

文章编号:1007-2780(2016)06-0558-05

氧分压对铟镓锌氧薄膜晶体管性能影响

孙建明*, 周婷婷, 任庆荣, 胡合合, 陈 宁, 宁 策, 王 路, 刘文渠, 李东升
(京东方科技集团股份有限公司, 北京 100176)

摘要:采用标准的液晶显示屏基板制备工艺制备出铟镓锌氧薄膜晶体管(IGZO-TFT),通过调节 IGZO 薄膜工艺中氧分压,研究不同氧分压对 TFT 器件电学性能的影响。实验结果表明,所有器件都展现出良好的电学特性,随着氧分压从 10% 增加到 50%,TFT 的阈值电压由 0.5 V 增加到 2.2 V,而亚阈值摆幅没有发生变化。在栅极施加 30 V 偏压 3 600 s 后,随着氧分压的增加,阈值电压向正向的漂移量由 1 V 增加到 9 V。经过分析得出高氧分压的 IGZO-TFT 器件中载流子浓度低,建立相同导电能力的沟道时所需要栅极电压会更大,阈值电压会增加。而在金属-绝缘层-半导体(MIS)结构中低载流子浓度会导致有源层能带弯曲的部分包含更多与电子陷阱相同的能态,栅介质层(GI)会俘获更多的电子,造成阈值电压漂移量较大的现象。

关 键 词:铟镓锌氧薄膜晶体管;氧分压;阈值电压漂移;电子积累层

中图分类号:TNT21.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163106.0558

Effect of oxygen partial pressure on the performance of indium gallium zinc oxide thin film transistor

SUN Jian-ming*, ZHOU Ting-ting, REN Qing-rong, HU He-he, CHEN Ning,
NING Ce, WANG Lu, LIU Weng-qu, LI Dong-seng

(BOE Technology Group Co., Limited, Beijing 100176, China)

Abstract: Indium gallium zinc oxide thin film transistors (IGZO-TFT) were fabricated with the standard process of TFT-LCD arrays substrate. The effects of different oxygen partial pressure on IGZO-TFT performance were investigated by adjusting the oxygen partial pressure in IGZO film process. All devices showed good electrical properties. The threshold voltage of TFT was increased from 0.5 V to 2.2 V as the oxygen partial pressure was increased from 10% to 50%, whereas the sub-threshold swing had not changed. Applying a positive gate bias of 30 V for 3 600 s, with the increase of the oxygen partial pressure, the positive shift of threshold voltage of IGZO-TFT was increased from 1 V to 9 V. The carrier concentration in TFT with higher oxygen partial pressure is lower. So it requires higher gate voltage for building the channel with the same conductive capability, and therefore the threshold voltage will be higher. In the Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) structure, the lower carrier concentration leads electron accumulation layer to be thicker. There will be more energy states in band bending part of active layer which are the same as electron traps of gate insulator (GI). Consequently,

收稿日期:2016-01-15;修订日期:2016-02-10.

* 通信联系人, E-mail: sunjianming@boe.com.cn

it is possible that more electrons are captured by GI, and shift of threshold voltage will be greater.

Key words: indium gallium zinc oxide thin film transistor; oxygen partial pressure; shift of threshold voltage; electron accumulation layer

1 引言

目前,在传统显示领域 TFT 有源层材料主要为 a-Si, LTPS, IGZO。a-Si 材料基板工艺制程相对简单,但是载流子迁移率较低,在高分辨,窄边框和低功耗的液晶显示发展趋势中逐渐失去竞争优势,更难以在 OLED 中应用。LTPS 载流子迁移率很高,但由于准分子激光退火工艺的限制,目前只适用于中小尺寸面板。而 IGZO 不仅迁移率较高^[1],而且制备工艺与 a-Si 工艺类似,已经被应用到 TFT-LCD 和大尺寸 OLED 显示领域。但 IGZO-TFT 的稳定性尤其是 GOA(Gate Driver On Array)区 TFT 稳定性一直是限制氧化物面板进行量产的关键因素,至今为止人们对这方面做了大量研究。阈值电压漂移基本可以归结于制备工艺过程氢元素会在栅介质(GI)层引入缺陷能级^[2],处于界面处陷阱对载流子俘获^[3],背沟道氧气和水分子存在吸附和解析过程^[4-6]。因此氧化物薄膜工艺条件对 TFT 器件的稳定性有重要影响^[7]。本文在实验的基础上,分析了不同氧分压制备工艺对 IGZO-TFT 电学性能影响的机理。

