

低温透明非晶 IGZO 薄膜晶体管的光照稳定性*

李喜峰[†] 信恩龙 石继锋 陈龙龙 李春亚 张建华

(上海大学, 新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072)

(2012年12月4日收到; 2012年12月26日收到修改稿)

采用室温射频磁控溅射非晶铟镓锌氧化物 (a -IGZO), 在相对低的温度 ($< 200\text{ }^\circ\text{C}$) 下成功制备底栅 a -IGZO 薄膜晶体管器件, 其场效应迁移率 $10\text{ cm}^{-2}\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 开关比大于 10^7 , 亚阈值摆幅 SS 为 0.4 V/dec , 阈值电压为 3.6 V . 栅电压正向和负向扫描未发现电滞现象. 白光发光二极管光照对器件的输出特性基本没有影响, 表明制备的器件可用于透明显示器件. 研究了器件的光照稳定性, 光照 10000 s 后器件阈值电压负向偏移约 0.8 V , 这种漂移是由于界面电荷束缚所致.

关键词: 非晶铟镓锌氧化物, 薄膜晶体管, 光照稳定性, 电滞现象

PACS: 85.30.Tv, 81.15.Cd

DOI: 10.7498/aps.62.108503

1 引言

2004 年 Hosono 等^[1] 在 Nature 上首次报道了非晶铟镓锌氧化物 (a -IGZO) 薄膜晶体管 (TFT), 因为其具有较高的迁移率 ($7\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$), 且与目前非晶硅 TFT 工艺兼容. 此外其作为一种新型透明氧化物薄膜晶体管能够开发透明电子器件促进透明电子学的进展得到广泛关注^[1-3]. 与非晶硅和低温多晶硅相比, a -IGZO 具有较高迁移率、良好可见光透过率以及可低温制作等优异的性能^[4-7]. 非晶硅虽然能够在低温下制备, 但由于其迁移率较低而无法应用, 而多晶硅虽然迁移率较高, 但由于多晶硅的制备温度较高, 不适用于不耐高温的衬底材料. 随着柔性显示技术的发展, 需要低温 ($< 200\text{ }^\circ\text{C}$) 制备 TFT 阵列基板^[8,9]. 因此, 开展低温氧化物 TFT 研究对于发展柔性显示具有显著的意义. 此外, 传统的非晶硅由于光照泄漏电流的增加, 需要黑矩阵对光进行屏蔽, 避免光照对器件的影响, 这导致了器件开口率低, 从而增加功耗^[10,11]. 而以前研究发现 a -IGZO TFT 经过光照会导致器件不稳定^[12-14], 从而使得其无法用于透明显示. 基于此, 本文成功地开发了低温高性能非晶 IGZO TFT, 研究其白光

发光二极管 (LED) 辐照对其稳定性的影响, 便于其用于透明显示.

2 实验

通过传统的光刻工艺制造底栅结构的 a -IGZO TFT, 其结构如图 1 所示. 基板采用 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的 corning EXG 玻璃. 首先通过直流磁控溅射溅射一层 100 nm 的透明 ITO 作为栅极, 接着采用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 生长 300 nm SiO_x 作为栅绝缘层, 然后射频磁控溅射 50 nm 的 IGZO 作为有源层, 随后 PECVD 生长 50 nm 的 SiO_x 作为刻蚀阻挡层, 并用干刻定义出器件的沟道宽度和长度, 分别为 $15\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8\text{ }\mu\text{m}$, 接着磁控溅射一层 100 nm 的 ITO 作为源漏电极, 最后 PECVD 生长 150 nm 的 SiO_x 作为钝化层. 所有的图案通过光刻工艺获得, SiO_x 采用干法刻蚀, 其他的图案采用湿法刻蚀. 所有的成膜温度低于 $200\text{ }^\circ\text{C}$, 制备的器件在空气下进行 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 稳定化退火 4 h .

采用 U-3900 H 紫外可见分光光度计测量薄膜和器件的透过率, Agilent HP4155C 半导体参数分析仪测试 a -IGZOTFT 器件的输出和转移特性曲线, 所有测试均在室温下进行. 采用白光 LED 对器件进行光照, 其 LED 发光波长采用 photo research

* 国家自然科学基金 (批准号: 61006005) 和上海科学技术委员会重大攻关项目 (批准号: 10dz1100102) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: lixifeng@shu.edu.cn

PR650 光谱光度计测量.

