

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>钝化层对 a-IGZO 薄膜晶体管电性能的增强机制研究

王琛, 曾超凡, 路文墨, 宁海玥, 马飞

(西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 采用空心阴极增强脉冲激光沉积技术 (HC-PLD) 在室温制备高质量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜, 作为非晶铟镓锌氧(a-IGZO) TFT 器件的钝化层, 显著增强了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 器件的亚阈值特性, 其原因在于空心阴极引入的氧等离子体抑制了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 界面处氧空位的形成。进一步研究发现, 针对 a-IGZO 薄膜的 180 °C 退火处理有利于消除弱结合氧并抑制深能级缺陷, 提高载流子迁移率并降低阈值电压漂移; 而针对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 器件进行 100 °C 退火处理有助于消除其界面附近的氧空位, 降低载流子浓度, 改善亚阈值特性。结合 2 步退火工艺所制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 器件迁移率高达 22.8 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>, 亚阈值摆幅为 0.6 V·decade<sup>-1</sup>, 综合电性能优异。

**关键词:** a-IGZO; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 钝化层; 薄膜晶体管; XPS 深度分析

**中图分类号:** TN321+.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2023)06-2103-08

非晶铟镓锌氧 (a-IGZO) 薄膜晶体管 (TFT) 具有场效应迁移率高 (>10 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>)、开关比高 (~10<sup>6</sup>)、沉积温度低和易于大面积制备等优点, 在主动驱动显示技术、柔性和可穿戴电子器件领域具有巨大的应用潜力<sup>[1]</sup>。然而, a-IGZO 对环境比较敏感, 环境中氧、水蒸气往往导致其电学性能不稳定, 制约着其大规模应用<sup>[2-5]</sup>。表面制备钝化层是提高 a-IGZO TFT 器件稳定性的重要方法之一<sup>[6]</sup>。Peng 等人<sup>[7]</sup>使用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 技术制备了非晶 SiO<sub>2</sub> 钝化层, 然而, 需要超过 300 °C 的退火处理才能得到性能较好的器件。Ko 等人<sup>[8]</sup>使用原子层沉积技术 (ALD) 制备了非晶 HfO<sub>2</sub> 钝化层, 而器件的场效应迁移率仅为 8 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>, 电学性能较差<sup>[8]</sup>。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的介电常数高、漏电流低, 并且是优异的氧气、水蒸气阻挡材料, 被广泛应用于 a-IGZO TFT 的栅极绝缘层材料<sup>[9]</sup>。但采用 ALD 制备 a-IGZO 薄膜表面的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 钝化层却鲜有报道。原因在于采用 ALD 制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜时通常需要水蒸气作为氧化剂<sup>[9-13]</sup>, 150~200 °C 的反应高温往往导致水蒸气与 a-IGZO 表面发生反应, 并向 a-IGZO 中引入氧空位, 导致载流子浓度增加以及阈值电压向负方向移动, 器件处于常开状态, 电学性能恶化<sup>[14]</sup>。采用脉冲激光沉积 (PLD) 技术可以在高真空中沉积 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜, 避免了水蒸气及反应气氛对 a-IGZO 电性能的影响。然而, 采用 PLD

制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜本身往往存在大量的氧空位, 导致即便经过退火处理器件性能仍较差<sup>[6]</sup>。

为了解决这个问题, 本研究在 PLD 系统中使用空心阴极引入氧等离子体 (HC-PLD), 制备了低氧空位浓度的高质量 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜, 并将其用作 a-IGZO TFT 的钝化层。为了进一步提高器件的电学特性, 针对 a-IGZO 薄膜进行了 100~220 °C 退火处理, 以消除弱结合氧导致的深能级缺陷; 针对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 器件进行了 80~140 °C 退火处理以消除界面附近的氧空位。研究发现, 结合两步退火工艺所制备 TFT 器件的综合性能显著提升。同时, 基于深度 XPS 分析, 深入研究了空心阴极及退火处理工艺对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 界面原子及电子状态的影响, 并阐明了 TFT 性能提升的机制。

## 1 实验

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 薄膜及 TFT 器件的制备流程如图 1 所示。首先, 采用 PLD 技术在 280 nm SiO<sub>2</sub>/p<sup>+</sup>-Si 衬底上沉积 40 nm 厚的 a-IGZO 薄膜。PLD 激光波长为 248 nm, 能量密度约 10 J·cm<sup>-2</sup>, 由 KrF 准分子激光器产生。靶材为 1400 °C 烧结的多晶 In<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>ZnO<sub>7</sub> 陶瓷, 沉积时真空腔体内的氧分压为 3.3 Pa。在高真空 (约 5×10<sup>-5</sup> Pa) 中对 a-IGZO 薄膜进行原位 100~220 °C 退火 3 h, 冷却至室温后原位再沉积 74 nm 厚的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 钝化层, 避免了在退火过程中和退火后 a-IGZO 表面暴露于大气或

收稿日期: 2022-06-16

基金项目: 国家自然科学基金 (51771144); 陕西省自然科学基金 (2019JLM-30, 2019TD-020, 2021JC-06)

作者简介: 王琛, 男, 1996 年生, 博士, 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049, E-mail: 18292887028@163.com

