

文章编号:1007-2780(2017)05-0339-05

高性能钆铝锌氧薄膜晶体管的制备

董俊辰¹, 郁文^{1,2}, 李慧津¹, 韩德栋^{1*}, 张盛东^{1,2}, 张兴¹, 王漪^{1*}

(1. 北京大学微电子学研究院, 北京 100871; 2. 北京大学深圳研究生院, 广东深圳 518055)

摘要: 本文研究并制备了钆铝锌氧薄膜和以钆铝锌氧为有源层的薄膜晶体管。钆铝锌氧薄膜材料的光致发光光谱和透过率说明钆铝锌氧薄膜在透明显示方向的应用潜力。透射电子显微镜揭示了钆铝锌氧薄膜的非晶态微观结构。钆铝锌氧薄膜晶体管显示了良好的转移特性和输出特性。器件开关比大于 10^5 、饱和迁移率约为 $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。实验结果表明, 钆铝锌氧薄膜可用作氧化物薄膜晶体管的有源层材料; 钆铝锌氧薄膜晶体管可作为像素电路的驱动器件。

关键词: 钆铝锌氧; 薄膜晶体管; 有源层

中图分类号: TN405 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/JYXS20173205.0339

Fabrication of high performance Gadolinium-aluminum-zinc-oxide thin film transistors

DONG Jun-chen¹, YU Wen^{1,2}, LI Hui-jin¹, HAN De-dong^{1*}, ZHANG Sheng-dong^{1,2},
ZHANG Xing¹, WANG Yi^{1*}(1. *Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China;*
2. *Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China*)

Abstract: Because of the advantages in high mobility and low temperature process, oxide thin film transistor (TFT) becomes the hotspot in display technology at present. Gadolinium-aluminum-zinc-oxide (GdAZO) thin film and GdAZO TFT (active layer is GdAZO thin film) were fabricated. The photoluminescence spectra and the transmittance of GdAZO thin film demonstrate the application potential in transparent display. The transmission electron microscope image discovers the amorphous microstructure of the GdAZO thin film. The GdAZO TFTs manifests preferable transfer characteristics and output characteristics. The on-to-off current ratio is larger than 10^5 , and the saturation mobility is about $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. The results imply that the GdAZO is a category of feasible candidate for oxide TFTs, besides, the GdAZO TFTs can serve as the drive devices in pixel circuits.

Key words: GdAZO; TFT; active layer

收稿日期: 2016-09-29; 修订日期: 2016-10-20.

基金项目: 国家自然科学基金(No.61275025)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61275025)

* 通信联系人, E-mail: hangedong@pku.edu.cn; wangyi@ime.pku.edu.cn

1 引言

Nomura 等研究人员 2004 年在 Nature 上发表了以铟镓锌氧为有源层的非晶氧化物薄膜晶体管,器件具有高性能和低温工艺等特点^[1],受到广泛重视,成为当前显示领域研究热点。与非晶硅薄膜晶体管相比,氧化物薄膜晶体管最明显的优点是高迁移率^[2-3]。例如,采用铟锡锌氧-铟镓锌氧双层沟道结构的薄膜晶体管,迁移率达到了 $22.16 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[4];退火优化的铟锡锌氧薄膜晶体管,饱和迁移率达到 $24.6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[5];以 GdTiO_3 为栅电介质的铟镓锌氧薄膜晶体管,场效应迁移率达到了 $26.9 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[4];因此,非晶氧化物薄膜晶体管有潜力成为先进的有源矩阵有机发光二极管显示像素电路的驱动器件^[6-10]。虽然基于非晶铟镓锌氧薄膜晶体管的显示产品已经出现,但元素铟在地球上储量较低,从用量和成本方面考虑,其工业大规模生产持续性低。因此,高性能无铟掺杂非晶氧化物薄膜晶体管的研究是非常有意义和必要的。

本文研究了钆铝锌氧薄膜作为薄膜晶体管有源层的可行性,并制备了高性能的钆铝锌氧薄膜晶体管。使用光致发光光谱和透过率谱测试了钆铝锌氧薄膜的光学特性;使用透射电子显微镜图形及其快速傅里叶变化表征了钆铝锌氧薄膜的微观结构;使用扫描探针显微镜分析了钆铝锌氧薄膜的表面形貌。测试并分析了钆铝锌氧薄膜晶体管的转移和输出特性。

2 实验

采用的薄膜生长工艺主要为射频溅射和等离子增强的化学气相淀积。其中,射频溅射用于生长钆铝锌氧有源层和铟锡氧电极材料,等离子增强的化学气相淀积用于生长氧化硅栅电介质。光刻和剥离结合的方法,形成器件的图形结构。

