

基于印刷双层电极的氧化物薄膜晶体管

林奕龙, 陈思婷, 吴永波, 兰林锋, 彭俊彪

引用本文:

林奕龙, 陈思婷, 吴永波, 等. 基于印刷双层电极的氧化物薄膜晶体管[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(9): 1239–1246.

LIN Yi-long, CHEN Si-ting, WU Yong-bo, et al. Oxide thin-film transistors based on printed double-layer electrodes[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(9): 1239–1246.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0116>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非晶铟镓锌氧薄膜晶体管银/钛源漏电极的研究

Ag/Ti source/drain electrodes for amorphous InGaZnO thin flim transistors

液晶与显示. 2016, 31(4): 375–379 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163104.0375>

激光对固态电解质金属氧化物薄膜晶体管性能的影响

Influence of laser irradiation on solid-electrolyte based metal-oxide thin film transistors performance

液晶与显示. 2020, 35(11): 1103–1109 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203511.1103>

溶液法氧化物薄膜晶体管的印刷制备

Oxide semiconductor thin film transistor device print fabrication based on solution method

液晶与显示. 2017, 32(6): 443–454 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173206.0443>

未退火InGaZnO作为缓冲层的InGaZnO薄膜晶体管性能研究

Effects of using InGaZnO without annealing as buffer layer on the performance of InGaZnO thin film transistors

液晶与显示. 2015, 30(4): 602–607 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153004.0602>

高性能钆铝锌氧薄膜晶体管的制备

Fabrication of high performance Gadolinium-aluminum-zinc-oxide thin film transistors

液晶与显示. 2017, 32(5): 339–343 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173205.0339>

文章编号:1007-2780(2021)09-1239-08

基于印刷双层电极的氧化物薄膜晶体管

林奕龙, 陈思婷, 吴永波, 兰林锋*, 彭俊彪

(华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:为满足印刷显示的大面积制备、低信号延迟的需求,有必要开发应用于氧化物薄膜晶体管(TFTs)的低电阻印刷电极。研究发现喷墨打印 Ag 和氧化物有源层的界面接触特性较差,导致基于 Ag 电极的氧化物 TFT 性能很差。通过在 Ag 电极和有源层中间插入喷墨打印的氧化铟锡(ITO)电极,可以阻隔 Ag 纳米颗粒扩散入有源层。此外,ITO 电极可以与 Ag 和有源层形成良好的接触特性,大幅降低了接触电阻。基于 Ag/ITO 双层电极的 TFT 较基于单层 Ag 电极的性能大幅提升:迁移率达 $16.0 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 开关比达 6.2×10^7 , 亚阈值摆幅为 174 mV/Decade , 阈值电压为 -2.0 V 。该结果证明了印刷 Ag 电极在氧化物 TFT 的应用潜力,并有助于建立导电氧化物薄膜和金属导电纳米材料堆叠结构的复合导电薄膜体系,实现优势互补。

关键词:薄膜晶体管;氧化物半导体;喷墨打印;双层电极;银电极

中图分类号: TN321⁺.5; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2021-0116

Oxide thin-film transistors based on printed double-layer electrodes

LIN Yi-long, CHEN Si-ting, WU Yong-bo, LAN Lin-feng*, PENG Jun-biao

(State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices,
South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To meet the requirement of low signal delay of the large-size printed display, it is necessary to develop low-resistance printed electrodes for oxide thin film transistors(TFTs). It is found that the interface contact between inkjet-printed Ag and the active layer is poor, which leads to the poor electrical performance of oxide TFT with the Ag electrode. By inserting inkjet-printed indium tin oxide (ITO) electrode between the Ag electrode and the active layer, the diffusion of Ag nanoparticles in the active layer can be blocked. In addition, the ITO electrode can form good contact characteristics with Ag and the active layer, greatly reducing the contact resistance. The performance of TFT based on Ag/ITO double-layer electrodes is significantly improved compared with that based on single-layer silver electrode: mobility of $16.0 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, switching ratio of 6.2×10^7 , subthreshold swing of 174 mV/Decade , and threshold voltage of -2.0 V . The results demonstrate the application potential of printed Ag electrode in oxide TFT, and contribute to the establishment of a composite conductive film system of stacked structure of metallic conductive nanomaterials and conductive oxide film, realizing complementary advantages.

收稿日期:2021-04-26;修订日期:2021-05-18.

