

# 氧化锌锡薄膜晶体管的研究\*

王雄 才玺坤 原子健 朱夏明 邱东江 吴惠桢<sup>†</sup>

(浙江大学物理学系, 硅材料国家重点实验室, 杭州 310027)

(2010年5月24日收到; 2010年6月21日收到修改稿)

在ITO玻璃基底上用射频磁控溅射技术生长氧化锌锡(ZnSnO)沟道有源层、用PECVD生长SiO<sub>2</sub>薄膜作为薄膜晶体管的栅绝缘层研制了薄膜晶体管(TFT), 器件的场效应迁移率最高达到 $\mu_n = 9.1 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 阈值电压 $-2 \text{ V}$ , 电流开关比为 $10^4$ .

**关键词:** 氧化锌锡, 薄膜晶体管, 场效应迁移率

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

## 1. 引言

用氧化物制作薄膜晶体管近年来备受关注, 它们有着高的迁移率和透过率, 传统的非晶硅迁移率较低、光敏性强, 多晶硅薄膜晶体管工艺复杂, 而有机薄膜晶体管又难以克服低寿命、低迁移率的弱点<sup>[1,2]</sup>, 用氧化物制成全透明的薄膜晶体管用在有源矩阵驱动显示器上将大大提高有源矩阵的开口率. 用氧化物及其合金来做有源层制备薄膜晶体管近年来在国内外都有报道, 较多文献中报道使用ZnO有源层来制备薄膜晶体管<sup>[3-7]</sup>, 也有用SnO<sub>2</sub><sup>[8,9]</sup>, InGaZnO<sup>[10,11]</sup>等. 先前我们课题组报道了分别以ZnMgO和ZnO:N纳米半导体薄膜做沟道有源层的TFT器件的研制结果<sup>[12,13]</sup>, 氧化铟薄膜有着较低的电阻率和高透过率<sup>[14]</sup>, 我们的课题组在氧化铟薄膜晶体管研制方面也取得进展<sup>[15]</sup>.

近年来, 国际上采用ZnSnO合金氧化物半导体做沟道研制高性能的薄膜晶体管成为研究热点, 被认为是一个很有应用前景的材料, 包括Chiang等人采用磁控溅射生长氧化锌锡(ZnSnO)做有源层, 并通过高温(300—600 °C)退火处理研制出高场效应迁移率薄膜晶体管<sup>[16]</sup>, Jackson等研制出了柔性ZnSnO-TFT<sup>[17]</sup>, Riedl小组则通过实验证实了ZnSnO TFT具有高的热稳定性<sup>[18]</sup>. ZnSnO-TFT的优异光、电、热性

能为其在液晶显示、OLED显示奠定了重要基础<sup>[19]</sup>.

本文中采用磁控溅射法生长氧化锌锡的合金薄膜来作为有源层, 用SiO<sub>2</sub>作为栅绝缘薄膜, 研制了薄膜晶体管, 我们从工业化生产TFT的要求出发, 采用ITO玻璃基片和低温退火工艺, 得到了高场效应迁移率的ZnSnO-TFT.

## 2. 实验

我们设计的ZnSnO薄膜晶体管结构如图1所示. 器件采用底栅式结构, 基底为玻璃, 沟道ZnSnO薄膜的厚度为40 nm, 器件沟道层的宽度 $W = 200 \mu\text{m}$ , 长度 $L = 50 \mu\text{m}$ ; SiO<sub>2</sub>栅绝缘层厚度为100 nm, 用60 nm ITO导电薄膜作栅电极, 源漏电极为金属Al薄膜, 厚度为150 nm. 射频磁控溅射技术沉积ZnSnO沟道有源层, 采用了ZnO和SnO<sub>2</sub>合金靶, 靶材的纯度为99.99%, 溅射气体为Ar, 溅射功率为100 W, 生长温度为室温; 用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术生长SiO<sub>2</sub>, 采用热蒸发金属Al获得源漏电极; 我们采用了光刻、湿法腐蚀和剥离技术相结合的标准器件工艺获得了薄膜晶体管. ZnSnO合金薄膜的光学透过率用日本岛津公司产的UV-3150型紫外可见分光光度计进行测量, 器件特性的测量用KEITHLEY 2612型半导体特性测试仪对ZnSnO-TFT的*I-V*特性进行测量,

\* 国家自然科学基金(批准号: 10974174), 国家重点基础研究发展计划项目(批准号: 2011CB925603), 浙江省自然科学基金(批准号: Z6100117, Y4080171)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: hzwu@zju.edu.cn

用 KEITHLEY4200 半导体特性测试仪测量电容-电压特性,测试过程在无光照条件下进行. 我们还分析了退火对 ZnSnO-TFT 性能的影响,把器件分别放

在150 °C,200 °C和250 °C真空环境中进行退火 1 h 后,再进行电学特性测量,结果表明 TFT 器件的电学特性得到明显改善.

