

文章编号: 1007-4252(2025)03-0231-08 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0024 CSTR: 32180.14.j.gncq.2025.0024

高稳定性 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{InGaZnO}$ 双层沟道薄膜晶体管

鞠姗姗¹, 李锦雄¹, 陆磊², 张盛东^{2,3}, 王新炜^{1,4,*}

(1. 北京大学深圳研究生院新材料学院, 深圳 518055; 2. 北京大学深圳研究生院信息工程学院, 深圳 518055; 3. 北京大学集成电路学院, 北京 100871; 4. 北京市集成电路高精尖创新中心, 北京 100871)

摘要: 提出并构建了一种基于 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ 双层沟道的薄膜晶体管 (Thin Film Transistor, TFT)。实验结果表明, 该双层结构器件展现出优异的电学性能和稳定性: 场效应迁移率高达 $26.8 \text{ cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$, 亚阈值摆幅低至 $90.8 \text{ mV} \cdot \text{dec}^{-1}$; 在正偏压应力和负偏压应力条件下, 阈值电压漂移分别仅为 29.6 mV 和 -89.3 mV 。此外, 经 50 d 高湿环境存储后, 器件电学特性未出现显著退化。上述卓越性能主要归因于物理气相沉积的 IGZO 层与原子层沉积的 In_2O_3 有源层之间形成了高质量界面, 同时 IGZO 层有效阻隔了环境中水汽和氧气对 In_2O_3 层的侵蚀。所提出的双层沟道技术为开发高性能氧化物薄膜晶体管提供了重要途径, 在先进电子器件领域具有广阔的应用前景。

关键词: 双层沟道; 氧化物薄膜晶体管; 原子层沉积; 偏压稳定性; 高湿度

中图分类号: TN321+.5

文献标志码: A

High-stability $\text{In}_2\text{O}_3/\text{InGaZnO}$ dual-channel thin-film transistors

JU Shanshan¹, LI Jinxiong¹, LU Lei², ZHANG Shengdong^{2,3}, WANG Xinwei^{1,4,*}

(1. School of Advanced Materials, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. School of Electronic and Computer Engineering, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China; 3. School of Integrated Circuits, Peking University, Beijing 100871, China; 4. Beijing Advanced Innovation Center for Integrated Circuits, Beijing 100871, China)

Abstract: This study proposes and fabricates an $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ dual-channel TFT. The results indicate that the bilayer device exhibits excellent electrical characteristics and stability, including a high field-effect mobility of $26.8 \text{ cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$ and an ultralow subthreshold swing of $90.8 \text{ mV} \cdot \text{dec}^{-1}$. The threshold voltage shifts under positive bias stress and negative bias stress are only 29.6 mV and -89.3 mV , respectively. After 50 d of storage in a humid environment, no significant degradation in electrical performance is observed. These outstanding electrical properties and stability are attributed to the high-quality interface

收稿日期: 2025-04-01; 修订日期: 2025-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 22175005; No. U24A20297); 深圳市科技计划 (No. JCYJ20241202125909013).

作者简介: 鞠姗姗 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为原子层沉积 (E-mail: 2201212711@stu.pku.edu.cn).

通信作者: 王新炜 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为原子层沉积与薄膜晶体管 (E-mail: wangxw@pkusz.edu.cn).

formed between the physical-vapor-deposited IGZO layer and the atomic-layer-deposited In_2O_3 layer. Furthermore, the IGZO layer effectively prevents the interaction between environmental moisture/oxygen and the In_2O_3 layer. The proposed dual-channel technology offers an effective solution for achieving high-performance oxide thin-film transistors, demonstrating considerable application potential in advanced electronic devices.

Key words: bilayer channel; oxide thin-film transistor; atomic layer deposition; bias stress stability; high humidity

0 引言

氧化物薄膜晶体管(Thin Film Transistor, TFT)作为新一代半导体薄膜晶体管^[1-2],相较于传统的非晶硅(a-Si)和低温多晶硅(Low-Temperature Polycrystalline Silicon, LTPS)TFT,具有高透光率、陡峭的亚阈值摆幅(Subthreshold Swing, SS)以及更低的关态电流(I_{off})等显著优势^[3-4],有望成为下一代先进显示技术的主流背板解决方案。此外,氧化物 TFT 的制造工艺温度较低,可与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)集成电路后道工艺(Back-End-of-Line, BEOL)兼容,因此在未来的 CMOS 集成电路单片三维集成架构中展现出重要的应用潜力^[5-6]。在众多氧化物半导体材料中,基于原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)技术制备的氧化铟(In_2O_3)TFT 近年来备受关注。例如,采用 ALD 技术制备的 In_2O_3 沟道层厚度仅为 1.5 nm 的晶体管,在漏极偏压为 0.7 V 时,其漏极电流(I_{DS})高达 $2.2 \text{ mA} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ^[7]。

