

基于 In-Zn-Ti-O 氧化物半导体材料的薄膜晶体管

姚绮君^{1,2}, 李曙新², 张 群¹

(1. 复旦大学 材料科学系, 上海 200433, E-mail: yqj01@yahoo.com.cn;

2. 天马微电子股份有限公司, 深圳 518118)

摘要: 在室温下制备了基于 In-Zn-Ti-O 氧化物半导体的薄膜晶体管, 氧化物沟道层中 In、Zn、Ti 的摩尔比为 49:49:2。所制备的器件场致迁移率达到 $9.8 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 开关比大于 10^5 , 亚阈值摆幅 0.61 V/dec 。和未掺 Ti 器件的比较表明, 掺 Ti 能使器件阈值正向变化, 对场致迁移率也有提高作用。

关键词: 薄膜晶体管; 氧化锌; 氧化铟; 氧化钛

中图分类号: O753.2 文献标识码: A

Thin Film Transistors Based on In-Zn-Ti-O Oxide Channel Layer

YAO Qi-jun^{1,2}, LI Shu-xin², ZHANG Qun¹

(1. Department of Material Science, Fudan University, Shanghai 200433, China, E-mail: yqj01@yahoo.com.cn;

2. Tianma Microelectronics Co. Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: Thin film transistors based on In-Zn-Ti-O oxide channel layer were fabricated at room temperature. The atomic proportion of In, Zn and Ti in channel layer is 49:49:2. The device with field effect mobility of $9.8 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, on-off ratio higher than 10^5 and subthreshold swing of $0.61/\text{dec}$ was obtained. While compared with devices without Ti doping, it is found that Ti-doping increases the threshold voltage in the positive direction and improves the field effect mobility of the devices.

Key words: thin film transistor; zinc oxide; indium oxide; titanium oxide

1 引言

近年来, 基于氧化物半导体沟道层的薄膜晶体管 (Thin Film Transistor, TFT) 方面的研究取得了许多进展。相比于在液晶显示器有源驱动矩阵中广泛采用的非晶硅 TFT, 氧化物半导体 TFT 具有场致迁移率高、制备工艺温度低、受可见光影响小和可以制作成透明器件等优点^[1]。在平板显示领域, 采用氧化物 TFT 技术是有机电致发光显示器有源驱动矩阵设计的备选方案之一^[2-3]。在柔性显示方面, 氧化物 TFT 也因为适用于衬底材料不能承受高温的场合而具备较大

优势^[4-5]。

许多氧化物 TFT 器件的报道中采用了 In_2O_3 作为半导体沟道层材料, 这类材料同时也经常作为透明电极材料被加以研究。近几年有大量报道证明掺入 Ti^[6-7]、Mo^[8]、W^[9] 等元素有利于提高 In_2O_3 薄膜电极中的载流子迁移率。这些元素被混合在靶材中或通过双靶溅射的方法掺入 In_2O_3 薄膜, 随着掺入量的增加, In_2O_3 薄膜的电子迁移率会达到一峰值, 然后逐渐下降。半导体材料的载流子迁移率和基于这些材料的 TFT 器件所能达到的场致迁移率有直接关系, 因而 Ti、Mo、W 等元素掺入 In_2O_3 基 TFT 中所能产生的

作用也是值得研究的课题。本文对掺 Ti 的 In-Zn-O 半导体沟道层 TFT 进行了研究,发现掺 Ti 有改变器件阈值和提高器件场致迁移率的作用。

2 实 验

薄膜晶体管器件在载玻片玻璃上制作,采用栅极在下、源漏极在上的底栅结构,各膜层通过掩模遮挡形成图形。晶体管沟道的尺寸包括两种,分别为宽 $400\ \mu\text{m}$ 、长 $40\ \mu\text{m}$ 和宽 $500\ \mu\text{m}$ 、长 $100\ \mu\text{m}$ 。器件电极材料为热蒸发的金属 Al,绝缘层为金属靶直流反应溅射沉积的 Ta_2O_5 ,厚度为 $150\ \text{nm}$ 。反应溅射 Ta_2O_5 时通入的氩气氧气流量比为 $5:1$,气压为 $0.8\ \text{Pa}$,溅射功率 $1\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。半导体沟道层采用脉冲等离子体沉积(Pulsed Plasma Deposition, PPD)方法制备。PPD 是一种利用高能脉冲电子束烧蚀靶材来沉积薄膜的方法,其中的高能电子束是通过渠道火花放电产生的,在烧蚀靶材时靶材表面附近会产生等离子体羽状火焰,因此这种沉积方法被称为脉冲等离子体沉积。PPD 沉积过程中所用电子束导向管为内径 $2\ \text{mm}$ 的石英管,所用靶材为自制陶瓷靶材,由 In_2O_3 、 ZnO 及 TiO_2 粉末混合压片在 $1000\ ^\circ\text{C}$ 下烧结制成,靶材中 In 元素与 Zn 元素的摩尔比为 $1:1$,Ti 的含量按 $\text{Ti}/(\text{In}+\text{Zn}+\text{Ti})$ 摩尔比计算,由 0 增加至 3% ,靶材纯度为 99.9% 。半导体沟道层的沉积过程中,脉冲电子束电源电压值设定为 $14.6\ \text{kV}$,脉冲电流设定为 $3.6\ \text{mA}$,真空腔内通入氧气,气压为 $4.5\ \text{Pa}$ 。沉积时间为 $20\ \text{min}$,得到的半导体层厚约 $50\ \text{nm}$ 。薄膜的 X 射线衍射谱由 D/max- γB 型 X 射线多晶体衍射仪测试得到,器件的电学特性由 Keithley4200 半导体特性测试仪测试得到。

