

# 高迁移率非晶铟镓锌氧化物薄膜晶体管的制备与特性研究\*

李帅帅 梁朝旭 王雪霞 李延辉 宋淑梅 辛艳青 杨田林†

(山东大学(威海)空间科学与物理学院, 威海 264209)

(2012年11月1日收到; 2012年11月29日收到修改稿)

由于铟镓锌氧化物 (IGZO) 薄膜具有高迁移率和高透过率的特点, 它作为有源层被广泛的应用于薄膜晶体管 (TFT). 本文利用磁控溅射方法制备了 TFT 的有源层 IGZO 和源漏电极, 用简单低成本的掩膜法控制沟道的尺寸, 制备了具有高迁移率、底栅结构的 n 型非晶铟镓锌氧化物薄膜晶体管 (IGZO-TFT). 利用 X 射线衍射仪 (XRD) 和紫外可见分光光度计分别测试了 IGZO 薄膜的衍射图谱和透过率图谱, 研究了 IGZO 薄膜的结构和光学特性. 通过测试 IGZO-TFT 的输出特性和转移特性曲线, 讨论了 IGZO 有源层厚度对 IGZO-TFT 特性的影响. 制备的 IGZO-TFT 器件的场效应迁移率高达  $15.6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 开关比高于  $10^7$ .

**关键词:** 非晶铟镓锌氧化物, 薄膜晶体管, 有源层

**PACS:** 73.61.Ey, 73.61.Jc, 73.40.Qv, 72.80.Ey

**DOI:** 10.7498/aps.62.077302

## 1 引言

薄膜晶体管 (TFT) 是显示器有源驱动的核心部件, 被广泛应用于平板显示器. 有源层材料和制备工艺是决定 TFT 性能的关键因素之一, 传统的非晶硅 TFT 迁移率较低, 光敏性强; 多晶硅 TFT 制备工艺复杂; 有机 TFT 的寿命与迁移率都比较低<sup>[1,2]</sup>. 近年来, 由重金属阳离子构成的具备  $(n-1)d^{10}ns(n \geq 4)$  电子形态结构的非晶化合物  $\text{In}_2\text{O}_3$ <sup>[3]</sup>,  $\text{ZnO}$ <sup>[4]</sup>,  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ (IZO)<sup>[5]</sup>,  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ (IGZO)<sup>[6]</sup> 和  $\text{SnO}_2\text{-ZnO}$ (ZTO)<sup>[7]</sup> 等成为制作 TFT 有源层的热点. 非晶金属氧化物容易在室温下制备, 具有高的透过率, 表面平整度高等特点<sup>[8]</sup>, 因此在柔性衬底上制备 TFT 有着广阔的前景. IGZO 作为有源层制成的全透明 TFT 在场效应迁移率、光透过率、阈值电压、源漏电流开关比等方面有着独特的优势, 并且在有源矩阵驱动显示器上的应用将大大提高有源矩阵的开口率和响应速度<sup>[9]</sup>. 2004 年 Hosono 和 Nomura 等<sup>[10]</sup> 室温下在

柔性衬底 PET 上制备了全透明 TFT, 其场效应迁移率超过  $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 比常规的氢化非晶硅 TFT 高一个数量级之多.

目前制备有源层 IGZO 的方法主要有磁控溅射法<sup>[5]</sup> 和脉冲激光沉积法<sup>[1]</sup> 等. 磁控溅射法具有温度低, 附着性好, 薄膜厚度均匀等优点, 适应于制备大面积以及柔性材料显示面板, 故被广泛应用于 TFT 的制备. 由于 IGZO 薄膜可以使用磁控溅射法制备, 所以导入时无需大幅改进现有的液晶面板的生产线, 大大降低了生产线更新换代的成本, 因此各大面板厂商以及研究机构纷纷开始致力于以 IGZO 为代表的透明非晶氧化物 TFT 的研究. 到目前为止, 对非晶 IGZO-TFT 的研究主要包括: 制备条件、稳定性、源漏电极与有源层的接触等方面, 而针对 IGZO 有源层厚度对 IGZO-TFT 性能影响的报道较少.