基金项目:国家自然科学基金(No. 62022034, No. 22090024)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 62022034, No. 22090024)

* 通信联系人, E-mail: lanlinfeng@scut.edu.cn

Key words: TFTs; oxide semiconductors; inkjet printing; double-layer electrodes; Ag electrode

1 引言

薄膜晶体管 (Thin-Film Transistor, TFT) 作为平板显示驱动背板的核心元器件,在像素电路中控制每一个像素点的选址和驱动,影响着显示效果^[1-2]。基于氧化物半导体的 TFT 由于其较高的载流子迁移率、出色的可见光透过性、极低的关态电流、以及良好的大面积均匀性等优点而受到广泛关注。目前,基于真空法的氧化物 TFT 已经实现量产应用,但真空法设备昂贵、成本较高^[3-6];相比之下,溶液(印刷)法具有工艺简单、成本低的特点。近年来,印刷氧化物 TFT 受到了越来越多的关注。然而,印刷氧化物 TFT 的电极接触问题一直没有突破。

溶液加工的 ITO 薄膜与金属相比导电性较差,在大尺寸和高分辨率显示器的应用上会导致信号延迟增加,引起画面失真。可印刷的金属纳米颗粒油墨在高稳定性的导电电极中起着重要的作用。Cu 纳米颗粒油墨是源漏电极的首选,因为它成本低,导电性能好。然而,纳米 Cu 在烧结过程中容易氧化,需要特殊的烧结环境,如惰性或还原性气氛,这覆盖了 Cu 纳米颗粒的成本优势^[7]。尽管可以通过闪速烧结在空气中获得导电铜薄膜,但这需要用于光子固化的特殊设备和与该方法兼容的底层材料的优化,这也需要较高的成本^[8]。Ag 是广受关注的材料,在太阳能电池和光催化降解领域都有广阔的应用前景^[9-10]。其相对成本效益优于 Au,化学稳定性优于 Cu。然而,用 Ag 纳米颗粒做电极存在一些严重的问题:例如,由于 Ag 的功函数大或残留有机物,容易与 n 型半导体形成肖特基接触,导致接触电阻增加^[11];Ag 原子容易在氧化物有源层中扩散,导致器件性能下降^[12-13];电极/有源层界面处形成绝缘的 Ag₂O;墨水的有机溶剂可能会对半导体或绝缘层造成一定的侵蚀,影响器件的性能。因此,突破稳定性高且导电性良好的 Ag 电极的印刷并应用于氧化物 TFT 具有重要的意义。

本研究通过在喷墨打印 Ag 电极和氧化物半导体之间插入喷墨打印 ITO 层,形成 Ag/ITO 双层电极来解决 Ag 与氧化物半导体之间的接触问

题。发现与单纯 Ag 电极的 TFT 相比,性能得到了大幅提升。为了解释其中的原理,本文还研究了墨水溶剂对半导体层的影响、Ag 纳米颗粒的扩散和 Ag 与氧化物的接触特性,解决了 Ag 墨水应用于氧化物 TFT 的接触问题,实现了高性能的基于印刷 Ag 电极的氧化物 TFT。

2 实验

本论文利用压电式喷墨打印机 DMP-2805 (Dimatix) 打印薄膜,所使用的墨水卡夹喷口直径为 21 μm 。物理气相沉积设备 JCP-350 (北京泰科诺科技有限公司)用于溅射薄膜。TFT 阵列测试仪 B1500A (安捷伦科技有限公司)用于测试 TFT 器件的电学特性。

CYTOP 墨水由购自日本 AGC 化学品公司的溶质 CTL-107MK 与溶剂 CT-Solv180 以 1 : 10 配置,并在室温搅拌 12 h,用于 ITO 墨水的图形化控制;ITO 墨水由往 1.25 mL 乙二醇和 3.75 mL 乙二醇单甲醚的混合溶剂中添加 0.714 5 g $\text{In}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 和 0.028 2 g $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 制备而成,并在 50 $^\circ\text{C}$ 下搅拌 12 h;Ag 纳米颗粒墨水为购自韩国 ANP 公司的 DGP 40LT-15C。CYTOP 墨水和 ITO 墨水经过 0.22 μm 过滤头、Ag 纳米颗粒墨水经过 0.45 μm 过滤头后才使用。喷墨打印功能层墨水的参数如表 1 所示,其弗罗姆常数 Z 均处于 1~10 的可打印范围内^[14]。

表 1 墨水参数

Tab.1 Ink parameters

墨水	粘度/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	表面张力/ ($\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Z 值
ITO 溶液	6.00	30.37	1.15	4.52
Ag 墨水	14.90	34.59	1.50	2.22

Ag/ITO 双层电极的 TFT 结构如图 1 所示。首先在洁净的玻璃表面通过金属掩模版溅射 300 nm 厚的掺钕铝电极 (Al : Nd) 作为 TFT 的栅极;接着使用阳极氧化的方法在 Al : Nd 表面生长一层 200 nm 厚的掺钕氧化铝 (AlO_x : Nd) 作为介