3 结果与讨论

图 1 为用作器件半导体沟道层薄膜的 X 射线衍射图,测试的样品以 Ta_2O_5 薄膜为基底以反映实际器件中的情况。其中掺 Ti 的薄膜是用掺入摩尔比为 3% TiO_2 的靶材制备的。图中没有明显的衍射峰出现,可见所制备的器件半导体沟道层处于非晶态。

图 2(a)为靶材中掺入摩尔比为 2% 的 TiO_2 时器件的转移特性曲线。测试时漏极电压为 $1\ \text{V}$,栅极电压从 $-5\ \text{V}$ 扫至 $10\ \text{V}$ 再扫回 $-5\ \text{V}$

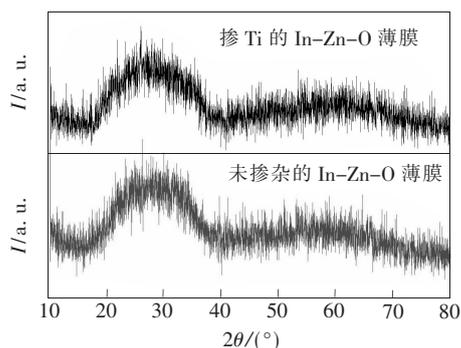


图 1 器件半导体沟道层薄膜的 X 射线衍射图

Fig. 1 X-ray diffraction patterns for semiconductor channel layer films of the devices

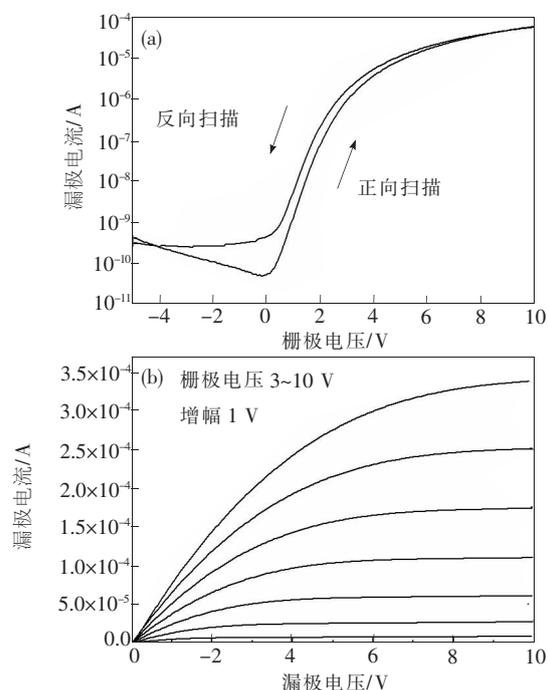


图 2 采用掺 Ti 量 2% 的靶材制备半导体沟道层时器件的转移特性曲线(a)和输出特性曲线(b)

Fig. 2 Transfer characteristics (a) and output characteristics (b) for the device with semiconductor channel layer deposited using 2% Ti doped target

以测试器件的稳定性。由图可见器件的开关比超过 10^3 ,正反向扫描曲线间的距离(滞回电压)约为 $0.3\ \text{V}$ 。器件的工作是比较稳定的,这一负向滞回电压应该是由绝缘层中的缺陷在栅极电压作用下束缚了正电荷引起的。图 2(b)为同一器件的输出特性曲线,曲线呈现出良好的饱和特性。可见在 In-Zn-O 基 TFT 的半导体沟道层中掺入 Ti 后晶体管仍然能保持正常的开关特性。