然而, In_2O_3 材料具有较高的本征缺陷密度,其在光照、环境、温度及偏压作用下的稳定性仍是一个亟待解决的问题^[8-9]。以底栅晶体管结构为例,其裸露的背沟道表面可能吸附氧/水分子,从而引入新的带隙态,导致器件出现明显的回滞效应,影响电学性能的稳定性^[10]。因此,对背沟道表面进行钝化处理是提升氧化物 TFT 稳定性的关键^[11]。目前已有多种钝化层材料被报道,如 SiO_2 ^[12]、 Al_2O_3 ^[13] 和 HfO_2 ^[14],这些材料均能有效改善 TFT 器件的稳定性。然而,这类绝缘钝化层通常需要在完成 TFT 源漏电极制备后才能沉积,而源漏电极图形化过程中使用的光刻胶容易在沟道层表面残留碳等杂质,从而影响器件特性^[15]。此外,这些钝化层的制备通常采用 ALD 或化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, CVD)方法,所使用的还原性前驱体可能对氧化物有源层产生化学刻蚀作用^[16],进而恶化器件的界面质量和电学稳定性。

本研究提出一种由 4 nm ALD In_2O_3 与 40 nm 磁控溅射铟镓锌氧(IGZO)组成的双层沟道结构背栅 TFT。该器件在高湿度环境中表现出更优的偏压稳定性,其阈值电压(V_{th})漂移较单层 In_2O_3 TFT 显著降低。从机理上看, In_2O_3 TFT 的不稳定性是由于背沟道表面吸附大气中的水氧分子,而 IGZO 层可有效抑制水氧渗透。此外,双层沟道层的制备无需光刻步骤,可避免引入碳杂质,从而获得了高质量的界面。实验结果表明,双层沟道器件在潮湿环境下放置 50 d 后仍保持几乎不变的电学特性。

1 实验

图 1(a)展示了背栅薄膜晶体管的结构示意图,具体制备流程如图 1(b)所示。本研究选用热生长 300 nm 二氧化硅(SiO_2)的硅片作为衬底,首先通过磁控溅射沉积 40 nm 钼(Mo),并经湿法刻蚀形成背栅电极;随后采用 ALD 技术,在 200 °C 下使用三甲基铝(TMA)和臭氧(O_3)作为前驱体生长 10 nm 氧化铝(Al_2O_3)介质层;接着在 160 °C 下利用环戊二烯基铟(InCp)和氧等离子体反应沉积 4 nm In_2O_3 层;之后通过磁控溅射沉积 40 nm IGZO 层(靶材成分的物质的量之比为 $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{ZnO} = 1:1:2$),溅射时氩气和氧气流量分别为 50 sccm(1 sccm = 标准状况下 $1 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)和 3 sccm;经过湿法刻蚀有源层后,在空气中进行 300 °C 退火处理;最后通过溅射和剥离工艺制备厚度为 40 nm 的 Mo 金属源漏电极(图 1(c))。

器件电学性能测试采用安捷伦 B1500A 半导体参数分析仪进行,所有测试均在相对湿度(Relative Humidity, RH)为 60% 的空气环境中完成。图 1(d)~(e)展示了 4 nm In_2O_3 与 4 nm In_2O_3 /40 nm IGZO 双层薄膜的表面形貌。两种薄膜均呈现出平整无针孔的表面特征,均方根粗糙度(R_q)分别为 0.26 nm 和 0.31 nm,表明采用 ALD 与磁控溅射工艺制备的薄膜具有优异的均匀性。

