

双沟道层对氮掺杂非晶氧化铟锌薄膜晶体管的影响

王乃倩¹, 张 群¹, 谢汉萍²

(1. 复旦大学 材料科学系, TFT-LCD 关键材料及技术国家工程实验室, 上海 200433; 2. 台湾交通大学 光电工程学系, 新竹 30010)

摘 要: 采用射频磁控溅射法, 在热氧化 p 型硅基片上制备了双沟道层非晶氧化铟锌(a-IZO)和氮掺杂氧化铟锌(a-IZON)薄膜晶体管(TFTs), 并研究了双沟道层对器件电学性能和温度稳定性的影响。研究发现, a-IZO/IZON 双沟道层 TFTs 具有较高的场效应迁移率, 为 $23.26 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 并且其阈值电压相较于单层 a-IZO-TFTs 正向偏移。这是由于氮掺杂可以减少沟道层中的氧空位, 抑制载流子浓度, 使器件具有更好的阈值电压。而 a-IZO 层避免了由于氮掺杂导致的场效应迁移率和开态电流的下降, 提升了器件的电流开关比。从 298 K 至 423 K 的器件转移特性曲线中发现, 双沟道层器件相较于单沟道层器件的温度稳定性更佳, 这可归因于 a-IZON 层的保护作用。氮掺杂可以减少氧在背沟道层表面的吸收/解吸反应, 改善器件的稳定性。

关 键 词: 双沟道层; 氮气掺杂; 温度稳定性; 薄膜晶体管

中图分类号: TN321 文献标识码: A

Influence of Double Channel Layers on the Performance of Nitrogen Doped Indium-zinc-oxide Thin Film Transistors

WANG Nai-Qian¹, ZHANG Qun¹, SHIEH Han-Ping²

(1. Department of Material Science, Fudan University, National Engineering Lab of TFT-LCD Materials and Technologies, Shanghai 200433, China; 2. Department of Photonics, National Chiao Tung University, Hsinchu 30010, Taiwan, China)

Abstract: The nitrogen-doped amorphous indium-zinc-oxide thin film transistors with double channel layers (a-IZO/IZON-TFTs) were fabricated by RF magnetron sputtering of IZO target on the thermal oxidized p-type Si substrate. Influence of the double channel layers on the electrical performance and thermal stability of the devices were investigated. It is found that a-IZO/IZON-TFTs have high field effect mobility of $23.26 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ and more positively shifted threshold voltage than that of a-IZO-TFTs. This is ascribed to the doped nitrogen which can help reduce oxygen vacancy in the channel layer, suppress carrier concentration and make the devices have a better threshold voltage. Meanwhile, employing a-IZO thin film can avoid the sharp drop of field effect mobility and drain on current caused by nitrogen doping on a-IZON layer, leading to promoting $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ ratio effectively. Besides, according to the transfer characteristics measured at temperatures from 298 K to 423 K, devices with a-IZO/IZON double layers have superior performance and thermal stability to TFTs of single channel layer, which can be ascribed to the protective effect of a-IZON thin film on the channel layers. The doped nitrogen can reduce the adsorption/desorption reaction of oxygen molecules on the back channel layer, leading to a significant improvement on thermal stability of the devices.

收稿日期: 2015-12-07; 收到修改稿日期: 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61136004, 61471126)

National Natural Science Foundation of China (61136004, 61471126)

作者简介: 王乃倩(1990-), 女, 硕士研究生. E-mail: 13210300033@fudan.edu.cn

通讯作者: 张 群, 教授. E-mail: zhangqun@fudan.edu.cn

Key words: double channel layers; nitrogen doped; thermal stability; thin film transistors

非晶氧化物半导体(AOSs)薄膜晶体管(thin film transistors, TFTs)以其场效应迁移率高、可见光区透明性好、大面积均匀性佳,以及制备温度低等优点,在液晶显示、有机发光二极管、柔性电子及全透明器件等领域具有潜在的应用前景^[1]。虽然 AOS-TFTs 是显示领域中最有可能替代传统硅基薄膜晶体管的产品^[2-6],但为了使 TFTs 器件具有更优异的电学性能和稳定性,氧化物半导体沟道层的研究仍然有大量工作亟待开展。