本文利用磁控溅射镀膜技术和简单的掩膜板法制备了具有不同厚度有源层的底栅非晶 IGZO-TFT, 研究了 IGZO 厚度对非晶 IGZO-TFT 性能的

\* 山东省自然科学基金(批准号: ZR2009AM020) 和山东大学自主创新基金(批准号: 2011ZRXT002, 2011ZRYQ010) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: ytlin@sdu.edu.cn

影响, 器件表现出高迁移率和高开关比。

## 2 实验

本研究设计的 IGZO-TFT 为底栅结构, 如图 1 所示, 基底为具有 (100) 晶向的重掺杂 p 型 Si, 有源层 IGZO 薄膜的厚度分别为 16, 33, 44 nm. 采用掩膜法控制器件的有源层尺寸, 其中沟道宽度  $W = 1500 \mu\text{m}$ , 长度  $L = 150 \mu\text{m}$ . 首先利用热氧化法在 p-Si 衬底上形成一层厚度为 200 nm 的  $\text{SiO}_2$  作为栅极绝缘层. 室温下采用射频磁控溅射方法沉积 IGZO 和 ITO 薄膜, IGZO 作为有源层, ITO 作为源漏电极 (厚度为 150 nm). 制备 IGZO 有源层的靶材直径为 76 mm, 由纯度为 99.99% 的  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$  制成 ( $\text{In}:\text{Ga}:\text{Zn}=1:1:1$ ); 溅射气体为  $\text{Ar}/\text{O}_2$  混合气体, 溅射气压为 0.4 Pa; 溅射功率为 70 W. 采用 XP-1 型台阶仪测得薄膜厚度, 利用 Cary 100 UV-VIS 紫外-可见分光光度计测量 IGZO 薄膜的透过率, 采用 Rigaku D/MAX 2500V/PC X 射线衍射仪测量分析薄膜的结构特性, 利用 Keithley-4200 SCS 测试器件的输出特性和转移特性。

## 3 结果与分析

图 2 为 X 射线衍射图谱, 图 2(a) 为玻璃衬底的衍射图样, 图 2(b), (c), (d) 是 IGZO 薄膜衍射图谱, 其薄膜厚度分别为 16, 33, 44 nm. 从图 2 中发现, 样品 b, c, d 的衍射图样跟玻璃衬底的衍射图样基本一致, 无明显的衍射峰, 这表明制备的 IGZO 薄膜呈现非晶态。

不同厚度的 IGZO 薄膜透过率曲线如图 3 所示, 由图 3 可看出, 随着薄膜厚度的增加, 薄膜的透过率有所下降, 但总体而言, 在可见光范围内 (400—700 nm) 均具有很高的透过率, 分别为 94.81%, 88.35%, 85.34%, 这为制作全透明 TFT 奠定了基础。

