

文章编号: 1000-7032(2013)08-1046-05

# 沟道宽度对 ZnO-TFT 电学性能的影响

苏 晶, 莫昌文, 刘玉荣\*

(华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 用射频磁控溅射法生长的 ZnO 薄膜作为有源层, 制备出了 ZnO 基薄膜晶体管 (ZnO-TFT), 并在空气环境下 350 °C 退火 1 h, 研究了沟道宽度对 ZnO-TFT 器件性能的影响。实验结果表明: 阈值电压随着沟道宽度的减小而增加, 这是由于沟道越窄, 载流子被捕获的几率越大, 在相同栅压下沟道内可动载流子浓度越小, 相应的阈值电压就越大; 饱和迁移率随着沟道宽度的减小而增加, 认为这是由源/漏电阻的侧壁效应及边缘电子场效应引起的附加电流所致。

**关键词:** 沟道宽度; 氧化锌; 薄膜晶体管

中图分类号: TN321+.5; O472+.4

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20133408.1046

## Effects of Channel Width on The Electrical Properties of ZnO-based Thin Film Transistor

SU Jing, MO Chang-wen, LIU Yu-rong\*

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

\* Corresponding Author, E-mail: phlyr@scut.edu.cn

**Abstract:** ZnO-based thin film transistors (ZnO-TFTs) with RF-sputtered ZnO active layer were fabricated at room temperature, and then annealed at 350 °C for 1 h in the air environment. Effects of channel width on the electrical properties of ZnO-TFTs were investigated. The threshold voltage increases with the decrease of the channel width, that is because the more narrower the channel width is, the more greater probability of carriers is captured, the less free carriers are under the same gate voltage, so that the more greater the threshold voltage is. The saturation carrier mobility also increases with the decrease of the channel width, due to the side wall effect associated with source/drain resistance as well as the fringing electronic-field effects which led to an additional current flow beyond the device edges.

**Key words:** channel width; zinc oxide; thin film transistor

### 1 引 言

ZnO 是直接宽带隙 (~3.37 eV) 半导体化合物, 具有高的激子束缚能 (60 meV)。将 ZnO 作为半导体有源层制备薄膜晶体管 (ZnO-TFT), 不仅

能获得较高的迁移率, 而且具有制造工艺简单、制备温度低、光敏性小等优点<sup>[1]</sup>。与现在大规模使用的非晶硅晶体管 (a-Si TFT) 相比, ZnO-TFT 的载流子迁移率高一个数量级以上, 而且由于 ZnO 的宽带隙, 使得对可见光的透明度大于 80%<sup>[2]</sup>,

收稿日期: 2013-06-10; 修订日期: 2013-06-24

基金项目: 国家自然科学基金 (61076113) 资助项目

作者简介: 苏晶 (1988 -), 女, 福建建瓯人, 主要从事半导体器件的研究。

E-mail: sujing0928@163.com

被认为是最有希望的下一代薄膜晶体管技术。通常, ZnO-TFT 的性能受到多种因素的影响, 如栅介质材料<sup>[3-7]</sup>、有源层掺杂<sup>[8-10]</sup>、沟道宽/长比<sup>[11-12]</sup>、退火温度<sup>[13-15]</sup>等, 因此各研究组所报道的 ZnO-TFT 性能存在较大差距。到目前为止, 关于栅介质材料、有源层掺杂、沟道长度、退火温度等对 ZnO-TFT 器件性能的影响报道较多, 而沟道宽度 ( $W$ ) 对器件性能的影响报道较少。本文以射频磁控溅射法生长的 ZnO 薄膜作为半导体有源层, 制备了 ZnO-TFT, 研究了  $W$  对 ZnO-TFT 性能的影响。