2005 年,Dehuff 课题组首次开展了 IZO-TFTs 的研究,他们采用传统的退火工艺制备了可见光区透明性良好的 IZO-TFTs: 经过 600℃退火处理的器件的漏极电流具有良好的饱和性,迁移率为 45~55 cm²/(V·s)、开关比为 10⁶、阈值电压为 -20 V 至 -10 V,此时沟道层为结晶态;而经过 300℃退火处理的器件的沟道层保持在非晶状态,且漏极电流仍具备良好的饱和性,迁移率为 10~30 cm²/(V·s)、开关比为 10⁶、阈值电压为 0 至 10 V^[7]。这说明 a-IZO-TFTs 在显示技术领域具有良好的发展前景。

2007 年,Zhang 等^[8]利用氮(N)掺杂提升 ZnO 氧化物薄膜晶体管的器件性能,并优化了器件的偏压稳定性和老化稳定性。2013 年,Raja 等^[9-10]研究了氮掺杂非晶 IGZO-TFT 的温度稳定性,发现氮掺杂可以降低温度对器件造成的影响,如不正常的亚阈值漏电流和缺陷的形成。由于氮掺杂减少了氧在背沟道层表面的吸收/解吸反应^[11],可以提高 ZnO 氧化物薄膜晶体管的器件性能和稳定性。2015 年,严海等^[12]开展了氮掺杂非晶 IZO 薄膜晶体管的研究,证实了氮气对 a-IZO-TFTs 电学稳定性提升有一定帮助。

本工作制备了非晶氧化铟锌层(a-IZO 层)和非晶氮掺杂氧化铟锌层(a-IZON 层)的双沟道层薄膜晶体管,研究了双沟道层对半导体器件性能的影响,并分析了器件温度稳定性提高的作用机理。

1 实验方法

1.1 沟道层薄膜的制备

实验使用射频磁控溅射法在玻璃基板上沉积了 10 nm 厚的沟道层薄膜,分别为 a-IZO、a-IZO/IZON、a-IZON/IZO 和 a-IZON 四种,用于表征其薄膜特性,讨论沟道层结构对于薄膜性能的影响。实验中使用 IZO 靶材,成分为 w(In₂O₃):w(ZnO)=90:10,靶材纯度为 99.99%,溅射功率为 70 W,本底压强为

0.399Pa,氩气流量为 20 sccm,氧气流量为 8 sccm,氮气流量为 2.5 sccm,三种气体的纯度均为 99.99%。溅射完成后在 250℃的氮气环境中退火 1 h。

1.2 薄膜晶体管的制备

实验制备了底栅顶结构的 TFT 器件,如图 1 所示。整个器件制备在 300 mm×300 mm 的 p 型重掺杂硅基板上,介质层为热氧化生长的 100 nm 厚的二氧化硅。使用射频磁控溅射法在室温下分别制备沟道层和源漏电极。沟道层分为四种,总厚度保持在 10 nm,如图 1 插图所示: (a)a-IZO 层; (b)a-IZO/a-IZON 双层(先制备 a-IZO 层,后制备 a-IZON 层); (c)a-IZON/a-IZO 双层(先制备 a-IZON 层,后制备 a-IZO 层); (d)a-IZON 层。其中双层结构的 a-IZO 和 a-IZON 层的厚度均为 5 nm。沟道层的溅射条件与沟道层薄膜制备条件一致。随后在纯氩环境中制备 100 nm 厚的 ITO 源漏电极,本底压强为 0.399Pa,功率为 50 W,氩气流量固定在 20sccm。为了提高器件的性能,最后整个器件在 250℃的氮气环境中退火 1 h。沟道层和源漏电极的制备中使用了掩模版,其沟道宽长比为 1000 μm/250 μm。

1.3 分析测试方法

使用 Bruker D8 Advanced X 射线衍射仪(XRD)表征薄膜的物相,以 Cu Kα1 为射线源;使用 Dimension 3100 型原子力显微镜(AFM)测量薄膜的厚度;使用 UV2450 型紫外/可见分光光度计测量薄膜的透射率曲线;使用 Keithley 4200 型半导体性能测试仪测量薄膜晶体管的转移特性曲线;并采用加温装置对器件进行温度稳定性的测试。

