

DOI: 10.7652/xjtuxb201512001

低温增强型非晶铟镓锌氧薄膜晶体管特性研究

李远洁^{1,2}, 江凯^{1,2}, 刘子龙¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学固态照明工程研究中心, 710049, 西安)

摘要: 在室温下利用射频磁控溅射沉积非晶铟镓锌氧化物(a-IGZO)薄膜作为有源沟道层,分别制备了顶栅和底栅结构的薄膜晶体管(a-IGZO-TFTs)原型器件,同时研究了沟道层生长参数及后退火工艺对器件特性的影响。研究及实验结果表明:当增加底栅结构 a-IGZO-TFTs 器件 IGZO 沟道层氧气流量时,器件输出特性由耗尽型转变为增强型;当沟道宽长比为 120 : 20 时,获得了 4.8×10^5 的开关电流比,亚阈值摆幅为 1.2 V/dec,饱和迁移率达到 $11 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。沟道层氧气流量为 $2 \text{ cm}^3/\text{min}$ 的底栅结构 a-IGZO-TFT 器件在大气中经过 300 °C 退火 30 min 后,器件由耗尽型转变为增强型,获得 4×10^3 的开关电流比。

关键词: 薄膜晶体管;非晶铟镓锌氧化物;输运特性;磁控溅射沉积

中图分类号: TN321.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)12-0001-05

Characteristics Study of Low Temperature Enhanced Amorphous InGaZnO Thin Film Transistors

LI Yuanjie^{1,2}, JIANG Kai^{1,2}, LIU Zilong¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Center of Solid State Lighting Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Transistors with top bottom-gate thin films and a-IGZO as the active channel layers (a-IGZO-TFTs) are developed by using magnetron sputtering deposition at room temperature. The characteristics of the a-IGZO-TFTs are investigated with regard to oxygen flow rate and post-annealing process. The output characteristics of the bottom-gate a-IGZO-TFTs convert from depletion to enhancement when the oxygen flow rate increases during deposition of the a-IGZO active layer. The a-IGZO-TFTs with a channel width/length ratio of 120 : 20 show good electrical properties with an on/off current ratio of 4.8×10^5 , a subthreshold swing of 1.21 V/dec and a saturation mobility of $11 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. After the a-IGZO-TFTs with active layer deposited at $2 \text{ cm}^3/\text{min}$ oxygen flow rate are annealed at 300 °C in air for 30 min, the devices show good enhancement characteristics with on/off current ratio of 4×10^3 .

Keywords: thin film transistors; amorphous indium gallium zinc oxide; transport properties; magnetron sputtering deposition

未来显示技术正朝向发展基于可弯曲衬底的柔性透明显示技术,这要求作为有源显示关键驱动器

件的薄膜晶体管(thin film transistor, TFT)中的沟道层具有大面积低温制备和高可见光透过率的性

收稿日期: 2015-04-23。 作者简介: 李远洁(1974—),女,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10904121);陕西省自然科学基金资助项目(2015JM6281);教育部回国留学人员启动基金资助项目(10 回国基金 11)。

网络出版时间: 2015-10-03 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151003.1919.006.html>

能。因此,目前薄膜晶体管沟道层材料已由传统非晶硅(a-Si)转向非晶态 InZnO (IZO) 及 InGaZnO (IGZO)等氧化物半导体薄膜材料^[1-3]。相比于 a-Si-TFT,基于非晶氧化物半导体沟道层的 IGZO-TFT 具有可室温制备、高迁移率、高可见光透过率以及大面积均匀性良好等优点,推动了柔性透明显示技术的发展^[4-6]。

