

文章编号:1007-2780(2016)04-0375-05

# 非晶铟镓锌氧薄膜晶体管银/钛源漏电极的研究

吴 崎,许 玲,董承远\*

(上海交通大学 电子工程系 TFT-LCD 关键材料及技术国家工程实验室,上海 200240)

**摘要:**为了适应大尺寸高分辨率显示的技术需求,研究并开发用于非晶铟镓锌氧(a-IGZO)薄膜晶体管(TFT)阵列的低电阻电极非常关键。本文采用磁控溅射制备的金属银为源漏电极,设计并制作了底栅结构的 a-IGZO TFT 器件。实验发现,具有单层银源漏电极的器件电学特性较差,这是因为银与 a-IGZO 之间不能形成良好的欧姆接触。另一方面,通过增加钛中间层而形成的 Ag/Ti 电极在保持低电阻的同时能够有效阻止银原子扩散并与 a-IGZO 形成较好的接触状态。最终制备的以 Ag/Ti 为源漏电极的 a-IGZO TFT 具有明显改善的电学特性,场效应迁移率为  $1.73\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,亚阈值摆幅  $2.8\text{ V}/(^{\circ})$ ,开关比为  $2\times 10^7$ ,由此证明了磁控溅射制备的银电极具有应用于非晶氧化物薄膜晶体管的实际潜力。

**关键词:**非晶铟镓锌氧;薄膜晶体管;银电极;磁控溅射;平板显示

**中图分类号:**TN 321+5      **文献标识码:**A      **doi:**10.3788/YJYXS20163104.0375

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

WU Qi,XU Ling, DONG Cheng-yuan\*

*(Department of Electronic Engineering and National Engineering Lab of TFT-LCD Materials and Technologies, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)*

**Abstract:** With the increasing requirements from large-size and high-resolution flat panel displays (FPDs), it is necessary to investigate and develop the low-resistance electrodes for amorphous InGaZnO (a-IGZO) thin film transistors (TFTs). In this study, the inverted staggered a-IGZO TFTs using Ag as source/drain (S/D) electrodes were designed and fabricated by magnetron sputtering. It was found that the a-IGZO TFTs with single-layer Ag S/D electrodes exhibited poor performance due to the bad contact between Ag and a-IGZO. On the other hand, the Ag/Ti electrodes, formed by inserting a Ti film between Ag and a-IGZO, could effectively prevent Ag diffusion and form good contact with the active layers. In fact, the a-IGZO TFTs with Ag/Ti electrodes showed much better performance (field effect mobility of  $1.73\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , subthreshold swing of  $2.8\text{ V}/(^{\circ})$ , and on-off current ratio of  $2\times 10^7$ ) than those of the a-IGZO TFTs with single-layer Ag source/drain electrodes, proving that Ag electrodes could be potentially used in amorphous oxide TFTs.

**Key words:** a-IGZO; TFTs; Ag electrodes; magnetron sputtering; FPDs

收稿日期:2015-12-17;修订日期:2015-12-31.  
基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 61474075);国家自然科学基金重点项目(No. 61136004)  
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61474075;No. 61136004)  
\* 通信联系人,E-mail:cydong@sjtu.edu.cn

1 引 言

薄膜晶体管(TFT)是平板显示(FPD)产业的核心部件,针对它的研究和开发具有非常重要的科学意义和工程价值。近年来,以非晶铟镓锌氧化物(a-IGZO)为代表的非晶氧化物半导体(AOS)因具有高载流子迁移率、可低温沉积、可大面积制备、均匀性和透明性好等特点,而引起了学术界和工业界的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。目前普遍认为 a-IGZO 可能成为下一代 TFT 器件的有源层材料,但 a-IGZO TFT 的制备工艺仍有待完善。例如,目前 TFT 的实际生产中多采用铝合金电极,但是随着人们对 FPD 的尺寸和分辨率的要求越来越高,研究并开发具有更好导电特性的 TFT 电极势在必行。因此,降低 a-IGZO TFT 金属电极的电阻对进一步提升由其驱动的平板显示器件的尺寸和解析度具有重大意义。当然,增大电极的横截面积也可以降低其电阻值,但是该方法受到很多因素诸如开口率或台阶覆盖性等问题的制约。相比较而言,选用低电阻率金属,如铜、银等作为电极材料则更切实可行。目前已经有了一些关于 a-IGZO TFT 铜电极研究的报道<sup>[4-5]</sup>,但银电极方面的研究却鲜有报道,特别是采用传统真空方法(如磁控溅射等)制备的银电极在 a-IGZO TFT 中的应用则几乎未见报道。在 FPD 的实际生产中电极薄膜的沉积通常都采用磁控溅射方法,因此研究并开发采用磁控溅射方法制备的低电阻电极对 a-IGZO TFT 的量产更具有实际参考价值。本论文以实验为基础并结合理论分析,针对由磁控溅射制备的低阻值银电极应用于 a-IGZO TFT 源漏电极时涉及到的技术问题开展了深入的研究,最终设计并制备了采用低阻值 Ag/Ti 源漏电极的 a-IGZO TFT 器件。