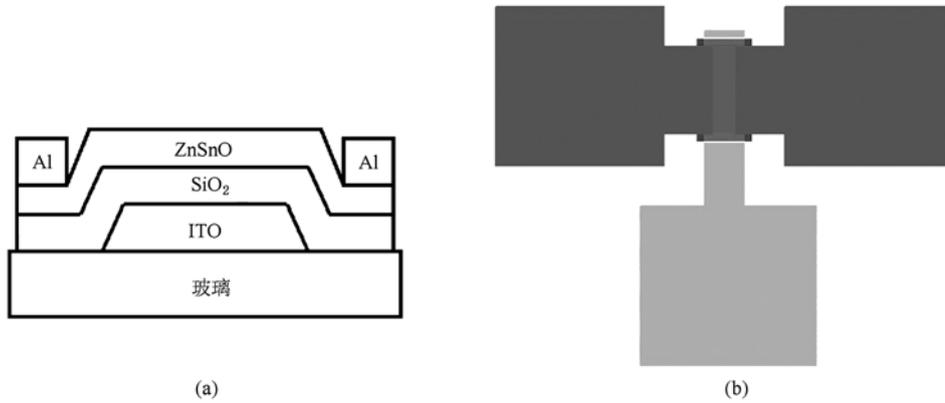


图1 ZnSnO 薄膜晶体管 (a) 器件截面示意图; (b) 器件俯视图

### 3. 结果与讨论

ZnSnO 禁带宽度为 3.3—3.9 eV<sup>[16]</sup>,其薄膜有着高的透过率,图2 为磁控溅射生长的 ZnSnO 薄膜的透射谱,从图中可以看出 ZnSnO 薄膜在可见光范围内(400—700 nm)的透过率达到 80% 以上,表明该系列合金薄膜材料可适合于透明电子器件的研制.

图3(a)为 ZnSnO-TFT 的输出特性曲线,源漏电压( $V_D$ )从 0 V 到 50 V,栅极偏压( $V_G$ )从 -5 V 到 10 V,间隔 5 V. 从图3(a)可以看出,ZnSnO-TFT 的栅极偏压( $V_G$ )对器件的漏电流( $I_D$ )有显著的调控作用. 漏电流随着栅极偏压的增大而显著增大,表明 ZnSnO-TFT 为 n 型器件. 当栅极偏压  $V_G = 0$  时,漏电流  $I_D$  并不为 0,漏电流仍有饱和趋势,说明器件工作在耗尽型模式. 随着漏极电压的增大,晶体管从线

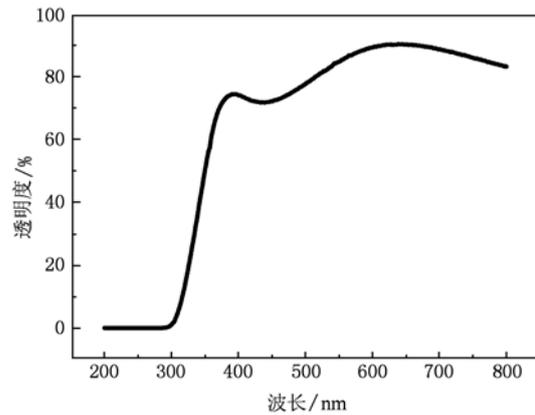


图2 氧化锌锡薄膜的透射谱

性区过渡到饱和区,并且表现出较好的饱和特性,当栅极电压  $V_G = 10$  V 时,源漏饱和电流约达到 1  $\mu$ A 左右.