水蒸气环境中。空心阴极增强脉冲激光沉积示意图如图 2 所示, 通过内径为 6 mm 的不锈钢管将 40 mL/min 的氧气通入真空腔体, 以不锈钢管为阴极施加直流高压, 将氧气电离为等离子体并引入腔体中。所用的电离电压为 1.5 kV, 电流为 65~75 mA。随后, 采用射频磁控溅射在  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  复合薄膜表面通过图案化沉积 100 nm 厚的 Mo 源漏电极。在真空中 TFT 器件整体再进行 80~140 °C 退火处理, 退火时间为 3 h。在沉积过程中依次使用不锈钢掩膜版对 a-IGZO、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Mo 进行图形化, 所制备器件的沟道长度为 300  $\mu\text{m}$ , 宽度为 2000  $\mu\text{m}$ 。

采用原子力显微镜 (AFM) (Bruker Innova) 表征薄膜的表面形貌, 采用 X 射线衍射 (XRD) 仪 (Bruker D8) 分析薄膜的物相, 采用椭圆偏振仪 (J.A.Woollam M2000V) 测量薄膜的厚度, 使用 XPS 沿薄膜深度方

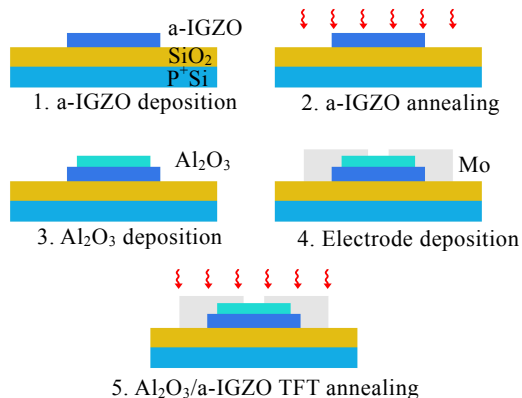


图 1  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  TFT 器件制备流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  TFT fabrication process

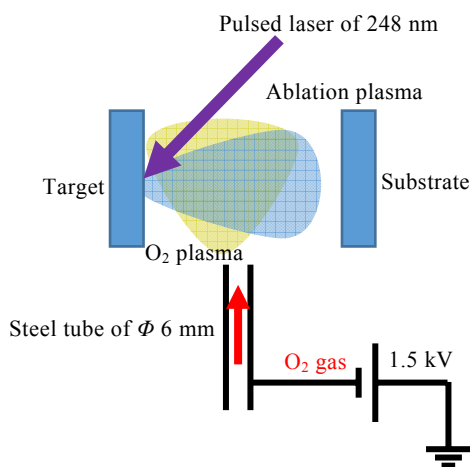


图 2 空心阴极增强脉冲激光沉积示意图

Fig.2 Schematic diagram of hollow cathode assistant pulsed laser deposition

向分析元素分布及化学状态。利用能量为 1000 eV、束流为 10  $\mu\text{A}$  的聚焦 Ar 离子束 (RBD IG2) 对样品进行剥层, 剥离速度为 0.4  $\text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 剥离面积为 2  $\text{mm}\times 2 \text{mm}$ 。XPS 分析仪为 Specs 公司的表面分析系统,  $\text{Al K}\alpha$  线为 X 射线光电子激发源, 探测面积为 0.7  $\text{mm}\times 0.7 \text{mm}$ , 通过能量设置为 10 eV, 每个特征谱累积测量 10 次并取平均值。使用 Keithley 2612b 数字源表在室温黑暗中测量器件的转移特性曲线, 施加的源漏电压为 2 V, 栅极电压从 -60 V 扫描至 60 V, 步长为 1 V。在栅极施加 60 V 电压 200 s 后再测量转移特性曲线, 分析器件的阈值电压漂移特性。

## 2 结果与讨论

图 3a 为在 3.3 Pa 氧分压下使用 PLD 制备的 a-IGZO 薄膜的 AFM 照片, 扫描范围为 0.5  $\mu\text{m}\times 0.5 \mu\text{m}$ 。a-IGZO 薄膜的方均根粗糙度 RMS 为 0.338 nm, 致密的薄膜表面有利于降低界面粗糙度对载流子迁移率的影响, 提高器件的整体性能。图 3b 为 6.0 Pa 氧分压下使用 HC-PLD 制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的 AFM 照片, 薄膜的方均根粗糙度 RMS 为 0.676 nm, 略有增加, 这是由于其制备过程中的氧分压高于 a-IGZO 薄膜。从图 3c 中可以看到,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  复合薄膜的表面与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜表面形貌相似, RMS 为 0.631 nm。图 3d 给出了先对 a-IGZO 进行 180 °C 退火再对  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  复合薄膜整体进行 100 °C 退火后的显微形貌, 薄膜表面的

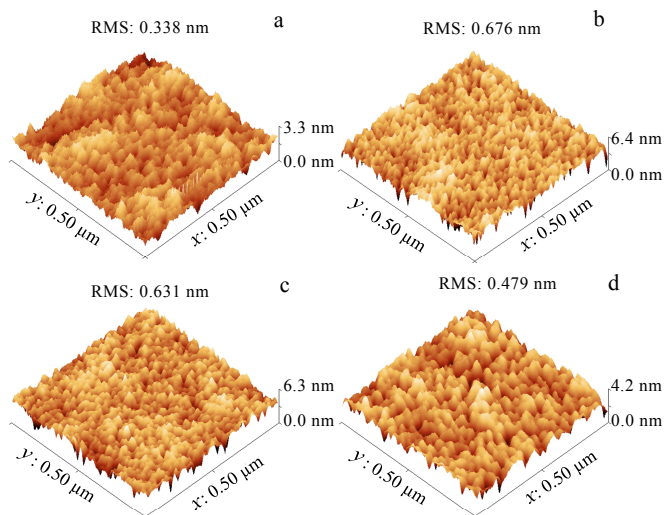


图 3 薄膜的原子力显微镜照片

Fig.3 AFM morphologies of different films: (a) a-IGZO thin film; (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin film; (c)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  thin film; (d) 100 °C annealed  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  thin film with 180 °C annealed a-IGZO thin film