2004 年东京理工大学 Nomura 教授小组首次在柔性衬底上成功制备了非晶 IGZO 沟道层的透明 TFT,获得 $6\sim 9\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 的饱和迁移率,已达到主流显示技术的驱动性能要求^[7]。此后,Wu Hung-Chi 等人报道了基于玻璃衬底的非晶 IGZO-TFT,经快速退火处理之后,获得了 3×10^6 的器件开关电流比,饱和迁移率达到 $8.3\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,亚阈值摆幅达到 0.44 V/dec ^[8]。国内上海大学李喜峰小组对 IGZO-TFT 光照稳定性进行了系统研究,发现白光对 IGZO-TFT 器件输出特性影响很小,因而可用于透明显示驱动器件^[9]。目前,基于非晶氧化物 TFT 器件介质层材料的选择、沟道层工艺参数及厚度控制已成为影响 TFT 器件稳定性的瓶颈问题^[10-15],调控并优化非晶 IGZO 沟道层制备工艺参数,对获得性能稳定的 IGZO-TFT 驱动阵列具有关键和决定性的研究意义。

本文利用射频磁控溅射法在室温石英导电玻璃衬底上分别制备了以非晶 IGZO 作为沟道层的底栅和顶栅结构的 TFT 原型器件,通过系统调控 IGZO 沟道层制备工艺中的氧气流量、后处理退火工艺以及 TFT 沟道宽长比,获得了增强型 IGZO-TFT 器件,并分析和讨论了 IGZO 薄膜缺陷理论模型及对 IGZO-TFT 器件性能的影响机制。

1 实验

室温下利用射频磁控溅射法在石英玻璃衬底上生长了非晶 IGZO 薄膜,沉积过程中 IGZO 靶材(成分为 $m(\text{In}_2\text{O}_3):m(\text{Ga}_2\text{O}_3):m(\text{ZnO})=1:1:2$)的溅射功率为 100 W ,分别制备了 IGZO 沟道层氧气流量从 0 变化到 $5\text{ cm}^3/\text{min}$ 的顶栅和底栅结构 IGZO-TFT 原型器件。

制备顶栅结构 TFT 时,首先采用光刻腐蚀工艺形成 ITO 源漏电极,然后利用电子束蒸发金属 Al 作为栅极电极,再利用磁控溅射沉积 100 nm 非晶 IGZO 层作为有源沟道层,接着采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)法生长非晶 SiO_2 层作为栅介电层,最后腐蚀定义出 TFT 器件沟道和栅结

构。底栅结构 TFT 器件则采用 Ti 金属作为源漏电极。顶栅和底栅 IGZO-TFT 器件结构示意图如图 1 所示,器件的光学显微镜俯视图如图 2 所示。

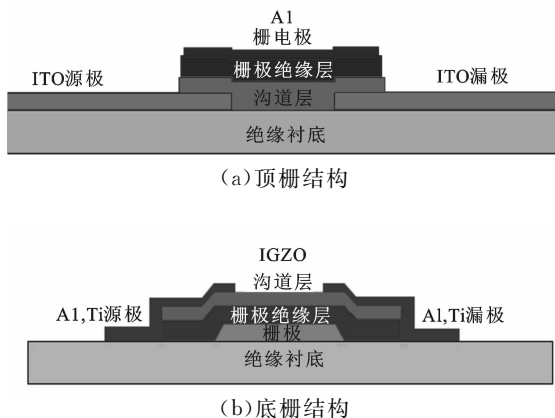


图 1 IGZO-TFT 器件结构示意图

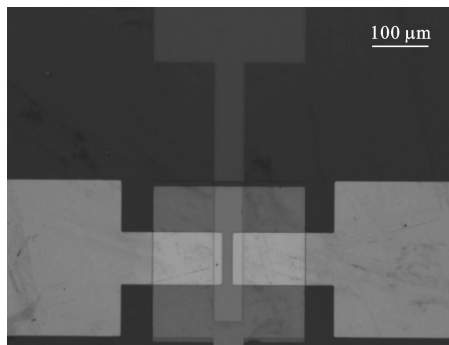


图 2 底栅结构 IGZO-TFT 光学显微镜俯视图

分别采用粉末 X 射线衍射仪(德国 Bruker D8 Advance)和霍尔效应系统(Lakeshore 7707A)对不同氧气流量下 IGZO 薄膜的晶体结构和电输运性能进行了表征。利用台阶轮廓仪(AMBIOS XP-2)测试薄膜厚度。采用半导体器件测试系统(Keithly 4200)表征 IGZO-TFT 器件的输出和转移特性曲线,测试均在室温无光照条件下进行。利用紫外可见光分光光度计(SHIMADZU U3600)测量 IGZO-TFT 器件在可见光范围内的光透过率。