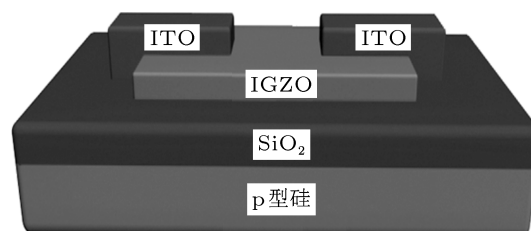


图 1 IGZO-TFT 结构图

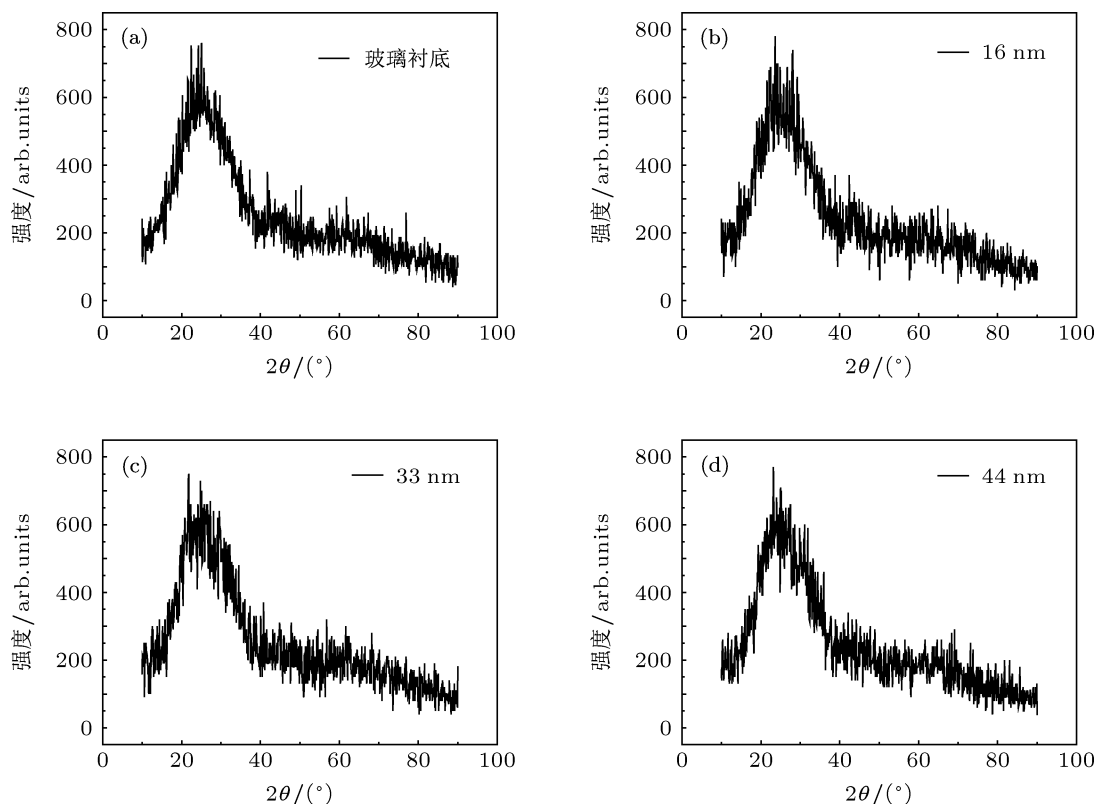


图 2 玻璃衬底及不同有源层厚度 IGZO 的 X 射线衍射图谱

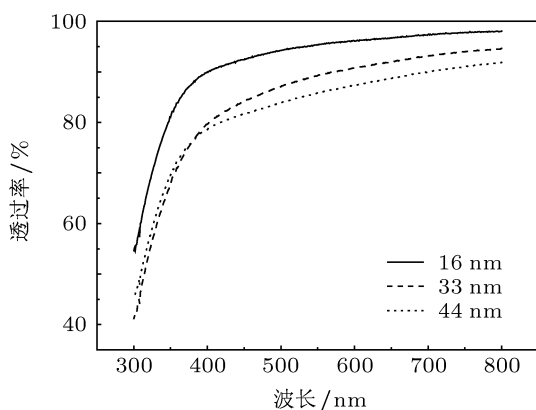


图3 不同厚度 IGZO 的透过率

IGZO-TFT 输出特性曲线如图 4 所示, (a), (b), (c) 有源层厚度分别为 16 nm, 33 nm, 44 nm. 源漏电压  $V_D$  从 0 V 增加到 20 V, 栅极偏压  $V_G$  从 0V 增加到 20 V, 间隔为 5 V. 从图 4 中可以看出, 随着  $V_G$  增大, (a), (b), (c) 中的漏电流  $I_D$  均显著增大; 在相同的栅极偏压  $V_G$  下, 随  $V_D$  的增大,  $I_D$  先显著增大, 随后变为常数. 这表明对于有源层厚度不同的 IGZO-TFT, 栅极偏压  $V_G$  对器件的漏电流  $I_D$  均有很好的调控作用, 并且器件具有很好的夹断特性, 在饱和区漏电流无明显的升降, 这显示出 TFT 具备良好的电学特性.