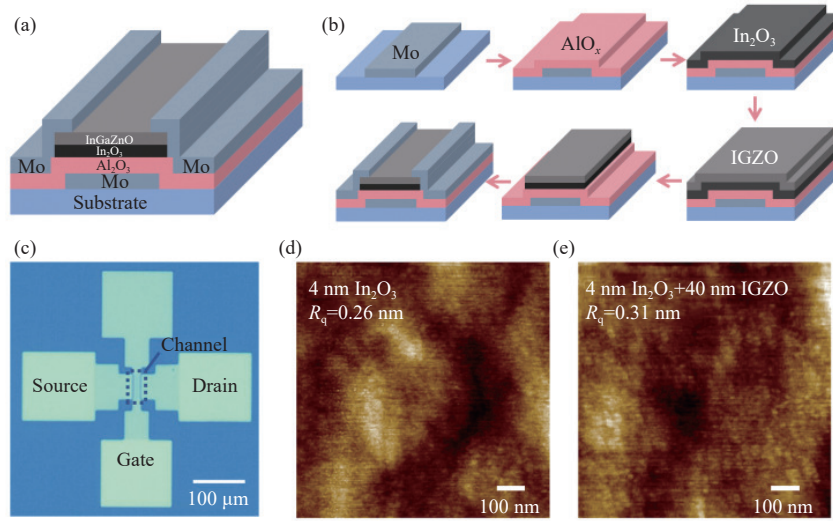


图1 (a) $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ 薄膜晶体管(TFTs)结构示意图; (b) $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 制备工艺流程; (c) In_2O_3 TFT 光学显微图像; 原子力显微镜图像; (d) 4 nm In_2O_3 薄膜, (e) 4 nm $\text{In}_2\text{O}_3/40$ nm IGZO 双层薄膜

Fig. 1 (a) Schematic representation of $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFTs. (b) Fabrication procedure for $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFTs. (c) Optical image of In_2O_3 TFTs. AFM images: (d) 4 nm In_2O_3 film, (e) 4 nm $\text{In}_2\text{O}_3/40$ nm bilayer film

2 结果与讨论

2.1 薄膜生长特性

图2(a)~(b)展示了在 160°C 条件下, In_2O_3 薄膜的 ALD 周期生长率 (Growth per Cycle, GPC) 与前驱体脉冲时长之间的变化关系。当前驱体脉冲时长达到 2 s, O_2 plasma 脉冲时长为 5~20 s 时, 薄膜生长速率趋于稳定, 表明该条件下的生长过程已达到饱和状态。图2(c)展示了 In_2O_3 薄膜生长速率随沉积温度的变化趋势。结果表明, 在 $140\sim 180^\circ\text{C}$ 的温度范围内, 生长速率基本保持不变, 说明 In_2O_3 具有较宽的工艺温度窗口。此外, 图2(d)展示了薄膜厚度与 ALD 循环周期数之间的线性关系, 表明可通过精确设定 ALD 循环周期数实现对 In_2O_3 薄膜厚度的精准控制。线性拟合结果显示, 薄膜的周期生长率为 $0.276\text{ nm}\cdot\text{循环}^{-1}$, 且拟合截距接近于 0, 表明在 20 个循环周期内薄膜生长无明显的成核延迟现象。以上结果表明, 该 ALD 工艺具有优异的饱和性和自限制性。本研究涉及的 4 nm 厚 In_2O_3 沟道层是在 160°C 下进行 15 个 ALD 循环周期沉积制备而成的。

2.2 电学性能

图3(a)~(b)分别展示了沟道长度(L_{ch})为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的 In_2O_3 TFT 与 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 的转移特性曲线。

在源漏电压 $V_{\text{DS}} = 0.1\text{ V}$ 的条件下, In_2O_3 TFT 与 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 均表现出 $10^{-13}\text{ A}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 的低关态电流(I_{off})、 10^7 的高开关比($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$), 以及较低的亚阈值摆幅。相较于单层器件, 双层器件的场效应迁移率(μ_{FE})从 $23.3\text{ cm}^2\cdot(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$ 提升至 $26.8\text{ cm}^2\cdot(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$, 同时其阈值电压(V_{th})从 -1.36 V 负漂至 -2.68 V 。由于远离栅介质层的低电子密度 IGZO 层(约 10^{16} cm^{-3})^[17] 受栅压调控能力较弱, 导电沟道仍主要位于 In_2O_3 层内。因此, 双层器件的 μ_{FE} 提升和 V_{th} 负漂可归因于厚 IGZO 层在退火过程中阻碍了氧的扩散, 导致 In_2O_3 沟道中的氧空位缺陷未能充分修复, 进而使其导带内自由电子浓度升高^[7, 18]。

图3(c)~(d)展示了 In_2O_3 TFT 与 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 的输出特性曲线, 曲线呈现出清晰的夹断与电流饱和现象, 且未观察到电流拥挤效应, 表明器件具有较低的源漏接触电阻(R_{SD})。