## 2 实 验

以 n-Si 为衬底并作为栅极、热氧化生长的 SiO<sub>2</sub> 作为栅介质层、射频磁控溅射法生长的 ZnO 薄膜作为半导体有源层, 制备出底栅顶接触型 ZnO-TFT, 器件结构如图 1 所示。ZnO-TFT 的主要制备工艺如下: 把 SiO<sub>2</sub>/n-Si 置于 I 号液中 80 °C 水浴加热 10 min, 清洗干净后再置于 II 号液中 80 °C 水浴加热 10 min, 清洗干净后用高纯氮气吹干。然后, 用高纯 ZnO (纯度为 99.999%) 为靶材, 采用沈阳科技仪器有限公司的 GP-560b 型双室磁控溅射沉积系统制备 ZnO 薄膜, 基底温度为室温, 本底真空为  $5 \times 10^{-4}$  Pa, 溅射气压为 0.5 Pa, Ar、O<sub>2</sub> 流量都为 30 cm<sup>3</sup>/min, 溅射功率为 60 W。而后采用真空蒸镀法在 ZnO 薄膜上沉积 Al 作为源/漏电极, 器件的沟道长度 ( $L$ ) 和宽度 ( $W$ ) 由蒸镀时采用的金属掩膜版确定,  $L$  固定为 50 μm,  $W$  分别为 825, 625, 425, 225 μm。最后, 把 ZnO-TFT 置于空气环境下 350 °C 退火 1 h。SiO<sub>2</sub> 和 ZnO 薄膜的厚度采用德国 Ocean Optics 公司的 Nanocalc-XR 光学薄膜测厚仪测量得到, SiO<sub>2</sub> 的厚度为 120 nm, ZnO 薄膜厚度为 25 nm。ZnO 薄膜的表面形貌采用广州本原纳米仪器有限公司的 CPSM4000s 型原子力显微镜 (AFM) 观测。ZnO-TFT 的电特性采用安捷伦公司的 4156C

半导体参数测试仪进行测试。

## 3 结果与讨论

### 3.1 ZnO 薄膜的特性

图 2 为在 SiO<sub>2</sub> 上生长 ZnO 薄膜的 XRD 图, 从图 2 可以看出  $2\theta$  位于 33.5° 的 Si 的 (002)<sup>[16]</sup> 峰和位于 34.5° 的 ZnO 的 (002) 峰。因为所制备的 ZnO 很薄, 只有 25 nm, 所以 Si 的峰会明显比 ZnO 的强, 但这并不影响 ZnO (002) 峰的  $c$  轴择优取向。ZnO 薄膜的结晶性越好, 晶粒越大, 晶界也就越小, 那么以 ZnO 作为有源层的 TFT 迁移率也就越高<sup>[17]</sup>。

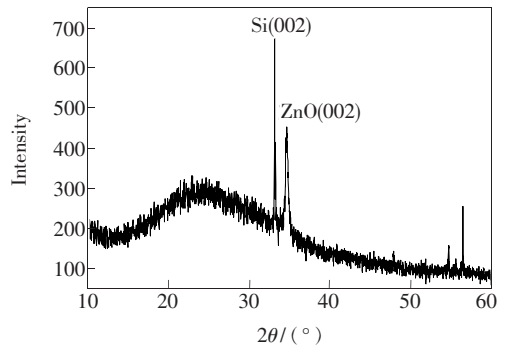


图 2 ZnO 薄膜的 XRD 图

Fig. 2 XRD pattern of ZnO thin film

图 3 为 ZnO 薄膜的原子力显微镜 (AFM) 照片, 可以看出 ZnO 薄膜的表面非常光滑, 平均粗糙度只有 0.881 nm, 平均晶粒尺寸为 28.4 nm。

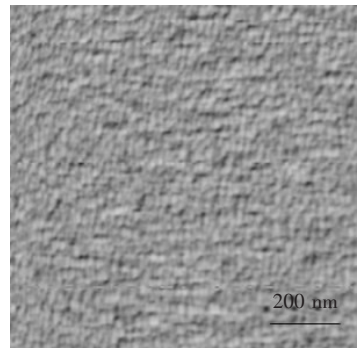


图 3 ZnO 薄膜表面形貌的 AFM 图

Fig. 3 AFM image of surface morphology of ZnO thin film

### 3.2 ZnO-TFT 的电学特性

图 4 是不同  $W$  所对应的 ZnO-TFT 的输出特性曲线。从图 4 可以看出, 由于沟道电子是在正  $V_{GS}$  下产生的, 因此 ZnO-TFT 为 n 沟道增强型器件。增强型器件不需要施加额外的电压去关断器件, 因此所使用电路更加简单, 功耗也更低<sup>[18]</sup>。此