2 结果与讨论

2.1 氧气流量对顶栅 IGZO-TFT 器件性能的影响

图 3 所示为 X 射线衍射测试结果,在不同氧气流量下制备的 IGZO 薄膜在 2θ 为 32° 附近均呈现出宽衍射峰包,因此当氧气流量变化时,均获得了非晶结构的 IGZO 薄膜。Hosono 等人研究报道了 $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 材料体系中,当 In、Ga、Zn 三者的原子比为 $1:1:1$ 时,三元氧化物 IGZO 呈现非晶结构^[16]。本文研究发现,IGZO 薄膜的非晶结构

只与其元素化学组成有关,而与制备过程中的工艺参数无关。

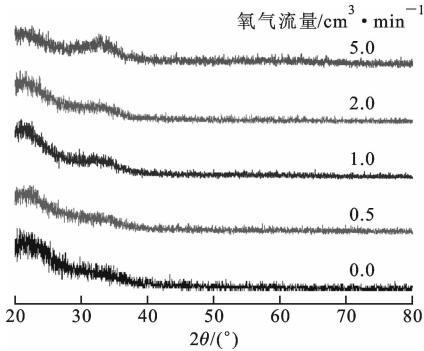


图 3 不同氧气流量下 IGZO 薄膜的 X 射线衍射谱

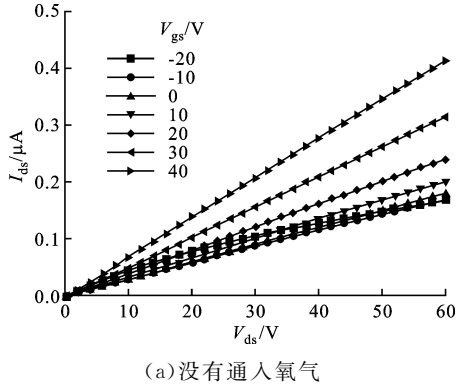
表 1 为不同氧气流量下非晶 IGZO 薄膜的电输运性能参数。由表 1 可见:当氧气流量低于 1.0 cm³/min 时,IGZO 薄膜中电阻率 ρ 随氧气流量的增加而升高,同时电子浓度 n 降低了 2 个数量级;当氧气流量为 0.5 cm³/min 时,霍尔迁移率 μ_{Hall} 达到最大值;当氧气流量高于 1.0 cm³/min 时,IGZO 薄膜的导电性急剧下降,呈现半绝缘性。增加氧气流量造成电阻率显著升高的原因是由于氧空位(V_{O})是非晶 IGZO 薄膜中主要的电子载流子,同时氧空位电离遵循 $V_{\text{O}} \rightarrow V_{\text{O}}^{\cdot\cdot} + 2e^-$ 的机制^[17-18],当增加溅射生长过程中氧气流量时,非晶 IGZO 薄膜中氧空位缺陷浓度降低,从而使电子载流子浓度的降低,呈现出 IGZO 薄膜的电阻率显著升高。

表 1 不同氧气流量下非晶 IGZO 薄膜的电输运性能

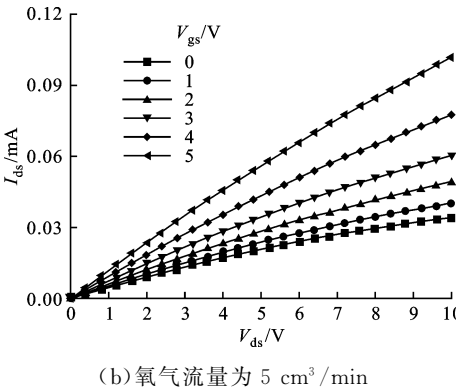
氧气流量/ cm ³ · min ⁻¹	n / cm ⁻³	μ_{Hall} / cm ² · (V · s) ⁻¹	ρ / $\Omega \cdot \text{cm}$
0.0	1.5×10^{19}	4.6	9×10^{-2}
0.5	1.2×10^{19}	11.9	4×10^{-2}
1.0	4.4×10^{17}	10.3	1.4
2.0			
5.0			

