

# SiO<sub>2</sub>/Si 衬底上制备增强型 ZnO 薄膜晶体管\*

张新安<sup>1,2,†</sup> 张景文<sup>1</sup> 王东<sup>1</sup> 毕臻<sup>1</sup> 边旭明<sup>1</sup> 张伟凤<sup>2</sup> 侯洵<sup>1,2</sup>

(1 西安交通大学信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

(2 河南大学物理与电子学院, 开封 475001)

**摘要:** 在 NH<sub>3</sub> 和 O<sub>2</sub> 的混合气氛下, 采用激光分子束外延法(L-MBE)在 SiO<sub>2</sub>/p-Si 衬底上制备了氮掺杂 ZnO 薄膜. XRD 分析表明 ZnO 薄膜掺入微量的氮后仍有很高的结晶质量和高度的 c 轴择优取向性, (0002) 面摇摆曲线的半峰宽仅为 1.89°. 在此基础上制备了以氮掺杂 ZnO 薄膜为沟道层、以 SiO<sub>2</sub> 为绝缘层的底栅式薄膜晶体管. 电学测试表明该晶体管工作在 n 沟道增强模式, 阈值电压为 5.15V, 电流开关比为 10<sup>4</sup>, 电子的场迁移率达到 2.66cm<sup>2</sup>/(V·s).

**关键词:** ZnO 薄膜; 激光分子束外延; 薄膜晶体管; 迁移率

**PACC:** 7280E; 7340Q; 7360F

**中图分类号:** O472<sup>\*</sup>.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0306-03

## 1 引言

近年来, 随着薄膜制备工艺和微细加工技术的不断发展, 薄膜晶体管(TFT)在光电显示、光电探测、气敏传感等领域的应用日趋广泛<sup>[1~3]</sup>. 薄膜晶体管中半导体沟道层的性质对器件的性能、制作工艺有重要的影响, 是决定薄膜晶体管应用范围的关键. 最近有人报道了以氧化锌(ZnO)为沟道层的薄膜晶体管(ZnO-TFT), 与传统的 TFT 沟道层(非晶硅、多晶硅、硒化镉或有机半导体材料等)相比, ZnO 是一种新型的宽禁带化合物半导体材料, 常温常压下呈六方纤锌矿结构, 室温下的禁带宽度为 3.37eV, 同时具有激子束缚能高、制备温度低、对衬底要求不高、无毒害等优点, 以 ZnO 作为 TFT 的沟道层不但可以优化 TFT 的制作工艺, 而且大大拓宽了 TFT 的应用范围, 最近已有很多关于 ZnO-TFT 在气敏和紫外探测方面的报道, 成为 ZnO 材料研究领域的一个新的热点<sup>[4,5]</sup>.

在制备 ZnO-TFT 的过程中, ZnO 薄膜导电性能的控制是非常重要的一个环节. 普通条件下生长的非故意掺杂 ZnO 薄膜有很高的本征电子浓度, 如果用这种 ZnO 薄膜作为 TFT 器件的沟道层, 所得器件一般工作在耗尽模式, 即栅极偏压为零时, 漏极有较大的电流. 而且当沟道层中的电子浓度过高时, 栅极偏压很难将其完全耗尽, 影响了 TFT 的工作特性. Kwon 等人<sup>[6]</sup>报道了利用 P 掺杂 Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>O

薄膜作为沟道层的增强型薄膜晶体管, 其中沟道层薄膜制备采用脉冲激光沉积技术(PLD), 并以 HfO<sub>2</sub> 作为绝缘层. 但是由于其栅极和源、漏电极之间有很大的漏电流, 出现栅压升高输出特性曲线右移的现象. 本实验以工艺简单、结构成熟的 SiO<sub>2</sub>/p-Si 为衬底, 在 NH<sub>3</sub> 和 O<sub>2</sub> 的混合气氛下, 采用激光分子束外延法制备掺氮 ZnO 薄膜, 并采用剥离工艺(lift-off)在 ZnO 薄膜上制备源、漏电极, 制作了以掺氮 ZnO 为沟道层的增强型场效应薄膜晶体管, 氮的掺入有效地降低了 ZnO 薄膜中的本征载流子浓度, 热氧化生长的 SiO<sub>2</sub> 有很好的绝缘性能, 使 TFT 表现良好的电学性质.