钆铝锌氧薄膜晶体管器件结构如图 1 所示。采用的衬底为硅片,衬底表面有 300 nm 热氧化生长的氧化硅。将衬底先后置于丙酮、无水酒精和去离子水中超声清洗 5 min。然后,在衬底表面淀积铟锡氧栅电极,溅射气压为 1 Pa,溅射功率为 70 W,溅射气氛为氩气,淀积的铟锡氧

薄膜厚度为 130 nm。再使用 PECVD 淀积栅电介质,反应气体为硅烷和笑气,淀积的氧化硅薄膜厚度为 150 nm。之后,淀积钆铝锌氧有源层,溅射气氛为氩气和氧气的混合气体,其他条件与淀积铟锡氧电极的条件相同。淀积的钆铝锌氧薄膜厚度为 30 nm。溅射使用陶瓷靶材,靶材中各成分的质量比为 $\text{ZnO} : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Gd}_2\text{O}_3 = 94 : 3 : 3$ 。最后,溅射淀积铟锡氧源漏电极,制备条件与栅电极相同,薄膜厚度为 130 nm。自此,完整的底栅交叠型钆铝锌氧薄膜晶体管制备完成。制备完成的器件在空气中退火处理 1 h,退火温度为 200 °C。



图 1 钆铝锌氧薄膜晶体管结构图

Fig.1 Structure schematic of Gd-AZO TFT

本研究使用 Agilent4156C 半导体参数分析仪测试器件的转移曲线和输出曲线,测试条件为室温、暗态。使用稳态光致发光光谱(OminiPL)测试薄膜光学特性,使用场发射高分辨率透射电子显微镜(Tecnai F30)测试薄膜微观结构,使用扫描探针显微镜(SPI3800)测试薄膜的表面特性。

3 结果和讨论

有源层的材料特性对薄膜晶体管器件性能有重要影响,因此必要的有源层表征是很有意义的。图 2 为钆铝锌氧薄膜光致发光光谱和透过率示意图。图 2(a) 405 nm 峰值位置为半导体载流子带边发射,可计算得出钆铝锌氧薄膜材料的带隙宽度约为 3.06 eV。图 2(b)为薄膜透过率,在可见光谱范围内的光透过率超过 80%。图 2 结果表明钆铝锌氧薄膜可用于制备透明氧化物薄膜晶体管。

为了观察钆铝锌氧薄膜的微观结构,我们使用场发射透射电子显微镜对薄膜进行了表征。图 3(a)为薄膜截面的高分辨图像。如图所示,溅射淀积的钆铝锌氧薄膜表面平整、轮廓清晰,无明显的结晶趋势。图 3(b)和 3(c)分别是氧化硅和钆铝锌氧的傅里叶变换。由图可知,在 20 nm 清晰

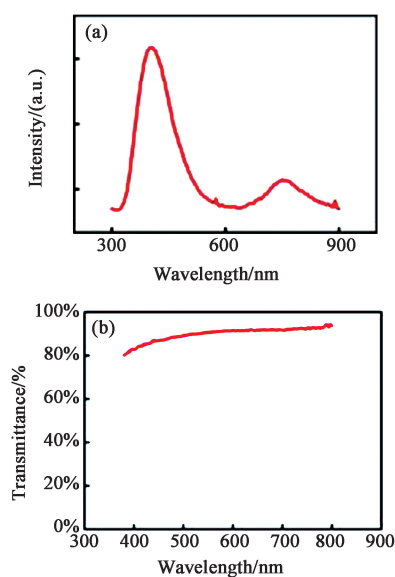


图2 钆铝锌氧薄膜的光学特性。(a)光致发光光谱,(b)透过率

Fig.2 Optical characterization of Gd-AZO thin film. (a) photoluminescence spectra, (b) transmittance

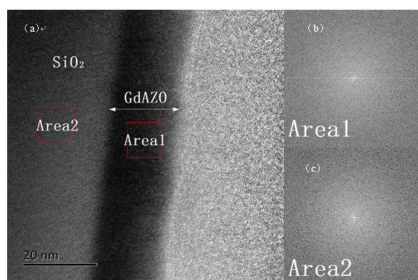


图3 钆铝锌氧薄膜的场发射透射电子显微镜图像。(a)高分辨率图像,(b)钆铝锌氧的傅里叶变换,(c)氧化硅的傅里叶变换

Fig.3 Transmission electron microscope image of GdAZO thin film. (a) high resolution image of GdAZO, (b) FFT of GdAZO, (c) FFT of SiO_2