图4展示了在 60% RH 下器件的回滞特性。两种器件的转移特性曲线均呈现出顺时针回滞现象, 该现象可归因于界面缺陷态电荷俘获以及表面水氧吸附^[19]。回滞大小通过正反向扫描转移曲线在 $I_{\text{DS}}=10^{-11}\text{ A}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 处的栅源电压 V_{GS} 差值确定。与单层 In_2O_3 TFT 器件相比, 双层 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 表现出更小的回滞(回滞电压分别为 17.0 mV 和 7.2 mV), 这主要归因于 IGZO 层有效隔离了器件表面的水氧吸附。

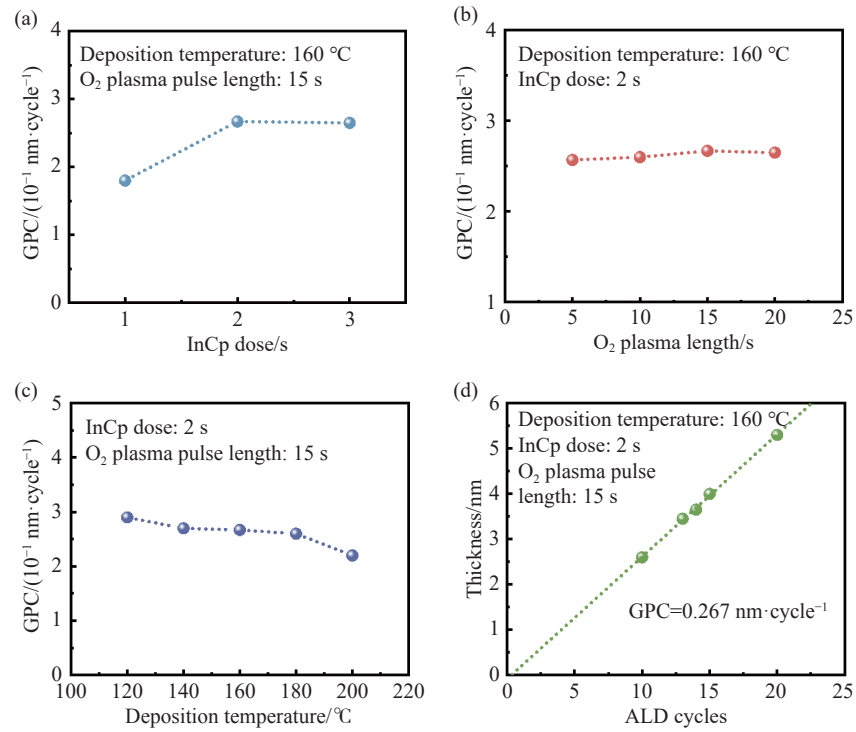


图2 ALD In_2O_3 薄膜生长特性: (a) In_2O_3 薄膜 GPC 随 TMA 脉冲量的变化曲线; (b) In_2O_3 薄膜 GPC 随 O_2 脉冲时间的变化曲线; (c) In_2O_3 薄膜 GPC 随沉积温度的变化曲线; (d) In_2O_3 薄膜厚度随 ALD 循环周期数的变化曲线

Fig. 2 ALD GPC of In_2O_3 with respect to (a) InCp dose time and (b) O_2 plasma pulse length at the deposition temperature of 160 °C. (c) Temperature dependence of GPC. (d) Thickness of the In_2O_3 films versus the number of ALD cycles

