2003 *Thin Solid Films* **445** 317
- [27] Grundmann M, Klüpfel F, Karsthof R, Schlupp P, Schein F L, Splith D, Yang C, Bitter S, von Wenckstern H 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 213001

Influence of thickness and doping-dependent properties of Li-doped NiO thin films on rectification effect of pn junction^{*}

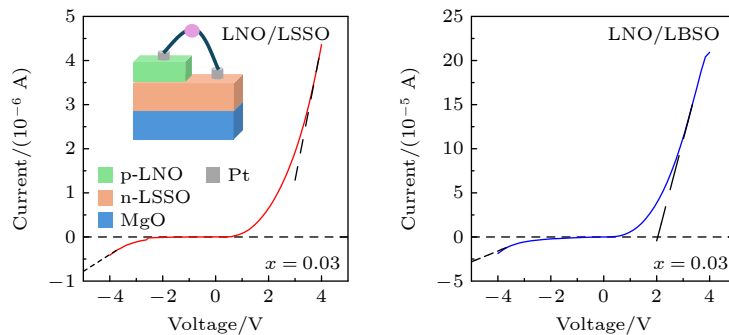
WANG Lei ZHOU Tong HUA Enda[†] LIU Zhongliang
LI Bing LIU Qinzhuang[‡]

(Anhui Province Industrial Generic Technology Research Center for Aluminic Materials, School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China)

(Received 5 December 2024; revised manuscript received 27 January 2025)

Abstract

Transparent conducting oxides (TCOs) are crucial materials in optoelectronics, but p-type TCOs are less studied than n-type TCOs. NiO, for typical p-type TCOs show promising potential applications in transparent optoelectronic devices. In this study, $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ thin films with varying thickness and Li doping levels on MgO(001) substrates are successfully fabricated using pulsed laser deposition. The results demonstrate that increasing both thickness and Li doping level will reduce the resistivity of the films, with the maximum optical bandgap observed at a thickness of 50 nm and 3% Li doping level. Based on the control of physical properties through film thickness and Li doping, the p-type $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ with the largest bandgap is selected to construct transparent electronic devices with n-type La-doped ASnO_3 films. The I - V tests confirm the rectification properties of the heterostructures, successfully demonstrating the formation of pn junctions. This work expands the potential applications of transparent electronic devices by integrating p-type NiO with n-type ASnO_3 .



Keywords: transparent conducting oxide, thin film, doping, pn junction

PACS: 68.55.-a, 72.80.Ga, 73.40.Kp, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.74.20241683

CSTR: 32037.14.aps.74.20241683

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of China (Grant No. 11974127), the Middle-aged and Young Teachers' Training Action Discipline (Major) Leader Cultivation Project, China (Grant No. DTR2023022), the Excellent Scientific Research and Innovation Team of Education Department of Anhui Province, China (Grant No. 2024AH010027), the Scientific Research Foundation of Education Department of Anhui Province of China (Grant No. 2024AH051674), the Surplus Fund Expansion Research Project of Huaibei Normal University, China (Grant Nos. 2023ZK052, RE230426, 2023ZK065, 2024ZK09), and the University Synergy Innovation Program of Anhui Province, China (Grant No. GXXT-2022-086).

[†] Corresponding author. E-mail: huaed@chnu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: qzliu@mail.ustc.edu.cn



$\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ 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

Influence of thickness and doping-dependent properties of Li-doped NiO thin films on rectification effect of pn junction

WANG Lei ZHOU Tong HUA Enda LIU Zhongliang LI Bing LIU Qinzhuang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 096802 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241683

CSTR: 32037.14.aps.74.20241683

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241683>

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

应变增强Nb掺杂 SrTiO_3 薄膜热电性能

Strain-enhanced thermoelectric properties of Nb-doped SrTiO_3 thin films

物理学报. 2023, 72(9): 096803 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222301>

金属网格-透明导电氧化物复合型透明电极的瑞利分析和仿真

Rayleigh analysis and numerical simulations of metal-mesh/ transparent conducting oxide composite transparent electrode

物理学报. 2024, 73(14): 146801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240230>

缺陷对铁单质薄膜磁致伸缩与磁矩演化的影响

Effect of defects on magnetostriction and magnetic moment evolution of iron thin films

物理学报. 2022, 71(1): 017502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211177>

SrSnO_3 作为透明导电氧化物的第一性原理研究

First-principles study of SrSnO_3 as transparent conductive oxide

物理学报. 2023, 72(1): 013101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221544>

Ag, Cu掺杂氧化石墨烯吸附 NH_3 的第一性原理研究

First-principles study of NH_3 adsorption on Ag- and Cu doped graphene oxide

物理学报. 2025, 74(7): 073101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241737>

Te掺杂对二维InSe抗氧化性以及电子结构的影响

Effect of Te doping on oxidation resistance and electronic structure of two-dimensional InSe

物理学报. 2023, 72(12): 123101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230004>