

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-13

面向高精度显示应用的新型氧化铟锡靶材性能研究

康健, 黄聪*, 毛瑞锋*, 李登涛, 张毅, 胡稳
(合肥京东方显示技术有限公司, 安徽 合肥 230012)

摘要:本研究系统对比了新型少水氧化铟锡(W-ITO)靶材与传统氧化铟锡(N-ITO)靶材的材料特性、薄膜性能及其在显示器件中的应用表现。材料结构显示,W-ITO通过引入0.10 at. %的微量金属元素补偿氧空位,抑制了退火时水诱发的污染物颗粒(Particle)问题;且其难以溅射的二次相粒子直径($2.02\text{ }\mu\text{m}$)与面积占比(16.80%)均显著低于N-ITO,从源头减少了电弧现象的产生。磁控溅射成膜后的性能方面,W-ITO呈现更优异的方阻均值、良好的电阻率稳定性、高结晶质量及高透过率,且在湿法刻蚀中速率更快、表面更洁净、钻蚀更小,利于高精度图形的制备。在薄膜晶体管(TFT)器件应用中,基于W-ITO电极的器件表现出标准电学特性,其平滑无扭结的转移曲线间接证明了电极/有源层界面的高质量。进一步集成封装为玻璃面板后,成品在光学对比度、伽马曲线、图像残留、静电放电耐受性及功耗等方面均表现出色,验证了W-ITO电极对显示面板综合性能与可靠性的提升。最终,量产数据证实,采用W-ITO靶材可显著提升首次ITO沉积批次良率($\sim 0.14\%$)、降低二次沉积缺陷返修率($\sim 0.37\%$),并有效延长设备维护周期,带来了显著的经济效益。本研究为高可靠性、高性能ITO的材料选型与量产工艺优化提供了系统的理论支持和实验依据。

关键词:氧化铟锡;磁控溅射;薄膜晶体管;玻璃面板;良率

中图分类号:TN304.21;TN321.5;TN141.9 文献标识码:A doi:10.3724/CJLCD.2026-0140 CSTR:32172.14.
CJLCD.2026-0140

Performance investigation of novel indium tin oxide targets for high-precision display applications

KANG Jian, HUANG Cong*, MAO Ruifeng*, LI Dengtao, ZHANG Yi, HU Wen

(Hefei BOE Display Technology Co. Ltd., Hefei 230012, China)

Abstract: This study systematically compares the material properties, thin-film performance, and application performance in display devices between the new water-less indium tin oxide (W-ITO) target and normal indium tin oxide (N-ITO) target. Material analysis reveals that W-ITO mitigates particle contamination induced by water during annealing by introducing trace amounts of metallic elements at 0.10 at. %. Additionally, its sputter-resistant secondary phase area and particle size ($2.02\text{ }\mu\text{m}$, 16.80%) are significantly smaller than those of N-ITO, effectively reducing arc generation from the source. In terms of performance after magnetron sputtering, W-ITO exhibits superior average sheet resistance, excellent

收稿日期:2026-07-24;修订日期:2026-09-21.

基金项目:京东方集团重点项目(No. B02-00240710021)

Supported by Key Projects of BOE Group (No. B02-00240710021)

*通信联系人, E-mail: huangcong@boe.com.cn; maoruifeng@boe.com.cn

resistivity stability, high crystalline quality, and high transmittance. It also demonstrates faster wet etching rates, cleaner surfaces, and reduced undercutting, facilitating the fabrication of high-precision patterns. In thin-film transistor (TFT) device applications, devices based on W-ITO electrodes exhibit standard electrical characteristics, with smooth and distortion-free transfer curves indirectly confirming the high-quality interface between the electrode and active layer. After further integration and encapsulation into glass panels, the final product demonstrates outstanding performance in optical contrast, gamma curve, image retention, electrostatic discharge tolerance, and power consumption, validating the enhancement of comprehensive performance and reliability of display panels by W-ITO electrodes. Finally, mass production data confirms that using W-ITO targets significantly improves the first-pass yield of ITO deposition batches ($\sim 0.14\%$), reduces the rework rate for secondary deposition defects ($\sim 0.37\%$), and effectively extends equipment maintenance cycles, delivering substantial economic benefits. This study provides systematic experimental evidence and theoretical support for material selection and process optimization of high-reliability, high-performance ITO.

Key words: indium tin oxide; magnetron sputtering; thin film transistor; glass panel; yield

1 引言

ITO是以 In_2O_3 和 SnO_2 为原料,按一定比例混合后经高温煅烧制备而成的透明导电材料^{[1][2]}。Sn元素对In位点进行施主掺杂,为体系引入自由电子,显著提升ITO的电导率,使其表现出典型的n型半导体特性^[3]。同时,ITO属于宽带隙半导体(约3.70 eV),具有高载流子浓度、优良导电性和可见光区高透过率,并具备良好的机械硬度、热稳定性和化学稳定性^[4-6]。经退火处理后,其晶粒生长致密化,晶界数量减少,可进一步优化上述性能^{[5][7]}。基于这些综合优势,ITO已成为液晶显示器、太阳能电池及高性能光电子器件等领域广泛使用的功能性透明电极材料^{[8][9]}。

近年来,随着液晶显示器件向大尺寸方向持续发展,对电极材料在透过率、低电阻、集成化、均匀性与表面洁净度等方面提出了更为严格的要求^{[8][10]}。尽管ITO具备诸多优异性能,但在实际应用中仍面临一系列关键挑战。首先,N-ITO材料因Sn元素掺杂引入的晶格氧空位易与氢结合,由此导致在后续退火工艺中,因水分释放而引起的Particle问题,严重影响器件良率^[11]。其次,N-ITO靶材中存在的4-3相仍占有一定面积比例,且其颗粒尺寸较大^[12]。该相与母相相比电阻更高、可溅射性较差,在实际磁控溅射过程中,等离子体轰击到靶材表面的4-3相区域时易引发电弧现象,进而产生Particle,影响成膜的均匀

性^[10-13]。此外,在维持膜厚均匀性的同时进一步优化电阻率等电学特性,仍是目前工艺中的重要挑战^{[14][15]}。

针对上述问题,选用低水分残留、少二次相的靶材成为重要改进方向。基于此需求,合肥京东方显示技术有限公司与三井金属公司联合研发测试了一种新型微量掺杂的W-ITO靶材,通过引入总掺杂量约为0.10 at. %的微量金属元素,结合工艺优化,实现对靶材内部微观结构的有效调控。并重点对比分析W-ITO靶材与N-ITO靶材在结构、成膜及性能方面的差异,阐明W-ITO通过微量掺杂与工艺调控,在抑制水分释放、减少二次相与降低Particle方面的作用机制。研究进一步结合薄膜沉积、器件制备与量产测试,系统评估W-ITO在光学性能、刻蚀工艺适应性、电学器件及长期可靠性方面的实际表现,并分析其对良率与综合效益的提升效果。通过本研究,旨在为高性能ITO薄膜的选型与工艺优化提供可靠实验支撑,推动显示行业材料与制程的持续进步。

2 实验材料与方法

2.1 成膜制备方法

本实验采用ULVAC公司SMD-3400型立式磁控溅射镀膜机,通过直流磁控溅射法在平板玻璃基板上沉积ITO薄膜。量产玻璃基板采用溢

流下拉熔制法制造,尺寸为 $2\,940\text{ mm}\times 3\,370\text{ mm}$ 。在镀膜前,玻璃基板依次经过等离子体清洗、专用清洗剂清洗、去离子水漂洗及高压气枪吹干,以确保表面清洁。沉积过程的基本原理如图1所示。在直流电源的作用下,通入的氩气被电离形成等离子体。在磁场约束下,高能氩离子被加速并轰击ITO靶材表面,通过物理溅射效应将靶材原子或原子团溅射出来。这些溅射粒子在真空腔体中飞行并最终沉积到玻璃基板表面。随后,沉积粒子经历凝结、表面扩散、碰撞成核、晶核生长与岛状膜形成等过程,最终聚结形成连续、均匀的薄膜。具体的溅射工艺参数如下:本底真空度优于 $1\times 10^{-4}\text{ Pa}$;工作气体为99.9999%纯度氩气,流量设定为 $1250\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$;工作气压维持在 0.73 Pa ;放电功率为 16 kW ;靶材表面与基板之间的距离固定为 215 mm 。