在研究非晶 IGZO 薄膜性能的基础之上,本文制备了不同氧气流量下以非晶 IGZO 作为沟道层的顶栅和底栅 TFT 器件。图 4a 和 4b 分别是氧气流量为 0 和 5 cm³/min 时顶栅结构 TFT 器件的输入输出曲线。由图 4 可见:随着 IGZO 沟道层生长过程中氧气流量的增加,器件的栅极电压 $V_{\text{gs}} = 0$ 时的源漏电流 I_{ds} 降低;随着氧气流量的增加,IGZO 薄膜中作为电子施主的氧空位缺陷浓度降低,从而造成沟道层中载流子浓度降低,导致 TFT 源漏电流下

降,并表现为更好的栅控特性和输入饱和特性。



(a)没有通入氧气



(b)氧气流量为 5 cm³/min

图 4 不同氧气流量对顶栅 IGZO-TFT 器件输出特性的影响

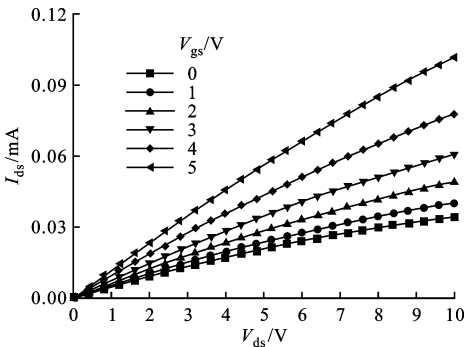
2.2 氧气流量对底栅 IGZO-TFT 器件性能的影响

图 5a 和 5b 分别为溅射过程中氧气流量分别为 2 和 5 cm³/min 时的底栅 IGZO-TFT 输入输出特性曲线,金属 Ti 为源漏电极。测试结果表明,随着 IGZO 沟道层溅射过程中氧气流量的增加,源漏电流 I_{ds} 的饱和性增强,当氧气流量达到 5 cm³/min 时,器件显示了良好的饱和特性。当沟道层氧气流量增加时,沟道层中氧空位缺陷浓度降低,导致 IGZO 沟道中电子浓度减少,使 TFT 器件沟道层电流降低。因此,控制 IGZO 沟道层生长时的氧气流量是调控 TFT 器件沟道层载流子浓度和源漏电流的有效方法,是获得具有良好 IGZO-TFT 器件输出特性的关键工艺。

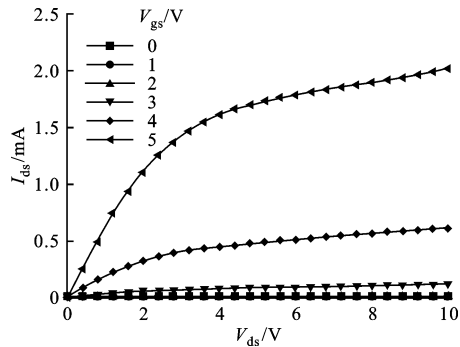
图 6 为 IGZO 沟道层氧气流量为 5 cm³/min 时的顶栅 TFT 器件转移特性和 $I_{\text{ds}}^{1/2}$ - V_{gs} 曲线。从转移特性曲线中可以看出,器件的关态电流小于 10⁻⁹ A。器件工作进入饱和区后,源漏电流 I_{ds} 与栅压 V_{gs} 之间的关系可以表示为

$$I_{\text{ds}}^{1/2} = \left(\frac{W \mu_{\text{sat}} C_{\text{G}}}{2L} \right)^{1/2} (V_{\text{gs}} - V_{\text{th}}) \tag{1}$$

式中: W 、 L 为沟道的宽与长; C_{G} 为栅电容密度(器件栅电容密度为 1.04×10^{-10} F/cm²); V_{th} 为阈值电



(a) 氧气流量为 2 cm³/min



(b) 氧气流量为 5 cm³/min

图 5 不同氧气流量对底栅 IGZO 沟道 TFT 输出特性的影响(沟道宽长比为 120 μm : 20 μm)