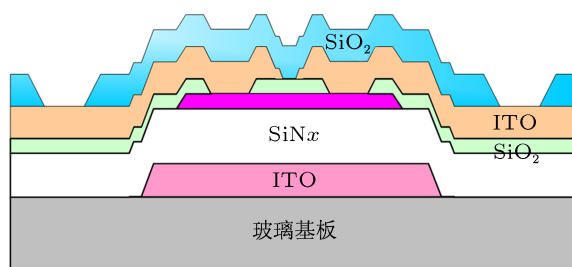
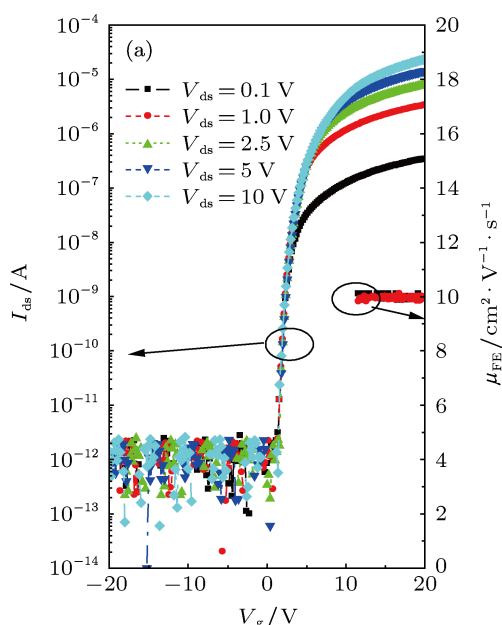


图1 a-IGZO 薄膜晶体管结构示意图

3 结果与讨论

图 2 给出了在源漏电压为分别为 0.1, 1, 2.5, 5 和 10 V 时测得的 a-IGZO TFTs 器件的转移特



性曲线 ($I_{ds}-V_{gs}$). 可以看出器件具有低的泄漏电流 (10^{-12} A), 器件的开关比大于 10^7 , 阈值电压 V_{th} 根据 $I_{ds}^{1/2}$ 与 V_{gs} 的关系^[15] 萃取如图 2(b) 所示, 获得阈值电压 V_{th} 为 3.6 V, 通过在低源漏电压 ($V_{ds} \ll V_{gs}$) 计算的跨导定义器件的场效应迁移率 (μ_{FE})^[16] 为

$$\mu_{FE} = Lg_m/WC_iV_{ds}, \quad (1)$$

其中 C_i 表示单位面积栅绝缘层电容, L 和 W 分别是沟道长度和宽度, g_m 定义为

$$g_m = (\partial I_{rmd})/(\partial V_{gs}), \quad (2)$$

其中 I_{rmd} 和 V_{gs} 分别代表漏电流和栅电压,

图 2(a) 给出了 $V_{ds} = 0.1$ V 和 1 V 的通过 (1) 和 (2) 式从转移特性计算的 μ_{FE} , 器件场效应迁移率为 $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

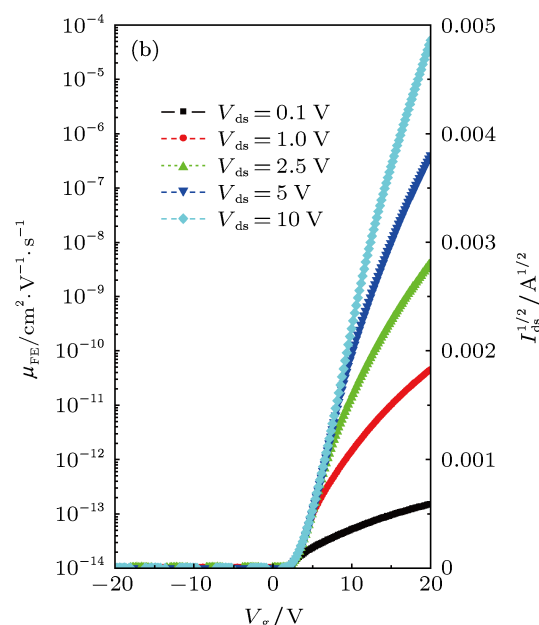


图2 (a) 不同 V_{ds} 电压下 a-IGZO TFT 的转移特性; (b) 方均根源漏电流与栅极电压的关系曲线

亚阈值摆幅 (SS) 通过 $V_{ds} = 10$ V 的转移曲线亚阈值区域的斜率获得

$$SS = \left(\frac{\partial \log I_{rmd}}{\partial V_{gs}} \right)^{-1}, \quad (3)$$

计算获得的 SS 约为 0.4 V/dec.