度的高分辨率图像下,钆铝锌氧薄膜类似于氧化硅薄膜,显示材料微观结构为非晶。由于铝锌氧薄膜为多晶材料^[11-14],可知钆掺杂有效抑制了材料的结晶生长,这类似于铜元素在铜镓锌氧体系中的作用^[15]。非晶有源层薄膜材料是氧化物薄膜晶体管高一致性的前提,高一致性是大尺寸显示的必要条件。所以钆铝锌氧薄膜微观结构的优势有利于其应用在大尺寸显示。

图4为钆铝锌氧薄膜的扫描探针显微镜图

像。扫描面积为 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 。薄膜粗糙度均方根 $\text{RMS}=0.45\ \text{nm}$,表面平整、生长均匀。粗糙度小的钆铝锌氧晶粒尺寸小,与图3高分辨率图像对应。平整的表面可改善薄膜晶体管界面特性,提高载流子迁移率和器件一致性。

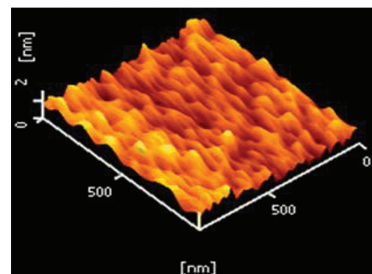


图4 钆铝锌氧薄膜扫描探针显微镜图像

Fig.4 Scanning probe microscope image of GdAZO thin film

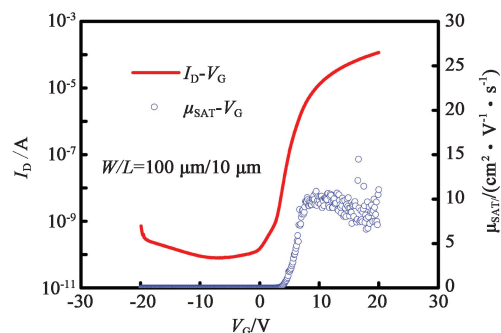


图5 钆铝锌氧薄膜晶体管转移曲线和饱和迁移率。红色实线为转移曲线,蓝色圆圈为饱和迁移率, $V_D=10\ \text{V}$

Fig. 5 Transfer characteristic and saturation mobility of GdAZO TFT. The red solid line is transfer characteristic, the blue circles are saturation mobility. $V_D=10\ \text{V}$

图5所示为钆铝锌氧薄膜晶体管转移曲线和饱和迁移率,器件宽长比 $W/L=100\ \mu\text{m}/10\ \mu\text{m}$ 。图中数据表明器件具有良好的电学特性:开启电压 $V_{ON}=0\ \text{V}$ 、漏端开关态电流比 $I_{ON}/I_{OFF}=7.7 \times 10^5$ 、饱和迁移率 $\mu_{\text{SAT}}=10\ \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。饱和迁移率提取根据方程(1)^[16]。

$$I_D^{1/2} = \sqrt{\frac{W}{2L}} \mu_{\text{SAT}} C_{\text{OX}} (V_G - V_T), \quad (1)$$

其中: C_{OX} 为单位面积栅电容, V_T 为阈值电压。

图6为钆铝锌氧薄膜晶体管输出曲线。从可以明显的看出晶体管为n沟增强型器件,且输出特性良好。输出曲线存在明显的夹断和电流饱

和。在漏端电压较低时,漏电流无明显电流拥挤现象,器件源、漏接触电阻小,说明 200 °C 退火处理对于钆铝锌氧薄膜晶体管是合适的。

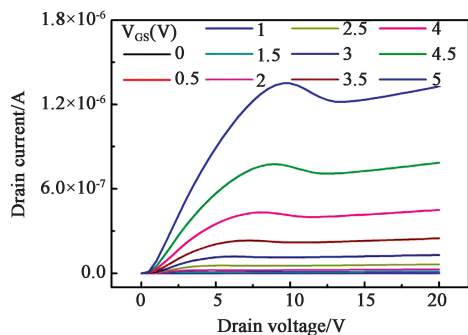


图 6 钆铝锌氧薄膜晶体管输出曲线

Fig.6 Output characteristic of GdAZO TFT

4 总 结

本研究采用磁控溅射技术成功制备了硅衬底的钆铝锌氧薄膜,薄膜光学特性、微观结构和表面形貌表明,钆铝锌氧薄膜适合于用作氧化物薄膜晶体管的半导体有源层。制备了以钆铝锌氧薄膜为有源层的薄膜晶体管,晶体管性能优良,其中,开启电压 $V_{ON} = 0$ V、漏端开关态电流比 $I_{ON}/I_{OFF} = 7.7 \times 10^5$ 、饱和迁移率 $\mu_{SAT} = 10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。钆铝锌氧薄膜晶体管的转移特性和输出特性显示了其作为显示设备像素电路驱动器件的广阔前景。