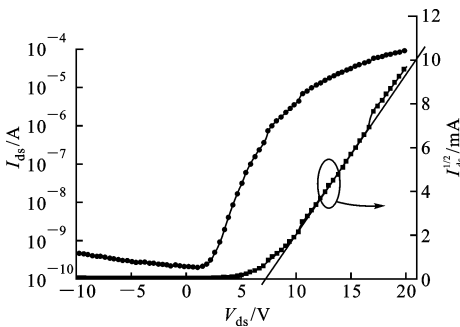


图 6 氧气流量为 5 cm³/min 时底栅 IGZO-TFT 的转移特性曲线

压。从式中可以看出 $I_{ds}^{1/2}$ 与 V_{gs} 呈线性关系,通过 $I_{ds}^{1/2}$ - V_{gs} 关系图可以获得沟道中载流子饱和迁移率 μ_{sat} 和阈值电压 V_{th} 。IGZO-TFT 器件亚阈值摆幅 (SS) 根据下面公式计算获得

$$S = \frac{dV_{gs}}{d(\lg I_{ds})} \tag{2}$$

式中: S 为亚阈值摆幅。

表 2 所示为氧气流量为 5 cm³/min 时不同沟道宽长比的底栅 IGZO-TFT 器件特性参数。根据式 (1) 计算获得 TFT 器件饱和迁移率最大值为 19 cm²/(V · s), 高于 IGZO 薄膜的载流子迁移率 5~

12 cm²/(V · s)。由于 IGZO 沟道层导通后的边缘场效应,沟道电力线向周围扩展,导致 TFT 器件的有效沟道宽度 W_{eff} 大于沟道图形设计宽度 W , Okamura 等人研究发现,当增加氧化物 TFT 器件沟道宽长比时, TFT 器件沟道的有效宽度更趋近于沟道图形设计宽度^[19]。因此,由式 (1) 计算获得的器件饱和迁移率要高于实际值。我们根据该模型对 IGZO-TFT 器件的饱和迁移率进行了修正,修正后的饱和迁移率为 10~11 cm²/(V · s), 接近于非晶 IGZO 的实际霍尔迁移率。

表 2 氧气流量为 5 cm³/min 时 IGZO-TFT 的电学特性参数

宽长比	开关 电流比	$S/V \cdot$ dec^{-1}	$\mu_{sat}/\text{cm}^2 \cdot$ $(V \cdot s)^{-1}$	$\mu'_{sat}/\text{cm}^2 \cdot$ $(V \cdot s)^{-1}$
80/20	3.9×10^5	1.23	19.0	11.0
100/20	4.3×10^5	1.28	17.4	11.2
120/20	4.8×10^5	1.21	15.5	10.5

注: μ'_{sat} 为修正后的饱和迁移率; 开关电流比为开态电流 I_{on} 与关态电流 I_{off} 的比值。

2.3 退火对器件性能的影响

本文还研究了后退火工艺对 IGZO 薄膜以及 IGZO-TFT 器件特性的影响。前期研究结果表明, IGZO 薄膜经过不同温度下的退火处理未改变 IGZO 的非晶结构^[20]。图 7 为沟道层氧气流量为 2 cm³/min 时的 IGZO-TFT 在 300 °C 大气下退火 30 min 后的输入输出曲线。经过大气退火后, IGZO-TFT 器件由耗尽型转变为增强型, 具有良好的栅控和饱和特性, 开关电流比达到 10^3 , 饱和载流子迁移率为 1.66 cm²/(V · s)。后退火工艺有效地降低了 IGZO 沟道中的氧空位浓度, 从而降低了沟道层载流子浓度。