质层,其单位面积电容为 38 nF/cm^2 ^[15];在介质层上面通过金属掩模版磁控溅射 12 nm 厚的 InScO_x 薄膜作为有源层,随后在空气中以 350°C 退火 1 h (InScO_x 靶材为 $\omega(\text{In}_2\text{O}_3) : \omega(\text{ScO}_2) = 98 : 2$;溅射条件:本底真空: $8 \times 10^{-4} \text{ Pa}$,溅射功率: 60 W ,溅射气压: 0.5 Pa ,氩气流量: 17 mL/min);在基片上旋涂 CYTOP 墨水,喷墨打印溶

剂 CT-Solv180 刻蚀出咖啡环,经过等离子处理 50 s 后将 ITO 溶液打印在咖啡环里面,在 100°C 干燥 5 min 随后在 350°C 退火 1 h ,所制备的 ITO 薄膜约 50 nm 厚(关于墨水图形化控制详见 Li 等的研究工作^[16])。由于 Ag 墨水粘度较大,且钉扎效果好,可直接打印在 ITO 上面,并在 150°C 退火 30 min ,所制备的 Ag 薄膜约 168 nm 厚。所制备的器件宽长比 $W/L = 400 \mu\text{m}/200 \mu\text{m}$ 。基于单纯 Ag 电极或 ITO 电极的 TFT 与上述类似,只是减少了一个步骤。

3 实验结果

图 2 为不同电极的 InScO_x TFTs 的转移特性和输出特性曲线。可以看出,Ag 电极的 TFT 转移曲线有较大的顺时针迟滞,而且出现抖动,栅绝缘层的泄漏电流相对较大,这可能与 Ag 墨水与有源层和 Ag 墨水与绝缘层的相互作用有关;输出电流很小且输出曲线有严重的电流拥挤效应,可能与接触电阻过大有关。ITO 电极的 TFT 转移曲线几乎没有迟滞,这表明有源层与绝缘层界面以及有源层内部没有较多的缺陷,ITO 电极与 InScO_x 有源层具备良好的兼容性,同时也间接证明了 Ag 墨水在有源层中引入了缺陷;输出曲线在 V_G 较大时没有达到饱和区,可能是 ITO 电极导电率不够,导致电极体电阻分压较大,加在

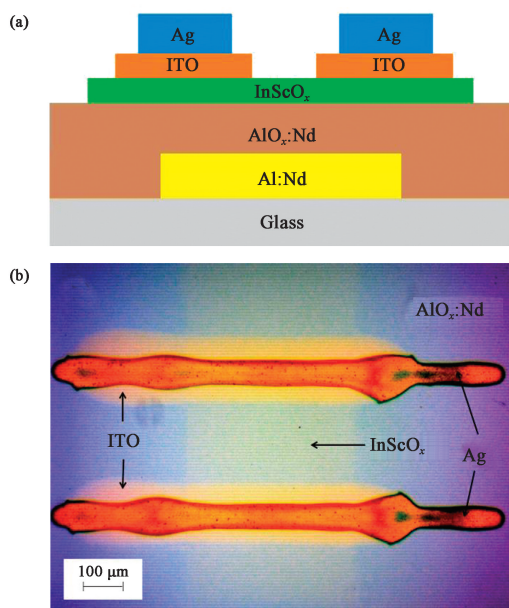


图 1 Ag/ITO 电极 TFT 结构。(a)示意图;(b)偏光图。

Fig.1 Structure of TFT with Ag/ITO electrode. (a) Schematic diagram; (b) Polarizing microscope image.