2 实验

以标准的基板制备工艺制备出刻蚀阻挡层(ESL)结构的 TFT 器件,器件的结构如图 1 所示,沟道的宽长比 $W/L=18\ \mu\text{m}/12\ \mu\text{m}$ 。玻璃尺寸为 $370\ \text{mm}\times 470\ \text{mm}$,以直流溅射制备 Mo(220 nm)作为 Gate 层,以 PECVD 制备 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ (60 nm/250 nm)作为 GI 层,以直流溅射工艺制备 a-IGZO(40 nm)作为 TFT 有源层,IGZO 靶材的成分: $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Ga}_2\text{O}_3 : \text{ZnO}=1:1:1$ 。在制备工艺中氧分压为 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%。以 PECVD 工艺制备 SiO_2 (100 nm)作为 ESL 层,再以 Sputter 工艺制备 Mo/AlNd/Mo(30 nm/300 nm/80 nm)作为源漏电极(SD)层,其中 Gate, Active, SD 层刻蚀采用湿法

刻蚀工艺,而 GI 层和 ESL 层采用干刻工艺。制备器件在 $300\ ^\circ\text{C}$, 空气气氛退火 1 h。

使用半导体测试仪 Agilent4156C 测试器件 I - V 曲线,在退火以后立刻进行测试。在器件整体完成 5 d 以后进行 stress 测试,以半导体测试仪 AgilentB1500A 测试器件的 stress 性能。为保证测试准确性,在测试时分别选取每片玻璃的同一个位置的器件。所有电学性能的测试都保证在空气,暗室,室温条件下进行。

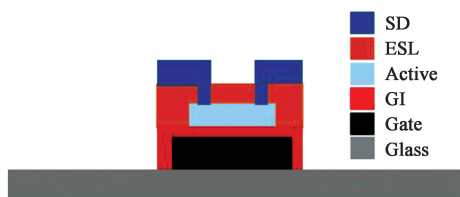


图1 IGZO-TFT 器件的结构示意图

Fig.1 Sketch map of IGZO-TFT structure

3 结果与讨论

在半导体领域阈值电压 V_{th} 的求法为在漏源极电压 V_{ds} 极小情况,利用式(1)^[8],在 I_D - V_G 曲线中采用外推的方法得到。 I_D 为源漏极电流, V_G 为栅极电压, C_{ox} 为单位面积栅极电容, μ 为载流子迁移率。而在显示领域,根据设计需要,某一 I_D 值对应的 V_G 定义为 V_{th} 。

$$I_D = \frac{W\mu}{L} C_{ox} (V_G - V_{th} - \frac{V_{ds}}{2}) V_{ds} \quad (1)$$

图2所示在不同氧分压制备工艺条件下的 TFT 器件转移特性曲线,源漏极之间电压 $V_{ds}=15\ \text{V}$,栅极电压变化范围为: $-30\ \text{V}\sim 30\ \text{V}$ 。从图2(a)中可以看到所有的器件都展现出良好的电学特性。所有器件亚阈值摆幅 SS 没有明显不同。定义在 $I_D=1\times 10^{-8}\ \text{A}$ 时所对应的栅极电压为阈值电压 V_{th} ,在图2中发现随着氧分压的增加 V_{th} 逐渐增大,在 10% 氧分压时阈值电压为 0.5 V, 50% 分压时阈值电压达到 2.2 V。由于 SS 没有发生变化,可见不同氧分压不会引起界面态密度的变化。引起阈值电压变化的原因在于载流子浓度的变化。Suresh A^[9]等曾报道 IGZO 薄膜随着