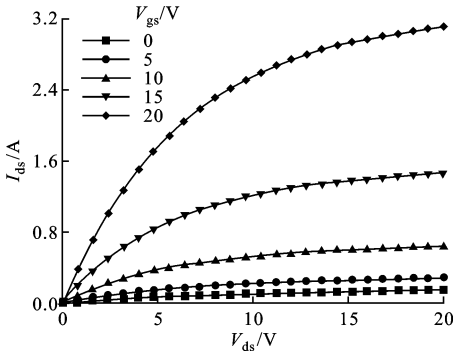


图 7 氧气流量为 2 cm³/min 时的 IGZO-TFT 退火后输出曲线

3 结 论

在室温下玻璃衬底上制备了以非晶 IGZO 作为沟道层的顶栅和底栅结构 IGZO-TFT 器件,通过研究 IGZO 沟道层沉积过程中氧气流量对器件特性的影响,我们发现随着氧气流量的增加,IGZO-TFT 器件由耗尽型转变为增强型。当氧气流量为 $5 \text{ cm}^3/\text{min}$ 时,开关电流比为 4.8×10^5 ,亚阈值摆幅最低为 1.2 V/dec ,阈值电压为 6.8 V 的器件特性。器件饱和迁移率经过对沟道有效宽度的修正后为 $10 \sim 11 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。此外,我们还研究了低温退火工艺对 IGZO-TFT 器件性能的影响, $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 大气退火后 IGZO-TFT 器件由耗尽型转变为增强型。研究表明,通过调控 IGZO 沟道层沉积时氧气流量而控制沟道载流子浓度是获得良好饱和特性增强型 IGZO-TFT 器件的关键因素。

致谢 感谢西安交通大学微电子系张国和副教授参与本文工作的讨论;感谢西安交通大学物理电子与器件教育部重点实验室提供磁控溅射和探针台 TFT 器件测试条件。

参考文献:

- [1] KAMIYA T, NOMURA K, HOSONO H. Present status of amorphous InGaZnO thin film transistors [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2010, 11(4): 044305.
- [2] FORTUNATO E, BARQUINHA P, MARTINS R. Oxide semiconductor thin film transistors: a review of recent advances [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(22): 2945-2986.
- [3] WAGER J. Transparent electronics [J]. *Science*, 2003, 300: 1245-1246.
- [4] XIAO X, SHAO Y, HE X, et al. Back channel anodization amorphous InGaZnO thin film transistors process [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, 36(4): 357-359.
- [5] YABUTA H, SANO M, ABE K, et al. High mobility thin film transistor with amorphous InGaZnO₄ fabricated by room temperature RF-magnetron sputtering [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89: 112123.
- [6] ZHANG B, LI H, ZHANG X, et al. Performance regeneration of InGaZnO transistors with ultra-thin channels [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106: 093506.
- [7] 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: 488-492.
- [8] WU H, CHIEN C. High Performance InGaZnO thin film transistor with InGaZnO source and drain electrodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102: 062103.
- [9] 李喜峰, 信恩龙, 石继锋, 等. 低温透明非晶 IGZO 薄膜晶体管的光照稳定性 [J]. *物理学报*, 2013, 62(10): 108503-1-5.
- LI Xifeng, XIN Enlong, SHI Jifeng, et al. Stability of low-temperature and transparent amorphous InGaZnO thin film transistor under illumination [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(10): 108503.
- [10] NOMURA K, KAMIYA T, HOSONO H, et al. Origins of threshold voltage shifts in room-temperature deposited and annealed a-IGZO thin film transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95: 013502.
- [11] CHOWDHURY M, UM J, MATIVENGA M, et al. Passivation on the stability of amorphous indium-gallium zinc-oxide thin-film transistors under high humidity [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, 62(3): 869-874.
- [12] BARQUINHA P, PIMENTEL A, MARQUES A, et al. Influence of the semiconductor thickness on the electrical properties of transparent TFTs based on indium zinc oxide [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352: 1749-1752.
- [13] CHIANG H, HONG D, PRESLEY R, et al. Processing effects on the stability of amorphous InGaZnO thin film transistors [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354: 2826-2830.
- [14] KONG D, JUNG H, KIM Y, et al. The effect of the active layer thickness on the negative bias stress-induced instability in amorphous InGaZnO thin film transistors [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2011, 32(10): 1388-1390.
- [15] 吴慧贞, 张莹莹, 王雄, 等. In₂O₃ 透明薄膜晶体管的制备及其电学性能研究 [J]. *物理学报*, 2010, 59(7): 5018-5022.
- WU Huizhen, ZHANG Yingying, WANG Xiong, et al. Fabrication and performance of transparent In₂O₃ thin film transistors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(7): 5018-5022.

(下转第 18 页)