2 实 验

本研究中的 a-IGZO TFT 制作于重掺杂硅片( $n^{++}$  Si)衬底上,采用栅极在下、源漏极在上的底栅错排结构,如图 1 所示。硅衬底兼作栅电极,通过热氧化的方法在硅表面生长厚度约为 300 nm 的氧化硅作为栅绝缘层。在室温条件下,使用磁控溅射方法沉积有源层 a-IGZO 和源漏极 Ag (及

Ti)薄膜,所用靶材分别为 IGZO 靶(In : Ga : Zn = 1 : 1 : 1)、高纯 Ag 靶(及 Ti 靶),成膜工艺条件如表 1 所示。其中,Ag/Ti 电极使用磁控溅射系统直流溅射成膜,金属钛和银在同一腔室内连续溅射,这样可以保证溅射成膜环境清洁稳定;两种金属使用相同溅射功率,溅射过程中功率可调;大功率成膜速度快,但容易对下层造成等离子损伤(Plasma damage)。就源漏电极薄膜沉积而言,因为此时 a-IGZO 有源层已经成膜,所以需要保护背沟道不受等离子损伤,因此最终选用较小的成膜功率(直流溅射 50 W)进行成膜。最终,将制备完成的 TFT 器件在 400 ℃的氮气环境中退火处理 1 h。有源层和源漏电极层通过成膜时采用金属掩膜遮挡而形成图案,晶体管沟道的长度和宽度分别为 275  $\mu\text{m}$  和 1 000  $\mu\text{m}$ 。TFT 器件的电学性能在室温下采用 Keithley 4 200 半导体参数测试系统进行测试,器件参数提取方法见文献[6]。TFT 器件的断面样品制备和观察采用 Zeiss Auriga 场发射电子束/聚焦离子束双束系统进行。

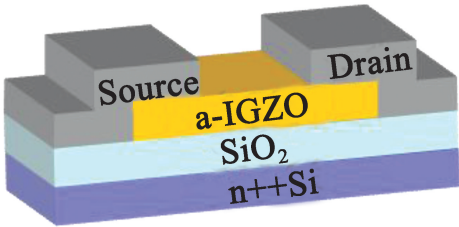


图 1 本研究采用的 a-IGZO TFT 结构示意图  
Fig. 1 Schematic cross section of the a-IGZO TFTs used in this study

表 1 器件制备采用的成膜工艺参数  
Tab. 1 Processing parameters used for the films' deposition

| 材料    | 功率/<br>W | 氩气/氧气/<br>(mL · min <sup>-1</sup> ) | 气压/Pa                 | 厚度/<br>nm |
|-------|----------|-------------------------------------|-----------------------|-----------|
| IGZO  | 60 (RF)  | 30/1                                | $3.99 \times 10^{-1}$ | 50        |
| Ag    | 50 (DC)  | 40/0                                | $6.65 \times 10^{-1}$ | 100       |
| Ag/Ti | 50 (DC)  | 40/0                                | $6.65 \times 10^{-1}$ | 80/20     |