表 1 列出了靶材掺有不同含量的 Ti 时所制备器件各方面的性能,所列出的性能为同一样品

基片上 4 个器件特性的平均值。其中器件的阈值由漏极电压 1 V 时转移特性曲线线性部分在电压轴上的截距得到,场致迁移率 μ 由曲线线性部分的斜率 k 计算:

$$\mu = \frac{dI_D}{dV_G} \cdot \frac{L}{W} \cdot \frac{1}{C_i V_{DS}} = \frac{kL}{WC_i V_{DS}} \quad (1)$$

式中 L 和 W 为半导体沟道的长和宽, C_i 为单位面积绝缘层电容, I_D 及 V_G 分别为漏极电流和栅极电压, V_{DS} 为源漏极间电压。从所列数据中可以发现,掺 Ti 使器件的亚阈值摆幅略有增大,阈值在掺 Ti 后向正电压方向变化,而器件的场致迁移率在掺 Ti 量达到 2% 时明显提高了。当掺 Ti 量增至 3% 时,器件的阈值进一步增大,许多样品在转移特性的正反向扫描过程中表现得非常不稳定,所以没有给出这些样品的结果。

对于在 In_2O_3 中掺 Ti 提高材料电子迁移率的机理,目前还没有很明确的解释。文献 [10] 和 [11] 对掺 Mo 的 In_2O_3 电极材料进行了分析,都认为材料电子迁移率的提高与掺入的 Mo 离子能有效吸附膜层中的间隙氧杂质有关。Ti 离子与 Mo 离子的价态不同,因此掺 Mo 的有关理论不能完全套用在掺 Ti 的情况上,电子迁移率

参 考 文 献:

- [1] 马仙梅,荆海,马凯,等. ZnO 薄膜及 ZnO-TFT 的性能研究 [J]. 液晶与显示, 2009, 24(3): 393-395.
- [2] Park S H K, Hwang C S, Ryu M, *et al.* Transparent and photo-stable ZnO thin-film transistors to drive an active matrix organic-light-emitting-diode display panel [J]. *Advanced Materials*, 2009, 27:678-682.
- [3] Görrn P, Ghaffari F, Riedl T, *et al.* Zinc tin oxide based driver for highly transparent active matrix OLED displays [J]. *Solid-State Electronics*, 2009, 53:329-331.
- [4] Park J S, Kim T W, Stryakhilev D, *et al.* Flexible full color organic light-emitting diode display on polyimide plastic substrate driven by amorphous indium gallium zinc oxide thin-film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(1):013503(1-3).
- [5] Lim W, Jang J H, Kim S H, *et al.* High performance indium gallium zinc oxide thin film transistors fabricated on polyethylene terephthalate substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93(8):082102(1-3).
- [6] Van Hest, Dabney M F A M, Perkins M S, *et al.* Titanium-doped indium oxide: A high-mobility transparent conductor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87(3):032111(1-3).
- [7] Abe Y, Ishiyama N. Titanium-doped indium oxide films prepared by d. c. magnetron sputtering using ceramic target [J]. *J. Material Science*, 2006, 41:7580-7584.
- [8] Yoshida Y, Wood D M, Gessert T A, *et al.* High-mobility, sputtered films of indium oxide doped with molybdenum [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(12): 2097-2099.
- [9] Li X, Zhang Q, Miao W, *et al.* Development of novel tungsten-doped high mobility transparent conductive In_2O_3 thin films [J]. *J. Vacuum Science and Technology A*, 2006, 24(5):1866-1869.
- [10] 孟扬,章壮健,华中一. 透明导电 IMO 薄膜的载流子迁移率研究 [J]. 真空科学与技术, 2002, 22(4):265-269.
- [11] Medvedeva J E. Magnetically mediated transparent conductors: In_2O_3 doped with Mo [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97:086401.

表 1 使用掺有不同含量 Ti 的靶材制备半导体沟道层时器件的性能比较

Table 1 Performance comparison of devices while using targets doped with different Ti content to deposit the semiconductor channel layer

靶材掺 Ti 量 (摩尔比)(%)	器件阈值 (V)	场致迁移率 (cm^2/Vs)	亚阈值摆幅 (V/dec)
0	0.15	5.7	0.43
1	4.30	5.5	0.48
2	4.40	9.8	0.61

增大的具体作用机制还有待深入研究。

4 结 论

对在基于 In-Zn-O 半导体材料 TFT 的沟道层中掺入 Ti 的研究结果表明,器件的阈值电压会因掺 Ti 而向正电压方向变化,但其他方面性能没有明显劣化的倾向,并且当掺 Ti 量达到 2% 时,器件的场致迁移率会有所提高,因此在 In-Zn-O 基 TFT 的半导体沟道层中掺入少量的 Ti 可以优化器件性能。