粗糙度明显下降, RMS 为 0.479 nm。这说明真空退火可以进一步提高复合薄膜的质量, 进而改善器件的电学性能。图 4 给出了 a-IGZO 薄膜、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜以及先对 a-IGZO 进行 180 °C 退火再 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜整体进行 100 °C 退火后的 XRD 图谱。所有图谱中均未出现属于晶态 IGZO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的衍射峰, 说明以上 4 种薄膜保持了非晶态。

图 5 为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 钝化层的制备方法对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 器件电学性能的影响。由图 5a 可以看出, 使用普通 PLD 沉积技术制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜时, TFT 器件的亚阈值特性很差。当氧分压为 2.0 Pa 时, TFT 器件甚至处于常开状态。随着氧分压的增加, 开启电压由 -40 V 逐渐降低至 -20 V, 但开启电压不能进一步接近 0 V。开启电压小于零意味着 a-IGZO 薄膜中存在高浓度的载流子, 费米能级接近迁移率边<sup>[15]</sup>。且器件的亚阈值摆幅为约 2 V·decade<sup>-1</sup>, 迁移率为 4.5~6.5 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>, 性能比一般的 a-IGZO TFT 器件差<sup>[1]</sup>。图 5b 为采用 HC-PLD 制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 器件的转移特性曲线。2.0 Pa 氧分压下制备的 TFT 器件即可实现开关功能, 当氧分压增加到 6.0 Pa 时, TFT 器件的载流子迁移率为 8.1 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>, 亚阈值摆幅为 0.76 V·decade<sup>-1</sup>, 开关比达到 1.3×10<sup>5</sup>, 开启电压接近于 0 V。相对于未采用 HC-PLD 技术制备的器件的电学性能得到明显改善。进一步提高氧分压时器件的迁移率开始下降, 说明 6.0 Pa 沉积氧分压为最佳参数。

为了探究空心阴极引入氧等离子体对 TFT 性能提升的原因和机制, 使用 XPS 沿着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 薄膜

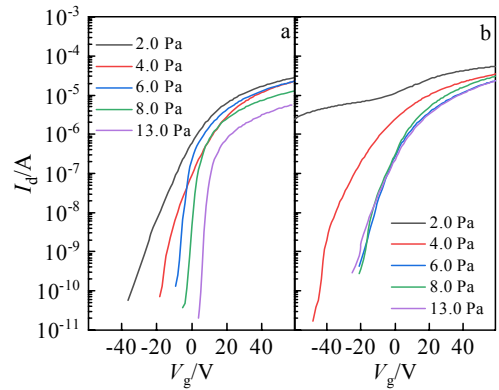


图 5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 钝化层的制备方法对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 器件转移特性的影响

Fig.5 Transfer curves of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFTs containing the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> passivation layer deposited by normal PLD (a) and HC-PLD (b) (the deposition oxygen pressure varies from 2.0 Pa to 13.0 Pa)

深度方向分析元素分布和化学状态。图 6 中 a~d 谱依次为 6.0 Pa 氧分压下使用 HC-PLD 制备的沉积态 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜样品随着 Ar 离子束剥离深度的 XPS 全谱。Al 元素特征峰 Al 2s 和 Al 2p 的强度随着剥离深度的增加而逐渐下降, 在图 6 中 c 和 d 谱几乎完全消失。从图 6 中 a 未见 In、Ga 和 Zn 的特征峰, 但随着深度的增加, In、Ga 和 Zn 的特征峰出现且逐渐增强, 在图 6 中 d 达到最大。可以推测, 图 6 中 a 对应着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜, 图 6 中 b 对应着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 界面, 图 6 中 c 和 d 分别对应着 a-IGZO 薄膜的亚表层和内部。

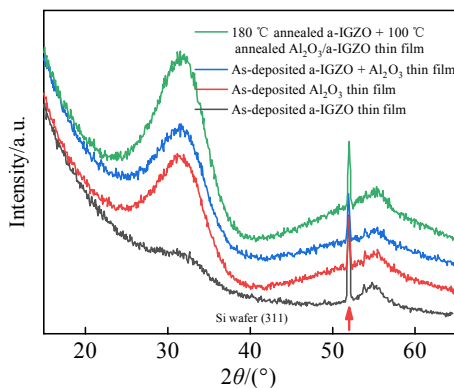


图 4 a-IGZO 薄膜、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜和先对 a-IGZO 进行 180 °C 退火再整体 100 °C 退火的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of a-IGZO thin film, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO film, and 100 °C annealed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO thin film with 180 °C annealed a-IGZO thin film

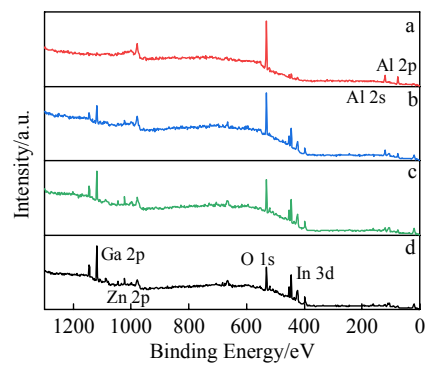


图 6 氧分压为 6.0 Pa 时使用 HC-PLD 制备的沉积态 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜样品随着 Ar 离子束剥离深度的 XPS 全谱