3 结果与讨论

采用上述工艺制备的单层银电极 a-IGZO

TFT 器件转移特性曲线如图 2 所示。单层银电极 a-IGZO TFT 虽然出现了较为明显的转移特性,但是开态电流( $I_{on}$ )较小,只有  $10^{-5}$  A 左右,阈值电压( $V_{th}$ )过大( $> 20$  V),场效应迁移率( $\mu_{FE}$ )只有  $0.77\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。由此可见,单层银电极器件的电学特性很不理想,这是因为银源漏电极与 a-IGZO 有源层之间并没有形成有效的欧姆接触的缘故;因为接触电阻过大,所以加在源漏电极间的电压大部分损失在接触电阻上,从而恶化了 TFT 器件的电学性能。根据报道,在器件退火时金属银会与 a-IGZO 有源层中的氧元素结合并形成金属银氧化物( $\text{AgO}_x$ )<sup>[7]</sup>,而  $\text{AgO}_x$  电阻率在  $10^{-2}\sim 10^8\ \Omega\cdot\text{cm}$  之间,属于绝缘体;这层绝缘的  $\text{AgO}_x$  分布在银与 a-IGZO 有源层之间,阻断银源漏电极与 a-IGZO 有源层的接触,从而导致银电极与 a-IGZO 有源层接触电阻过大。此外,金属银离子的扩散作用非常明显<sup>[8]</sup>。当银电极直接与 a-IGZO 有源层接触时,源漏电极中的银离子很容易通过扩散进入 a-IGZO 有源层;渗透到 a-IGZO 的离子会充当导带下的受主俘获态<sup>[9]</sup>,这也是造成银电极 a-IGZO TFT 场效应迁移率低的一个原因。

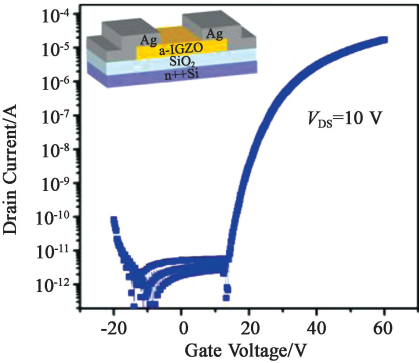


图 2 单层银源漏电极 a-IGZO TFT 的转移特性曲线  
Fig. 2 Transfer curve of the a-IGZO TFTs with single-layer Ag source/drain electrodes

由此可见,金属银与 a-IGZO 有源层直接接触制备 a-IGZO TFT 器件并不可行,因此改善源漏电极与有源层之间的接触特性十分必要。在金属银和 a-IGZO 有源层之间添加薄的夹层是首选方案;如果选择得当,这一薄层既能阻止银离子向下扩散进入 a-IGZO 有源层,又能改善银与 a-IGZO 有源层之间的接触。一些金属氧化物会表现

出半导体特性,最典型的是氧化钛( $\text{TiO}_x$ )<sup>[10]</sup>。根据氧含量的不同, $\text{TiO}_x$  电阻率在  $10^{-4}\ \Omega\cdot\text{cm}$  左右,因为它兼有金属和氧化物的性质,所以经常被选择作为金属和氧化物之间的接触层。通过实验我们发现,直接在银源漏电极成膜之前溅射一层氧化钛来改善接触特性效果并不理想,原因在于直接通过氧化钛靶材溅射成膜的  $\text{TiO}_x$  中氧元素含量高,导体特性不明显;金属银依然直接与大量氧原子接触,容易形成氧化银绝缘层,从而影响接触特性。

另一方面,器件在制备完成前通常会经过退火热处理,而加热过程中不同元素与氧元素结合的自由能有所不同;金属 Ti 的氧元素结合能很低(低于 a-IGZO 中  $\text{In}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}$  以及  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  的结合能量<sup>[11]</sup>),因此 Ti 在退火过程中更容易与 a-IGZO 有源层中的氧元素相结合并形成氧化物,从而在 S/D 电极与有源层之间形成有效的欧姆接触;同时,氧化钛的形成直接阻止了银与 a-IGZO 中氧元素的接触,从根本上抑制了氧化银的形成。基于上述考虑,我们最终设计了用于 a-IGZO TFT 的新型源漏电极—银/钛( $\text{Ag/Ti}$ )结构,如图 3 所示。

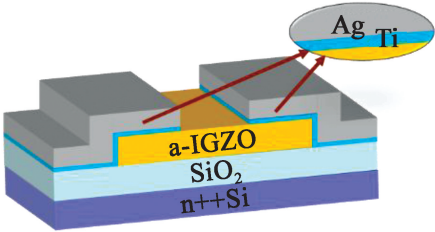


图 3 采用 Ag/Ti 源漏电极的 a-IGZO TFT 结构示意图  
Fig. 3 a-IGZO TFTs with Ag/Ti source/drain electrodes