图 3 为测试时漏极电压为 10 V, 栅极电压从 -20 V 扫至 20 V 再扫回 -20 V a-IGZO TFT 的转移特性. 表明器件从正向扫描和从负向扫描特性没有发生变化, 没有观察到电滞现象 (正反向扫描曲线间的距离). 通常由于绝缘层中的缺陷在栅极电压作用下束缚了正电荷引起的电滞现象^[17], 我们制备的器件没有电滞现象, 表明器件中绝缘层缺陷

较少.

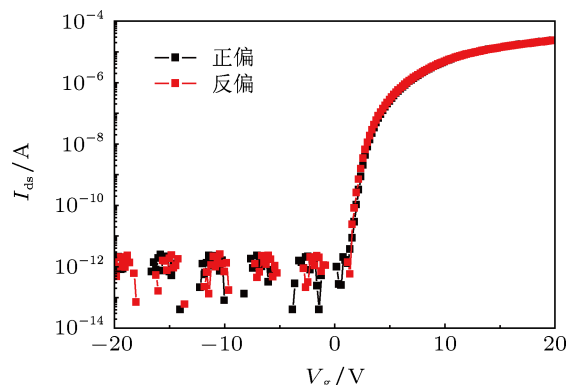


图3 无光照条件下 V_{Ds} 为 10 V 时 V_g 扫描从负到正和从正到负 a-IGZO TFT 的转移特性曲线

器件的开态漏电流和关态漏电流的稳定性, 对于其在驱动液晶显示器和有机发光二极管 (organic light-emitting diode, OLED) 的应用有着至关重要的作用. 图 4 给出了关态和开态漏电流与时间的关系. 从图 4(a) 可以看出器件的关态电流处于超出测试

的灵敏度, 表明器件关态漏电流低于 10^{-12} A, 能够满足目前的显示要求. 图 4(b) 开态电流在 600 s 的时间保持不变, 表明器件稳定性较好, 能够用于显示器件.

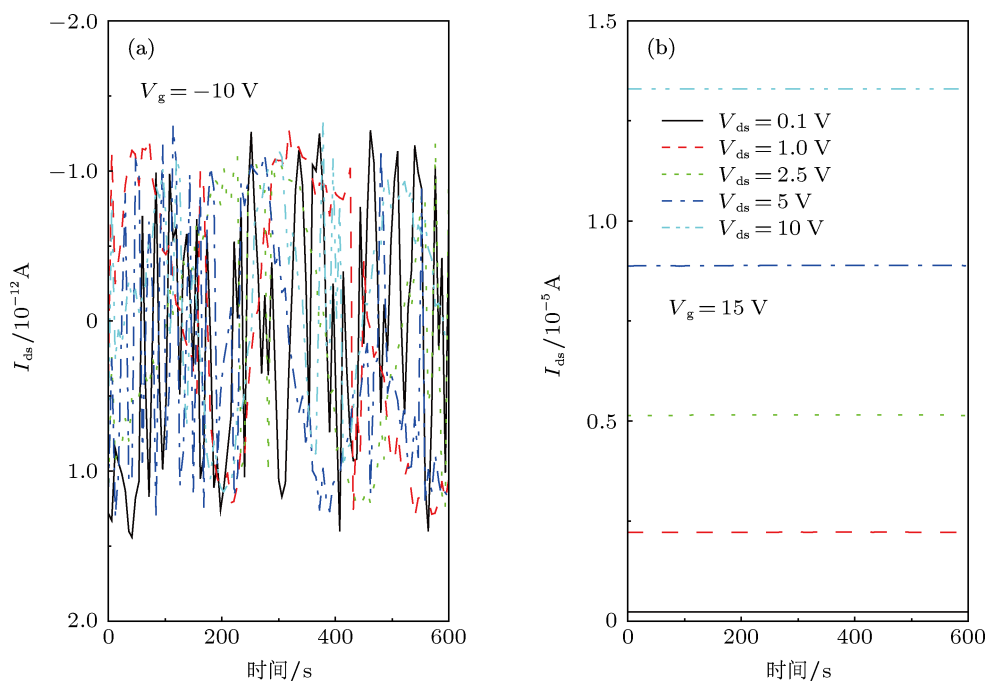


图 4 漏电流与时间的关系曲线 (a) *a*-IGZO 关态时 ($V_g = -10$ V); (b) *a*-IGZO TFT 开态时 ($V_g = 15$ V)