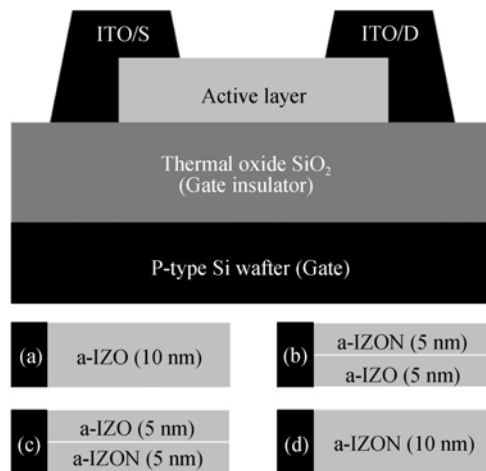


图 1 四种不同沟道层 TFTs 的结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of the TFTs with various channel layers

(a) a-IZO; (b) a-IZO/IZON; (c) a-IZON/IZO; (d) a-IZON

2 结果与讨论

2.1 沟道层薄膜的性能表征

图 2 为四种不同沟道层薄膜的 XRD 谱图, 可以发现, 无论单层还是双层, 图谱中均未出现明显的衍射峰。这说明制备的器件沟道层薄膜呈非晶状态, 掺氮对薄膜的结晶性影响并不明显。而薄膜的非晶态确保了器件性能在大面积范围内保持均匀性。

图 3 为不同沟道层薄膜的透射率曲线, 它是在相同器件工艺条件下在玻璃基板上制备的。四种沟道层薄膜 a-IZO、a-IZO/IZON、a-IZON/IZO 和 a-IZON 层在 400~700 nm 可见光范围内包括玻璃基板的平均透射率分别为 90.3%、89.7%、89.6%、89.9%, 超过或接近 90%, 均具有良好的透明性。这说明双沟道层器件也具有在透明显示领域的应用潜力, 而且可见光范围内的透射率基本一致, 避免了不同波长具有不同透射率的问题。

2.2 薄膜晶体管的器件性能

图 4 为具有不同沟道层结构的薄膜晶体管的转移特性曲线, 其中器件的性能指标如表 1 所示。可

以看出, 四种器件均有较高的电流开关比($I_{\text{on/off}}$), 高于或接近于 10^8 的数量级, 同时亚阈值摆幅($S.S$)均小于 0.8 V/dec。a-IZON-TFT 器件的场效应迁移率明显低于 a-IZO-TFT, 分别为 $14.50 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 和 $27.98 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。而 a-IZON-TFT 的阈值电压较 a-IZO-TFT 正向移动, 更接近 0 V, 分别为 0.5 V 和 -3.5 V。这是由于氮离子半径为 $1.46\times10^{-12} \text{ m}$ 接近于氧离子的半径($1.40\times10^{-12} \text{ m}$), 所以氮掺杂可以有效地减少氧空位, 起到抑制载流子浓度的作用, 导致阈值电压右移和场效应迁移率降低。同时, 氮掺杂还会降低界面和/或沟道层中的缺陷态, 使得沟道层和栅介质层界面的缺陷密度减少^[13]。

由图 4 和表 1 可知, 双沟道层器件 a-IZO/IZON-TFT 和 a-IZON/IZO-TFT 均有较好的场效应迁移率, 分别为 $23.26 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 和 $21.02 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 相较于 a-IZO-TFT 阈值电压都发生了正向漂移更接近 0 V, 分别为-2.5 V 和-1.5 V。另外, 从图 4 不难发现, 氮掺杂在抑制沟道层中载流子浓度的同时还会导致器件开态电流的减小。而双沟道层中的 a-IZO 层可以有效地抑制开态电流的降低, 从而使器件得到较好的电流开关比。所以, 双沟道层 TFT 对于提高器件性能具有很大的帮助^[14]。