## 2 实验

### 2.1 绝缘层制备

实验中所用衬底为 p 型(100)硅片, 电阻率为 1~10Ω·cm. 采用干氧化法在硅片上生长 SiO<sub>2</sub> 绝缘层, 生长温度为 900℃, SiO<sub>2</sub> 的厚度为 180nm.

### 2.2 ZnO 沟道层制备

将 SiO<sub>2</sub>/p-Si 衬底放入激光分子束外延设备中, 预抽真空系统到 8.8×10<sup>-6</sup> Pa, 然后加热衬底到 600℃ 热处理 1h, 以除去可能吸附在 SiO<sub>2</sub> 表面的杂质, 调节氧气和氮气的流量比到 1:1, 把两者的混合气体通入真空室, 生长时的气压为 1×10<sup>-3</sup> Pa, 温度为 400℃, 脉冲激光波长为 248nm, 频率为 3Hz,

\* 河南省杰出人才创新基金资助项目(批准号:0421001500)

† 通信作者. Email: xinanzhang@henu.edu.cn

2006-11-23 收到

单脉冲能量为 100mJ,生长时间为 150min,所用靶材为 STMC 公司生产的 ZnO 靶,纯度为 99.999%。用台阶仪测得 ZnO 薄膜的厚度为 120nm。然后在高纯氧气中对 ZnO 薄膜进行退火处理,退火温度为 500℃,时间为 1h。

### 2.3 用剥离工艺制备源、漏电极

本实验采用剥离工艺制备 TFT 的源极和漏极,电极金属为 Al,用热蒸发镀膜方式将 Al 沉积在刻好光刻胶图形的 ZnO/SiO<sub>2</sub>/p-Si 衬底上,然后在丙酮中超声清洗掉部分铝膜形成源漏电极图形,导电沟道的长为 25μm,宽为 100μm,宽长比为 4。源、漏电极制备后,为增加 Al 和 ZnO 的欧姆接触,整个器件在真空中退火处理 30min。图 1 给出了 ZnO-TFT 的截面图和俯视图。

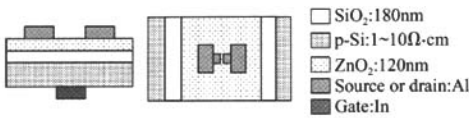


图 1 ZnO-TFT 的截面和俯视图

Fig. 1 Schematic diagram (cross-section and top view) of the ZnO-TFT

### 3 结果与讨论

用飞利浦公司的四晶高分辨 X 射线衍射仪(发散角 5°~15°, Δλ/λ = (2~5) × 10<sup>-5</sup>)对生长在 SiO<sub>2</sub>/p-Si 衬底上 ZnO 薄膜的结构进行表征,工作电压为 40kV,工作电流为 40mA, CuKα<sub>1</sub> 为发射源(波长为 0.15406nm),扫描范围为 20°~80°。图 2 为 ZnO 薄膜的 2θ-ω 扫描结果,图中 69°附近的微弱峰是 Si 衬底引起的,另外出现了一个很强的 ZnO (0002) 衍射峰和微弱的 ZnO (0004) 衍射峰,表明 ZnO 薄膜具有高度的 c 轴择优取向,这是由于

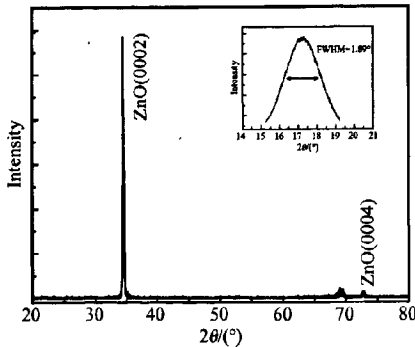


图 2 ZnO 薄膜的 2θ-ω 扫描图和摇摆曲线

Fig. 2 2θ-ω scan and rocking curve of ZnO film

生长过程中 ZnO(0002) 晶面具有较低的表面能密度,抑制其他晶面的生长造成的。利用 Scherrer 公式  $D = k\lambda/\beta\cos\theta$  可计算出薄膜中晶粒的平均尺寸,式中  $k$  为形状因子(0.89), $\lambda$  为 X 射线波长, $\beta$  为衍射峰的半高宽(FWHM), $\theta$  为衍射角。按照上述公式,ZnO 薄膜的平均晶粒大小为 38nm。图中右上角的插图是沿 ZnO(0002) 晶面的摇摆曲线,其半峰宽度为 1.89°,表明 SiO<sub>2</sub> 衬底上生长的掺氮 ZnO 仍具有较高的结晶质量<sup>[7]</sup>。