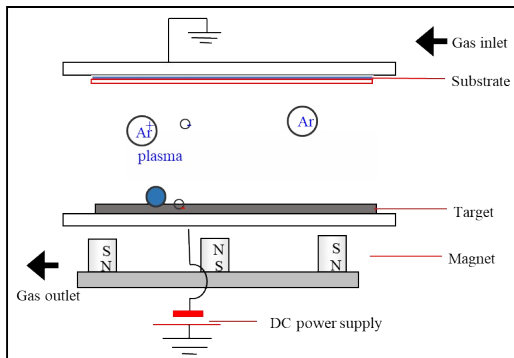


图1 直流磁控溅射法原理图

Fig.1 Schematic diagram of DC magnetron sputtering method

2.2 薄膜晶体管结构

所制备的TFT样品的沉积流程图与截面示意图如图2所示。沉积顺序依次为:第一层ITO(1st ITO)、栅极(Gate)、绝缘层(GI)、有源层(Active)、源漏电极(SD)、保护层(PVX),以及第二层ITO(2nd ITO)。这一结构设计兼顾了电学性能与光学特性,是典型的多层薄膜晶体管阵列结构。其中,1st ITO作为公共电极,与上方2nd ITO的像素电极共同形成垂直于基板的电场,以调控液晶分子的取向与透光状态^[16-18]。两层ITO虽均为透明导电层,但在工艺上分两次沉积,且通过中间的多层结构实现电学隔离,从而可独立施加电压,实现像素的精确驱动。Gate与SD分

别构成TFT的开关控制端与信号输入端,两者与GI共同作用,实现对沟道导通与关断的调控。Active作为TFT的核心功能层,实际为三层不同硅基半导体材料的叠层结构。包括本征非晶硅(a-Si:H)用于形成导电沟道,以及轻掺杂与低缺陷密度的非晶硅用于改善界面特性、抑制漏电流,确保器件具有良好的开关比与稳定性^[19]。PVX则覆盖于SD电极之上,起到钝化、隔离以及表面平整化的作用,为后续2nd ITO的沉积提供良好界面,同时增强器件在工艺过程中的可靠性^[20]。

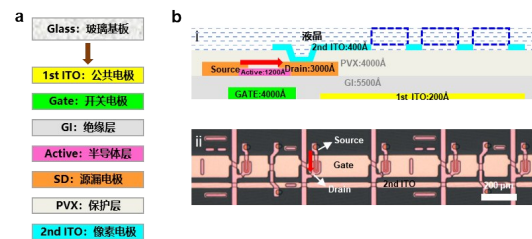


图2 薄膜晶体管的沉积工艺流程、含关键结构参数与载流子传输机制的截面示意图及器件实物显微图。(a)主要膜层沉积顺序流程图;(b)器件截面结构示意图(i),标注了各功能层厚度参数,红色箭头表示电流的流向;TFT器件整体实物显微图(ii),其中源极端连接数据线负责信号输入,漏极端连接像素电极负责电荷存储。

Fig.2 The deposition process flow of thin film transistors, cross-sectional schematic diagram containing key structural parameters and carrier transport mechanism, and physical microscopic image of the device. (a) Main membrane deposition sequence flowchart; (b) Detailed cross-sectional structure diagram (i) of the device, indicating the thickness parameters of each functional layer, with red arrows indicating the direction of current flow. The overall physical micrograph of TFT device (ii), where the source terminal is connected to the data line for signal input, and the drain terminal is connected to the pixel electrode for charge storage.

2.3 基本表征方式

本文采用以下方法对W-ITO成膜后样品进行系统表征与分析:首先,利用扫描电子显微镜(SEM, Hitachi SU8220型)观察样品表面形貌与微观结构;通过X射线衍射仪(XRD, 2 θ 扫描范围 $20^{\circ}\sim 80^{\circ}$)分析其晶体结构与物相组成。样品的电阻由四探针测试仪(4-Point Probe)测定;在光

学性能方面,采用台阶仪、椭偏仪与光谱反射仪分别测试膜厚、反射率与光学透过率,膜层的不良光学特性自动检测(AOI)则通过阵列宏微观缺陷检查机完成。所有测试均在室温下进行,以保证结果的一致性与可比性。

对于 TFT 的电学性能参数测试(EPM),使用半导体参数分析仪连接器件的 Gate 层与 SD 层,通过施加扫描电压并测量电流,获得各项电学特性曲线。从中提取关态电压、阈值电压、载流子迁移率、亚阈值摆幅及关态电流等关键参数,以监控工艺稳定性。所有测试均在电磁屏蔽箱内进行,以消除环境电磁干扰的影响。

将 TFT 基板、彩色滤光片、液晶盒、偏光片及驱动电路等组件集成为完整面板,并进行综合性能测试。在光学测试中,于暗室环境下向面板输入特定信号,由正前方光学仪器接收屏幕出射光,评估其色彩准确性与亮度均匀性。残像测试中,使面板在特定温度下长时间显示高对比度固定图案后,记录残留图案的亮度与色度差异随时间衰减的曲线,以评价其抗残像能力。在功耗测试中,面板输入指定工作模式信号,利用精密电源和电流探头测量电源轨电流,进而计算整机功耗。此外,通过静电放电枪对面板特定引脚施加高压静电脉冲,检验其抗静电能力与防护设计的鲁棒性。

3 实验结果与讨论

3.1 W-ITO 靶材的工艺改善

图 3(a)展示了 N-ITO 与 W-ITO 在退火前后的微观结构演变机制。在 N-ITO 中, Sn^{4+} 取代 In^{3+} 引入自由电子的同时产生氧空位,氢质子易占据氧空位转化为活性氢,还原晶格氧生成水分子^{[1][2][21][22]}。退火过程中,水分子析出诱发 Particle 缺陷,导致良率下降。为解决此问题,本研究采用联合研发的 W-ITO 靶材。其在氧化物粉末阶段通过共沉淀法引入微量多元素协同掺杂:包括 0.7~0.8 at. % 的 W 元素,利用其可变价态特性伴随氧空位的生成或湮灭,动态调节材料导电性与光学特性的平衡;以及 0.2~0.3 at. % 的 Mg 与 Zn 元素,用于精细调控载流子浓度并优化电学性能^{[23][24]}。该多元素掺杂策略通过补偿氧空位机制^{[25][26]},有效抑制了水分子生成,同时掺杂元素被晶格缺陷吸收^{[27][28]},促进了稳定多晶结构

的形成。图 3(b)为两种靶材表面的 SEM 形貌对比。两者均存在分布于母相边缘的 4-3 相(黑色区域),但 W-ITO 中该相显著减少。由于 4-3 相的电阻率高于母相,溅射时更易引发电弧^[10-13],并产生大量 Particle(图 3(c))。统计结果显示(图 3(d)),相较于 N-ITO, W-ITO 中 4-3 相的平均粒径减小约 12%(2.30 μm 降至 2.02 μm),面积占比降低约 15%(19.8% 降至 16.8%)。所以 N-ITO 靶面密集分布的大尺寸 4-3 相导致了高频电弧现象与大量 Particle 产生;相比之下, W-ITO 靶材通过减少高阻 4-3 相的含量与尺寸,有效降低了电弧发生概率,显著提升了成膜洁净度。图 3(e)的 Particle 数量测试进一步表明,随着靶材消耗厚度增加, N-ITO 膜层 Particle 数量显著上升,而 W-ITO 增长幅度明显减缓。综上, W-ITO 通过掺杂调控氧空位抑制了退火时水分的析出,并通过减少高阻 4-3 相降低了溅射电弧风险,为提升器件良率提供了材料与工艺基础。