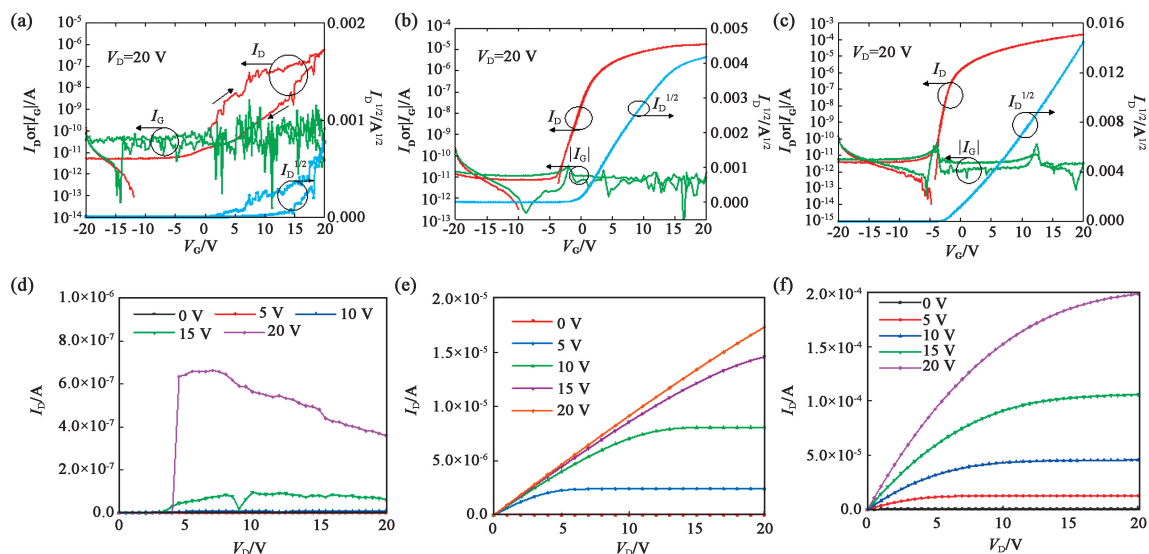


图 2 不同电极的 InScO_x TFTs 的转移曲线和输出曲线。(a)(d):Ag;(b)(e):ITO;(c)(f):Ag/ITO。

Fig.2 Transfer curves and output curves of InScO_x TFTs with different electrodes. (a)(d):Ag; (b)(e):ITO; (c)(f):Ag/ITO.

有源层的端电压较小,使器件不能进入饱和区;其饱和迁移率达 $1.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,开关比达 2.4×10^6 ,亚阈值摆幅为 234 mV/Decade ,阈值电压为 0.07 V 。Ag/ITO 电极的 TFT 转移曲线仅有很小的迟滞,说明 Ag 电极并没有对 InScO_x 有源层造成负面的影响,反而开态电流比 ITO 电极的 TFT 大了一个数量级;输出曲线表明 Ag/ITO 电极与有源层形成了良好的欧姆接触;其饱和迁移率达 $16.0 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,开关比达 6.2×10^7 ,亚阈值摆幅为 174 mV/Decade ,阈值电压为 1.4 V 。

经过电压电流测试表明,ITO 电极的电阻率为 $6.30 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$,Ag 的电阻率为 $1.75 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$,Ag 电极的电阻率远远小于 ITO 电极,因此单层 ITO 电极 TFT 电学性能优于单层 Ag 电极 TFT 的原因必然是 Ag 电极与有源层形成较差的界面特性。

为了提取 ITO 电极和 Ag/ITO 电极 TFT 的接触电阻,我们使用传输线方法(TLM)^[17],制备了不同沟道长度 L 的 TFT,通过测试获得总电阻 R_T 得到如图 3 所示的 R_T - L 关系图。通过交点提取出 ITO 电极的 TFT 接触电阻 R_c 约为 $41\ 353 \Omega$,

Ag/ITO 双层电极的 TFT 接触电阻 R_c 约为 $3\ 605 \Omega$,相差大于一个数量级。ITO 电极的 TFT 较大的接触电阻使得输出曲线在 V_G 较大时没有进入饱和区。Ag/ITO 双层电极 TFT 接触电阻的减小主要是因为 ITO 层改变了 Ag 的扩散程度。

4 讨论与分析

为了分析接触特性,利用开尔文探针法测试了电极和有源层的功函数,其中喷墨打印 Ag 电极 为 4.62 eV ,喷墨打印 ITO 电极 为 4.70 eV ,溅射 InScO_x 有源层 为 4.50 eV 。可以看出,ITO 电极与有源层形成的势垒要比 Ag 电极与有源层形成的势垒大,接触电阻更大,因此 ITO 电极的器件性能应当比 Ag 电极的要差,这与器件性能结果相反,说明了 Ag 墨水对有源层造成了不良的影响。而 Ag 电极与 ITO 电极形成的金半接触是欧姆接触,说明双层电极 Ag/ITO 界面不会阻挡载流子的注入,有一定的应用潜力。

Ag 墨水的溶剂是三乙二醇乙醚(TGME),另外还添加了分散剂、粘结剂等未知成分,可能会对有源层造成不利的影响。为了探究 Ag 墨水的溶剂成分对氧化物薄膜造成的影响,本实验设计了如图 4(a)所示的结构:在玻璃片上溅射 InScO_x 或打印 ITO 电极,然后在 350°C 退火 1 h ,具体参数如前所述;在氧化物薄膜两端溅射 100 nm 厚的 Ag 电极,并在 150°C 下退火 30 min ;测试两个 Ag 电极之间的电流电压关系;测完后在氧化物薄膜中间打印 Ag 墨水或 TGME 溶剂,在 150°C 退火 30 min ,然后用异丙醇将有源层上的 Ag 或 TGME 薄膜洗去,并于 80°C 下烘干 6 h ;最后再次测试两个电极间的电流电压关系,得到如图 4(b)和(c)所示的关系。由图 4(b)可知, TGME 处理 InScO_x 后,电极两端的导电性大幅降低,有可能是 TGME 在有源层 InScO_x 引入了较多的内部缺陷,从而引起电流的降低,同时使得转移曲线具备较大顺时针迟滞。曹丽娟等^[18]研究发现 TGME 对 ZnO 薄膜存在侵蚀和渗透作用并使 ZnO 内部缺陷态增多;另外 Ag 墨水里的 TGME 沸点较高,在退火过程中可能未被完全去除,在表面可能会引入偶极子,导致电子注入势垒的提高^[19],使得 Ag 电极的 TFT