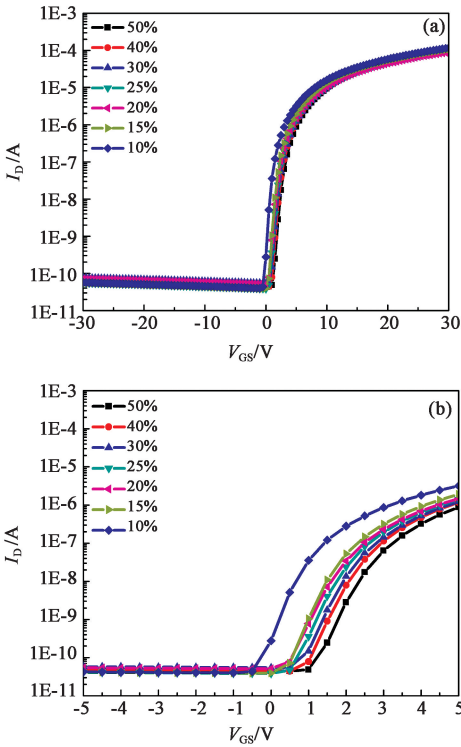


图 2 不同氧分压 TFT 转移特性曲线

Fig. 2 Transfer characteristic curves of TFT with different oxygen partial pressure

氧分压的增加载流子浓度会逐渐降低。IGZO-TFT 工作在电子积累层,沟道的导电能力和沟道中面电荷密度 Q 相关, Q 越大沟道导电能力越强^[8],在 TFT 的 MIS 结构中 Q 取决于式(2)^[10]其中 q 为电子的电荷量, N_i 为载流子浓度, V_s 为半导体表面电势, K_0 玻尔兹曼常数, ϵ_{rs} 为 IGZO 相对介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, T 为温度。

$$Q=N_i^{\frac{1}{2}}({}^2\epsilon_{rs}\epsilon_0K_0T)^{\frac{1}{2}}\exp(\frac{qV_s}{2k_0T})=N_i^{\frac{1}{2}}A\exp(\frac{qV_s}{2k_0T}), \tag{2}$$

而 V_s 和 V_G 之间的关系如式(3):

$$V_G=\frac{Q}{C_0}+V_s, \tag{3}$$

将(2)式代入到式(3)中

$$V_G=\frac{N_i^{\frac{1}{2}}A\exp(\frac{qV_s}{2k_0T})}{C_0}+V_s. \tag{4}$$

两边同时求微分得:

$$\frac{\partial V_s}{\partial N_i}=\frac{-\frac{1}{2}N_i^{-1}N_i^{\frac{1}{2}}A\exp(\frac{qV_s}{2k_0T})}{C_0+\frac{q}{2k_0T}N_i^{\frac{1}{2}}A\exp(\frac{qV_s}{2k_0T})}, \tag{5}$$

$$\frac{\partial V_s}{\partial N_i}=\frac{-\frac{1}{2}N_i^{-1}Q}{C_0+\frac{q}{2k_0T}Q}. \tag{6}$$

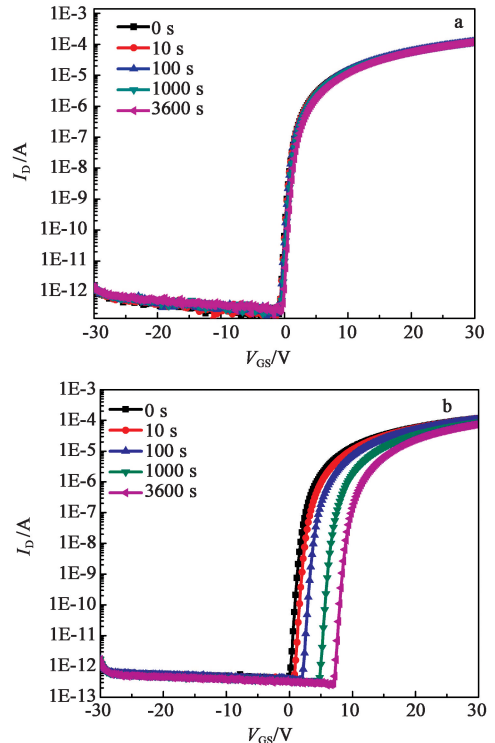
从式(6)中可见,其值小于 0,表明在同等栅极电压下随着 N_i 增加, V_s 会出现减小的趋势。结合式(3)可以看出, Q 有增大的趋势,所以达到相同 Q 条件下,载流子浓度大的器件所需要的 V_G 会小一些。