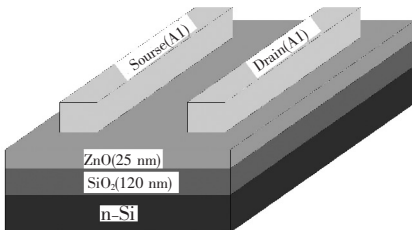


图 1 底栅顶接触 ZnO-TFT 的器件结构图

Fig. 1 Device structure of ZnO-TFT based on bottom gate and top-contact

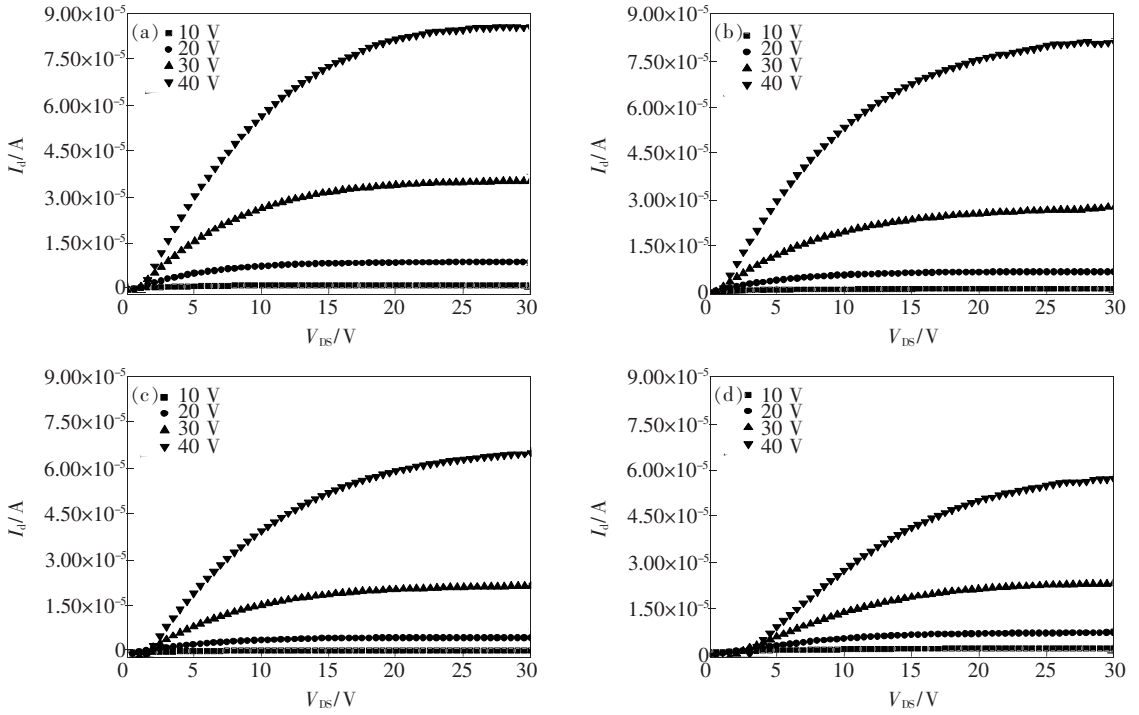


图 4 不同沟道宽度的 ZnO-TFTs 的输出曲线。(a)  $W = 825 \mu\text{m}$ ; (b)  $W = 625 \mu\text{m}$ ; (c)  $W = 425 \mu\text{m}$ ; (d)  $W = 225 \mu\text{m}$ 。

Fig. 4 Output character of different channel width of ZnO-TFTs. (a)  $W = 825 \mu\text{m}$ . (b)  $W = 625 \mu\text{m}$ . (c)  $W = 425 \mu\text{m}$ . (d)  $W = 225 \mu\text{m}$ .