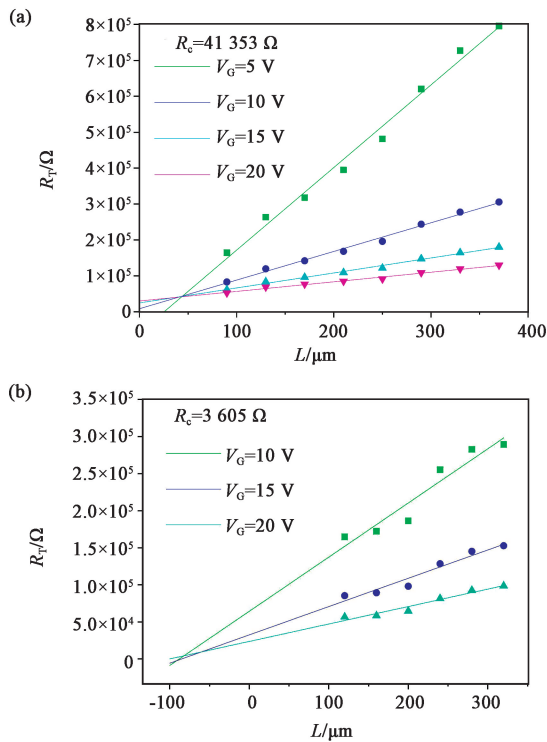


图 3 不同电极 TFT 接触电阻的提取。(a)ITO;(b) Ag/ITO。

Fig.3 Extraction of contact resistance of TFT with different electrode. (a)ITO; (b)Ag/ITO.

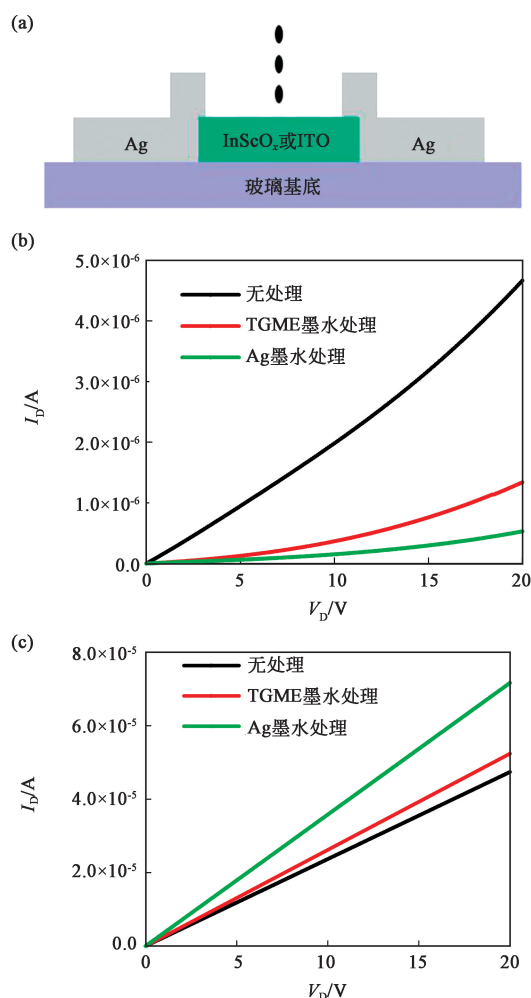


图4 墨水对氧化物薄膜的影响。(a)测试结构示意图;墨水处理(b) InScO_x 或(c)ITO 前后的电流电压曲线。

Fig.4 Effect of ink on the oxide films. (a) Testing structure; The current and voltage curves before and after (b) InScO_x or (c) ITO treated with ink.