Fig.6 XPS spectra of the as-deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO fabricated by HC-PLD with different Ar gun etch depths (a: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interior; b: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO interface; c: a-IGZO sub-surface; d: a-IGZO interior)

图 7a~7c 分别为使用普通 PLD 沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  复合薄膜中依次位于  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  界面、 $\text{a-IGZO}$  亚表层和  $\text{a-IGZO}$  内部的  $\text{In } 3\text{d}_{5/2}$  谱。可以看到, 界面处存在  $\text{In}_I$  和  $\text{In}_{II}$  峰, 其结合能分别为 444.4 和 445.2 eV, 对应着  $\text{In}^{3+}$  离子和类金属态的  $\text{In}_0$  [16-17]。高强度的类金属态  $\text{In}_{II}$  峰意味着界面附近存在着高浓度的氧空位 [18]。当未使用空心阴极时, 沉积过程中真空腔体内氧气的化学活性弱, 导致  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜中存在大量的氧空位, 而由于  $\text{In}$  原子与  $\text{O}$  原子的结合力较弱,  $\text{a-IGZO}$  薄膜中的  $\text{O}$  原子将向  $\text{Al}_2\text{O}_3$  钝化层移动, 提高了界面附近氧空位的浓度。图 7g~7i 分别给出了引入氧等离子后沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  复合薄膜位于  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  界面、 $\text{a-IGZO}$  亚表层和  $\text{a-IGZO}$  内部的  $\text{In } 3\text{d}_{5/2}$  谱。界面处  $\text{In}_{II}$  峰的强度显著降低, 说明高活性的氧等离子弥补了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  中的氧空位, 抑制了  $\text{a-IGZO}$  中的  $\text{O}$  原子向  $\text{Al}_2\text{O}_3$  中迁移, 进而降低了  $\text{a-IGZO}$  中的氧空位浓度。 $\text{a-IGZO}$  中的氧空位为电子施主, 因此, 空心阴极引入氧等离子体通过降低  $\text{a-IGZO}$  中的载流子浓度提高了器件的亚阈值性能。同时, 根据图 7j~7l, 引入氧等离子体后,  $\text{O } 1\text{s}$  谱中出现了对应弱结合氧的  $\text{O}_{II}$  峰 [19], 而未引入氧等离子体的  $\text{O } 1\text{s}$  谱中仅在 531.0 eV 处存在  $\text{O}_I$  峰 (图 7d~7f), 对应着与金属成键的氧离子。

针对  $\text{a-IGZO}$  薄膜进行真空退火处理会显著提升

其迁移率, 抑制  $\text{a-IGZO}$  TFT 器件的阈值电压漂移 [7, 20-21]。为了提高  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  TFT 的电学性能, 提出了两步退火工艺并进行了正交试验: (1) 针对  $\text{a-IGZO}$  薄膜进行 100~220 °C 退火处理; (2) 针对  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  TFT 器件进行 80~140 °C 退火处理。图 8 为测量的转移特性曲线。可以看出, 未经退火处理的  $\text{a-IGZO}$  薄膜组成 TFT 器件的开启电压接近于 0 V, 而在针对  $\text{a-IGZO}$  退火后器件的亚阈值性能变差。然而, 倘若再针对  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  TFT 器件整体进行不同温度的退火, TFT 器件的亚阈值特性逐渐得到改善, 退火温度越高亚阈值特性改善越明显。图 9 总结了从转移特性曲线提取的场效应迁移率、亚阈值摆幅、开关比和阈值电压漂移等参数。可以看出, 仅针对  $\text{a-IGZO}$  薄膜进行退火处理时, 温度的提高有利于提升 TFT 器件的场效应迁移率, 降低阈值电压漂移, 但会导致亚阈值摆幅增大, 开关比降低, 器件处于常开的状态; 而针对  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  TFT 器件进行整体退火处理时, 温度的升高将降低场效应迁移率, 增大阈值电压漂移, 但有利于降低亚阈值摆幅, 提高开关比。结合  $\text{a-IGZO}$  薄膜 180 °C 退火处理和  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  TFT 器件整体 100 °C 退火处理, 可以得到综合性能最佳的器件, 其迁移率高达  $22.8 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 亚阈值摆幅为  $0.6 \text{ V} \cdot \text{decade}^{-1}$ , 开关比为  $6.3 \times 10^6$ , 阈值电压漂移为 4.1 V。以  $\text{SiO}_2$ 、