IGZO-TFT 的转移特性曲线与  $I_{DS}^{1/2}-V_{GS}$  曲线如图 5(a), (b) 所示. 由图 5(a) 发现, 在栅极负压下,  $I_D$  数值很小, 说明器件处于关闭状态. 随着  $V_G$  增大,  $I_D$  呈指数上升, 说明亚阈值摆幅较小, 器件性能较好. 由  $I_{DS}^{1/2}-V_{GS}$  曲线外推直线可以得到 TFT 的阈值电压  $V_T$ , 如图 5(b), 发现随着有源层厚度的增加, 器件的阈值电压 ( $V_T$ ) 由正朝负方向移动, 并逐渐由增强型 ( $V_T > 0$ ) 变为耗尽型 ( $V_T < 0$ ), 这种现象可能是受表面态影响所引起的. 由于表面态能量低于施主态能量, 因此有源层内的自由电荷容易在  $\text{SiO}_2/\text{IGZO}$  界面与表面 (IGZO 与 ITO 接触面) 处被俘获 [11]. 当薄膜较薄时, 本来用作导电沟道的电子被两表面态俘获, 要想获得导电沟道必须加正的栅极电压  $V_G$ , 当有源层变厚时, 有源层内的自由电荷数量增多, 表面态逐渐被填充, 当厚度足够大时, 表面态可能被全部填充, 部分剩余的自由电荷在栅极负压下仍可在  $\text{SiO}_2/\text{IGZO}$  界面处形成导电沟道, 因此 TFT 的  $V_T$  朝负方向移动 [11]. 从而随着膜厚的增加 TFT 逐渐由增强型变为耗尽型. Wang 等 [12] 对于这一现象也给出了合理的解释.