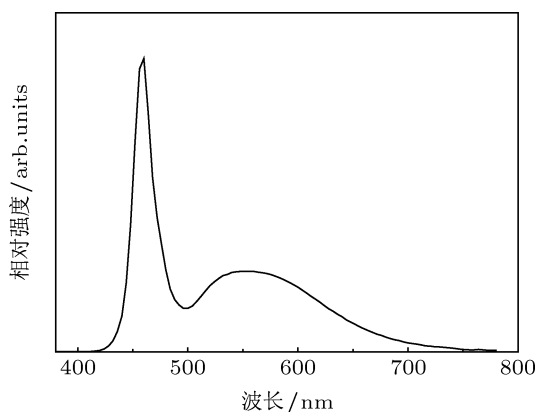


图 5 白光 LED 的发光光谱

图 5 为给出了用于辐照 *a*-IGZO TFT 的白光 LED 发光光谱曲线, 光谱主要集中在可见光区域, 能够用来表征透明显示器件的光谱范围. 图 6 给出了 *a*-IGZO TFT 光照前后的输出特性对比. 漏电流显示出良好的截止和饱和特性, 说明器件为 *n* 型增强型薄膜晶体管. 从图中可以看出, 光照前后器件

的输出特性基本没有变化, 表明可见光对器件的输出特性没有影响. 与 *a*-Si TFT 相比, 由于 *a*-Si TFT 光照后器件的输出特性明显增加, 在 TFT-LCD 中需要黑矩阵对非晶硅 TFT 进行光屏蔽, 从而导致开口率降低, 无法用于透明显示. 而 *a*-IGZO 可见光辐照对输出特性基本没有影响, 表明器件用于显示驱

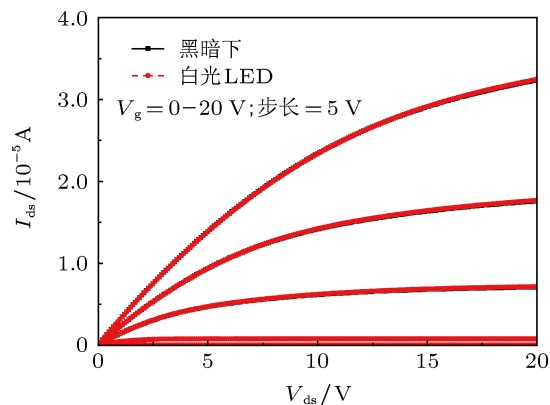


图 6 白光 LED 光照前和光照后 *a*-IGZO TFT 的输出特性

动元件是无需黑矩阵进行光屏蔽,从而导致开口率提高,提高器件光利用效率,能够降低能耗,并且能够用来透明显示. *a*-IGZO TFT 器件与可见光光照时间的关系,可能用 *a*-IGZO 的光学禁带宽度大于 *a*-Si 的光学带隙 (1.8 eV)^[18] 来解释. 图 7 给出了 *a*-IGZO 薄膜的吸收系数与光子能量 $((ahv)^2-hv)$ 的关系曲线. 从 $(ahv)^2-h$ 曲线可得薄膜的 *a*-IGZO 光学禁带宽度为 3.6 eV. 这表明器件不吸收可见光,或者可见光光子能量不能激发出光电子,因而不会产生光电流.