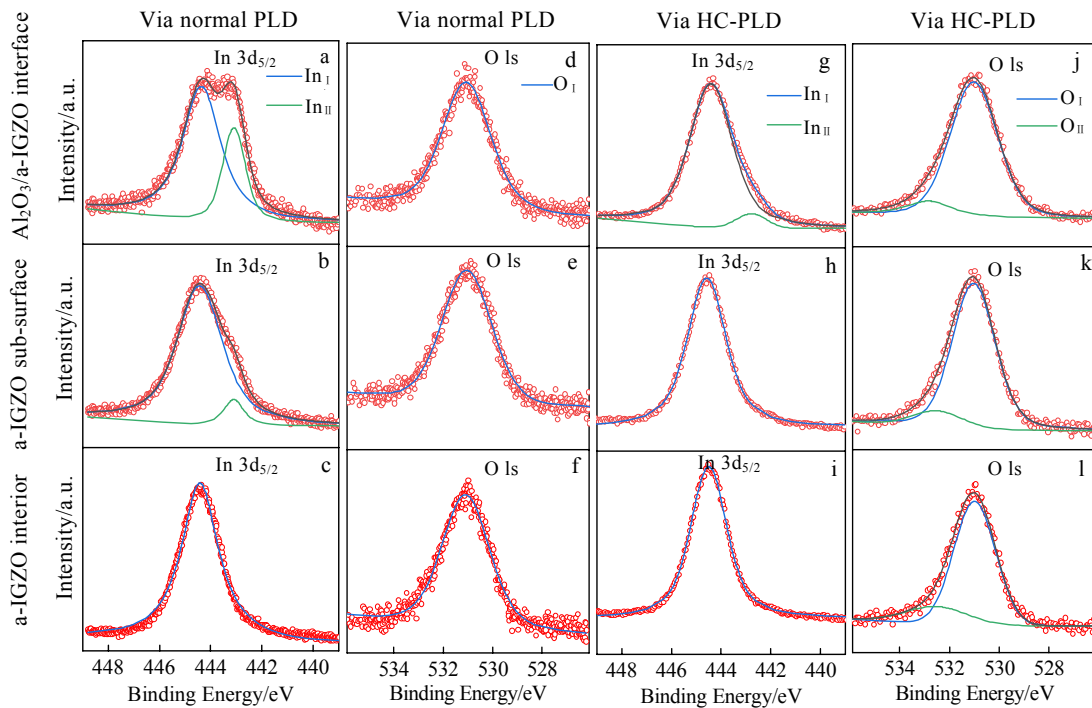


图 7 使用普通 PLD 和 HC-PLD 制备的沉积态  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  薄膜位于界面、 $\text{a-IGZO}$  亚表层和  $\text{a-IGZO}$  内部的  $\text{In } 3\text{d}_{5/2}$  和  $\text{O } 1\text{s}$  谱  
Fig.7  $\text{In } 3\text{d}_{5/2}$  and  $\text{O } 1\text{s}$  spectra of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  interface,  $\text{a-IGZO}$  sub-surface and  $\text{a-IGZO}$  interior in the as-deposited  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-IGZO}$  prepared via normal PLD and via HC-PLD

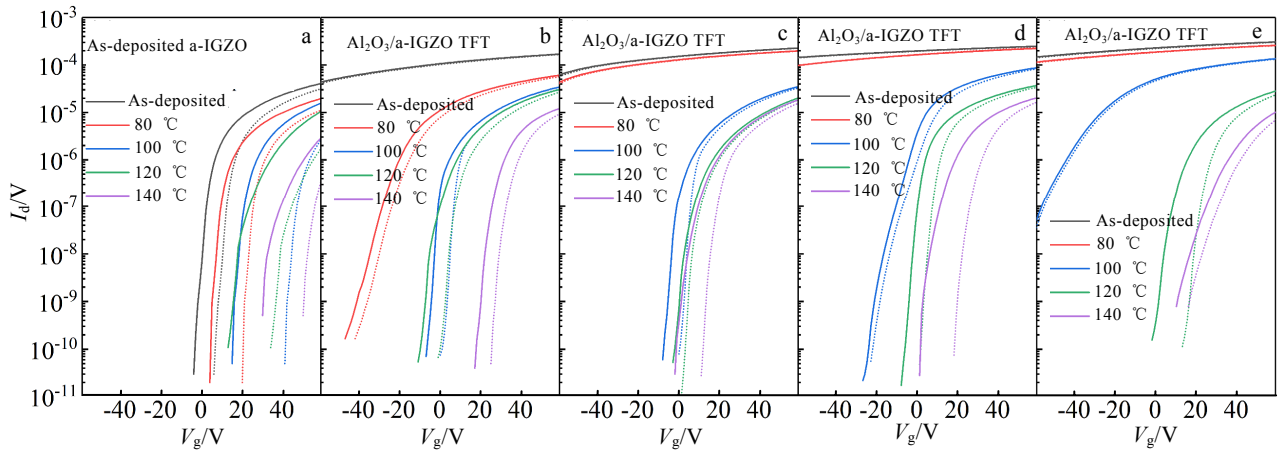


图 8 a-IGZO 薄膜退火工艺和器件整体退火工艺对转移特性曲线的影响

Fig.8 Transfer curves of as-deposited a-IGZO (a) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFTs annealed at 100 °C (b), 140 °C (c), 180 °C (d), and 220 °C (e) (the process of the TFT devices is non-annealing and annealing at 80~140 °C; the solid and dash lines correspond to the transfer curves before and after threshold voltage shift, respectively)