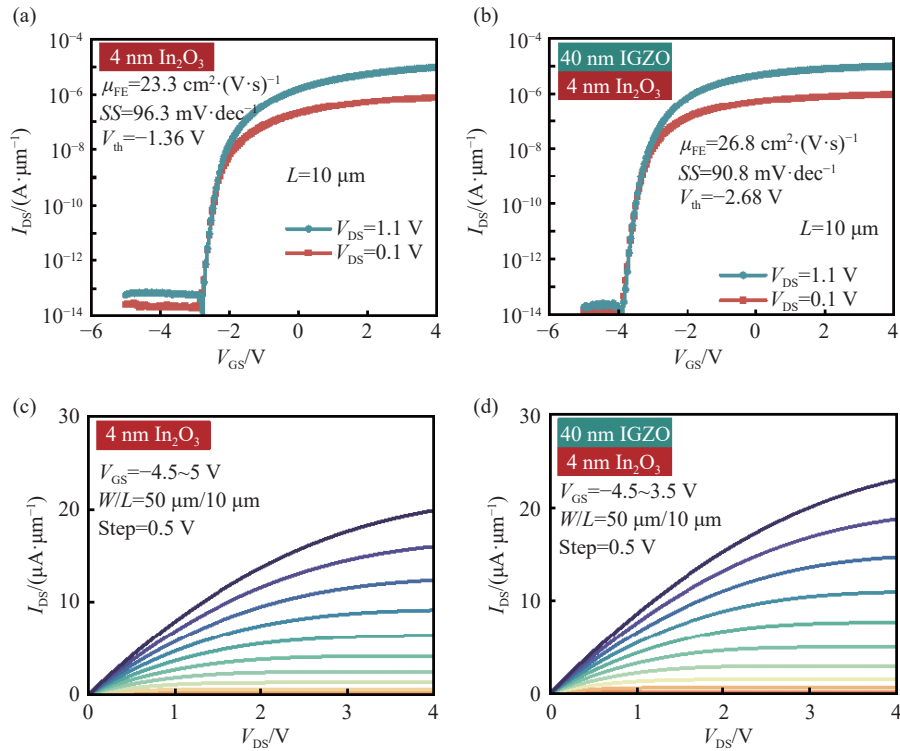
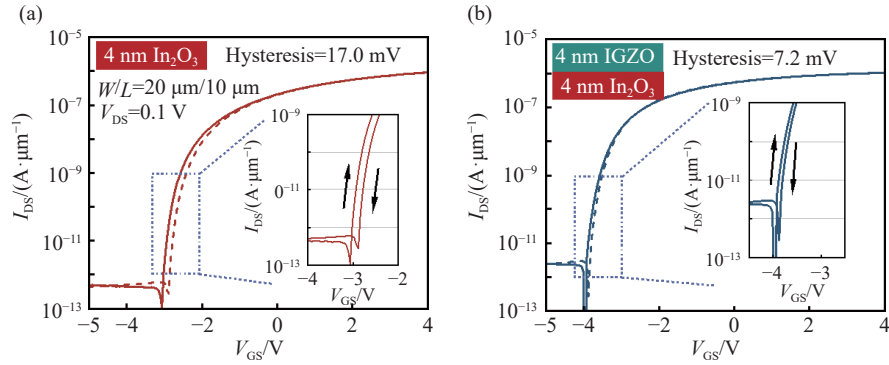


图3 (a) In_2O_3 TFTs 和(b) $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFTs 的转移特性曲线; (c) In_2O_3 TFTs 和(d) $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFTs 的输出特性曲线

Fig. 3 Transfer characteristics of (a) In_2O_3 TFTs, (b) $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFTs. Output characteristics of (c) In_2O_3 TFTs, (d) $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFTs

图4 (a) In_2O_3 TFTs 和(b) $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFTs 的回滞曲线Fig. 4 Transfer curve with hysteresis of (a) In_2O_3 TFTs and (b) $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFTs