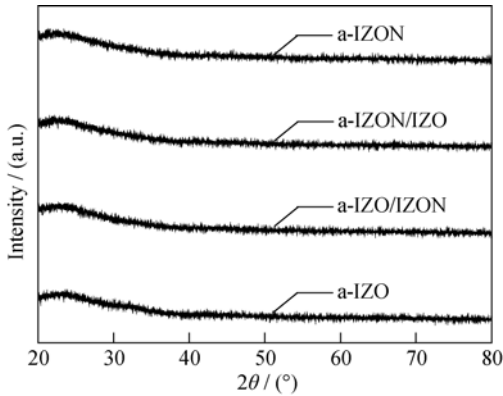


图 2 四种不同沟道层薄膜的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns for different channel layers

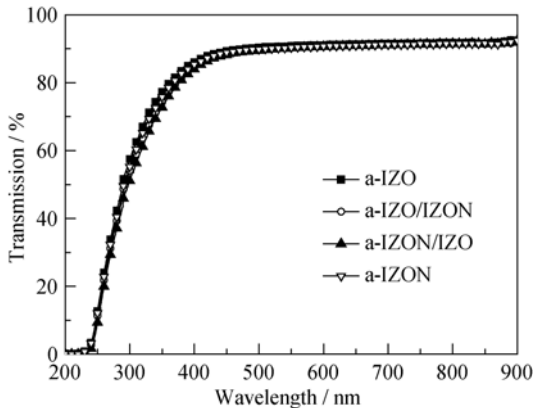


图 3 四种沟道层薄膜的透射率曲线
Fig. 3 Transmission curves of different channel layers

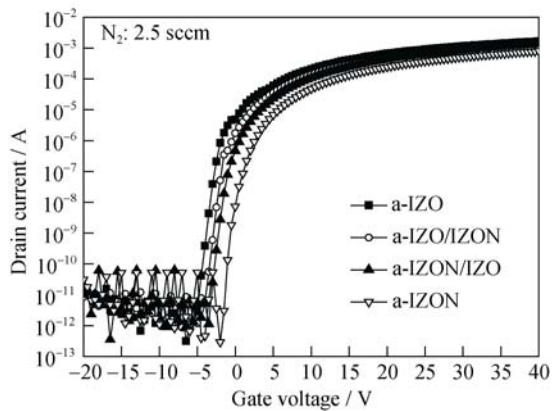


图 4 具有不同沟道层结构的 TFTs 的转移特性曲线
Fig. 4 Transfer characteristics (I_D - V_G) curves of the TFTs with different structures of channel layers

表 1 不同沟道层 TFTs 的性能指标				
Table 1 Charateristics of the TFTs with different channel layers				
Channel layers	$\mu_{FE} / (\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	V_{th} / V	$S.S / \text{V}\cdot\text{dec}^{-1}$	$I_{on/off}$
a-IZO	27.98	-3.0	0.5	3.1×10^8
a-IZO/IZON	23.26	-2.5	0.5	1.6×10^8
a-IZON/IZO	21.02	-1.5	0.5	8.3×10^7
a-IZON	14.50	0.5	0.8	1.2×10^8

从表 1 中可以看出, 两种双沟道层结构均在原先单层基础上改善了器件的综合性能。a-IZO/IZON 双沟道层器件比 a-IZON/IZO 双沟道层器件的场效应迁移率 μ_{FE} 和电流开关比 I_{on}/I_{off} 均较高。这是因为在双沟道层结构中, 与介质层接触的沟道层对场效应迁移和电流效应发挥主要作用^[15], a-IZO 层比 a-IZON 层具有更高的载流子浓度, 使得 a-IZO/IZON 双沟道层器件具有更好的场效应迁移率和电流开关比。另外, 覆盖于 a-IZO 层之上的 a-IZON 可以作为钝化层, 起到保护作用, 使 a-IZO/IZON 双沟道层器件的性能更佳。

2.3 薄膜晶体管的温度稳定性

在讨论氮掺杂 TFT 器件性能的基础上, 本工作还研究了其温度稳定性。对器件进行加温, 从室温 (298 K) 升温至 423 K 获得的转移特性曲线如图 5 所示, 由图可以发现, 随着测试温度的升高, 器件的转移特性曲线出现负向漂移, 性能逐渐变差。而当温度升至 423 K 以上时, 器件不表现出电学性能, 没有开关特性。在这里定义

$$\Delta V_{th} = V_{th}(T) - V_{th}(298 \text{ K}) \quad (1)$$

其中, 阈值电压 (V_{th}) 对应于标准电流 ($NI_{ds} = I_{ds} \cdot L/W$)