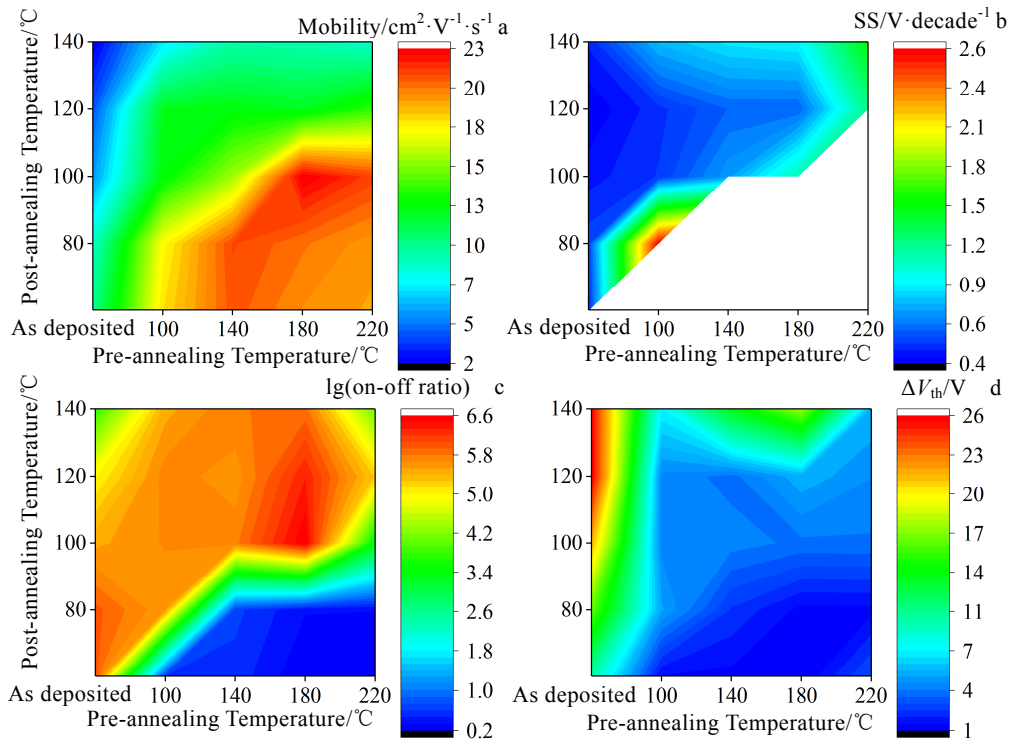


图 9 a-IGZO 薄膜退火工艺和器件退火工艺对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 的迁移率、亚阈值摆幅、开关比及阈值电压漂移的影响

Fig.9 Effects of a-IGZO and TFT annealing on mobility (a), subthreshold swing (SS) (b), on-off ratio (c), and threshold voltage shift ( $\Delta V_{th}$ ) (d) of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFTs

HfO<sub>2</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为钝化层的 a-IGZO TFT 器件的迁移率分别为 16.7<sup>[7]</sup>、8.0<sup>[8]</sup>、12.1<sup>[6]</sup>、10.1 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup><sup>[6]</sup>。可以看到,使用 HC-PLD 制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 器件的迁移率比文献中报道的更有优势。

为了研究退火工艺对 TFT 器件性能影响的物理机制,采用 XPS 沿 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜深度方向分析元素的成分和化学状态。图 10 和图 11 为不同退火工艺条件处理后 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜体系中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 界面、

a-IGZO 亚表层和 a-IGZO 内部的 In 3d<sub>5/2</sub> 和 O 1s 图谱。图 10a~10c 分别为仅针对 a-IGZO 薄膜进行 180 °C 退火处理后室温沉积 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜中的 In 3d<sub>5/2</sub> 峰。与未退火的 a-IGZO 相对比 (图 7g~7i), 界面附近的 In<sub>II</sub> 峰强度明显增加, 说明在界面附近 a-IGZO 中产生了大量的氧空位, 对应图 8 和图 9 中随 a-IGZO 退火温度升高亚阈值特性的恶化行为。图 11a~11c 为仅针对 a-IGZO 薄膜进行 180 °C 退火处理后的 O 1s 峰, 与未退火 a-IGZO 对比 (图 7j~7l), 退火使 a-IGZO 中的弱结合氧几乎完全消失。弱结合氧形成的深能级缺陷是发生阈值电压漂移的根本原因<sup>[19, 22-23]</sup>。同时, 由于束缚在深能级缺陷中的电子会对载流子产生强烈的散射作用, 场效应迁移率随之降低。因此, 针对 a-IGZO 薄膜的退火通过消除深能级缺陷, 提高了迁移率, 抑制了阈值电压漂移。如图 10d~10f 所示, 倘若只针对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜整体进行 100 °C 的退火处理, 界面处的 In<sub>II</sub> 峰强度明显降低, 可归因于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜中不稳定的 O 原子向 a-IGZO 中扩散并降低了氧空位浓度和载流子浓度, 与图 8 和图 9 中观察到的开启电压正向移动及亚阈值特性改善一致。图 11d~11f 为只针对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜进行 100 °C 退火处理后的 O 1s 谱。对比图

7j~7l 可以看出, 从界面到 a-IGZO 薄膜内部均存在着位于 531.0 和 532.5 eV 的 O<sub>I</sub> 和 O<sub>II</sub> 峰, 整体退火后 O<sub>II</sub> 峰的强度明显增强, 意味着从 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 向 a-IGZO 扩散的 O 原子在 a-IGZO 薄膜内形成了弱结合氧, 导致随着整体退火温度的升高, 阈值电压漂移增大且迁移率降低。图 10g~10i 为先对 a-IGZO 进行 180 °C 退火再对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜整体进行 100 °C 退火后的 In<sub>II</sub> 峰。可以发现, 界面处的 In<sub>II</sub> 峰强度明显降低, 即对复合薄膜进行整体退火处理时, 来自 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 钝化层的扩散氧抑制了 a-IGZO 中氧空位的形成, 有利于调控器件的载流子浓度。图 11g~11i 进一步证实了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜在退火处理后可在 a-IGZO 薄膜中引入了弱结合氧。然而相比于只针对复合薄膜进行整体退火的样品, 2 步退火后界面处和 a-IGZO 中的 O<sub>II</sub> 峰强度明显降低, 说明 2 步退火可以同时抑制氧空位和弱结合氧的浓度, 因此可以在保持亚阈值特性的同时, 抑制阈值电压漂移和提升迁移率。总而言之, a-IGZO 薄膜的氧空位和弱结合氧对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 器件的电学性能具有重要影响, 在 a-IGZO 材料与器件设计时应予以重视。