外,从图中还可以看出器件具有明显的夹断特性和饱和特性。在  $V_{GS} = 40 \text{ V}$ 、 $V_{DS} = 30 \text{ V}$ 、 $L$  为  $50 \mu\text{m}$  时, $W$  为  $825, 625, 425, 225 \mu\text{m}$  的器件饱和电

流( $I_d$ )分别为  $85.50, 80.42, 64.86, 56.73 \mu\text{A}$ ,表明  $I_d$  随着  $W$  的增加而增大。

图 5 为不同  $W$  所对应的 ZnO-TFT 的转移特

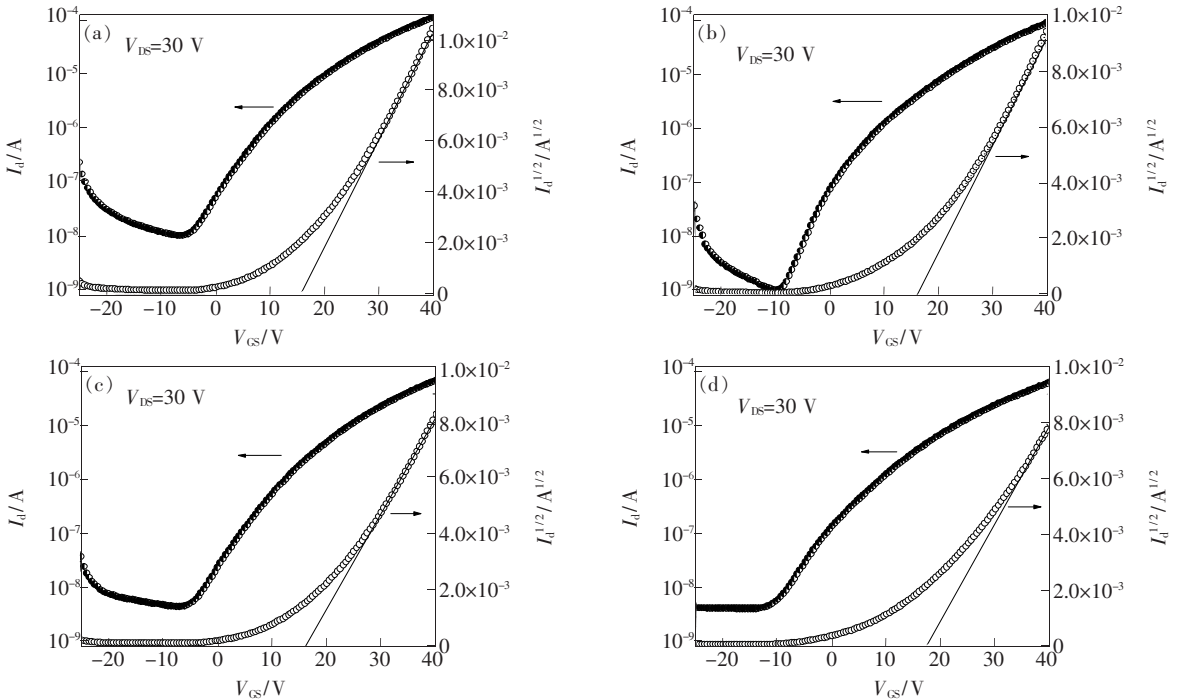


图 5 不同沟道宽度的 ZnO-TFTs 的转移特性曲线。(a)  $W = 825 \mu\text{m}$ ; (b)  $W = 625 \mu\text{m}$ ; (c)  $W = 425 \mu\text{m}$ ; (d)  $W = 225 \mu\text{m}$ 。

Fig. 5 Transfer character of different channel width of ZnO-TFTs. (a)  $W = 825 \mu\text{m}$ . (b)  $W = 625 \mu\text{m}$ . (c)  $W = 425 \mu\text{m}$ . (d)  $W = 225 \mu\text{m}$ .

性曲线,从图5中提取的器件性能参数列于表1。一般认为器件的阈值电压( $V_{th}$ )与界面态、栅介质厚度及介电常数、有源层厚度、沟道宽长比有关,其值可通过转移特性曲线对电流开方,其斜率与 $V_{GS}$ 轴的交点求出。从图5和表1中可以看出, $V_{th}$ 随着 $W$ 的减小而增大,这是因为 $W$ 越小,载流子被捕获的几率越大<sup>[11]</sup>,在相同栅电压下沟道内自由载流子浓度越小,相应的 $V_{th}$ 就越大。