为 10^{-8} A 时^[16-20], 栅电压 (V_{gs}) 的值; $V_{th}(T)$ 为 T 温度时的阈值电压; $V_{th}(298 \text{ K})$ 为室温时的阈值电压^[21-22]。根据图 6 的 ΔV_{th} 变化图可知, 氮掺杂弥补了沟道层中的氧空位, 使得沟道层中缺陷态减少。故而 a-IZON-TFT 比 a-IZO-TFT 高温时的阈值电压变化量有所降低。此外, 从图 6 中还可以看出, 双沟道层器件 ΔV_{th} 的变化要小于单沟道层器件, 温度越高、该效应越明显, a-IZO/IZON 层在 423 K 的 ΔV_{th} 近似为 a-IZO 单层器件的一半。可以认为, 双沟道层的结构相当于在原先基础上覆盖了一层 a-IZO 层或者 a-IZON 层, 作为器件内部的钝化层, 起到一定的保护作用, 减少了缺陷, 阻碍外界环境对其的影响, 提升了沟道层的质量。因此双沟道层器件的温度稳定性总体上会比单沟道层器件有明显改善。此外, 掺氮不仅抑制了沟道层中的载流子浓度, 而且还起到提高器件温度稳定性的作用。这是由于掺氮减少了氧在背沟道层表面的吸收/解吸反应^[11]。因此 a-IZO/IZON 双沟道层结构中, 由于 a-IZON 发挥了背沟道层的保护作用, 其 TFT 器件温度稳定性比 a-IZON/IZO-TFT 层表现更佳。而对氧化物 TFT 来说, 如果能够在内部降低缺陷态的形成, 这会比外部再制备一层钝化层的 TFT 器件, 具有更好的电学性能和温度稳定性^[13]。