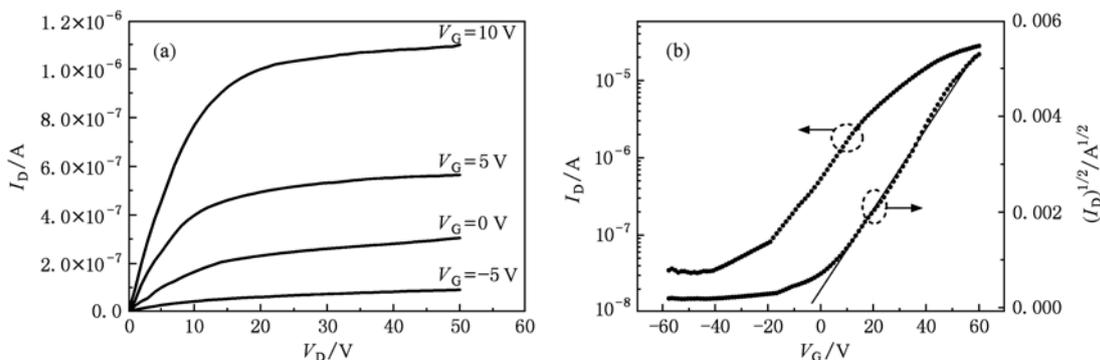


图3 (a) ZnSnO 薄膜晶体管的输出特性曲线; (b) ZnSnO 薄膜晶体管的转移特性曲线

薄膜晶体管工作在饱和区时漏电流可以表示为

$$I_D = \frac{W}{2L} \mu_n C_{\text{SiO}_2} (V_G - V_T)^2, \quad (1)$$

其中  $I_D$  为漏电流、 $W$  为器件沟道宽度、 $L$  为沟道长度、 $\mu_n$  为器件的场效应迁移率、 $C_{\text{SiO}_2}$  为绝缘层单位面积电容、 $V_G$  为栅极电压、 $V_T$  为阈值电压, 通过(1)式可以得到饱和区晶体管的场效应迁移率  $\mu_n$  以及阈值电压  $V_T$ . 测量栅绝缘层  $C_{\text{SiO}_2}$  电容特性, 单位面积  $\text{SiO}_2$  电容为  $0.67 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$ . 图 3(b) 是  $V_D = 30 \text{ V}$  的  $\sqrt{I_D} - V_{\text{GS}}$  曲线, 通过斜率可以计算出场效应迁移率  $\mu_n = 3.2 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 阈值电压  $-2 \text{ V}$ . 图 3(b) 中  $\log_{10}(I_{\text{DS}}) - V_{\text{GS}}$  曲线, 可以得到 ZnSnO-TFT 的电流开关比 ( $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ ) 约为  $1 \times 10^3$ , 影响源漏电流开关比和场效应迁移率的主要原因可能是  $\text{SiO}_2$  栅介质与 ZnSnO 沟道界面可能存在高密度悬挂键, 悬挂键一方面提供导电电荷, 另一方面起到对电荷漂移的散射作用. 退火过程可以饱和部分界面态, 从而提高器件的场效应迁移率和开关比. 另外, 国产 ZnSnO 靶材的纯度不够高也是影响场效应迁移率的一个重要因素.

我们接着将器件分别置于真空环境中进行  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  退火处理  $1 \text{ h}$ , 图 4 为不同退火温度下 ZnSnO-TFT 的转移特性曲线,  $V_D = 30 \text{ V}$ . 从图中可以看出, 随着退火温度的升高, ZnSnO-TFT 的开态电流显著增加, 未退火及  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  退火处理的开态电流分别为  $28 \text{ } \mu\text{A}$ ,  $67 \text{ } \mu\text{A}$ ,  $110 \text{ } \mu\text{A}$  和  $135 \text{ } \mu\text{A}$ , 影响开态电流的一个重要参数是绝缘层与有源层的界面态, 可见退火可能改善了界面态, 从而使开态电流增加. 图 4 中插图为器件场效应迁移率和电流开关比随退火温度的变化曲线. 开关比随退火温度的增加依次增大, 场效应迁移率随着退火温度的增加先增大后减小,  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  退火处理的迁移率分别为  $9.1 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ,  $7.6 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ,  $3.8 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 源漏电流开关比达到  $10^4$ . 从图 4 可见, 当退火温度较低 ( $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 时场效应迁移率增加明显. 退火过程对 ZnSnO-TFT 性能的影响在文献 [16, 20] 中已有讨论, 其原因可能是退火过程改善了 ZnSnO 半导体-绝缘层的界面,

使得局部原子重新排列. 退火过程也可使半导体层晶粒尺寸变大, 从而使晶界散射对电子漂移运动的影响减弱, 有利于薄膜迁移率的提高. 但是, 当退火温度进一步提高时, 迁移率反而减小,  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  退火处理后场效应迁移率降为  $7.6 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 其可能原因是 ZnSnO 薄膜中氧空位密度的提高导致缺陷散射的增强以及有源层 ZnSnO 可能出现的相分离 [20].  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  退火处理后, 阈值电压为  $15 \text{ V}$  和  $8 \text{ V}$ , 器件为增强型, 随退火温度的进一步升高, 不仅场效应迁移率进一步降低, 而且阈值电压减小,  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  退火处理后阈值电压为  $-10 \text{ V}$ , 器件变回耗尽型, 主要原因是较高的退火温度使载流子浓度增加的缘故, 可见退火工艺对薄膜晶体管的性能有重要影响.