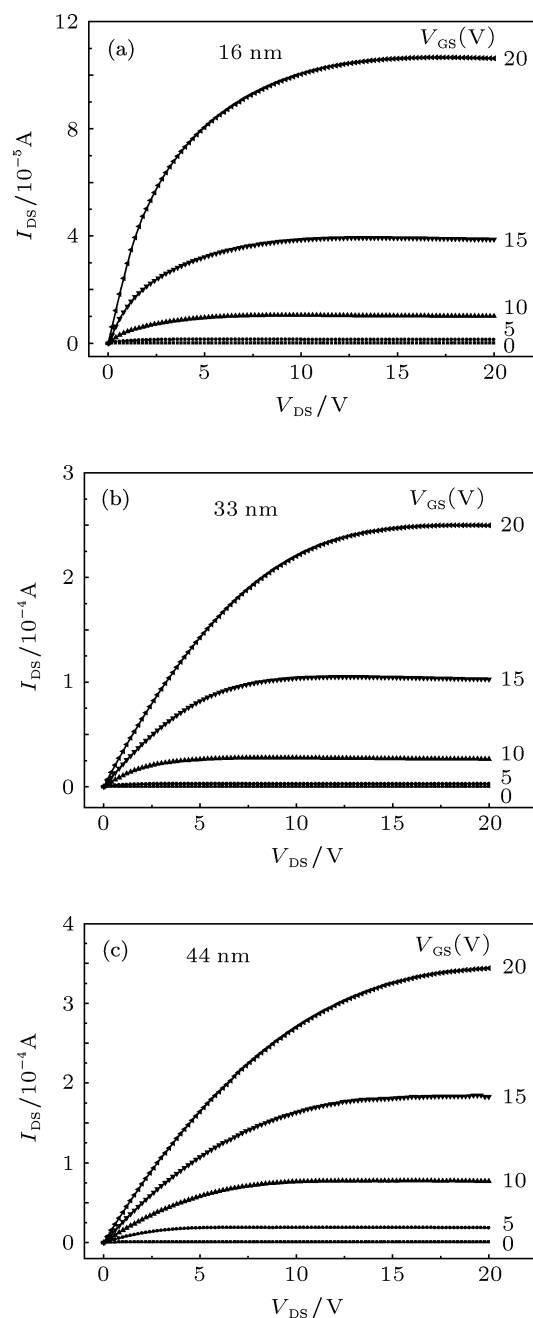


图4 不同有源层厚度的 IGZO-TFT 输出特性曲线

根据图 5, 并结合饱和区电流、电压关系式

$$I_{DS} = \mu_{FE} C_{ox} \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_T)^2$$

得到了不同厚度有源层 TFT 的电学特性参数, 如表 1 所示.

公式中单位面积的栅电容  $C_{ox} = 1.25 \times 10^{-8} \text{F/cm}^2$ . 如表 1 所示, 样品的电流开关比均高于  $10^7$ , 场效应迁移率都高于  $11 \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 亚阈值摆幅最小为  $0.2 \text{V/decade}$ . 这说明制备的 TFT 表现出优良的开关特性和较高的响应速度. 文献 [12]

报道的场效应迁移率最高为  $1.41 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 亚阈值摆幅最小为  $0.384 \text{ V/decade}$ . 随着 IGZO 薄膜厚度增加, 载流子的场效应迁移率  $\mu_{\text{FE}}$  先增大后减小, 这是由于随着 IGZO 厚度的增加, 载流子传输层远离有源层的表面<sup>[12]</sup>, 表面的粗糙程度对载流子的迁移率影响变小, 所以场效应迁移率呈增大的趋势. 但是当 IGZO 厚度为  $44 \text{ nm}$  时, 场效应迁移率又减小, 这可能是由于随着膜厚的增加载流子的散射增强与陷阱密度增加所引起的, 此规律在溶液法制备的 ZnO-TFT 中也存在<sup>[13]</sup>. 对于一种固定材料和几何结构的 TFT, 可以找到一个最佳的有源层厚度来保证 TFT 的最佳性能<sup>[12,14]</sup>. 随着有源层厚度增加, 亚阈值摆幅  $S$  变大, 亚阈值摆幅 ( $S$ ) 是用来表征 TFT 从关到开时电流变化的速度,  $S$  越小则器件从关态到开态所需要的电压变化越小. 在转移曲线中,  $S$  的含义为  $\log_{10}(I_{\text{DS}})$  上升一个数量级所需要增加的栅极电压大小. 设表面陷阱密度为  $N_{\text{T}}$  (单位:  $\text{cm}^{-2}$ ), 亚阈值摆幅为  $S$ , 其关系式如下<sup>[12]</sup>:

$$N_{\text{T}} = \left( \frac{S(\log_{10} e)}{kT/q} - 1 \right) \frac{C_i}{q},$$

$k$  为波尔兹曼常数,  $T$  为温度,  $C_i$  为栅极单位面积的电容<sup>[15]</sup>, 从公式中看出  $S$  与  $N_{\text{T}}$  成比例关系. 假设有源层的陷阱密度  $n_{\text{t}}$  (单位:  $\text{cm}^{-3}$ ) 是一个常数, 那么  $N_{\text{T}}$  与 IGZO 的厚度成比例关系 ( $N_{\text{T}} = n_{\text{t}} \times t_{\text{s}}$ ),  $t_{\text{s}}$  为有源层厚度, 因此随 IGZO 厚度的增加, 表面陷阱密度增加, 被陷阱束缚的自由电荷数量增加, 导致增加栅压时电流的增速相对变缓, 表现为  $S$  增大<sup>[12,16]</sup>. 另一方面, 随 IGZO 厚度的增加, 导电

沟道层远离 IGZO/SiO<sub>2</sub> 界面, 如果  $d_c$  (电荷重心与 IGZO/SiO<sub>2</sub> 界面间距) 变大, 那么栅极电场的影响被“屏蔽”. 也就是说, 当  $d_c > 0$  时, 半导体电容与栅极绝缘层电容组成串联关系, 从而减小了沟道有效电容, 导致了  $S$  的增大<sup>[16]</sup>.