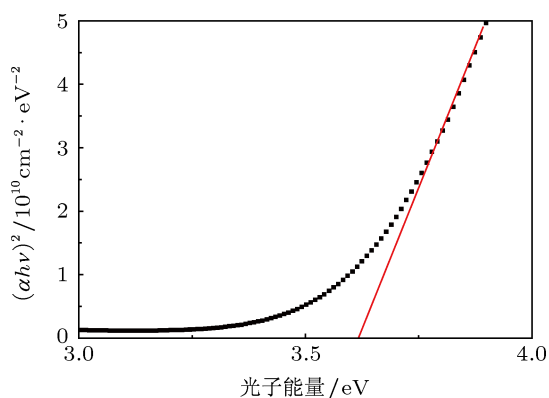


图 7 *a*-IGZO 薄膜的吸收系数与光子能量 $((ahv)^2-hv)$ 的关系曲线

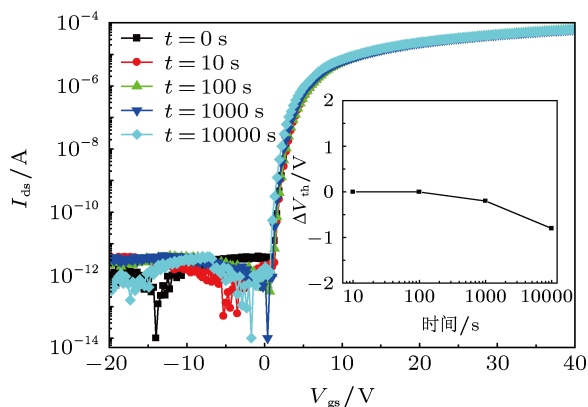


图 8 长时间白光 LED 光照作用下的 *a*-IGZO TFT 器件的转移特性曲线,插图是阈值漂移 ΔV_{th} 与时间的关系

图 8 给出了 *a*-IGZO TFT 器件在白光 LED 光

照 10000 s 的特性曲线. 从图中可看出, 曲线的形状没有发生改变, 仅仅曲线向负方面移动随着辐照时间的增加, 表明仅 V_{th} 往负方向漂移, 这与文献报道的结果一致^[19]. 图 8 插图给出阈值漂移量 (ΔV_{th}) 与辐照时间的关系, 10000 s 后器件的 V_{th} 漂移仅 -0.8 V, 与 Chen 等^[19] 报道的器件在 1000 s 光照偏移大于 -10 V 相比有着明显的改善. 这种漂移可能是由于绝缘层界面或 *a*-IGZO 与绝缘层界面的空穴束缚所致^[20], 或者由于光照诱致 *a*-IGZO 薄膜中中性氧空位 (V_O^0) 离子所致^[21-25]. 研究发现在室温放置 2 d 后器件能够恢复. 这说明这种漂移不是由于 V_O^0 离子所致, 因为 V_O^0 离子只有经过退火才能消除, 这表明我们的器件光致漂移是由于界面束缚所致. 而界面束缚缺陷态可以由亚阈值摆幅 *SS* 表征^[26].

$$SS = \frac{qk_B T(N_{it} + D_{it})}{C_i \log(e)}$$

其中 q 电子电荷 D_{it} 是绝缘层与有源层界面间的束缚态密度, N_{it} 为有源层的束缚态密度, C_i 为单位面积栅绝缘层电容, k_B 为 Boltzmann 常数, T 为绝对温度, t_c 为有源层厚度. 假定 D_{it} 和 N_{it} 分别为零, 获得最大的 D_{it} 和 N_{it} 分别是 $5.0 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ 和 $1.0 \times 10^{-17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$, 小于文献报道的 $1.1 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ 和 $1.1 \times 10^{-17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$. 表明制备的 TFT 的缺陷较小, 进一步证实光照偏移较少的原因.

4 结论

本文成功地制备了低温透明底栅 *a*-IGZO TFT 器件, 器件的场效应迁移率 $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 开关比大于 10^7 , 亚阈值摆幅 *SS* 为 0.4 V/dec , 阈值电压为 3.6 V . 栅电压正向和负向扫描未发现电滞现象, 白光 LED 光照对器件的输出特性基本没有影响, 表明制备的器件可能用于透明显示器件. 光照 10000 s 后器件阈值电压负便宜约 -0.8 V , 这种漂移是由于界面电荷束缚所致.

[1] Nomura K, Ohta H, Takagi A, Kamiya T, Hirano M, Hosono H 2004 *Nature* **432** 488
 [2] Jeon S J, Chang J W, Choi K S, Kar J P, Lee T, Myoung J M 2010 *Mat. Sci. Semicond. Proc.* **13** 320
 [3] Wu H Z, Zhang Y Y, Wang X, Zhu X M, Yuan Z J, Xu T N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5018 (in Chinese) [吴惠桢, 张莹莹, 王雄, 朱夏明, 原子健, 徐天宁 2010 物理学报 **59** 5018]