根据上述讨论,银/钛电极既能改善金属银与 a-IGZO 有源层的接触特性,同时也能阻止银离子的扩散,但其是否能保持单层银电极的低阻值特性还有待考证。为此,我们对银/钛结构电极的电学特性进行了测量和分析;银、钛、银/钛电极薄膜电阻分别使用四探针法进行测量,实验结果如表 2 所示。因为金属钛本身电阻率高,所以真空溅射成膜的金属钛膜电阻很大,但由于 Ag/Ti 电极中主要导电的是银薄膜,所以最终制备的 Ag/Ti 电极薄膜电阻( $0.35\ \Omega/\square$ )较之单层银电极( $0.24\ \Omega/\square$ )增加并不显著,保持了单层银电极的低阻值特性。

表 2 Ag/Ti 电极的基本特性

Tab. 2 Fundamental properties of Ag/Ti electrodes

| 材料    | 厚度/<br>nm | 方块电阻/<br>( $\Omega/\square$ ) | 成膜速率 <sup>a)</sup> /<br>( $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) |
|-------|-----------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Ag    | 100       | 0.24                          | 20                                                            |
| Ti    | 100       | 10.74                         | 4                                                             |
| Ag/Ti | 80/20     | 0.35                          | /                                                             |

<sup>a)</sup> 直流溅射 50 W, 氩气 40 mL/min, 真空度  $6.65 \times 10^{-1}$  Pa

使用上述 Ag/Ti 源漏电极制备的 a-IGZO TFT 器件的转移特性如图 4 所示。显然,通过在银膜和 a-IGZO 有源层之间添加一层薄的金属钛,制备的 a-IGZO TFT 器件较之单层银电极器件在电学性能上有显著改善,如表现出更大的开态电流和更小的阈值电压等。通过分析,我们认为器件特性改善的原因在于在退火过程中钛与 a-IGZO 有源层中的氧元素结合并形成金属钛氧化物( $\text{TiO}_x$ );而  $\text{TiO}_x$  电阻率在  $10^{-4}$  左右,明显低于  $\text{AgO}_x$ ,因此更容易形成低电阻的接触区域。金属钛与 a-IGZO 有源层中的氧元素结合后,相应的 a-IGZO 有源层区域出现了少氧区,这个区域阻值也会减少。我们采用扫描电子显微镜(SEM)观察了金属 Ag/Ti 电极与 a-IGZO 有源层之间的接触状态,如图 5 所示。从图中可以发现金属钛与 a-IGZO 有源层之间形成了较好的接触层  $\text{TiO}_x$ 。

根据图 4 所示的转移特性曲线提取了不同源漏电极 a-IGZO TFT 器件的特性参数,如表 3 所示。我们注意到使用 Ag/Ti 结构源漏电极的 a-IGZO TFT 在所有特性参数上均优于单层银电

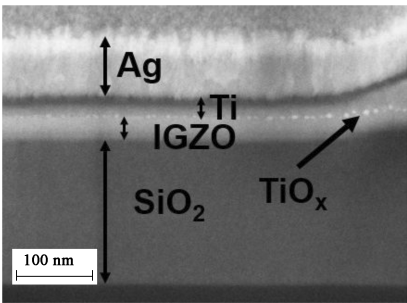


图 5 Ag/Ti 电极与 a-IGZO 有源层接触截面的 SEM 图象

Fig. 5 Cross-sectional SEM images of the interface between Ag/Ti and a-IGZO film

极器件。当然,目前获得的 Ag/Ti 源漏电极 a-IGZO TFT 的器件特性还不是非常理想,这说明实验中采用的制备工艺条件并非最优选择,相关工艺优化研究仍在进行中。

表 3 不同源漏电极 a-IGZO TFT 的特性参数

Tab. 3 Electrical parameters of the a-IGZO TFTs with different S/D electrodes

| TFT 特性参数                                            | 源漏电极            |                 |
|-----------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
|                                                     | Ag              | Ag/Ti           |
| 场效应迁移率<br>( $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ) | 0.44            | 1.73            |
| 亚阈值摆幅<br>$\text{V}/(^{\circ})$                      | 3.1             | 2.8             |
| 阈值电压<br>(V)                                         | 22.8            | 18.5            |
| 开关电流比                                               | $7 \times 10^6$ | $2 \times 10^7$ |