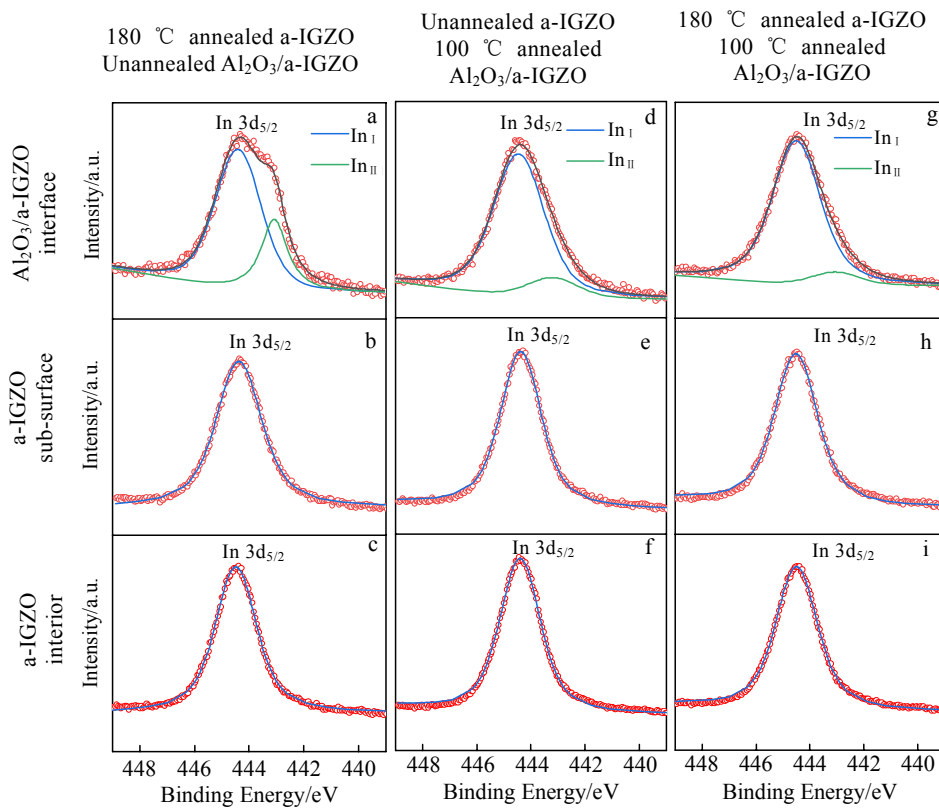
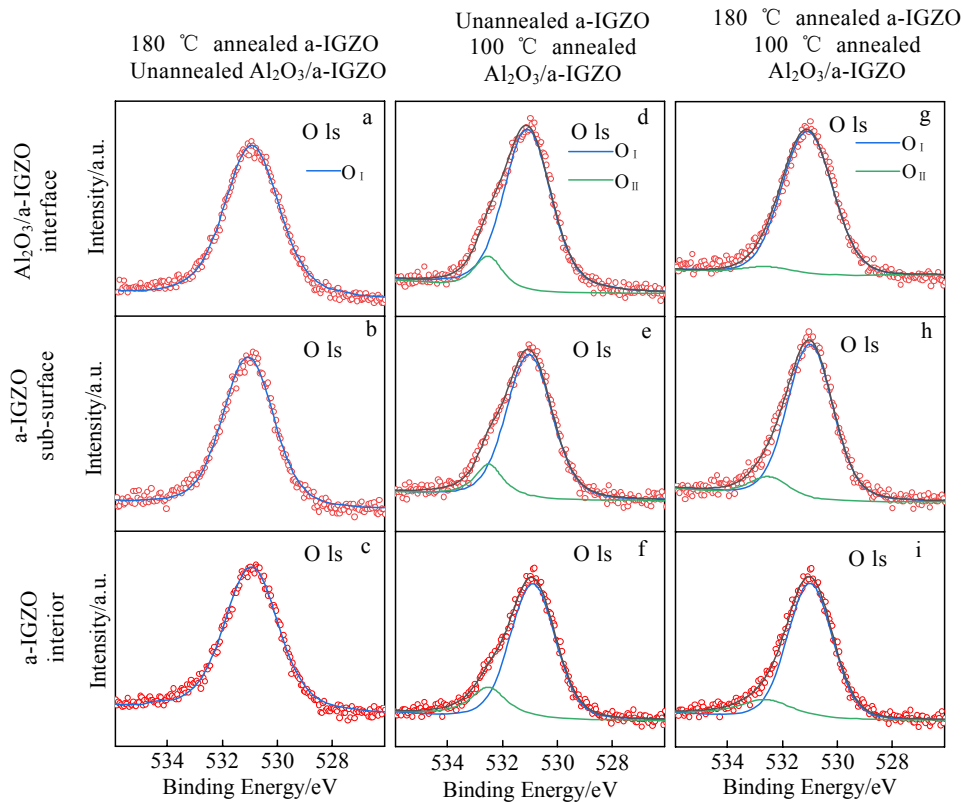


图 10 位于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 界面、a-IGZO 亚表层和 a-IGZO 内部的 In 3d<sub>5/2</sub> 谱  
 Fig.10 In 3d<sub>5/2</sub> spectra at Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO interface, a-IGZO sub-surface, and a-IGZO interior

图 11 位于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 界面、a-IGZO 亚表层和 a-IGZO 内部的 O 1s 谱Fig.11 O 1s spectra at Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO interface, a-IGZO sub-surface, and a-IGZO interior