3.2 W-ITO 膜与 N-ITO 膜的基本表征测试

本节在测试基板上分别利用 W-ITO 与 N-ITO 靶材进行磁控溅射沉积,制备了 W-ITO 与 N-ITO 的薄膜样品,并系统表征其在 150℃退火处理后的结构与光电性能,结果如图 4 所示。图 4(a)为薄膜方阻的 Mapping 分布,结果显示 W-ITO 膜的平均方阻约为 81.80 $\Omega/\square$,且均匀性更优,其变异系数较 N-ITO 膜降低 5.02%。这种优异的电学性能主要归因于 W-ITO 薄膜表面更为平整致密,显著减少了微观缺陷对载流子传输的散射^{[6][17][18]},从而在同等膜厚下实现了更低的整体电阻率。图 4(b)展示了不同靶材消耗厚度下的电阻率演变: N-ITO 膜在靶材使用后期电阻率较初期升高约 2.2 倍,而 W-ITO 膜表现出优异的稳定性,电阻率波动幅度始终维持在 0.50% 以内。XRD 表征结果(图 4(c))显示,两种薄膜均在 21.6°、30.5°、37.0°及 51.2°处呈现尖锐衍射峰,分别对应 (211)、(222)、(400) 和 (440) 晶面^{[5][29][30]},表明 W-ITO 膜具有与 N-ITO 膜高度择优取向的多晶生长特征。进一步的变点位(图 4(c))及变靶材消耗厚度(图 4(d)) XRD 分析表明, W-ITO 膜在不同测试条件下均呈现出高强度的衍射峰,反映出薄膜各处均具备较大的晶粒尺寸;同时,衍射峰位的稳定性证实了其具有良

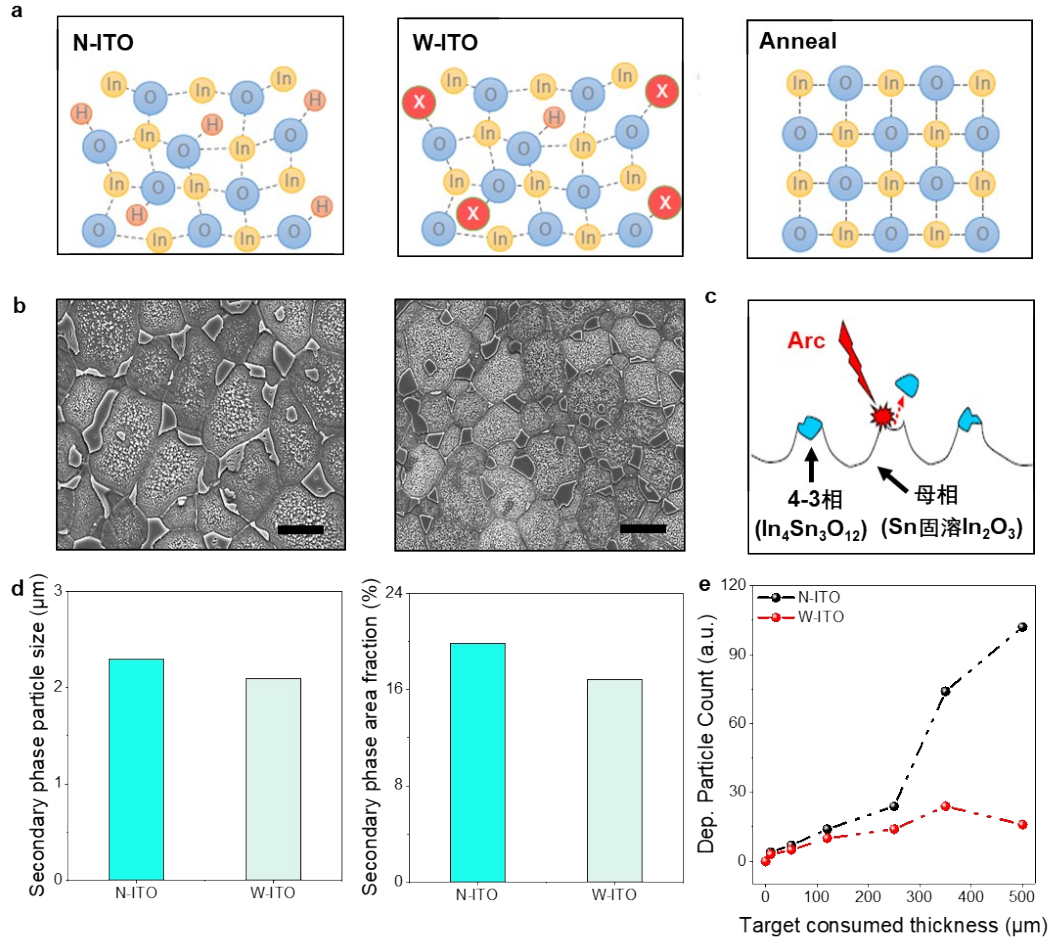


图3 (a) 退火前N-ITO、W-ITO与退火后W-ITO的分子结构示意图,其中X是微量金属元素;(b) N-ITO靶材(左)与W-ITO靶材(右)的扫描电子显微镜图像,所有图像标尺均为5 μm;(c) 电弧现象的原理示意图;(d) N-ITO靶材与W-ITO靶材的4-3相粒子直径对比图与4-3相面积率对比图;(e) 两种薄膜在不同的靶材消耗厚度下的Particle数量对比图。

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the molecular structure of N-ITO, W-ITO before annealing, and W-ITO after annealing, where X represents trace metal elements; (b) Scanning electron microscope images of N-ITO target material (left) and W-ITO target material (right), with all image scales at 5 μm; (c) Schematic diagram of Arc principle for target material; (d) Comparison of 4-3 phase particle diameter and 4-3 phase area ratio between N-ITO target and W-ITO target; (e) Comparison of particle count of two thin films at different target material consumption thicknesses.

好的晶格取向一致性。这些结果验证了W-ITO膜在基板空间分布及靶材全寿命周期内的结构稳定性。此外,图4(e)对比了W-ITO与N-ITO膜在相同条件下的透光率测试结果。测试显示,W-ITO膜的透光率与N-ITO膜相当。随靶材消耗厚度的增加,W-ITO膜透光率无明显波动(图4(f)),展现出稳定的光学性能。

3.3 W-ITO膜与N-ITO膜的刻蚀性能对比

沟道层刻蚀是决定TFT背板良率与可靠性的关键工艺^{[31][32]},图5整体对比了W-ITO膜与N-ITO膜的刻蚀性能。其中,图5(a)展示了本工

艺的湿法刻蚀流程:在曝光、显影工序之后,暴露出的ITO膜将与刻蚀液反应生成可溶性产物,从而实现图形化转移。图5(b)比较了W-ITO膜与N-ITO膜在完全相同的刻蚀液体系与刻蚀时间下的平均刻蚀速率。结果表明,W-ITO膜的平均刻蚀速率达到了13.2 Å/s,明显优于N-ITO膜的11.2 Å/s,有助于缩短工艺周期并提升产能。图5(c)进一步表明,W-ITO膜在靶材全寿命周期内刻蚀速率极其稳定,标准偏差仅为1.1%(较N-ITO降低2.2%),这种优异的均匀性对大尺寸面板的工艺一致性控制至关重要。彻底清除开