器件接触电阻增大。Ag 墨水处理有源层后,电流进一步下降,这表明 Ag 墨水里还存在其他添加剂或者其他机制影响着有源层。由图 4(c)可知,TGME 溶剂处理打印 ITO 后,电极两端的导电性略微有所提升,与 InScO_x 截然相反。因此,ITO 薄膜比 InScO_x 薄膜更能抵挡 Ag 墨水有机溶剂的负面影响,而且 Ag 纳米粒子的渗透在 ITO 和 InScO_x 薄膜中发挥不同的作用,提高了 ITO 的导电性,进而使 Ag/ITO 双层电极 TFT 接触电阻减小。

为了研究 Ag 纳米颗粒对半导体层的扩散

现象,本实验利用飞行时间二次离子质谱(TOF-SIMS)进行元素分析,从 Ag 电极正上方向下刻蚀获取相关元素信息,结果如图 5 所示。由图 5(a)的 Ag 与 Sc 和 Nd 元素的曲线都有一定的面积交叠可知,Ag 纳米颗粒已经扩散进入 InScO_x 有源层甚至部分扩散入 AlO_x:Nd 介质层。Tai 等^[20]研究表明 Cu 在 IGZO 薄膜中扩散形成的缺陷是导电带以下的类受主陷阱态,导致器件性能恶化。因此 Ag 纳米颗粒也可能在 InScO_x 有源层引入类受主缺陷态,导致如图 2(a)的顺时针迟滞。另外,有研究发现,由于 Ag 纳米颗粒在热或电场作用下扩散进入介质层 SiO₂,重掺杂 Si/100 nm SiO₂/Ag 器件结构在退火后,SiO₂ 不能保持其优良的绝缘性能,在电场强度为 0.3 MV/cm 下,其漏电流达到了 0.01 A/cm²^[21]。因此,图 2(a)较大的漏电流归因于 Ag 纳米颗粒向 AlO_x:Nd 介质层扩散。由图 5(b)的 Ag 和 Sc 元素的曲线在 Sn 元素所在位置强度趋于零,表明 ITO 薄膜阻止了 Ag 纳米颗粒向 InScO_x 有源层和 AlO_x:Nd 的扩散,避免了 Ag 电极与 InScO_x 有源层的不良接触和较大的漏电流。

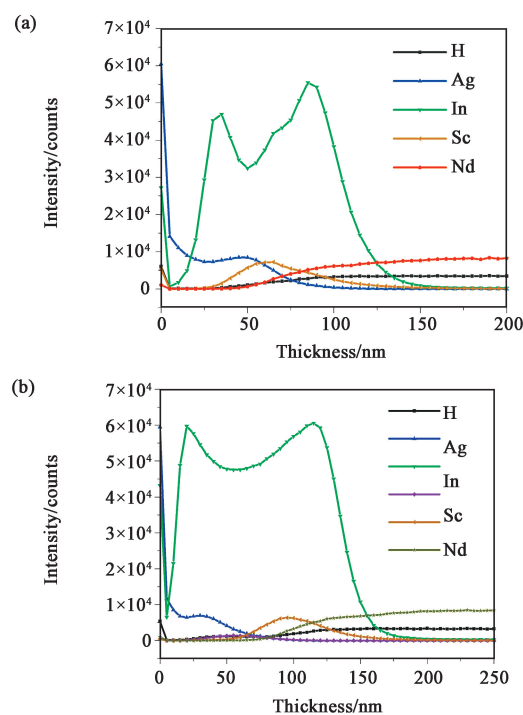


图5 不同电极 InScO_x TFT 的 TOF-SIMS。(a) Ag;(b)Ag/ITO。

Fig.5 TOF-SIMS of InScO_x TFT with different electrode. (a) Ag; (b) Ag/ITO.

为了进一步理解扩散进入 InScO_x 和 ITO 氧化物薄膜的 Ag 元素的化学成键特性,我们利用 X 射线光电子能谱仪(XPS)对 Ag 3d 芯能级信号图谱进行分析,如图 6 所示。在做 XPS 分析之前,氧化物薄膜上的 Ag 电极已经用溶剂洗掉。图中 368.2 eV 左右的拟合信号峰属于金属相的 Ag^0 , 367.7 eV 左右的拟合信号峰属于氧化相的 Ag_2O [22]。由图 6(a)可知,迁移入 InScO_x 有源层的 Ag 相大部分以 Ag_2O 化学态存在,少部分保持 Ag^0 存在,其相对面积达 17.0%。而 Ag_2O 电阻率在 $10^{-1} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间,阻断了 Ag 电极