用 KEITHLEY 4200 型半导体特性测试仪对 ZnO-TFT 的电学性质进行测量,图 3 为在无光照条件下测得的结构为 Al/ZnO/SiO<sub>2</sub>/p-Si TFT 的输出特性曲线,测量时用钢(In)焊接引线到栅、源、漏电极,源极接地,栅极电压为  $V_G$ ,漏极为  $V_D$ ,栅极偏压从 0 增加到 25V,间隔为 5V。从图中可以看到 ZnO-TFT 的栅极偏压对器件的电流有明显的控制作用,栅极偏压为 0V 时,源漏电流  $I_{DS}$  近似为零,随着栅极偏压正向增加,ZnO 中电子向 ZnO 和绝缘层界面移动,栅极偏压大于阈值电压后,导电沟道开始形成,沟道电流随着栅极偏压的增大而增大,表明该晶体管工作在 n 沟道增强模式,随着漏极电压的增加,晶体管由线性区过渡到饱和区,并表现出较好的饱和特性,栅极电压为 25V 时,漏源饱和电流达到 38μA 左右。由于采用了后退火处理工艺,提高了 ZnO 薄膜的结晶质量,减小了由本征缺陷引起的自由电子,氮离子的掺入也起到进一步补偿作用。我们用该方法研制的 TFT 的工作电压比 Bae 报道的同结构器件的要小得多<sup>[8]</sup>。

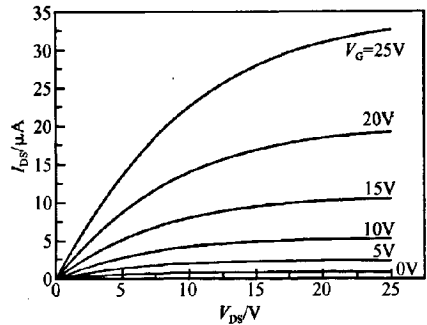


图 3 ZnO-TFT 的  $I_{DS}$ - $V_{DS}$  特性曲线

Fig. 3  $I_{DS}$ - $V_{DS}$  curves of ZnO-TFT

薄膜晶体管工作在饱和区时 ( $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ ),栅极电压和漏电流满足如下公式<sup>[9]</sup>:

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (1)$$

其中  $I_{DS}$  为漏极电流; $\mu$  为场致迁移率; $C_{ox}$  为单位面积栅极绝缘层电容; $W$  为导电沟道宽度; $L$  为导电沟道长度; $V_{GS}$  是栅极电压; $V_T$  为阈值电压。该式

常用于计算载流子迁移率。

测得 ZnO-TFT 在  $V_{DS} = 20V$  偏压下的  $I_{DS}-V_{GS}$  曲线,并绘出  $I_{DS}^{1/2}-V_{GS}$  曲线,如图 4 所示.外推 ( $I_{DS}$ )<sup>1/2</sup>- $V_{GS}$  曲线中的线性部分,即得到晶体管的阈值电压为 5.15V,与  $I_{DS}-V_{DS}$  特性图基本一致.由上图和(1)式计算得到该薄膜晶体管的场迁移率为  $2.66\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ .图中左上角的插图是  $\lg I_{DS}-V_{GS}$  曲线,可以得到 ZnO-TFT 的电流开关比大约为  $10^4$ .