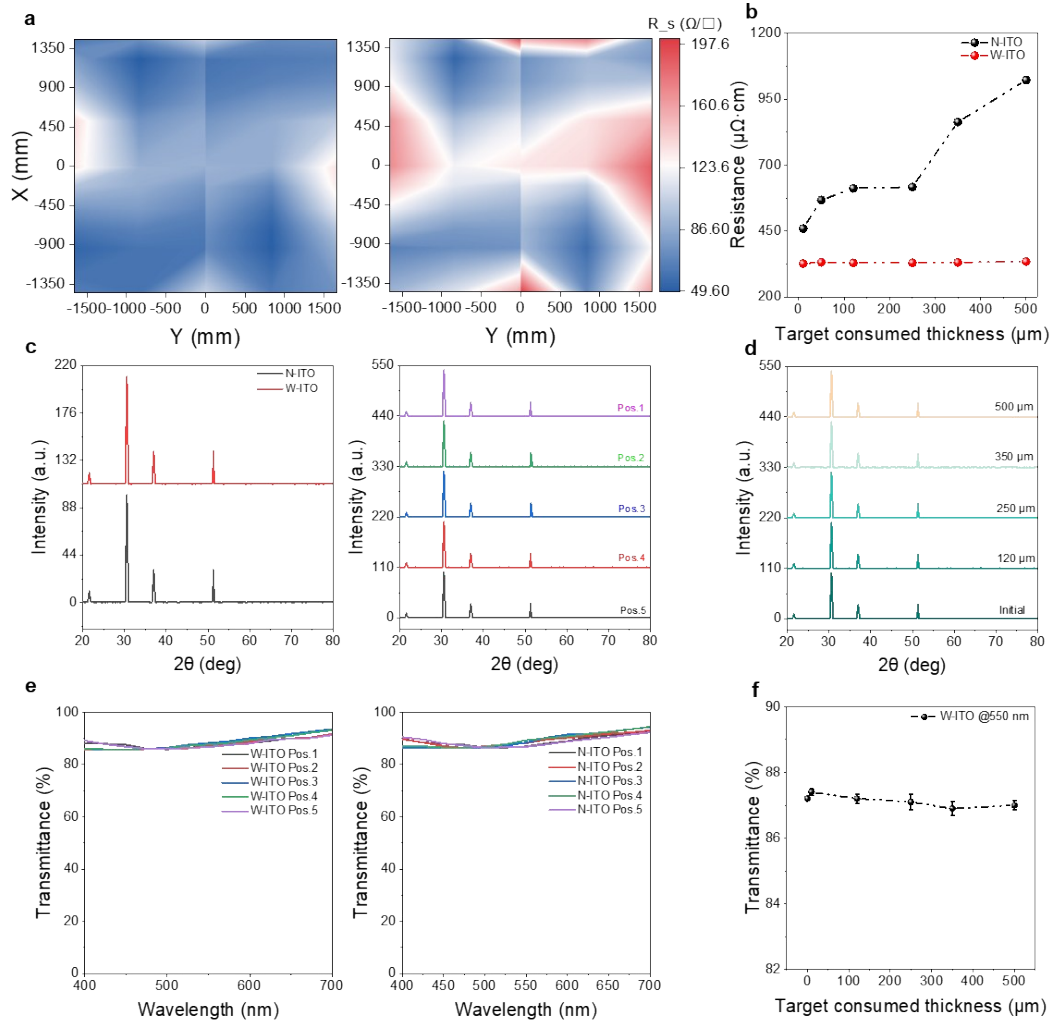


图4 (a) W-ITO膜(左)与N-ITO膜(右)的方阻均值分布图;(b)两种薄膜在不同的靶材消耗厚度下的电阻率变化图;(c)两种薄膜在相同点位下的XRD图(左)与W-ITO膜在不同点位下的XRD图(右);(d) W-ITO膜在不同的靶材消耗厚度下的XRD图;(e) W-ITO膜(左)与N-ITO膜(右)在不同点位下的透光率;(f) W-ITO膜在不同的靶材消耗厚度下的透光率,误差棒表示多次测量的标准偏差。

Fig. 4 (a) Mean sheet resistance distribution maps of W-ITO film (left) and N-ITO film (right); (b) The resistivity variation of two thin films at different target material consumption thicknesses; (c) XRD patterns of the two thin films at the same position (left) and the W-ITO film at different positions (right); (d) XRD patterns of W-ITO film at different target material consumption thicknesses; (e) The transmittance of W-ITO film (left) and N-ITO film (right) at different points; (f) The transmittance of W-ITO film at different target material consumption thicknesses, with error bars representing the standard deviation of multiple measurements.

口区氧化物是刻蚀工艺的核心要求,残留导电物会导致源/漏极桥接或漏电路径,严重损害 TFT 开关特性与可靠性^{[33][34]}。图5(d)通过扫描电子显微镜详细对比了两种薄膜在刻蚀后的残沙情况及侧向钻蚀(Side Etch)特征。表面俯视像(上半部分)显示,N-ITO膜表面残留大量不溶性颗粒,归因于成分不均或副产物溶解性差^[35],构成短路隐患。与之形成鲜明对比的是,W-

ITO膜表面依然保持洁净,图形边界清晰,无可见残留。这一结果证实,相同的时间内,W-ITO膜表面更洁净且无残沙,预示着其在 TFT 器件制造中能显著提升生产良率与速率。剖面像(下半部分)显示在确保刻蚀干净的前提下,N-ITO膜刻蚀45 s时侧向钻蚀长度达~16.0 nm,而W-ITO膜刻蚀55 s时侧向钻蚀长度仅~17.0 nm。这表明W-ITO膜的侧向钻蚀速率相对更