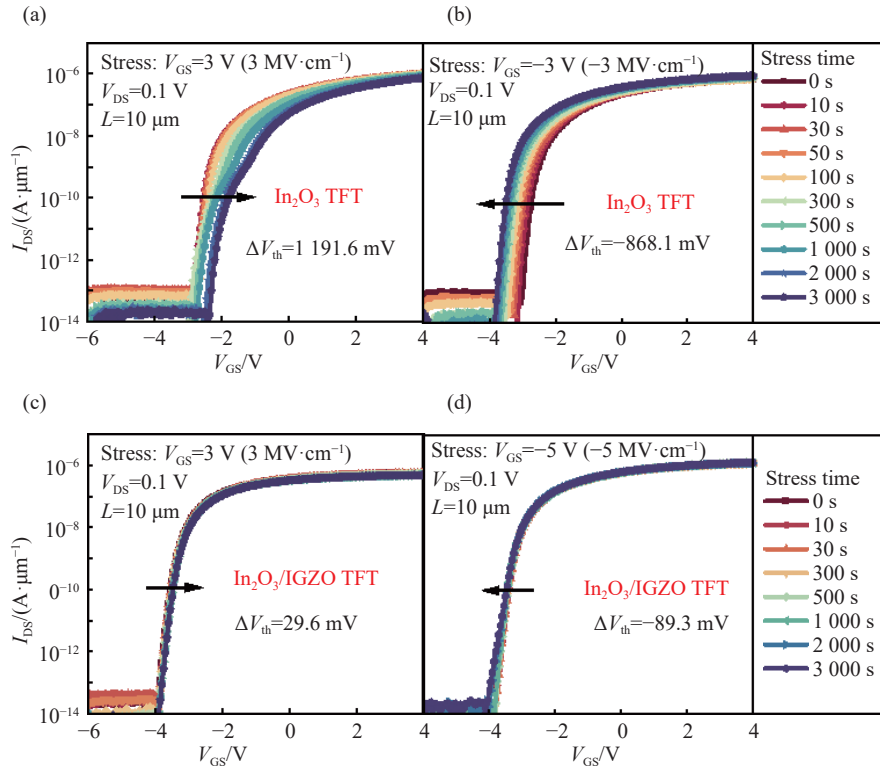
2.3 偏压稳定性

为深入研究器件在大气环境中的可靠性,在 60% RH 的条件下评估了 In_2O_3 TFT 与 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 在 $\pm 3 \text{ MV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 电场下的偏压稳定性。对 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 在更强的 $-5 \text{ MV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 电场下进行负偏压应力(Negative Bias Stress, NBS)测试,以确保其处于完全关态,实验结果如图 5 所示。高湿环境下的 In_2O_3 TFT 在施加 3000 s 偏压应力后,正偏压应力(Positive Bias Stress, PBS)引起 1191.6 mV

的阈值电压漂移(ΔV_{th}),并伴随严重的亚阈值摆幅劣化和驼峰现象;在 NBS 下也观察到 -868.1 mV 的 ΔV_{th} 。相比之下, $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 的偏压稳定性更优异,其在 PBS 下的 ΔV_{th} 仅为 29.6 mV,即使在 $-5 \text{ MV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的 NBS 下, ΔV_{th} 仍保持在 -89.3 mV 的较低水平。

2.4 机理讨论

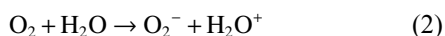
先前的研究表明,在干燥氮气环境中,背

图5 In_2O_3 TFT 在(a)PBS 和(b)NBS 条件下的转移特性曲线; $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 在(c)PBS 和(d)NBS 条件下的转移特性曲线Fig. 5 Evolution of transfer curves of In_2O_3 TFTs under (a) PBS, (b) NBS. Evolution of transfer curves of $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFTs under (c) PBS, (d) NBS

栅 In_2O_3 TFT 的 PBS 和 NBS 稳定性与 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 相当。这表明, In_2O_3 TFT 在高湿度大气中观察到的较大漂移很可能与表面水氧吸附有关^[20]。高湿度环境下 NBS 的负向漂移和 PBS 的正向漂移, 通常归因于氧气(O_2)和水(H_2O)在电场作用下于背沟道表面发生的化学吸附行为。如图 6 所示, 当对 In_2O_3 TFT 施加正偏压应力时, 环境大气中的 O_2 吸附可形成类受主态缺陷, 捕获导电沟道中的电子以生成带负电的氧离子(O_2^-)^[21]。该反应可表示为:



其中, e^- 表示电子, O_2 和 O_2^- 分别表示中性和带电的氧分子^[21]。研究表明, 在水存在的情况下, H_2O 可能与 O_2 协同作用, 增强氧气的吸附, 并在正偏压应力下导致更大的正向漂移^[22]。水分子可提供 O_2 转变为 O_2^- 所需的电子, 其反应式为:



其中, H_2O^+ 表示带电的水分子。化学吸附的 H_2O^+ 可充当类似受主的陷阱, 从导带中捕获一个电子, 其反应式为:



在 PBS 条件下出现的驼峰现象在其他研究中

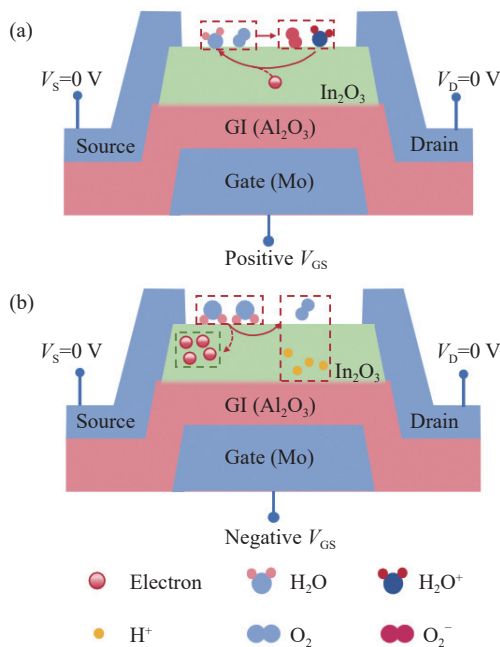
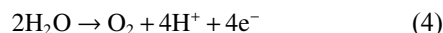