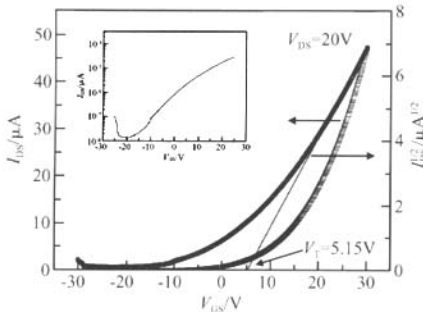


图 4 ZnO-TFT 的  $I_{DS}-V_{GS}$  特性曲线

Fig. 4  $I_{DS}-V_{GS}$  curves of ZnO-TFT

## 4 结论

用激光分子束外延技术在  $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$  衬底上制备了高质量的掺氮 ZnO 薄膜,用 XRD 对 ZnO 薄膜的结晶质量进行表征,然后用剥离工艺和热蒸发 Al 的方法形成源漏电极.并对 ZnO-TFT 的电学性质进行了测试,发现该晶体管

具有很好的场控电流作用和夹断特性,工作在 n 沟道增强模式,电流开关比约为  $10^4$ ,阈值电压为 5.15V,电子的场迁移率达到  $2.66\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ .

## 参考文献

- [1] Liu Xingming, Han Lin, Liu Litian. New type a-Si TFT used as room temperature infrared detector. *Laser and Infrared*, 2005, 35(10): 709 (in Chinese) [刘兴明, 韩琳, 刘理天. 用于室温红外探测的新型非晶硅薄膜晶体管. 激光与红外, 2005, 35(10): 709]
- [2] Bae H S, Yoon M H, Kim J H, et al. Photodetecting properties of ZnO-based thin-film transistors. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(25): 5313
- [3] Ge Changjun, Jin Zaiyuan, Cheng Jianbo. Fabrication of active layer used in  $640 \times 640$  TFT-AMLCD. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(3): 254 (in Chinese) [葛长军, 靳在渊, 成建波.  $640 \times 640$  TFT-AMLCD 有源层的制备. 半导体学报, 1999, 20(3): 254]
- [4] Look D C. Recent advances in ZnO materials and devices. *Mater Sci Eng B*, 2001, 80(1~3): 383
- [5] Tang Z K, Wong G K L, Yu P, et al. Room-temperature ultraviolet laser emission from self-assembled ZnO microcrystalline thin films. *Appl Phys Lett*, 1998, 72(25): 3270
- [6] Kwon Y, Li Y, Hco Y W, et al. Enhancement-mode thin-film field-effect transistor using phosphorus-doped (Zn, Mg) O channel. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(14): 2685
- [7] Paraguay D M, Estrada D W, Acosta L D R, et al. Growth structure and optical characterization of high quality ZnO thin films obtained by spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 1999, 350: 192
- [8] Bea H S, Im S. ZnO-based thin film transistors of optimal device performance. *J Vac Sci Technol B*, 2004, 22(3): 1191
- [9] Hsieh H H, Wu C C. Scaling behavior of ZnO transparent thin film transistors. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 041109

## Enhancement Mode Thin Film Transistor with Nitrogen-Doped ZnO Channel Layer Fabricated on $\text{SiO}_2/\text{Si}$ Substrate\*

Zhang Xin'an<sup>1,2,†</sup>, Zhang Jingwen<sup>1</sup>, Wang Dong<sup>1</sup>, Bi Zhen<sup>1</sup>, Bian Xuming<sup>1</sup>,  
Zhang Weifeng<sup>2</sup>, and Hou Xun<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory of Photonics Technology for Information, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2 School of Physics and Photoelectronics, Henan University, Kaifeng 475001, China)

**Abstract:** Nitrogen-doped ZnO film is deposited on  $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$  substrate by L-MBE in the mixed gas of  $\text{NH}_3$  and  $\text{O}_2$ . XRD measurement shows the film has high crystalline quality and high  $c$ -axis preferential orientation even doped with nitrogen. The FWHM of rocking curve of ZnO (0002) plane is only  $1.89^\circ$ . Then, a bottom-gate type thin film transistor with nitrogen doped ZnO as the active channel layer and  $\text{SiO}_2$  served as insulator is fabricated. Electrical measurement shows the device operates in enhancement mode and exhibits an on/off ratio of  $10^4$ . The threshold voltage is 5.15V and the channel mobility on the order of  $2.66\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  is determined.

**Key words:** ZnO thin film; L-MBE; thin film transistor; channel mobility

**PACC:** 7280E; 7340Q; 7360F

**Article ID:** 0253-4177(2007)S0-0306-03

\* Project supported by the Outstanding Talent Innovation Fund of He'nan Province (No.0421001500)

† Corresponding author. Email: xinan Zhang@henu.edu.cn

Received 23 November 2006