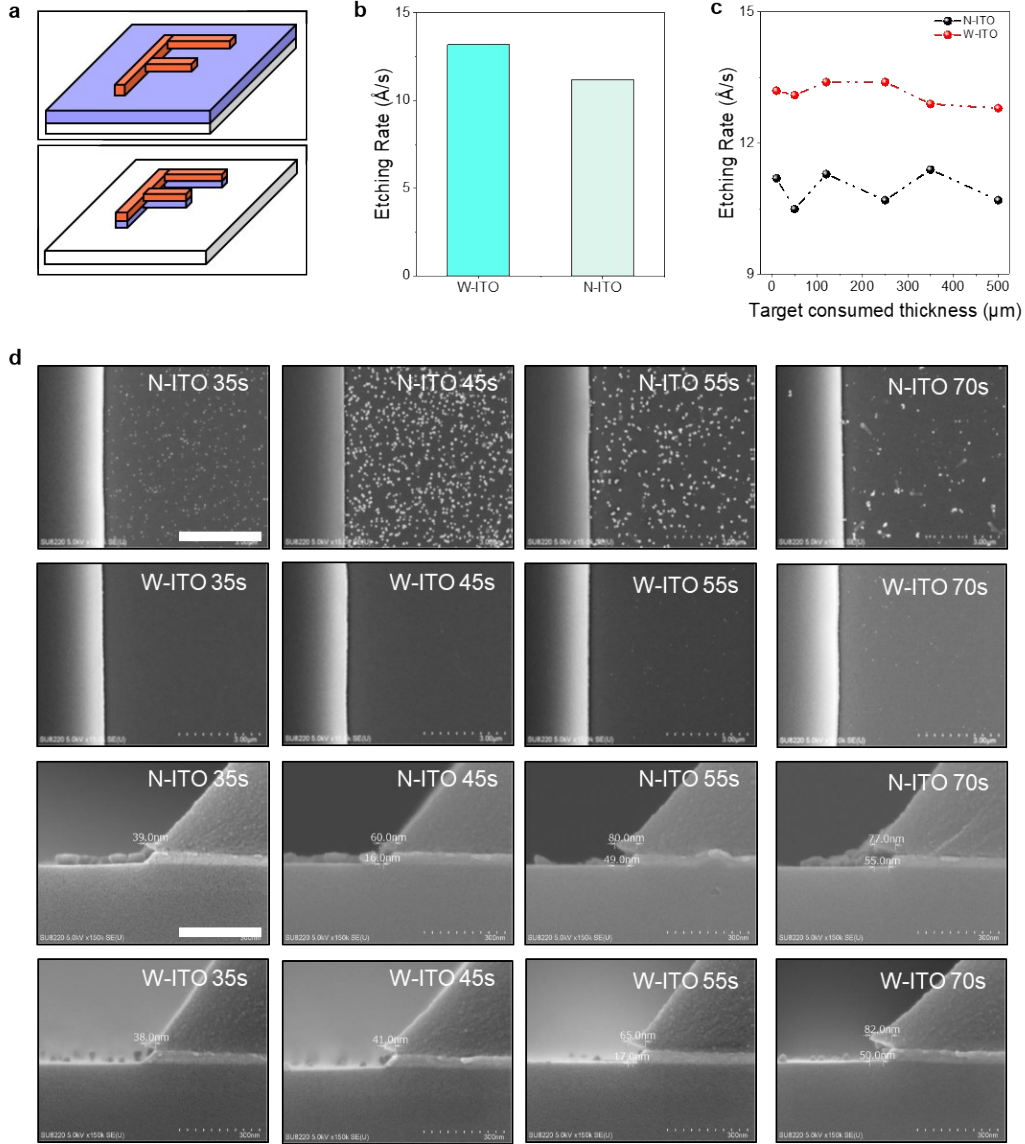


图5 (a) ITO膜的刻蚀流程,其中图示颜色区域从上到下依次为PR胶(橙)、ITO膜(紫)与玻璃基板(白);(b) W-ITO膜与N-ITO膜的平均刻蚀速率;(c) 两种薄膜在不同的靶材消耗厚度下的刻蚀速率;(d) W-ITO膜与N-ITO膜在刻蚀后的SEM图像。表面刻蚀形貌图的标尺统一为3 μm,截面刻蚀形貌图的标尺统一为300 nm。

Fig. 5 (a) Etching process of ITO film, where the color regions shown from top to bottom are PR adhesive (orange), ITO film (purple), and glass substrate (white); (b) The average etching rate of W-ITO film and N-ITO film; (c) The etching rate of two thin films at different target material consumption thicknesses; (d) SEM images of W-ITO film and N-ITO film after etching, with the scale bars uniformly set at 3 μm for surface etching morphology and 300 nm for cross-sectional etching morphology.

慢。这表明W-ITO具有更低的侧向钻蚀速率,能在保证刻蚀彻底的同时最小化关键尺寸损失^{[8][36]},更利于制备高精度精细线路,满足高分辨率显示需求^{[10][37]}。

3.4 基于W-ITO电极的EPM测试与封装显示面板的性能评估

W-ITO膜在退火结晶化处理后满足电极的

要求,基于该电极制备的TFT器件电学表征如图6所示。本节首先对基于W-ITO电极制备的TFT器件进行了常规EPM表征,图6(a)为不同源漏偏压(V_{ds})下的转移特性曲线,测试栅压(V_{gs})扫描范围为-20 V至20 V。所有曲线均呈现出典型的n型场效应晶体管开关行为:在负栅压区间器件处于关态,源漏电流(I_{ds})维持在 10^{-13}

A 量级的极低水平;当栅压超过阈值电压后,器件开启, I_{ds} 随 V_{gs} 的升高呈指数型增长并最终进入饱和区,展现出清晰的栅控调制特性^[38]。值得注意的是,曲线整体平滑、无毛刺或扭结,这从侧面印证了电极良好的均匀性^[39]。图 6(b)为器件在不同偏压下的物理参数。数据表明,该器件在 V_{ds} 从 3 V 到 15 V 的宽范围调控下,亚阈值摆幅(SS)始终稳定在 304 - 305 mV/dec 的极小波动范围内,展现出优异的稳定性。这种稳定性源于 W-ITO 电极、绝缘层与硅基沟道间良好的界面接触,以及本征硅/n 型硅异质结对沟道缺陷态的有效调控,在宽漏压区间内抑制了界面态的激活^{[38][40]}。同时,器件在高源漏偏压下,界面态密度与体陷阱态密度保持稳定,无额外的缺陷激活态^[39],符合短沟道器件中载流子迁移率(μ)随 V_{ds} 的提升呈现出单调递增的饱和趋势。为进一步评估器件在后端工艺中的开关可靠性,根据工艺设计规格测定了深截止区的关断栅压(V_{gl})与裕量(Margin),如图 6(c)所示。工艺设定的 V_{gl} 平均值为 -8.00 V,实测器件 V_{gl} 平均值为 -5.07 V。在实际生产中,由于工艺波动(如膜厚、掺杂浓度变化),开启电压会产生一定漂移,进而导致 V_{gl} 的相应变化^{[41][42]}。经测试,本批次器件的 Margin 为 -2.96 V。实测 V_{gl} 与 Margin 值的叠加结果恰好趋近于规格要求的理论值,表明器件在工艺波动下仍保留充足的安全余量,确保阵列彻底关断与低功耗特性。将 TFT 器件依次进行 CF、Cell 及 Module 工艺加工后,最终集成封装为显示面板。为全面评估其显示性能与可靠性,对成品显示面板进行了系统的光学与电学表征。光学性能方面,图 6(d)展示了显示面板的对比度与伽马(Gamma)曲线。测试结果显示,该面板不仅能够呈现深邃的黑色和鲜明的层次感^[43],其灰阶与亮度输出之间的关系也高度符合设计标准^[44],确保了图像处理的准确性。图像残留与稳定性方面,图 6(e)给出了图像残留(Area)与线段残像(Line)的灰阶跟踪测试结果。无论屏幕持续工作多久,残像消失后的灰阶始终稳定在 127 附近。经计算,Area 残像波动率为 1.58%,Line 残像波动率为 1.55%。长时间工作引起的面板温升,可能导致液晶分子或有机材料电光特性发生微小漂移^[45-48],但该微弱的波动几乎不可察觉,证明屏

幕显示质量具有极高的时间稳定性。抗静电能力方面,由于静电释放(ESD)极易破坏半导体内部的精细氧化层^[49],对显示面板的 ESD 耐受性测试至关重要。图 6(f)展示了不同批次面板在接触放电(Contact)和空气放电(Air)模式下的 ESD 耐受电压。测试结果表明,所有产品均能稳定通过 ± 15 kV 的静电测试,远高于行业通用的 ± 8 kV 标准^[49]。这一结果证实了该面板在工业控制、车载显示、医疗设备等对可靠性要求严苛的应用场景中具备显著优势。验证器件在实际工况下的功耗是否符合设计规格及系统电源预算也是衡量其商用价值的关键指标。图 6(g)对比了不同批次面板在正常使用场景与极端负载场景下的逻辑功耗(Logic Power)测试结果。在典型工作模式下,产品的平均功耗为 14.7 W,相对标准误差值为 0.41%,表现出极佳的能效一致性。在极端负载条件下,产品平均功耗为 43.1 W,相对标准误差值为 0.56%。该测试结果不仅保证了产品在日常使用中的低功耗特性,也验证了其在极端工况下仍能稳定运行,不会因瞬时过载导致芯片损坏或系统宕机^[50]。这些电学参数与面板级测试结果表明,基于 W-ITO 电极的器件在保持优异 TFT 特性的同时,完全满足显示面板对光学显示质量、可靠性及低功耗的严苛要求。结合其与 N-ITO 相当的性能表现^{[2][4][7][9]},证实了 W-ITO 电极在保障高性能显示的同时具备成熟的量产应用潜力。

3.5 基于 W-ITO 靶材的良率提升与实际收益结果

W-ITO 靶材虽具备优良的光学与电学性能,但其量产价值需通过良率与工艺稳定性进一步验证。为评估其实际生产效益,本节基于 43、65 和 75 英寸产品数据,分析 W-ITO 靶材对产线良率提升及量产收益的影响。图 7(a)展示了 W-ITO、N-ITO 靶材在首次 ITO 沉积(1st ITO Dep)后的良率表现。在 43、65 和 75 英寸产品中,采用 W-ITO 电极的修复前良率(BR Yield)分别比 N-ITO 电极提高 0.22%、0.17% 和 0.04%。同时,缺陷良率损失(1st ITO Defect Yield)对比显示,W-ITO 电极在三种尺寸下的缺陷率(Short、Open 等)分别较 N-ITO 电极低 0.08%、0.17% 和 0.04%,验证了 W-ITO 靶材在提升初