### 3 结 论

1) 采用空心阴极引入氧等离子体辅助 PLD 沉积过程, 可在室温条件下制备出高质量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜, 并作为 a-IGZO TFT 器件的钝化层。

2) 结合 a-IGZO 薄膜 180 °C 退火处理工艺和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 器件整体 100 °C 退火处理工艺, 可以得到优化的器件性能, 其迁移率高达 22.8 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>, 亚阈值摆幅为 0.6 V·decade<sup>-1</sup>, 开关比为 6.3×10<sup>6</sup>, 阈值电压漂移为 4.1 V。

3) 沿薄膜深度方向进行 XPS 分析发现, 空心阴极引入的氧等离子体有效地降低了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜界面附近的氧空位浓度, 提升了 TFT 器件的亚阈值性能。

4) 退火工艺进一步提高了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 的性能: 仅针对 a-IGZO 薄膜进行退火处理有助于消除弱结合氧, 抑制器件的阈值电压漂移、提升载流子迁移率; 而针对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 复合薄膜进行退火有利于降低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO 薄膜界面附近的氧空位浓度, 从而提高器件的亚阈值性能。

5) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 器件的电学特性与氧空位和

弱结合氧紧密相关, 恰当的退火工艺有利于改善 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT 器件的电学特性。

#### 参考文献 References

- [1] Nomura K, Ohta H, Takagi A *et al.* *Nature*[J], 2004, 432(7016): 488
- [2] Zhou X, Shao Y, Zhang L *et al.* *IEEE Electron Device Letters*[J], 2017, 38(4): 465
- [3] Watanabe K, Lee D H, Sakaguchi I *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2013, 103(20): 201 904
- [4] Liu P T, Chou Y T, Teng L F. *Applied Physics Letters*[J], 2009, 95(23): 233 504
- [5] Qin T, Huang S X, Liao C W *et al.* *Acta Physica Sinica*[J], 2018, 67(4): 047 302
- [6] Nomura K, Kamiya T, Hosono H. *Thin Solid Films*[J], 2012, 520(10): 3778.
- [7] Peng C, Yang S, Pan C *et al.* *IEEE Transactions on Electron Devices*[J], 2020, 67(10): 4262
- [8] Ko Y, Bang S, Lee S *et al.* *Physica Status Solidi-Rapid Research Letters*[J], 2011, 5(10-11): 403
- [9] Suresh A, Wellenius P, Baliga V *et al.* *IEEE Electron Device*

- Letters*[J], 2010, 31(4): 317
- [10] Meyer J, Görrn P, Bertram F, *et al. Advanced Materials*[J], 2009, 21(18): 1845
- [11] Ma P, Du L, Wang Y *et al. Applied Physics Letters*[J], 2018, 112(2): 023 501
- [12] Park J W, Kwon S, Kwon J H, *et al. ACS Applied Electronic Materials*[J], 2019, 1(8): 1400
- [13] Li X F, Xin E L, Shi J F, *et al. Acta Physica Sinica*[J], 2013, 62(10): 108 503
- [14] Chowdhury M D H, Migliorato P, Jang J. *Applied Physics Letters*[J], 2011, 98(15): 153 511
- [15] Takagi A, Nomura K, Ohta H *et al. Thin Solid Films*[J], 2005, 486(1-2): 38
- [16] Pujilaksono B, Klement U, Nyborg L *et al. Materials Characterization*[J], 2005, 54(1): 1
- [17] Yamaguchi M, Ide-Ektessabi A, Nomura H, *et al. Thin Solid Films*[J], 2004, 447-448(30): 115
- [18] Nomura K, Kamiya T, Ohta H *et al. Physical Review B*[J], 2007, 75(3): 035 212
- [19] Nomura K, Kamiya T, Hosono H. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*[J], 2013, 2(1): 5
- [20] Hanyu Y, Abe K, Domen K *et al. IEEE/OSA Journal of Display Technology*[J], 2014, 10(11): 979
- [21] Tang H, Ide K, Hiramatsu H *et al. Thin Solid Films*[J], 2016, 614: 73
- [22] Jeong J, Lee G J, Kim J *et al. Applied Physics Express*[J], 2013, 6(3): 031 101
- [23] Han W H, Oh Y J, Chang K J *et al. Physical Review Applied*[J], 2015, 3(4): 044 008

## Enhancement Mechanism of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Passivation Layer on Electrical Properties of a-IGZO Thin Film Transistors

Wang Chen, Zeng Chaofan, Lu Wenmo, Ning Haiyue, Ma Fei

(State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films with low oxygen vacancy content were prepared by hollow cathode assistant pulsed laser deposition at room temperature, and they were used as the passivation layer of amorphous In-Ga-Zn-O (a-IGZO) TFT devices. The oxygen plasma introduced by the hollow cathode inhibits the formation of oxygen vacancies at the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO interface, which significantly improves the subthreshold performance of TFT devices. Annealing at 180 °C for a-IGZO films can improve the mobility and reduce the threshold voltage shift, whereas annealing at 100 °C for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-IGZO TFT devices can reduce the carrier concentration and improve the subthreshold characteristics. The mobility of TFT devices processed by the combining annealing process can be as high as 22.8 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>, and the subthreshold swing is 0.6 V·decade<sup>-1</sup>, showing excellent comprehensive electrical properties.

**Key words:** a-IGZO; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> passivation; thin film transistors; XPS in-depth analysis

---

Corresponding author: Ma Fei, Ph. D., Professor, State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, E-mail: mafei@mail.xjtu.edu.cn