图 6 In_2O_3 TFTs 在 (a) PBS 和 (b) NBS 条件下的漂移机制示意图

Fig. 6 Schematic diagram of drift mechanism of In_2O_3 TFTs under (a) PBS, (b) NBS

也有报道, 其原因可能与表面吸附的水氧分子在氧化物导带下方形成缺陷态有关^[23]。

在 NBS 条件下, 大气中的 H_2O 通常充当电子供体, 经历与 O_2 不同的电荷交换过程。 H_2O 分子可向沟道中释放电子, 该过程可用以下反应描述:



在 NBS 下, 大气中的 H_2O 吸附于沟道表面, 并向沟道内释放氢离子(H^+)和电子^[24]。

$\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 在高湿度环境下展现出优异的偏压稳定性, 主要可从以下 3 个方面进行阐述。首先, 致密的 IGZO 薄膜能够有效阻挡大气中的水氧分子对 In_2O_3 导电沟道的影响, 从而减少水氧吸附导致的阈值电压漂移。其次, 与传统钝化层工艺不同, IGZO 层和 In_2O_3 层采用连续沉积方式, 中间无额外光刻步骤, 避免了光刻过程中碳相关杂质的引入, 防止杂质在双层沟道界面形成类施主缺陷态, 从而确保良好的偏压应力稳定性。此外, IGZO 薄膜采用室温低功率溅射沉积技术, 对下层通过 ALD 技术制备的 In_2O_3 层影响较小, 避免了强还原性前驱体可能引起的蚀刻损伤和缺陷, 保证了双层沟道优异的界面质量, 进一步提升了器件的稳定性。

2.5 长期稳定性

为评估 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 的长期稳定性, 将器件置于潮湿大气环境 (60% RH) 中放置 50 d 后重新进行电学测试。如图 7 所示, 对比放置前后 TFT 的特性曲线可以发现, V_{th} 、 μ_{FE} 和亚阈值摆幅均未出现显著变化。上述结果进一步表明, $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 具有优异的长期稳定性。

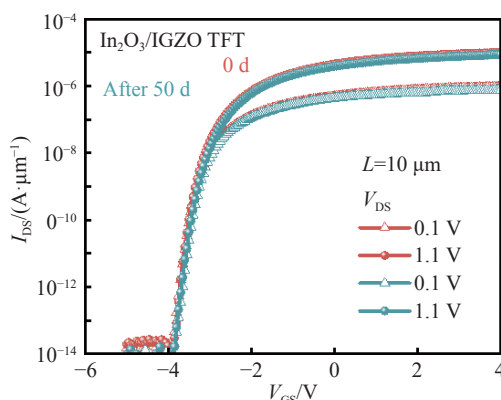


图 7 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFTs 在空气中放置 50 d 的转移曲线对比

Fig. 7 Evolution of transfer curves before and after 50 d of $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFTs in air