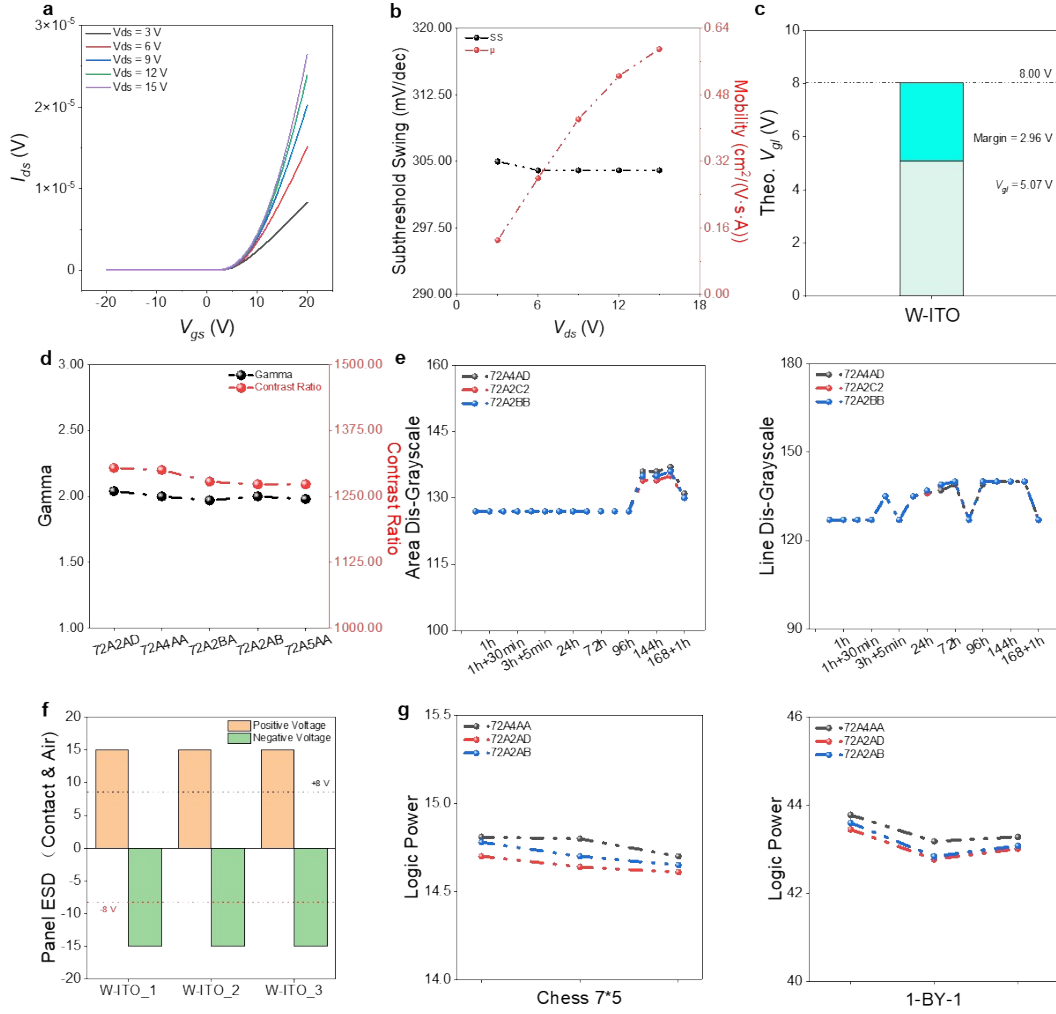


图6 (a) 基于W-ITO电极器件的转移曲线测试;(b) 器件在不同偏压下的亚阈值摆幅与载流子迁移率;(c) W-ITO电极器件的关断栅压与裕量的分析图;(d) 显示面板的光学性能测试结果;(e) 显示面板的残像消失灰阶曲线图(Area,Line);(f) 显示面板的静电放电测试结果;(g) 显示面板在常规场景与极端场景下的功耗测试。

Fig. 6 (a) Transfer curve test based on W-ITO electrode device; (b) The subthreshold swing and carrier mobility of the device under different biases; (c) Analysis diagram of the turn off gate voltage and margin of W-ITO electrode devices; (d) Optical performance test results of display panel; (e) Gray scale curves (Area, Line) of residual image disappearance on the display panel; (f) Display the static discharge test results of the panel; (g) Power consumption testing of display panels in both conventional and extreme scenarios.

始良率方面的优势。进一步地,图7(b)对比了两种靶材的二次ITO沉积后的缺陷返修率(2nd ITO Remain(P)),该指标反映了沉积工序后因Particle需返修的比例。结果显示,在43、65及75英寸产品中,W-ITO电极的返修率分别比N-ITO电极低0.21%、0.22%和0.67%。这表明W-ITO靶材能有效抑制Particle污染,从而显著降低返修风险。基于3.8%的返修率阈值,图7(c)给出了两种靶材的使用天数与返修率的柱状图。N-ITO靶材在第6天即达到更换阈值(能耗

550 kWh),而W-ITO靶材可维持至第12天(能耗1200 kWh)。由此可见,W-ITO靶材不仅将掩膜板寿命延长一倍,也同步提升了设备保养周期,显著减少停机维护频次。最后,本节统计了应用W-ITO靶材的综合经济效益:月产能提升约5400张玻璃基板,不良改善收益约21.80万元/月,清洗费用节约15.96万元/月,月综合收益提升达105.20万元/月。综上,W-ITO靶材通过提升良率、降低缺陷及延长维护周期,实现了显著的降本增效。

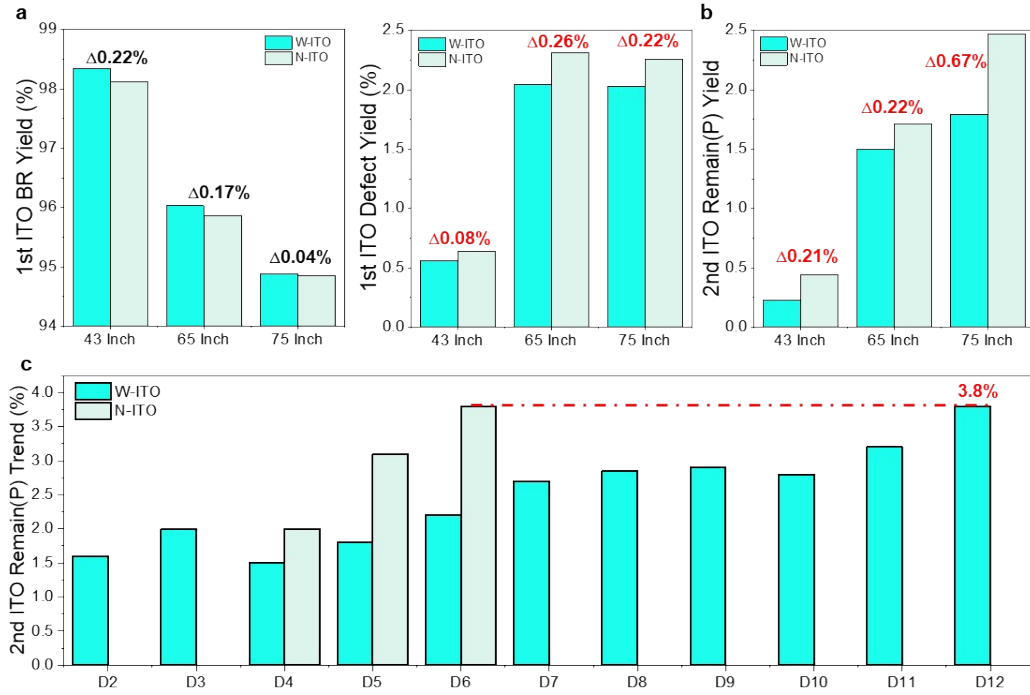


图7 (a) 不同产品尺寸下,W-ITO电极与N-ITO电极的1st ITO Dep BR Yield与1st ITO Defect Yield柱状对比图;(b) 不同产品尺寸下,W-ITO电极与N-ITO电极的2nd ITO Dep Remain(P) Yield柱状对比图;(c) 不同靶材的使用天数与其2nd ITO Remain(P)的趋势图。其中N-ITO靶材在第六天达到3.8%,而W-ITO靶材在第十二天才达到3.8%。

Fig. 7 (a) Column comparison of 1st ITO Dep BR Yield and 1st ITO Defect Yield of W-ITO electrode and N-ITO electrode under different product sizes; (b) Column comparison of 2nd ITO Dep Remain(P) Yield between W-ITO electrode and N-ITO electrode under different product sizes; (c) The trend chart of the usage days of different target materials and their 2nd ITO Remain(P) shows that the N-ITO target material reached 3.8% on the sixth day, while the W-ITO target material only reached 3.8% on the twelfth day.