参考文献:

- [1] NOMURA K, OHTA H, TAKAGI A, *et al.* Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors [J]. *Nature*, 2004, 432(7016): 488-492.
- [2] 刘冲, 韦敏, 杨帆, 等. 电极材料对 IGZO 薄膜晶体管性能的影响 [J]. *发光学报*, 2014, 35(11): 1365-1369.
LIU C, WEI M, YANG F, *et al.* Effects of electrode materials on the performances of IGZO-based thin film transistor [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(11): 1365-1369. (in Chinese)
- [3] 郭永林, 梁续旭, 胡守成, 等. Al_2O_3 薄层修饰 SiN_x 绝缘层的 IGZO-TFTs 器件的性能研究 [J]. *发光学报*, 2015, 36(8): 947-952.
GUO Y L, LIANG X X, HU S C, *et al.* Improvement of IGZO-TFTs performance with SiN_x gate insulator modified by Al_2O_3 film [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(8): 947-952. (in Chinese)
- [4] RIM Y S, CHEN H J, KOU X L, *et al.* Boost up mobility of solution-processed metal oxide thin-film transistors via confining structure on electron pathways [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(25): 4273-4278.
- [5] FORTUNATO E M C, PEREIRA L M N, BARQUINHA P M C, *et al.* High mobility indium free amorphous oxide thin film transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(22): 222103.
- [6] PAN T M, CHEN C H, LIU J H, *et al.* Comparison of high- κ Gd_2O_3 and $\text{GdTiO}_3/\alpha\text{-InGaZnO}$ thin-film transistors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, 61(1): 87-91.
- [7] TAKAHASHI K, SATO T, YAMAMOTO R, *et al.* 13.3-inch 8k4k 664-ppi foldable OLED display using crystalline oxide semiconductor FETs [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2015, 23(12): 600-606.
- [8] AN S J, MATIVENGA M, KIM Y, *et al.* Improvement of bias-stability in amorphous-indium-gallium-zinc-oxide thin-film transistors by using solution-processed Y_2O_3 passivation [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(5): 053507.
- [9] GÖRRN P, SANDER M, MEYER J, *et al.* Towards see-through displays: fully transparent thin-film transistors driving transparent organic light-emitting diodes [J]. *Advanced Materials*, 2006, 18(6): 738-741.
- [10] LI X L, GENG D, MATIVENGA M, *et al.* High-speed dual-gate a-IGZO TFT-based circuits with top-gate offset structure [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2014, 35(4): 461-463.
- [11] Cai J, Han D D, Geng Y F, *et al.* High-performance transparent AZO TFTs fabricated on glass substrate [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, 60(7): 2432-2435.
- [12] JEONG S H, KHO S, JUNG D, *et al.* Deposition of aluminum-doped zinc oxide films by RF magnetron sputtering and study of their surface characteristics [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 174-175: 187-192.
- [13] KIM K H, PARK K C, MA D Y. Structural, electrical and optical properties of aluminum doped zinc oxide films prepared by radio frequency magnetron sputtering [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 81(12): 7764-7772.

- [14] SZYSZKA B. Transparent and conductive aluminum doped zinc oxide films prepared by mid-frequency reactive magnetron sputtering [J]. *Thin Solid Films*, 1999, 351(1/2): 164-169.
- [15] SURESH A, WELLENIUS P, DHAWAN A, *et al.* Room temperature pulsed laser deposited indium gallium zinc oxide channel based transparent thin film transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(12): 123512.
- [16] FORTUNATO E, BARQUINHA P, MARTINS R. Oxide semiconductor thin-film transistors: a review of recent advances [J]. *Advanced materials*, 2012, 24(22): 2945-2986.

作者简介:王漪(1958—),男,河北石家庄人,博士,教授,主要从事半导体自旋电子学、III-V 族稀磁半导体薄膜材料与器件、透明平板显示技术研究。E-mail: wangyi@ime.pku.edu.cn

韩德栋(1970—),男,安徽阜南人,博士,副教授,主要从事新型半导体材料、新型 MOS 器件结构、新型薄膜晶体管的工艺技术、平板显示和柔性显示技术研究。E-mail: handedong@pku.edu.cn

董俊辰(1988—),男,黑龙江富锦人,博士研究生,主要从事氧化物薄膜晶体管研究。E-mail: junchendong@126.com