4 结 论

本文设计并制备了采用银/钛源漏电极的 a-IGZO TFT 器件。实验发现,磁控溅射制备的单层银电极直接用于 a-IGZO TFT 的源漏电极会因为与有源层的接触电阻过大而导致器件特性较差。最终设计的 Ag/Ti 源漏电极则具有电阻低、接触特性好和防银原子扩散的优点;以此为源漏电极制备的 a-IGZO TFT 的电学特性得到了明显改善,场效应迁移率为  $1.73 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ,亚阈值摆幅  $2.8 \text{ V}/(^{\circ})$ ,开关电流比为  $2 \times 10^7$ 。本研究证

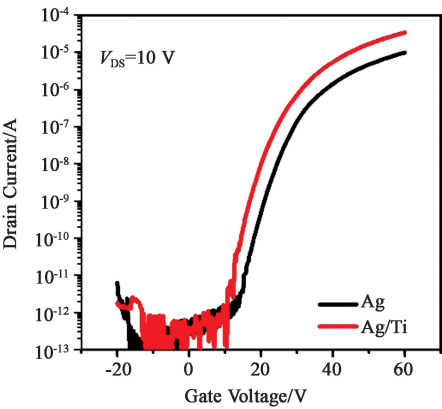


图 4 Ag/Ti 电极 a-IGZO TFT 转移特性

Fig. 4 Transfer curves of the a-IGZO TFTs with Ag/Ti source/drain electrodes

明了磁控溅射制备的银电极具有应用于非晶氧化物薄膜晶体的实际潜力。

## 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] 陈龙龙,张建华,李喜峰,等. 基于柔性PI基底的氧化物IGZO TFT器件工艺及特性研究[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(5): 796-800.  
CHEN L L, ZHANG J H, LI X F, *et al.* Process and properties of oxide IGZO TFT device based on flexible PI substrate [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5): 796-800. (in Chinese)
- [3] 刘翔,薛建设,贾勇,等. 金属氧化物IGZO薄膜晶体管的最新研究进展[J]. *现代显示*, 2010(10): 28-32.  
LIU X, XUE J S, JIA Y, *et al.* The recent research progress of amorphous indium gallium zinc oxide thin film transistors [J]. *Advanced Display*, 2010(10): 28-32. (in Chinese)
- [4] JEONG J, LEE G J, KIM J, *et al.* Electrical characterization of a-InGaZnO thin-film transistors with Cu source/drain electrodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(11): 112109.
- [5] KIM W S, MOON Y K, LEE S, *et al.* Copper source/drain electrode contact resistance effects in amorphous indium-gallium-zinc-oxide thin film transistors [J]. *Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Letters*, 2009, 3(7/8): 239-241.
- [6] SHI J F, DONG C Y, DAI W J, *et al.* The influence of RF power on the electrical properties of sputtered amorphous In-Ga-Zn-O thin films and devices [J]. *Journal of Semiconductors*, 2013, 34(8): 084003-1-084003-5.
- [7] 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.
- [8] NASON T C, YANG G R, PARK K H, *et al.* Study of silver diffusion into Si (111) and SiO<sub>2</sub> at moderate temperatures [J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 70(3): 1392-1396.
- [9] 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-J203.
- [10] MARTIN N, ROUSSELOT C, RONDOT D, *et al.* Microstructure modification of amorphous titanium oxide thin films during annealing treatment [J]. *Thin Solid Films*, 1997, 300(1/2): 113-121.
- [11] YUN P S, NAITO M, KUMAGAI R, *et al.* P-23: the contact properties and TFT structures of a-IGZO TFTs combined with Cu-Mn alloy electrodes [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 1177-1180.

**作者简介:**吴崎(1989—),男,河北蔚县人,硕士,主要从事 a-IGZO TFT 制备工艺的研究。E-mail: wuqi\_sjtu@sjtu.edu.cn

董承远(1971—),男,辽宁沈阳人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事薄膜电子器件与电路的研究。E-mail: cydong@sjtu.edu.cn