4 结论

本研究围绕新型W-ITO靶材,从材料结构设计、薄膜性能表征、器件光电特性到量产应用验证,开展了系统性研究,得出以下主要结论:

第一,W-ITO靶材通过材料微结构调控与氧空位补偿机制,从源头抑制了Particle污染。引入约为0.10 at. %的变价金属元素构建了动态氧缓冲体系,有效阻断了退火过程中水分子的生成路径,消除了水分诱导的Particle缺陷。同时,靶材中高阻抗二次相的平均粒径由2.30 μm 降低至2.02 μm (降幅约12%),面积占比从19.80%降至16.80%(降低约15%),显著抑制了溅射过程中的电弧现象。上述结构优化从源头上提升了成膜洁净度,为高良率器件制造奠定了材料基础。

第二,W-ITO膜在保持主相晶体结构稳定

的前提下,实现了电学稳定性与刻蚀精度的协同提升。XRD分析表明,W-ITO与N-ITO具有相同的多晶生长特征((211)、(222)、(400)等特征峰),但W-ITO凭借更优的晶界质量,展现出卓越的电学稳定性:其方阻均值低至81.80 $\Omega/\square$ (变异系数降低5.02%),且在靶材全寿命周期内电阻率波动仅为0.51%(N-ITO后期升高2.2倍)。在刻蚀工艺中,W-ITO虽具有更高的本征刻蚀速率(13.2 $\text{\AA}/\text{s}$),但得益于表面残沙较少的特点,避免了因过刻蚀导致的侧向钻蚀扩大,实现了图形边界的高精度保真,满足了微细线路制备需求。

第三,基于W-ITO电极的器件与面板表现出高可靠性与优异的光电性能。TFT器件测试显示,W-ITO电极赋予了器件优异的关断特性($I_{\text{off}} \sim 10^{-13} \text{ A}$)与栅控一致性($SS \sim 303 \text{ mV/dec}$),且关断裕量充足(8 V),验证了电路设计的鲁棒性。集成面板在长时间工作下残像波动率低于

1.6%,ESD耐受电压达 ± 15 kV(超行业标准近1倍),且在典型与极端负载下功耗误差均小于0.56%,证实了其在高规格显示应用中的稳定性。

第四,W-ITO靶材在量产中实现显著的良率提升与降本增效。量产数据显示,相较于N-ITO,W-ITO使各尺寸产品的良率提升0.04%-0.22%,缺陷率降低0.08%-0.17%,二次沉积返修率降低0.21%-0.67%。更重要的是,W-ITO将腔室掩膜板的使用寿命延长一倍(6天),大幅降低了设备维护频率。综合测算,应用W-ITO靶材后月产能提升5400张玻璃基板,每月不良Q点改善收益约21.80万元,清洗成本节约

15.96万元,月综合经济效益增加约105.20万元,经济效益显著。

综上所述,W-ITO靶材通过材料微结构调控与掺杂机制,有效解决了N-ITO在颗粒污染、刻蚀残留与电阻率漂移等方面的工艺瓶颈,实现了从材料—薄膜—器件—量产的全链条性能提升。本研究不仅为高性能氧化物电极材料的设计提供了理论依据,也为高规格显示产品的量产工艺优化提供了切实可行的技术路径,具有重要的产业应用价值。未来可进一步拓展其在柔性显示、Micro-LED等先进显示技术中的适用性,持续推动高端面板制造的材料革新。

参 考 文 献:

- [1] SHIGESATO Y, HAYASHI Y, HARANO T. Doping mechanisms of tin-doped indium oxide films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 61(1): 73-75.
- [2] KAPETANOVIC V, BICKET I C, LAZAR S, *et al.* Tunable Infrared Plasmon Response of Lithographic Sn-doped Indium Oxide Nanostructures[J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(22): 2001024.
- [3] HAN J, RONG X, XU C, *et al.* Complementary inverter based on n-type and p-type OFETs with the same ambipolar organic semiconductor and ITO S/D electrodes[J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2023, 9(5): 2201288.
- [4] REN Y, LIU P, LIU R, *et al.* The key of ITO films with high transparency and conductivity: Grain size and surface chemical composition[J]. *J. Alloys Compd.*, 2022, 893: 162304.
- [5] AHMED M, BAKRY A, QASEM A, *et al.* The main role of thermal annealing in controlling the structural and optical properties of ITO thin film layer[J]. *Opt. Mater.*, 2021, 113: 110866.
- [6] SHI J, ZHANG J, YANG L, *et al.* Wide bandgap oxide semiconductors: from materials physics to optoelectronic devices[J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(50): 2006230.
- [7] AHMED N M, SABAH F A, ABDULGAFOUR H I, *et al.* The effect of post annealing temperature on grain size of indium-tin-oxide for optical and electrical properties improvement[J]. *Results Phys.*, 2019, 13: 102159.
- [8] KHURGIN J, BYKOV A Y, ZAYATS A V. Hot-electron dynamics in plasmonic nanostructures: fundamentals, applications and overlooked aspects[J]. *eLight*, 2024, 4(1): 15.
- [9] MINAMI T. Present status of transparent conducting oxide thin-film development for Indium-Tin-Oxide (ITO) substitutes[J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(17): 5822-5828.
- [10] AZANI M R, HASSANPOUR A, TORRES T. Benefits, problems, and solutions of silver nanowire transparent conductive electrodes in indium tin oxide (ITO)-free flexible solar cells[J]. *Adv. Energy Mater.*, 2020, 10(48): 2002536.
- [11] PREMKUMAR M, VADIVEL S. Effect of annealing temperature on structural, optical and humidity sensing properties of indium tin oxide (ITO) thin films[J]. *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.*, 2017, 28(12): 8460-8466.
- [12] MEI F, YUAN T, LI R. Effects of second-phase particles and elemental distributions of ITO targets on the properties of deposited ITO films[J]. *Ceram. Int.*, 2017, 43(12): 8866-8872.
- [13] UTSUMI K, MATSUNAGA O, TAKAHATA T. Low resistivity ITO film prepared using the ultra high density ITO target[J]. *Thin Solid Films*, 1998, 334(1-2): 30-34.
- [14] WU N, SUN Y, HU J, *et al.* Intelligent nanophotonics: when machine learning sheds light[J]. *eLight*, 2025, 5(1): 5.
- [15] FURASOVA A, ANDREEVA Y, XING J, *et al.* Structural colouring and luminescence anisotropy of perovskite thin films via laser-induced periodic surface structure formation[J]. *Light—Adv. Manuf.*, 2025, 6(3): 416-427.