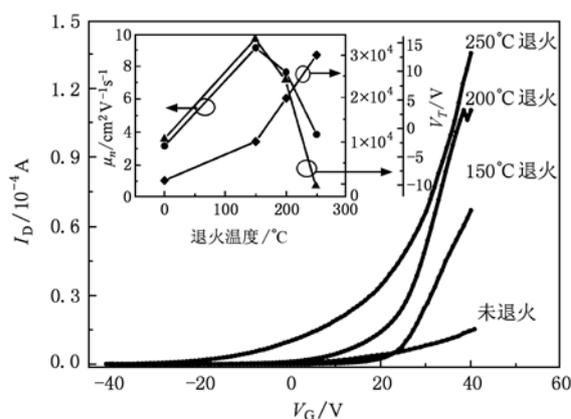


图 4 不同退火温度下 ZnSnO 薄膜晶体管的转移特性曲线, 插图不同退火温度下器件的迁移率、开关比和开启电压的变化

## 4. 结 论

我们用射频磁控溅射法生长 ZnSnO 有源层, 用  $\text{SiO}_2$  薄膜作为薄膜晶体管的栅绝缘层, 在 ITO 玻璃衬底上制备了底栅结构的薄膜晶体管. 通过对器件进行真空低温退火处理, 器件的电学性能得到了显著改善, 场效应迁移率在退火温度为  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  时达到  $9.1 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 电流开关比为  $10^4$ , 器件为增强型, 随着退火温度的升高场效应迁移减小, 器件变回耗尽型, 表明退火温度是影响器件性能的重要参数.

[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 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5911 (in Chinese) [袁广才、徐征、赵霞玲、张福

- 俊、姜薇薇、黄金昭、宋丹丹、朱海娜、黄金英、徐叙  
2008 物理学报 **57** 5911]
- [3] Gupta D, Anand M, Ryu S W, Choi Y K, Yoo S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 224106
- [4] Garcia P F, McLean R S, Reilly M H, Nunes G 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1117
- [5] Masuda S, Kitamura K, Okumura Y, Miyatake S, Tabata H, Kawai T 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 1624
- [6] Oh M S, Han J I, Lee K, Lee B H, Sung M M, Im S 2010 *Electrochemical and Solid-State Letters* **13** 194
- [7] Avis C, Kim S H, Hur J H, Jang J, Milne W I 2009 *Electrochemical and Solid-State Letters* **12** 93
- [8] Zhang Q, Saraf L V, Hua F 2007 *Nanotechnology* **18** 195204
- [9] Sun J, Lu A X, Wang L P, Hu Y, Wan Q 2009 *Nanotechnology* **20** 335204
- [10] Lim W, Douglas E A, Lee J, Jang J H, Craciun V 2009 *J. Vac. Sci. Technol. B* **27** 2128
- [11] Paine D C, Yaglioglu B, Beiley Z, Lee S H 2008 *Thin Solid Film.* **516** 5894
- [12] Wu H Z, Liang J, Jin G F, Lao Y F, Xu T L 2007 *IEEE Transactions on Electron Devices* **54** 2856
- [13] Zhu X M, Wu H Z, Wang S J, Zhang Y Y, Cai C F, Si J X, Yuan Z J, Du X Y, Dong S R 2009 *J. Semicond.* **30** 033001
- [14] Cheng S H, Ling Z Y, Huang F 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 668 (in Chinese) [程珊华、宁兆元、黄峰 2002 物理学报 **51** 668]
- [15] Xu T N, Wu H Z, Zhang Y Y, Wang X, Zhu X M, Yuan Z J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 616 (in Chinese) [徐天宁、吴惠楨、张莹莹、王雄、朱夏明、原子健 2010 物理学报 **59** 616]
- [16] Chiang H Q, Wager J F, Hoffman R L, Jeong J, Keszler D A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 013503
- [17] Jackson W B, Hoffman R L, Herman G S 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 193503
- [18] Görrn P, Hölzer P, Riedl T, Kowalsky W, Wang J, Weimann T, Hinze P, Kipp S 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 063502
- [19] Han S Y, Lee D H, Herman G S, Chang C H 2009 *J. Display Technology* **5** 520
- [20] Chiang H Q, McFarlane B R, Hong D, Presley R E, Wager J F 2008 *Journal of Non-Crystalline Solids* **354** 2826

## Study of zinc tin oxide thin-film transistor\*

Wang Xiong Cai Xi-Kun Yuan Zi-Jian Zhu Xia-Ming Qiu Dong-Jiang Wu Hui-Zhen<sup>†</sup>  
(Department of Physics, State Key Laboratory of Silicon Materials, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)  
(Received 24 May 2010; revised manuscript received 21 June 2010)

### Abstract

Thin film transistors with zinc tin oxide as the active channel layer were fabricated on ITO glass by rf magnetron sputtering. SiO<sub>2</sub> gate dielectric was grown using plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD). These devices operate with a maximum field effect mobility of 9.1 cm<sup>2</sup>/V·s, threshold voltage of -2 V, and current on/off ratio of 10<sup>4</sup>.

**Keywords:** zinc tin oxide, thin-film transistors, field effect mobility

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

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10974174), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB925603) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant Nos. Z6100117 and Y4080171).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: hzwwu@zju.edu.cn