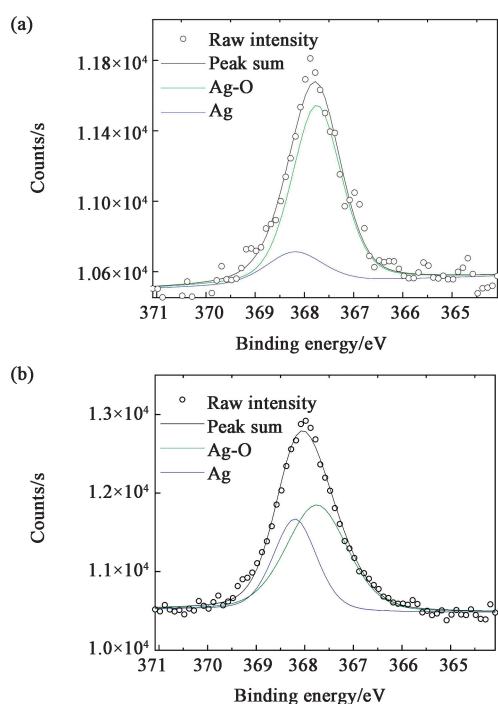


图 6 不同氧化物薄膜的 XPS Ag 3d_{5/3} 能谱。(a) InScO_x ; (b) ITO。在做 XPS 分析之前,氧化物薄膜上的 Ag 电极已经用溶剂洗掉。

Fig.6 XPS Ag 3d_{5/3} spectra of different oxide films. (a) InScO_x ; (b) ITO. Prior to the XPS analysis, the Ag electrode on the oxide films was washed off with solvent.

与 InScO_x 有源层的接触,导致接触电阻增大,从而使图 2(d) 输出曲线有严重的电流拥挤效应。Ueoka 等 [3] 也报道了器件在退火时 Ag 电极会与 a-IGZO 的氧元素结合形成 Ag_2O , 导致接触电阻增大。由图 6(b) 可知,迁移入 ITO 氧化物薄膜的 Ag 相也以 Ag_2O 和 Ag^0 两种形式存在,金属相的相对面积高达 37.7%。有研究表明,向氧化物半导体层中掺入导电成分,可以形成局部电荷传导路径,进而提高场效应迁移率 [23-24]。根据渗流导电模型 [25],当金属相的 Ag 掺杂到半导体时,由于 Ag 的高导特性,可以在半导体区域内架起载流子输运路径。载流子可以在半导体和 Ag 纳米粒子之间快速流动,因此提高了 ITO 薄膜的导电性,有利于载流子从电极注入有源层,使得 Ag/ITO 电极 TFT 的接触电阻远小于 ITO 电极 TFT,具备更良好的电学性能。

5 结 论

设计了 Ag/ITO 双层电极的 InScO_x TFT。研究发现单层 Ag 电极作为 TFT 的源漏电极存在界面问题,导致接触电阻、迟滞和漏电流变大,最终导致器件性能恶化。而 Ag/ITO 双层电极具备电阻小、接触特性好、兼容性好和防止 Ag 原子扩散的优势,克服了单层 Ag 电极的缺点。Ag/ITO 电极的 TFT 电学性能得到明显改善,其饱和迁移率达 $16.0 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 开关比为 6.2×10^7 , 亚阈值摆幅为 174 mV/Decade。该结果为喷墨打印 Ag 电极应用于氧化物 TFT, 实现高兼容性电极和高性能器件提供了简单有效的方案。本研究有助于建立导电氧化物薄膜和导电纳米材料堆叠结构的复合导电薄膜体系,实现优势互补,使薄膜晶体管具备更优异的性能。

参 考 文 献:

- [1] 刘俊,赵达裕,陈鹏,等.高温竖向串扰发生机理的定量研究[J].液晶与显示,2021,36(8):1128-1135.
LIU J, ZHAO D Y, CHEN P, et al. Quantitative study on the mechanism of high temperature vertical crosstalks [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021,36(8):1128-1135. (in Chinese)
- [2] 邓立昂,陈世林,黄博天,等.基于低温多晶硅-氧化物半导体混合集成的薄膜晶体管显示背板技术[J].液晶与显示,2021,36(3):420-431.