- [16] ICHIMURA K. Photoalignment of liquid-crystal systems[J]. *Chem. Rev.*, 2000, 100(5): 1847-1874.
- [17] 罗璇, 孟河辰, 王晓丹, 等. Dy^{3+} , Tb^{3+} 共掺氮化铝薄膜结构与发光特性[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(4): 733-741.
- LUO X, MENG H C, WANG X D, *et al.* Structure and cathode luminescence properties of Dy^{3+} and Tb^{3+} doped AlN films[J]. *Chin. Opt.*, 2024, 17(4): 733-741. (in Chinese)
- [18] MA L L, LI C Y, PAN J T, *et al.* Self-assembled liquid crystal architectures for soft matter photonics[J]. *Light: Sci. & Appl.*, 2022, 11(1): 270.
- [19] ZHAO S, MI Z, KIBRIA M G, *et al.* Understanding the role of Si doping on surface charge and optical properties: Photoluminescence study of intrinsic and Si-doped InN nanowires[J]. *Phys. Rev. B*, 2012, 85(24): 245313.
- [20] JROUNDI F, SCHIRO M, RUIZ-AGUDO E, *et al.* Protection and consolidation of stone heritage by self-inoculation with indigenous carbonatogenic bacterial communities[J]. *Nat. Commun.*, 2017, 8(1): 279.
- [21] LIU C, GAO H, OU W, *et al.* Light management in monolithic all-perovskite tandem solar cells[J]. *Light Sci. Appl.*, 2026, 15(1): 56.
- [22] ZHANG Z, HUANG Y, JIN J, *et al.* Mechanistic understanding of oxidation of tin-based perovskite solar cells and mitigation strategies[J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(45): e202308093.
- [23] JIAO Z B, LUAN J H, MILLER M K, *et al.* Co-precipitation of nanoscale particles in steels with ultra-high strength for a new era[J]. *Mater. Today*, 2017, 20(3): 142-154.
- [24] FRATI F, HUNAULT M O J Y, DE GROOT F M F. Oxygen K-edge X-ray absorption spectra[J]. *Chem. Rev.*, 2020, 120(9): 4056-4110.
- [25] CIFTYUREK E, LI Z, SCHIERBAUM K. Adsorbed oxygen ions and oxygen vacancies: their concentration and distribution in metal oxide chemical sensors and influencing role in sensitivity and sensing mechanisms[J]. *Sensors*, 2022, 23(1): 29.
- [26] KOU Z, LI X, ZHANG L, *et al.* Dynamic surface chemistry of catalysts in oxygen evolution reaction[J]. *Small Sci.*, 2021, 1(7): 2100011.
- [27] LI W, SHI J, ZHANG K H L, *et al.* Defects in complex oxide thin films for electronics and energy applications: challenges and opportunities[J]. *Mater. Horiz.*, 2020, 7(11): 2832-2859.
- [28] ILKHANI M, DEJAM L. Structural and optical properties of ZnO and Ni: ZnO thin films: the trace of post-annealing[J]. *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.*, 2021, 32(3): 3460-3474.
- [29] KULKARNI A K, SCHULZ K H, LIM T S, *et al.* Dependence of the sheet resistance of indium-tin-oxide thin films on grain size and grain orientation determined from X-ray diffraction techniques[J]. *Thin Solid Films*, 1999, 345(2): 273-277.
- [30] GULEN M, YILDIRIM G, BAL S, *et al.* Role of annealing temperature on microstructural and electro-optical properties of ITO films produced by sputtering[J]. *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.*, 2013, 24(2): 467-474.
- [31] LI G, XIE D, FENG T, *et al.* The influence of channel layer thickness on the electrical properties of ZnO TFTs [J]. *Solid—State Electron.*, 2014, 95: 32-35.
- [32] WANG Y, SUN X W, GOH G K L, *et al.* Influence of channel layer thickness on the electrical performances of inkjet-printed In-Ga-Zn oxide thin-film transistors[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2010, 58(2): 480-485.
- [33] MOONEN P F, YAKIMETS I, HUSKENS J. Fabrication of transistors on flexible substrates: from mass-printing to high-resolution alternative lithography strategies[J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(41): 5526-5541.
- [34] MOON J H, YANG S. Chemical aspects of three-dimensional photonic crystals[J]. *Chem. Rev.*, 2010, 110(1): 547-574.
- [35] MAMMANA S S, GREATTI A, LUIZ F H, *et al.* Study of wet etching thin films of indium tin oxide in oxalic acid by monitoring the resistance[J]. *Thin Solid Films*, 2014, 567: 20-31.
- [36] XU Y, WANG L, CHEN X, *et al.* Improvement of drilling quality using precision directional drilling technology [J]. *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, 2022, 12(11): 3149-3164.
- [37] HYACINTH SUGANTHI X, NATARAJAN U, RAMASUBBU N. A review of accuracy enhancement in microdrilling operations[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2015, 81(1): 199-217.

- [38] 初学峰, 胡小军, 张祺, 等. 氧化锌锡薄膜晶体管的制备与性能研究[J]. 液晶与显示, 2024, 39(1): 40-47.
CHU X F, HU X J, ZHANG Q, *et al.* Performances and preparation of zinc-tin oxide thin-film transistors[J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2024, 39(1): 40-47. (in Chinese)
- [39] YANG S, SUN X, ZHOU F, *et al.* Giant built-in electric field enabled quantum-confined Stark effects[J]. *Adv. Photonics*, 2025, 7(5): 056003.
- [40] ZHANG L, KANG J, SUN X, *et al.* Highly tunable Förster resonance energy transfer across atomically thin organic – inorganic interfaces[J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2025, 12(4): 041416.
- [41] IDIR N, BAUSIERE R, FRANCHAUD J J. Active gate voltage control of turn-on di/dt and turn-off dv/dt in insulated gate transistors[J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2006, 21(4): 849-855.
- [42] YANG F, PU S, XU C, *et al.* Turn-on delay based real-time junction temperature measurement for SiC MOSFETs with aging compensation[J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2020, 36(2): 1280-1294.
- [43] HOHBERGER B, LAEMMER R, ADLER W, *et al.* Measuring contrast sensitivity in normal subjects with OPTEC® 6500: influence of age and glare[J]. *Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.*, 2007, 245(12): 1805-1814.
- [44] BORASI G, SAMEI E, BERTOLINI M, *et al.* Contrast-detail analysis of three flat panel detectors for digital radiography[J]. *Med. Phys.*, 2006, 33: 1707-1719.
- [45] AUGUSTAUSKAS R, LIPNICKAS A, SURGAILIS T. Segmentation of drilled holes in texture wooden furniture panels using deep neural network[J]. *Sensors*, 2021, 21(11): 3633.
- [46] HAYASHIZAKI Y, USUI A, HOSOKAI Y, *et al.* Sex determination of the pelvis using Fourier analysis of postmortem CT images[J]. *Forensic Sci. Int.*, 2015, 246: 122.
- [47] MOL G N, HARRIS K D, BASTIAANSEN C W M, *et al.* Thermo-mechanical responses of liquid-crystal networks with a splayed molecular organization[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2005, 15(7): 1155-1159.
- [48] KIM Y K, SENYUK B, LAVRENTOVICH O D. Molecular reorientation of a nematic liquid crystal by thermal expansion[J]. *Nat. Commun.*, 2012, 3(1): 1133.
- [49] YAN Y, LAN W, CHEN Y, *et al.* Reliability issues of thin film transistors subject to electrostatic discharge stresses: An overview[J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2022, 8(2): 2100886.
- [50] ÇEVEN S, ALBAYRAK A, BAYIR R. Real-time range estimation in electric vehicles using fuzzy logic classifier [J]. *Comput. Electr. Eng.*, 2020, 83: 106577.

作者简介:



康健,男,硕士,初级工程师,2025年于南京航空航天大学获得硕士学位,主要从事于半导体薄膜制备工艺与方法的研究。E-mail:kangjian-b9@boe.com.cn



毛瑞锋,男,硕士,专家,2010年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事于半导体器件的工艺优化与良率分析的研究。E-mail:maorufeng@boe.com.cn



黄聪,男,硕士,高级工程师,2017年于南京航空航天大学获得硕士学位,主要从事于半导体器件的工艺优化与良率分析的研究。E-mail:huangcong@boe.com.cn