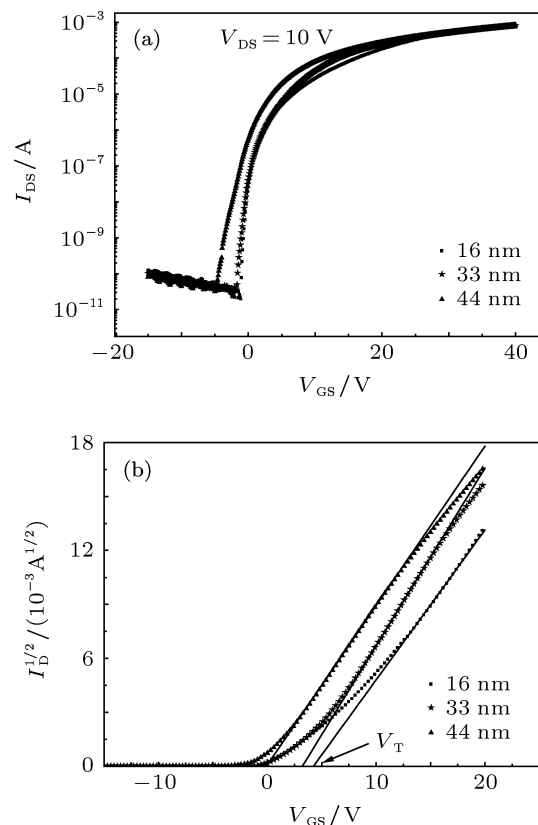


图 5 不同有源层厚度的 IGZO-TFT 转移特性曲线与  $I_{\text{DS}}^{1/2}$ - $V_{\text{GS}}$  曲线

表 1 不同厚度有源层 IGZO-TFT 电学性能参数

IGZO 厚度 $d/\text{nm}$	场效应迁移率 $\mu_{\text{FE}}/\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	阈值电压 $V_{\text{T}}/\text{V}$	电流开关比 $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	亚阈值摆幅 $S/(\text{V/decade})$
16	11.1	4.2	$2.8 \times 10^7$	0.2
33	15.6	3.2	$2.3 \times 10^7$	0.5
44	12.5	-0.1	$2.1 \times 10^7$	0.8

## 4 结论

本文用磁控溅射技术结合简单掩膜法在 Si 基上制备了高迁移率底栅结构的 IGZO-TFT. 随着 IGZO 厚度的增加, TFT 的阈值电压 ( $V_{\text{T}}$ ) 由正朝负方向移动, 并逐渐由增强型 ( $V_{\text{T}} > 0$ ) 变为耗尽型

( $V_{\text{T}} < 0$ ), 载流子的场效应迁移率  $\mu_{\text{FE}}$  先增大后减小, 亚阈值摆幅  $S$  变大, 电流开关比变小. 器件的场效应迁移率最高为  $15.6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 电流开关比最大为  $2.8 \times 10^7$ , 亚阈值摆幅最小为  $0.2 \text{ V/decade}$ . 实验证明, 可以通过改变有源层厚度来控制 TFT 的电学性能.