迁移率( $\mu$ )是指载流子在单位电场作用下的平均漂移速度,即载流子在电场作用下运动快慢的量度。饱和迁移率( $\mu_{sat}$ )可通过下面的公式求得:

$$I_d = (C_i \mu_{sat} W/2L) (V_{GS} - V_{th})^2, \quad (V_{DS} > V_{GS} - V_{th}) \quad (1)$$

式中, $C_i$ 为单位面积栅介质电容(28.75 nF/cm<sup>2</sup>), $W$ 、 $L$ 分别为沟道的宽和长, $V_{GS}$ 、 $V_{DS}$ 及 $V_{th}$ 分别为栅源电压、漏源电压及阈值电压。当 $V_{GS} = 40$  V、 $V_{DS} = 30$  V、 $L$ 为50  $\mu$ m时,通过式(1)可以

得到 $W$ 为825,625,425,225  $\mu$ m的ZnO-TFT的饱和迁移率( $\mu_{sat}$ )分别为0.62,0.78,0.96,1.66 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>,表明 $\mu_{sat}$ 随着 $W$ 的减小而增大,这是由源/漏电阻的侧壁效应及边缘电子场效应导致超出器件边沿处产生的附加电流引起的<sup>[12]</sup>。

由表1可知,各器件的关态电流( $I_{off}$ )都在10<sup>-9</sup>数量级以下,开关电流比( $I_{on}/I_{off}$ )都大于10<sup>4</sup>,表明器件具有良好的关断特性。然而, $I_{off}$ 和 $I_{on}/I_{off}$ 随着 $W$ 的变化并没有表现出明显的规律性。

器件的亚阈值摆幅(SS)是表示器件从关态到开态时速度的物理量,反映了器件界面态密度的大小<sup>[19]</sup>,可通过以下公式求得:

$$SS = dV_{GS}/d(\lg I_d), \quad (2)$$

可得出 $L$ 为50  $\mu$ m, $W$ 为825,625,425,225  $\mu$ m的ZnO-TFT的SS分别为8.2,5.2,4.7,11.5 V/dec。这里SS与 $W$ 的关系并没有表现出特别明显的规律性。

表1 不同沟道宽度的 ZnO-TFT 器件性能参数

Table1 The character parameters of different channel width of ZnO-TFT devices

$W/L/\mu\text{m}$	$I_{off}/\text{A}$	$I_{on}/I_{off}$	$V_{th}/\text{V}$	$SS/(\text{V} \cdot \text{dec}^{-1})$	$\mu_{sat}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
825/50	$7.55 \times 10^{-9}$	$10^4$	15.8	8.2	0.62
625/50	$9.90 \times 10^{-10}$	$9 \times 10^4$	16.0	5.2	0.78
425/50	$4.38 \times 10^{-9}$	$1.6 \times 10^4$	16.5	4.7	0.96
225/50	$4.20 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^4$	17.0	11.5	1.66

## 4 结 论

以射频磁控溅射法生长的 ZnO 薄膜作为半导体有源层制备了不同沟道宽度的 ZnO-TFT,并对 ZnO 薄膜质量和 ZnO-TFT 的电学性能进行了测试与分析。结果表明:经 350 °C 退火后的 ZnO 薄膜具有良好的  $c$  轴择优取向性,薄膜晶粒均匀性好,表面相对平整,表面粗糙度仅为 0.881 nm。

ZnO-TFT 的阈值电压随着沟道宽度的减小而增大,这是因为沟道宽度越窄,载流子在迁移过程中被界面态捕获的几率越大,从而引起阈值电压变大;ZnO-TFT 器件的饱和迁移率随着沟道宽度的减小而增大,当沟道宽度为 225  $\mu$ m 时可达到 1.66 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>,这是由源/漏电阻的侧壁效应及边缘电子场效应导致超出器件边沿处产生的附加电流引起的。

## 参 考 文 献:

- [1] Hong W K, Song S H, Hwang D K, *et al.* Effects of surface roughness on the electrical characteristics of ZnO nanowire field effect transistors [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, 254(23):7559-7564.
- [2] Pang H X, Liu C Z, Xie A, *et al.* Effect of annealing temperature on structure and optical properties of sheet-like ZnO crystals [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* (液晶与显示), 2012, 27(2):158-162 (in Chinese).
- [3] Fortunato E, Pimentel A, Pereira L, *et al.* High field-effect mobility zinc oxide thin film transistors produced at room temperature [C]//20th International Conference on Amorphous and Microcrystalline Semiconductors, Campos Do Jordao,