图 3 为在栅极加正偏压的条件下,一定时间后器件的转移特性曲线,在栅极所加偏压为 30 V,测试时 V_{ds} 为 15 V。如图 3(a)所示时间为 3 600 s 时,氧分压为 10% 的 TFT 器件 V_{th} 漂移值 ΔV_{th} 为 1 V 左右。图 3(b)所示在 50% 的条件下 ΔV_{th} 为 9 V 左右。而两种器件的 SS 并没有发生变化,表明 stress 后在界面并没有产生新的界面态,而造成漂移主要是借助隧道效应界面俘获电子^[11]。图 3(c)中可以看出,随着 stress 时间的增加, ΔV_{th} 逐渐增加,Qian 等^[12]曾报道,阈值电压随时间变化如式(7)

$$\Delta V_{th}=\Delta V_{th0}\{1-\exp[-(t/\tau)^\beta]\}, \tag{7}$$

$$\tau=\tau_0\exp(E_\tau/k_BT), \tag{8}$$

其中: ΔV_{th0} 为无限时间的阈值电压漂移量, τ 为时间常数, β 为指数常数, E_τ 为平均能量势垒, τ_0 为初始时间常数。氧分压越低 E_τ 越小^[12],电子应越容易注入到 GI 层,但是实验结果如图 3(c)所示,



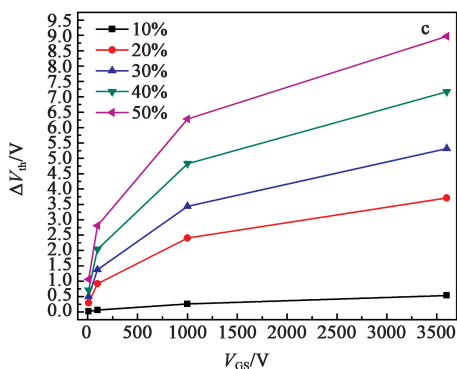


图3 栅极加30 V电压10 s,100 s,1 000 s,3 600 s后的转移特性曲线。(a)10%分压,(b)50%分压,(c)不同氧分压TFT器件 ΔV_{th} 随所加偏压时间变化曲线。

Fig. 3 Gate bias is 30 V, the TFT transfer characteristic curves after 10 s, 100 s, 1 000 s, 3 600 s, (a) 10% oxygen partial pressure, (b) 50% oxygen partial pressure. (c) Shift of threshold voltage of TFT device with different partial pressure and stress time.

加相同时间 stress 后,随着氧分压的增加 ΔV_{th} 逐渐增大,用上述理论无法解释该现象。

ΔV_{th} 的变化与电子积累层厚度变化相关。如图4所示 IGZO-TFT 工作时界面的能带图,当加栅极电压 V_G 时,形成电子的积累层,能带弯曲的部分所对应的能态都有可能被电子占据,如果能态与 GI 层中电子陷阱能态相同就有可能发生隧道效应。如果能带弯曲部分包含更多的能态数,就意味着与 GI 层电子陷阱相同能态数会更多,会有更多的电子有可能被俘获。在 IGZO 中,起到施主作用的是氧空位,制备过程中随着氧分压的增加,载流子浓度会逐渐降低^[9],在加栅极偏压 V_G 后,IGZO 的空间电荷层中的电势会满足泊松方程:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_{rs} \epsilon_0}, \quad (9)$$

其中: $\rho(x)$ 为空间电荷密度,IGZO 为 n 型可以认为 $\rho(x) = N_x$, N_x 为 x 处的载流子浓度,采用经典统计分布, x 点的电势为 V_x , x 为垂直于界面的坐标,以 IGZO 与 GI 接触点为原点。则 N_x 为:

$$N_x = N_i \exp\left(\frac{qV_x}{k_0 T}\right). \quad (10)$$

结合式(9)可以看出载流子浓度越高则能带

弯曲的曲率越大,能带的弯曲程度越大,在 IGZO 中发生能带弯曲的距离会越小,能带弯曲部分所包含的能态数会减少。

如图4所示,虽然高分压 IGZO 能带弯曲部分电子数会变小,但是所包含的能态数会增加,能够发生隧道效应的电子总数可能会增加。阈值电压漂移量会相对增大。

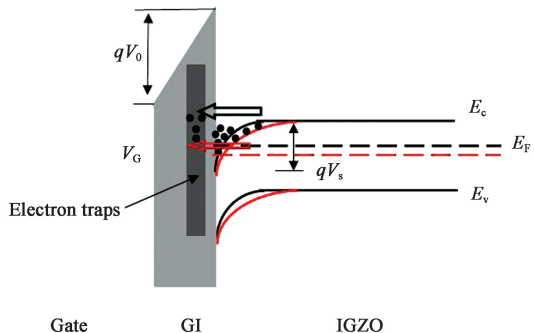


图4 IGZO-TFT 工作时界面的能带图。 E_c 为导带底, E_v 为价带顶, E_f 为费米能级(黑色为高载流子浓度,红色为低载流子浓度), V_s 为半导体表面电势, V_0 为 GI 层电势变化, V_G 为栅极电压。

Fig. 4 Energy band of IGZO-TFT interface when the device is working. E_c is the conduction band minimum, and E_v is the valence band maximum. E_f is the Fermi level (the black curve is E_f at high carrier concentration, and the red curve is E_f at low carrier concentration), V_s is surface potential, V_0 is the change of GI potential, V_G is Gate voltage.

可以预测当在光照的条件下,同样会引起载流子浓度的增加,施加正偏压后的 ΔV_{th} 相对于无光照条件下会有明显减少的趋势。

4 结 论

以标准的基板制备工艺制备出 ESL 结构的 TFT 器件,通过对 IGZO 薄膜工艺中氧分压的调节,制备出不同电学性能的 TFT 器件。随着氧分压的增加,阈值电压逐渐增大,因为高氧分压工艺时,薄膜载流子浓度低,达到同等导电能力所需的栅极电压会更高。在加相同时间正向偏压条件下,随着氧分压的增加阈值电压的漂移量会增大,原因在于氧分压增加会增加 GI 层捕获电子的数量。

参 考 文 献:

- [1] NOMURA K, HIROMICHI O, AKIHIRO T, *et al.* Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors [J]. *Nature*, 2004, 432(7016): 488-492.
- [2] TSUBUKU M, WATANABE R, ISHIHARA N, *et al.* 16. 1: Negative-Bias photo degradation mechanism in In-GaZnO TFT [J]. *Sid Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 166-169.
- [3] KAMIYA T, NOMURA K, HOSONO H. TOPICAL REVIEW: Present status of amorphous In-Ga-Zn-O thin-film transistors [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2010, 11(4): 044305.
- [4] KANG D H, 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.
- [5] PARK J S, JEONG J K, CHUNG H J, *et al.* Electronic transport properties of amorphous indium-gallium-zinc oxide semiconductor upon exposure to water [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(7): 072104.
- [6] JEONG J K, YANG H W, JEONG J H, *et al.* Origin of threshold voltage instability in indium-gallium-zinc oxide thin film transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12):123508.
- [7] NOMURA K, KAMIYA T, OHTA H, *et al.* Defect passivation and homogenization of amorphous oxide thin-film transistor by wet O₂ annealing [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(19): 192107.
- [8] 施敏, 伍国珏. 半导体器件物理[M]. 耿莉, 张瑞智, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2008: 238-239.
SZE S M, NG K K. *Physics of Semiconductor Devices* [M]. GENG L, ZHANG R Z, trans. Xi'an: Xi'an Jiao-tong University Press, 2008: 238-239. (in Chinese)
- [9] SURESH A, GOLLAKOTA P, WELLENIUS P, *et al.* Transparent, high mobility InGaZnO thin films deposited by PLD [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(7): 1326-1329.
- [10] 刘恩科. 半导体物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 213-214.
LIU E K. *The Physics of Semiconductors* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 213-214. (in Chinese)
- [11] SURESH A, MUTH J F. Bias stress stability of indium gallium zinc oxide channel based transparent thin film transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(3): 033502.
- [12] QIAN H M, YU, LU H, *et al.* Temperature-dependent bias-stress-induced electrical instability of amorphous indium-gallium-zinc-oxide thin-film transistors [J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(7): 077307.

作者简介: 孙建明(1989—), 男, 河北承德人, 硕士, 研究员, 主要从事氧化物薄膜晶体管方面研究。E-mail: sunjianming@boe.com.cn