[4] Libsch F R, Kanicki J 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 1286
 [5] Estrada M, Cerdeira A, Iniguez B 2012 *Microelectron. Reliab.* **52** 1342
 [6] Kim G H, Jeong W H, Kim H J 2010 *Phys. Status Solidi A* **207** 1677
 [7] Lee J, Park J S, Pyo Y S, Lee D B, Kim E H 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 123502
 [8] Takechi K, Nakata M, Eguchi T, Yamaguchi H, Kaneko S 2009 *Jpn. J. Appl. Phys.* **48** 011301

- [9] Kim M G, Kanatzidis M, Facchetti A, Marks T 2011 *Nature Mater.* **10** 382
- [10] Kimura H *U.S. Patent* 0 283 762 [2009-11-19]
- [11] Ito M, Kon M, Miyazaki C, Ugajin Y, Sekine N 2007 *IEICE Trans. Electron.* **E90-C** 2105
- [12] Huh J Y, Seo S B, Park H S, Jeon J H, Choe H H, Lee K W, Seo J H, Ryu M K, Park S H, Hwang C S 2011 *Curr. Appl. Phys.* **11** S49
- [13] Barquinha P, Fortunato E, Goncalves A, Pimentel A, Marques A, Pereira L, Martins R 2006 *Superlatt. Microstat.* **39** 319
- [14] Lee K H, Jung J S, Son K S, Park J S, Kim T S, Choi R, Jung J K, Kwon J Y, Koo B, Lee S 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 232106
- [15] Lee H G, OH S Y, Fuller G 1982 *IEEE Trans. Electron Dev.* **ED-29** 346
- [16] Park J S, Jeong J K, Mo Y G, Kim H D 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 262106
- [17] Cho I T, Lee J M, Lee J H, Kwon H I 2009 *Semicond. Sci. Technol.* **24** 015013
- [18] Chen X X, Yao R H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 237105 (in Chinese) [陈晓雪, 姚若河 2012 物理学报 **61** 237105]
- [19] Chen T C, Chang T C, Hsieh T Y, Tsai C T, Chen S C, Lin C S, Hung M C, Tu C H, Chang J J, Chen P L 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 192103
- [20] Görm P, Lehnhardt M, Riedl T, Kowalsky W 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 193504
- [21] Lany S, Zunger A 2005 *Phys. Rev. B* **72** 035215
- [22] Janotti A, van de Walle C G. 2007 *Phys. Rev. B* **76** 165202
- [23] Clark S J, Robertson J, Lany S, Zunger A 2010 *Phys. Rev. B* **81** 115311
- [24] Lee W J, Ryu B, Chang K J 2009 *Physica B* **404** 4794
- [25] Chowdhury M D H, Mifiorato P, Jang J 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 173506
- [26] Vygranenko Y, Wang K, Nathan A 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 263508

Stability of low temperature and transparent amorphous InGaZnO thin film transistor under illumination*

Li Xi-Feng[†] Xin En-Long Shi Ji-Feng Chen Long-Long
Li Chun-Ya Zhang Jian-Hua

(Key Laboratory of Advanced Display and System Applications of Ministry of Education, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(Received 4 December 2012; revised manuscript received 26 December 2012)

Abstract

The amorphous indium-gallium-zinc-oxide (*a*-IGZO) thin films are prepared by radio frequency magnetron sputtering at ambient temperature. The transparent thin film transistors (TFT) fabricated at low temperature (< 200 °C) with *a*-IGZO active channel exhibits good electrical properties with a field effect mobility of around $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, subthreshold swing of 0.4 V/decade, and high Ion/off current ratio of over 10^7 . Hysteresis is not observed when gate voltage sweeps forward and reverses. And the dependence of white LED illumination on characteristic of *a*-IGZO TFT is investigated. The results show that output characteristic is hardly affected, indicating the potential of the devices for transparent electronics. In particular, illumination stability is investigated under white LED illumination stress test, and the *a*-IGZO TFT shows only 0.4 V shift in threshold voltage. The negative shift can be explained on the basis of trap of interface state.

Keywords: amorphous indium-gallium-zinc-oxide, thin film transistors, illumination stability, hysteresis

PACS: 85.30.Tv, 81.15.Cd

DOI: 10.7498/aps.62.108503

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61006005) and the Shanghai Science and Technology Commission, China (Grant No. 10dz1100102).

[†] Corresponding author. E-mail: lixfeng@shu.edu.cn