3 结论

本研究针对单层 ALD In_2O_3 TFT 在高湿度环境下可靠性较差的问题, 采用溅射 IGZO 与 ALD In_2O_3 相结合的方法, 成功构建了 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ 双层沟道 TFT。该双层器件表现出优异的电学性能, 包括 $26.8 \text{ cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$ 的 μ_{FE} 以及 $90.8 \text{ mV} \cdot \text{dec}^{-1}$ 的陡峭亚阈值摆幅。在高湿度 (60% RH) 和强电场条件下, 由于 IGZO 层对吸附水氧的良好屏蔽作用, 双层 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 的偏压稳定性显著优于单层 In_2O_3 TFT。具体而言: 在 PBS 条件下, ΔV_{th} 从 1191.6 mV 降低至 29.6 mV; 在 NBS 条件下, ΔV_{th} 从 -868.1 mV 降低至 -89.3 mV。此外, 双层 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 在高湿度环境中放置 50 d 后, 其电学性能未出现明显劣化。研究表明, 所开发的双层沟道 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ TFT 在先进显示技术及集成电路后道工艺集成领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] NOMURA K, OHTA H, TAKAGI A, et al. Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors[J]. *Nature*, 2004, 432(7016): 488-492.
- [2] 崔云怡, 付雅勤, 刘搏, 等. 金属氧化物 IGZO 薄膜研究进展[J]. *功能材料与器件学报*, 2021, 27(5): 456-467.
- [3] SI M, LIN Z, CHEN Z, et al. Scaled indium oxide transistors fabricated using atomic layer deposition[J]. *Nature Electronics*, 2022, 5(3): 164-170.
- [4] GUO M, OU H, XIE D, et al. Critical assessment of the high carrier mobility of bilayer $\text{In}_2\text{O}_3/\text{IGZO}$ transistors and the underlying mechanisms[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2023, 9(3): 2201184.
- [5] LI J, PENG H, YANG H, et al. Abnormal bias instabilities induced by lateral H_2O diffusion into top-gate insulator of a-InGaZnO thin-film transistors[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2022, 10: 341-345.
- [6] MYNY K. The development of flexible integrated circuits based on thin-film transistors[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(1): 30-39.
- [7] SI M, CHARNAS A, LIN Z, et al. Enhancement-mode atomic-layer-deposited In_2O_3 transistors with maximum drain current of 2.2 A/mm at drain voltage of 0.7 V by low-temperature annealing and stability in hydrogen environment[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(3): 1075-1080.
- [8] DING Y, REN Y, LIU G, et al. UV-treated ZrO_2 passivation for transparent and high-stability In_2O_3 thin film transistor[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(7): 3722-3726.
- [9] CHARNAS A, ZHANG Z, LIN Z, et al. Review—extremely thin amorphous indium oxide transistors[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(9): 2304044.
- [10] KANG D, LIM H, KIM C, et al. Amorphous gallium indium zinc oxide thin film transistors: Sensitive to oxygen molecules[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(19): 192101.
- [11] ZHOU X, CAO Y, LI J, et al. Reactively-sputtered AlO_x passivation layer for self-aligned top-gate amorphous InGaZnO thin-film transistors[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, 148: 106796.
- [12] LI J, ZHOU F, LIN H-P, et al. Effect of reactive sputtered SiO_x passivation layer on the stability of InGaZnO thin film transistors[J]. *Vacuum*, 2012, 86(12): 1840-1843.
- [13] SAHA J K, BUKKE R N, MUDE N N, et al. Remarkable stability improvement of ZnO TFT with Al_2O_3 gate insulator by yttrium passivation with spray pyrolysis[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(5): 976.
- [14] HONG S, PARK S P, KIM Y G, et al. Low-temperature fabrication of an HfO_2 passivation layer for amorphous indium-gallium-zinc oxide thin film transistors using a solution process[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 16265.
- [15] SHIAH Y S, SIM K, SHI Y, et al. Mobility-stability trade-off in oxide thin-film transistors[J]. *Nature Electronics*, 2021, 4(11): 800-807.
- [16] LI J, ZHANG Y, WANG J, et al. Near-ideal top-gate controllability of InGaZnO thin-film transistors by suppressing interface defects with an ultrathin atomic layer deposited gate insulator[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(6): 8666-8675.
- [17] MATIVENGA M, HAQUE F, BILLAH M M, et al. Origin of light instability in amorphous IGZO thin-film transistors and its suppression[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 14618.
- [18] PAN W, ZHOU X, LI Y, et al. High performance of ZnSnO thin-film transistors engineered by oxygen defect modulation[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, 151: 106998.
- [19] YE Z, YUAN Y, XU H, et al. Mechanism and origin of hysteresis in oxide thin-film transistor and its application on 3-D nonvolatile memory[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64(2): 438-446.

- [20] LI J, JU S, TANG Y, et al. Remarkable bias-stress stability of ultrathin atomic-layer-deposited indium oxide thin-film transistors enabled by plasma fluorination[J]. [Advanced Functional Materials](#), 2024, 34(28): 2401170.
- [21] LIU P T, CHOU Y T, TENG L F. Environment-dependent metastability of passivation-free indium zinc oxide thin film transistor after gate bias stress[J]. [Applied Physics Letters](#), 2009, 95: 233504.
- [22] ZHANG J, LI X, LU J, et al. Water assisted oxygen absorption on the instability of amorphous InAlZnO thin-film transistors[J]. [RSC Advances](#), 2014, 4(7): 3145-3148.
- [23] IM H, SONG H, JEONG J, et al. Effects of the defect creation on the bidirectional shift of threshold voltage with hump characteristics of InGaZnO TFTs under bias and thermal stress[C]//Proceedings of the 2014 21st International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD). New York: IEEE, 2014: 153-156.
- [24] CHEN H C, KUO C W, CHANG T C, et al. Investigation of the capacitance-voltage electrical characteristics of thin-film transistors caused by hydrogen diffusion under negative bias stress in a moist environment[J]. [ACS Applied Materials & Interfaces](#), 2019, 11(43): 40196-40203.