- DENG L A, CHEN S L, HUANG B T, *et al.* TFT display backplane technology based on low-temperature poly-silicon-oxide semiconductor hybrid integration [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36 (3): 420-431. (in Chinese)
- [3] UEOKA Y, ISHIKAWA Y, BERMUNDO J P, *et al.* Effect of contact material on amorphous InGaZnO thin-film transistor characteristics [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53(3S1): 03CC04.
- [4] HU S B, LU K K, NING H L, *et al.* High mobility amorphous indium-gallium-zinc-oxide thin-film transistor by aluminum oxide passivation layer [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2017, 38(7): 879-882.
- [5] NING H L, ZENG Y, KUANG Y D, *et al.* Room-temperature fabrication of high-performance amorphous In-Ga-Zn-O/ Al_2O_3 thin-film transistors on ultrasmooth and clear nanopaper [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(33): 27792-27800.
- [6] 詹润泽, 谢汉萍, 董承远. 采用不同透明电极的非晶铟镓锌氧化物薄膜晶体管[J]. 液晶与显示, 2013, 28(1): 55-58.
- ZHAN R Z, SHIEH H, DONG C Y. Amorphous InGaZnO thin film transistors with different transparent electrodes [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1): 55-58. (in Chinese)
- [7] ZENOU M, ERMAK O, SAAR A, *et al.* Laser sintering of copper nanoparticles [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 47(2): 025501.
- [8] NORITA S, KUMAKI D, KOBAYASHI Y, *et al.* Inkjet-printed copper electrodes using photonic sintering and their application to organic thin-film transistors [J]. *Organic Electronics*, 2015, 25: 131-134.
- [9] 霍朝晖, 杨晓珊, 陈晓丽, 等. 纳米银/二维石墨相氮化碳/还原氧化石墨烯复合材料的制备及其光催化降解抗生素[J]. 应用化学, 2020, 37(4): 471-480.
- HUO Z H, YANG X S, CHEN X L, *et al.* Preparation of Ag/two-dimensional graphitic carbon nitride/reduced graphene oxide composite and its photocatalytic degradation of antibiotics [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2020, 37(4): 471-480. (in Chinese)
- [10] 张晓琴, 吴江, 王建太, 等. 基于银纳米线复合透明电极的可弯折柔性聚合物太阳能电池[J]. 应用化学, 2018, 35 (1): 109-115.
- ZHANG X Q, WU J, WANG J T, *et al.* Silver nanowire composite transparent electrode based flexible polymer solar cells [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2018, 35(1): 109-115. (in Chinese)
- [11] LIU X X, WEGENER M, POLSTER S, *et al.* Materials integration for printed zinc oxide thin-film transistors: engineering of a fully-printed semiconductor/contact scheme [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(3): 214-218.
- [12] ANDO E, MIYAZAKI M. Moisture degradation mechanism of silver-based low-emissivity coatings [J]. *Thin Solid Films*, 1999, 351(1/2): 308-312.
- [13] ZUO R Z, LI L T, GUI Z L. Influence of silver migration on dielectric properties and reliability of relaxor based MLCCs [J]. *Ceramics International*, 2000, 26(6): 673-676.
- [14] BERGERON V, BONN D, MARTIN J Y, *et al.* Controlling droplet deposition with polymer additives [J]. *Nature*, 2000, 405(6788): 772-775.
- [15] XU H, LUO D X, XU M, *et al.* 20.4L: A flexible AMOLED display on PEN substrate driven by oxide thin-film transistors [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2014, 45(1): 260-262.
- [16] LI Y Z, LAN L F, SUN S, *et al.* All inkjet-printed metal-oxide thin-film transistor array with good stability and uniformity using surface-energy patterns [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(9): 8194-8200.
- [17] 董承远. 薄膜晶体管原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- DONG C Y. *Principles and Applications of Thin Film Transistors* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese)
- [18] 曹丽娟. 全溶液加工量子点电致发光器件的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- CAO L J. All-solution processed quantum dots light-emitting diodes [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [19] LEE B R, JUNG E D, NAM Y S, *et al.* Amine-based polar solvent treatment for highly efficient inverted polymer solar cells [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(3): 494-500.

- [20] TAI Y H, CHIU H L, CHOU L S. The deterioration of a-IGZO TFTs owing to the copper diffusion after the process of the source/drain metal formation [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2012, 159(5): J200.
- [21] HONG G R, LEE S S, PARK H J, *et al.* Unraveling the issue of Ag migration in printable source/drain electrodes compatible with versatile solution-processed oxide semiconductors for printed thin-film transistor applications [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(16): 14058-14066.
- [22] WEAVER J F, HOFLUND G B. Surface characterization study of the thermal decomposition of AgO [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1994, 98(34): 8519-8524.
- [23] SON G C, CHEE S S, JUN J H, *et al.* Chemically functionalized, well-dispersed carbon nanotubes in lithium-doped zinc oxide for low-cost, high-performance thin-film transistors [J]. *Small*, 2016, 12(14): 1859-1865.
- [24] DAI M K, LIAN J T, LIN T Y, *et al.* High-performance transparent and flexible inorganic thin film transistors: a facile integration of graphenenanosheets and amorphous InGaZnO [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2013, 1(33): 5064-5071.
- [25] MEIR Y. Percolation-type description of the metal-insulator transition in two dimensions [J]. *Physical Review Letters*, 1999, 83(17): 3506-3509.

作者简介:



兰林锋(1983—),男,福建武平人,研究员,2010年于华南理工大学获得博士学位,主要从事薄膜晶体管、氧化物半导体材料、印刷电子以及柔性电子的研究。E-mail:lanlinfeng@scut.edu.cn