- [1] Liu Y R, Wang Z X, Yu J L, Xu H H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8566 (in Chinese) [刘玉荣, 王智欣, 虞佳乐, 徐海红 2009 物理学报 **58** 8566]
- [2] Yuan G C, Xu Z, Zhao S L, Zhang F J, Jiang W W, Huang J Z, Song D D, Zhu H N, Huang J Y, Xu S R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5911 (in Chinese) [袁广才, 徐征, 赵谡玲, 张福俊, 姜薇薇, 黄金昭, 宋丹丹, 朱海娜, 黄金英, 徐叙瑛 2008 物理学报 **57** 5911]
- [3] Xu T Y, Wu H Z, Zhang Y Y, Wang X, Zhu X M, Yan Z J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5018 (in Chinese) [徐天宇, 吴惠楨, 张莹莹, 王雄, 朱夏明, 原子健 2010 物理学报 **59** 5018]
- [4] Zhang L, Li J, Zhang X W, Jiang X Y, Zhang Z L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 072112
- [5] Dehuff N L, Kettenring E S, Hong D, Chiang H Q, Wager J F 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 064505
- [6] Yabuta H, Sano M, Abe K, Aiba T, Den T, Kumomi H, Nomura K, Kamiya T, Hosono H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 112123
- [7] Chiang H Q, Wager J F, Hoffman R L, Jeong J, Keszler D A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 013503
- [8] Kamiya T, Nomura K, Hosono H 2010 *Sci. Technol. Adv. Mater.* **11** 044305
- [9] Wang X, Cai X K, Yan Z J, Zhu X M, Qiu D J, Wu H Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 037305 (in Chinese) [王雄, 才玺坤, 原子健, 朱夏明, 邱东江, 吴惠楨 2011 物理学报 **60** 037305]
- [10] Nomura K, Ohta H, Takagi A, Kamiya T, Hirano M, Hosono H 2004 *Nature* **432** 488
- [11] Barquinha P, Pimentel A, Marques A, Pereira L, Martins R, Fortunato E 2006 *Journal of Non-Crystalline Solids* **352** 1749
- [12] Wang Y, Sun X W, Goh G K L, Demir H V, Yu H Y 2011 *IEEE Trans. Electron Device* **58** 480
- [13] Li C S, Li Y N, Wu Y L, Ong B S, Loutfy R O 2009 *J. Mater. Chem.* **19** 1626
- [14] Martin S, Chiang C S, Nahm J Y, Li T, Kanicki J, Ugai Y 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 530
- [15] Greve D W 1998 *Field Effect Devices and Applications: Devices for Portable Low Power, and Imaging Systems* (1st Edn.) (Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall) p287288
- [16] Chiang H Q 2007 *Ph. D. Dissertation* (Corvallis: Oregon State University)

# The preparation and characteristics research of high mobility amorphous indium gallium zinc oxide thin-film transistors\*

Li Shuai-Shuai Liang Chao-Xu Wang Xue-Xia Li Yan-Hui Song Shu-Mei  
Xin Yan-Qing Yang Tian-Lin<sup>†</sup>

(Department of Space Science and Physics, Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China)

(Received 1 November 2012; revised manuscript received 29 November 2012)

## Abstract

Indium gallium zinc oxide (IGZO) is widely used in thin-film transistors (TFT) as an active layer due to its high mobility and transmittance. The amorphous n-type indium gallium zinc oxide thin-film transistors (IGZO-TFT) of bottom gate with high mobility were prepared, the active layer, source and drain electrode of the TFT were prepared by using magnetron sputtering method, and a low cost mask was used to control the size of the channel. The diffraction pattern and transmittance spectrum were measured by using X-ray diffraction and ultraviolet-visible spectrophotometer, respectively. The structural and optical properties of the IGZO thin film were studied. The dependence of active layer thickness on the performance was analyzed by testing the output characteristics and transfer property of IGZO-TFT. The field effect mobility of the IGZO-TFT reaches  $15.6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , and the on/off ratio is higher than  $10^7$ .

**Keywords:** amorphous indium gallium zinc oxide, thin-film transistor, active layer

**PACS:** 73.61.Ey, 73.61.Jc, 73.40.Qv, 72.80.Ey

**DOI:** 10.7498/aps.62.077302

\* Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2009AM020), and the Independent Innovation Foundation of Shandong University, China (Grant Nos. 2011ZRXT002, 2011ZRYQ010).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: ytlinsdu.edu.cn