- Brazil: Elsevier Science, 2004:806-809.
- [ 4 ] Park S H K, Hwang C S, Jeong H Y, *et al.* Transparent ZnO-TFT arrays fabricated by atomic layer deposition [J]. *Electrochem. Solid-State Lett.*, 2008, 11(1):H10-H14.
- [ 5 ] Remashan K, Choi Y S, Park S J, *et al.* Enhanced performance of MOCVD ZnO TFTs on glass substrates with nitrogen-rich silicon nitride gate dielectric [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2010, 157(1):H60-H64.
- [ 6 ] Siddiqui J J, Phillips J D, Leedy K, *et al.* Bias temperature stress analysis of ZnO thin film transistors with HfO<sub>2</sub> gate dielectrics [C]// 2011 69th Annual Device Reeach Conference, Santa Barbara, USA: IEEE, 2011:75-76.
- [ 7 ] Ci L, Li Y, Wu Y, *et al.* Fabrication conditions for solution-processed high-mobility ZnO thin-film transistors [J]. *J. Mater. Chem.*, 2009, 19(11):1626-1634.
- [ 8 ] Barquinha P, Pimentel A, Marques A, *et al.* Effect of UV and visible light radiation on the electrical performances of transparent TFTs based on amorphous indium zinc oxide [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2006, 352(9-20):1756-1760.
- [ 9 ] Kim M, Jeong J H, Lee H J, *et al.* High mobility bottom gate InGaZnO thin film transistors with SiO<sub>x</sub> etch stopper [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(21):212214-1-3.
- [ 10 ] Kim D H, Kim H R, Kwon J D, *et al.* Sputter-deposited Ga-Sn-Zn-O thin films for transparent thin film transistors [J]. *Phys. Status Solidi (a)*, 2011, 208(12):2934-2938.
- [ 11 ] Yan J F, Wu Z M, Tai H L, *et al.* Study on the performance of organic thin film transistors with different ratio of channel width to length [J]. *Semicond. Optoelectron.* (半导体光电), 2011, 23(1):52-55 (in Chinese).
- [ 12 ] Choi W S. Effect of channel scaling on zinc oxide thin-film transistor prepared by atomic layer deposition [J]. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 2010, 11(6):253-256.
- [ 13 ] Zhang X A, Zhang J W, Zhang W F, *et al.* Effect of annealing temperature on electrical properties of ZnO-TFT [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* (液晶与显示), 2009, 24(4):557-561 (in Chinese).
- [ 14 ] Peng L P, Fang L, Yang X F, *et al.* Microstructures and properties characterization of In-doped ZnO films [J]. *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* (真空科学与技术学报), 2011, 30(6):680-684 (in Chinese).
- [ 15 ] Liu Y R, Ren L F, Yang R H, *et al.* Effects of annealing temperature on electrical properties of ZnO thin-film transistors [J]. *J. South China Univ. Technol. (Natural Science Edition)* (华南理工大学学报:自然科学版), 2011, 39(9):104-107.
- [ 16 ] Chung J H, Lee J Y, Kim H S, *et al.* Effect of thickness of ZnO active layer on ZnO-TFT's characteristics [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(16):5597-5601.
- [ 17 ] Ma X M, Jing H, Ma K, *et al.* ZnO films and properties of ZnO-TFT [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* (液晶与显示), 2009, 24(3):393-395 (in Chinese).
- [ 18 ] Fortunato E, Pimentel A, Pereira L, *et al.* High field-effect mobility zinc oxide thin film transistors produced at room temperature [C]//20th International Conference on Amorphous and Microcrystalline Semiconductors, Campos Do Jordao, Brazil: Elsevier Science, 2004:806-809.
- [ 19 ] Wu W J, Yan J, Xu Z P, *et al.* Property comparison between IGZO TFT and ZnO TFT [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* (液晶与显示), 2011, 26(2):147-153 (in Chinese).