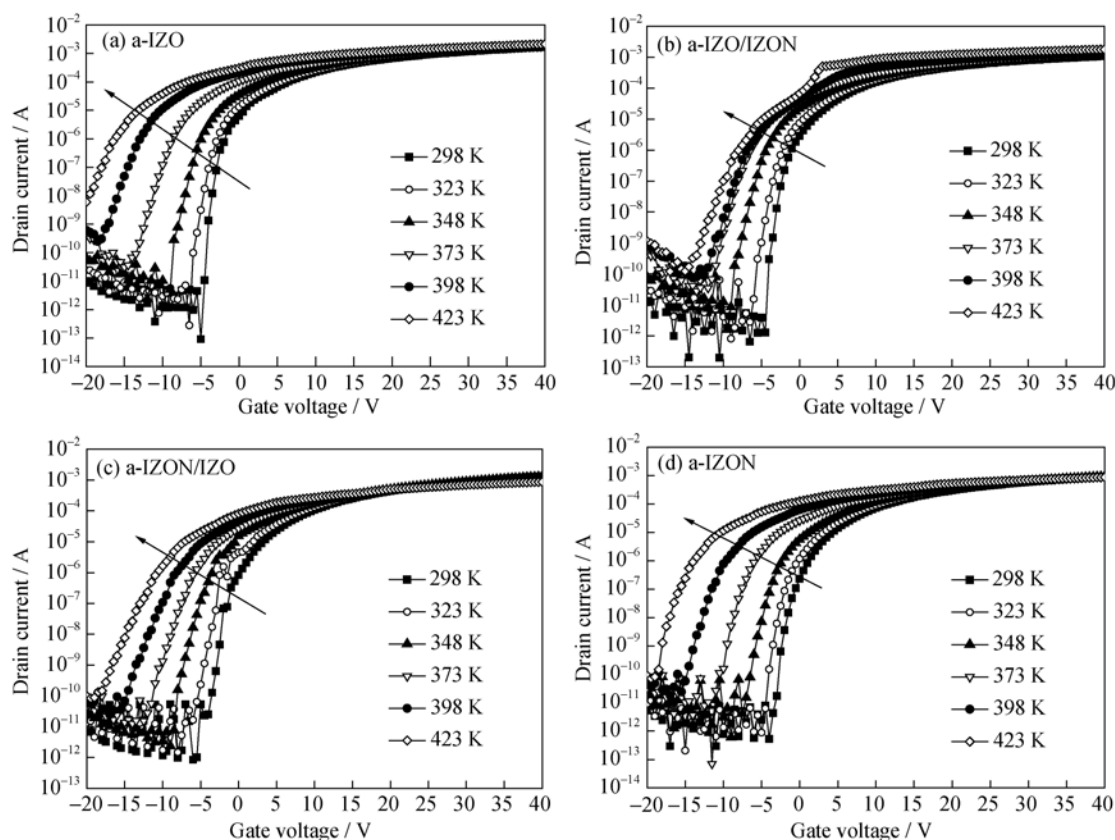


图 5 不同测试温度下, 不同沟道层 TFTs 的转移特性曲线

Fig. 5 Transfer characteristics (I_D - V_G) curves of the TFTs tested at different temperatures

(a) a-IZO; (b) a-IZO/IZON; (c) a-IZON/IZO; (d) a-IZON

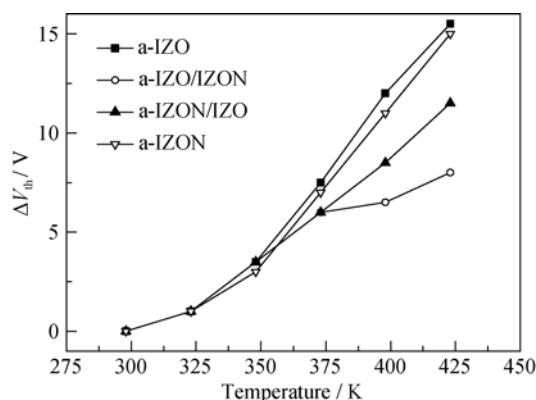


图6 不同沟道层 TFTs 阈值电压变化量的温度依赖性

Fig. 6 Temperature dependency of ΔV_{th} for TFTs with different channel layers

3 结论

实验制备了双沟道层非晶掺氮氧化铟锌薄膜晶体管, 讨论了双沟道层对于器件性能和温度稳定性的影响。结果发现, 双沟道层在可见光范围内具有90%左右的透射率, 显示出其在透明显示器件领域的应用前景。对于 TFT 器件性能而言, 掺氮层可以有效减少沟道层的氧空位, 抑制其载流子浓度, 使得相应的器件具有更好的阈值电压。而 a-IZO 层由于载流子浓度较高可以保证器件场效应迁移率不会因为掺氮而显著下降, 同时还能阻止氮掺杂对于开态电流降低的影响, 得到较好的电流开关比。此外 a-IZON 层可以作为钝化层覆盖在 a-IZO 层上, 起到保护器件的作用, 从而提升 a-IZO/IZON-TFTs 器件的温度稳定性。

参考文献:

- [1] NOMURA KENJI, OHTA HIROMICHI, TAKAGI AKIHIRO, *et al.* Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors. *Nature*, 2004, **432**(7016): 488–492.
- [2] KAMIYA TOSHIO, NOMURA KENJI, HOSONO HIDEO, *et al.* Present status of amorphous In-Ga-Zn-O thin-film transistors. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2010, **11**(4): 044305.
- [3] PARK JOON SEOK, MAENG WAN-JOO, KIM HYUN-SUK, *et al.* Review of recent developments in amorphous oxide semiconductor thin-film transistor devices. *Thin Solid Films*, 2011, **520**(6): 1679–1693.
- [4] NOH JOO HYON, RYU SEUNG YOON, JO SUNG JIN, *et al.* Indium oxide thin-film transistors fabricated by rf sputtering at room temperature. *IEEE Electron Device Letter*, 2010, **31**(6): 567–569.
- [5] KIM WON, BANG JUNG-HWAN, UHM HYUN-SEOK, *et al.* Effects of post plasma treatment on material properties and device characteristics in indium zinc oxide thin film transistors. *Thin Solid Film*, 2010, **519**(5): 1573–1577.
- [6] LIU XIANG, ZHANG SHENG-DONG, XUE JIAN-SHE, *et al.* Improvement of indium gallium zinc oxide thin film transistor with etch-stop layer of bottom-gate. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2014, **34**(2): 130–133.
- [7] DEHUFF N L, KETTENRING E S, HONG D, *et al.* Transparent thin-film transistors with zinc indium oxide channel layer. *Applied Physics Letters*, 2005, **97**(6): 064505-1-5.
- [8] ZHANG XIN-AN, ZHANG JING-WEN, ZHANG WEI-FENG, *et al.* Enhancement-mode thin film transistor with nitrogen-doped ZnO channel layer deposited by laser molecular beam epitaxy. *Thin Solid Films*, 2007, **516**(10): 3305–3308.
- [9] RAJA JAYAPAL, JANG KYUNGSOO, BALAJI NAGARAJAN, *et al.* Suppression of temperature instability in InGaZnO thin-film transistors by *in situ* nitrogen doping. *Semiconductor Science and Technology*, 2013, **28**(11): 115010-1-6.
- [10] RAJA JAYAPAL, JANG KYUNGSOO, BALAJI NAGARAJAN, *et al.* Negative gate-bias temperature stability of N-doped In-GaZnO active-layer thin-film transistors. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(8): 083505-1-4.
- [11] LIU PO-TSUN, CHOU YI-THE, TENG LI-FENG. Environment-dependent metastability of passivation-free indium zinc oxide thin film transistor after gate bias stress. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(5): 233504-1-3.
- [12] YAN HAI, TSAI YUNCHU, ZHANG QUN, *et al.* Impact of N₂-doping on reliability of amorphous InZnO: N thin film transistors. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, **35**(9): 1054–1058.
- [13] KIM CHANG EUN, YUN ILGU. Effects of nitrogen doping on device characteristics of InSnO thin film transistor. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(1): 013501-1-3.
- [14] 岳 兰. 多元非晶氧化物薄膜及其薄膜晶体管的研究. 上海: 复旦大学博士学位论文, 2013.
- [15] CHEONG WOO-SEOK, CHUNG SUNG MOOK, SHIN JAE-HUN, *et al.* Electrical properties of top-gate oxide thin-film transistors with double-channel layers. *Journal of Crystal Growth*, 2011, **326**(1): 186–190.
- [16] HU ZHE, DONG CHENG-YUAN, ZHOU DA-XIANG, *et al.* Thermal stability of amorphous InGaZnO thin film transistors with different oxygen-contained active layers. *Journal of Display Technology*, 2015, **11**(7): 610–614.
- [17] LIU KUANG-HSIEN, CHANG TING-CHANG, CHOU WU-CHING, *et al.* Influence of an anomalous dimension effect on thermal instability in amorphous-InGaZnO thin-film transistors. *Journal of Applied Physics*, 2014, **116**(15): 154508-1-7.

- [18] CHEN TE-CHIH, CHANG TING-CHANG, HSIEH TIEN-YU, *et al.* Light-induced instability of an InGaZnO thin film transistor with and without SiO_x passivation layer formed by plasma-enhanced-chemical-vapor-deposition. *Applied Physics Letters*, 2010, **97(19)**: 192103-1-3.
- [19] ZHOU DA-XIANG, HU ZHE, WU QI, *et al.* Light illumination stability of amorphous InGaZnO thin film transistors with sputtered AlO_x passivation in various thicknesses. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, **53(15)**: 121103-1-5.
- [20] CHANG GENG-WEI, CHANG TING-CHANG, JHU J C, *et al.* Temperature-dependent instability of bias stress in InGaZnO thin-film transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, **61(6)**: 2119–2124.
- [21] HU ZHE, ZHOU DA-XIANG, XU LING, *et al.* Thermal stability of amorphous InGaZnO thin film transistors passivated by AlO_x layers. *Solid-State Electronics*, 2015, **104**: 39–43.
- [22] TAKECHI KAZUSHIGE, NAKATA MITSURU, EGUCHI TOSHIMASA, *et al.* Temperature-dependent transfer characteristics of amorphous InGaZnO₄ thin-film transistors. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, **48(1)**: 011301-1-6.