

L-MBE 法制备以 ZnO 为沟道层的薄膜晶体管*

张新安^{1,2,†} 张景文² 杨晓东² 娄 辉¹ 刘振玲² 张伟风¹ 侯 洵^{1,2}

(1 河南大学物理与信息光电子学院, 开封 475001)

(2 西安交通大学信息光子技术省重点实验室, 西安 710049)

摘要: 采用激光分子束外延法(L-MBE)在 SiN_x/Si(111)衬底上制备了高质量的 ZnO 薄膜,用 X 射线衍射(XRD)和原子力显微镜(AFM)对薄膜的晶体结构、表面形貌进行了表征,结果表明 ZnO 薄膜有高度的 c 轴择优取向,薄膜表面平整致密,并以 ZnO 薄膜为沟道层制作了薄膜晶体管(ZnO-TFT),该晶体管工作在 n 沟道增强模式,阈值电压为 17.5V,电子的场迁移率达到 1.05cm²/(V·s)。

关键词: 激光分子束外延; ZnO 薄膜; 薄膜晶体管

PACC: 7280E; 7340Q; 7360F

中图分类号: O472⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)06-1051-04

1 引言

近年来,薄膜晶体管(thin film transistor, TFT)在有源矩阵驱动显示器件中发挥了重要作用,而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.目前,较为成熟的无机薄膜晶体管(ITFT)的沟道层多采用非晶硅(a-Si)、多晶硅(p-Si),其中非晶硅薄膜晶体管(a-Si TFT)具有制备工艺简单,容易大面积制作和漏电流小等特点,是有源矩阵寻址液晶显示器件中应用最广、发展最快、工艺最为成熟的一种显示器件.但是,非晶硅材料的迁移率较低,一般在 0.1~1cm²/(V·s)范围,不能适应显示器件高速、高亮度的要求^[1].低温多晶硅技术制备的 p-Si TFT 虽具有较高的电子迁移率(30~100cm²/(V·s)),但是需要激光晶化处理等复杂工艺^[2].与这些材料相比,ZnO 是一种新型宽禁带直接带隙化合物半导体,常温常压下具有六方纤锌矿结构,室温下的禁带宽度为 3.37eV.该材料具有生长温度低、抗辐射能力强、化学稳定性好和材料来源丰富无毒害等优点.ZnO 薄膜对衬底的要求不高,在普通玻璃和塑料衬底上均可生长高质量的 ZnO 薄膜,制备在透明衬底上的 ZnO 薄膜在可见光范围有很高的透过率,是一种新型的透明半导体材料,可用来制作全透明电子器件,极具开发和应用价值.最近国外报道了以 ZnO 为沟道层的薄膜晶体管(ZnO-TFT)的研究工作,以期在有源矩阵驱动液晶显示(AM-LCD)中有出色的表现^[3,4],在

这些工作中 ZnO 薄膜的制备多采用溅射的方法获得,本实验采用激光分子束外延法(L-MBE)在 SiN_x/Si(111)衬底上制备了高质量的 ZnO 薄膜,并在此基础上制作了 ZnO-TFT 器件.

2 实验

薄膜晶体管实质上是一种场效应管,其结构可以分为两种类型:一种称为共面型,即源、漏和栅极均在半导体薄膜的同一侧;另一种称为参差倒置型,即相对于源、漏极,栅极位于半导体薄膜的另一面.其中参差倒置结构可以连续沉积薄膜、适合流水线作业,同时又可以减少交叉污染,目前得到广泛应用^[5].本实验研制的 ZnO-TFT 为参差倒置型,其结构示意图如图 1 所示,采用 p 型(111)Si(电阻率为 0.008Ω·cm)为衬底,同时也作为薄膜晶体管的栅极.具体的实验可分为以下三个步骤:首先采用等离子体化学气相沉积法(PECVD)在 Si 衬底上沉积厚度为 200nm 的 SiN_x 绝缘层,Si 衬底温度为 300℃,气体流量体积比 NH₃/SiH₄ = 20,射频功率 100W.然后用本实验室研制的激光分子束外延系统在 SiN_x/Si 衬底上生长 ZnO 薄膜,生长前的本底真空度为 9.6×10⁻⁶Pa,生长温度为 300℃,氧气分压为 2×10⁻³Pa,脉冲激光波长为 248nm,频率为 3Hz,单脉冲能量为 100mJ,生长的 ZnO 薄膜厚度为 100nm 左右.但是,这样得到的 ZnO 薄膜的电阻率较低,不适于作薄膜晶体管的沟道层.为增加 ZnO 薄膜的电阻,在高纯氧气中对薄膜进行退火处理,退

* 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

2005-10-28 收到,2006-02-28 定稿

火温度为 500°C , 时间为 0.5h. 最后用热蒸发镀膜设备和掩模板的方法在 $\text{ZnO}/\text{SiN}_x/\text{Si}$ 上面沉积铝(Al)作为源、漏电极, 沟道长度 L 为 $200\mu\text{m}$, 宽长比

为 5. 为提高源漏电极和 ZnO 层的欧姆接触, 整个器件在 200°C 热处理 0.5h, 并用铟(In)连接在 p-Si 的背面作为栅极.

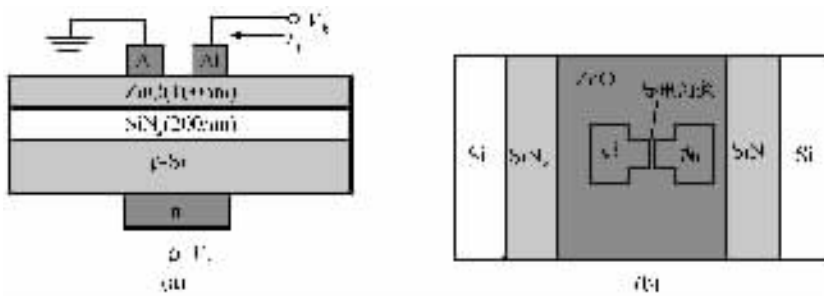


图 1 ZnO-TFT 的截面(a)和俯视图(b)

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

3 结果与讨论

SiN_x 和 ZnO 薄膜的表面形貌在日本精工 SPA400 型原子力显微镜 (AFM) 上观察, 如图 2 所示. 扫描范围分别为 $1500\text{nm} \times 1500\text{nm}$ 和 $3000\text{nm} \times 3000\text{nm}$, 扫描为轻敲模式. 可以看到 SiN_x 薄膜表面均匀致密; 生长 ZnO 薄膜后, ZnO 晶粒分布很均匀, 大小在 25nm 左右. 对生长在 SiN_x/Si 衬底上的 ZnO 薄膜进行了 X 射线衍射分析, 采用飞利浦公司的四晶高分辨 X 射线衍射仪 (发散角 $5'' \sim 15''$,

$\Delta\lambda/\lambda = (2 \sim 5) \times 10^{-5}$) 对样品结构进行表征, 工作电压为 40kV , 工作电流 40mA , $\text{CuK}\alpha_1$ 为发射源 (波长为 0.15406nm), 扫描范围为 $20^{\circ} \sim 80^{\circ}$. 图 3 为 ZnO 薄膜的 $2\theta-\omega$ 扫描结果, 除衬底衍射峰外, 图中仅出现了 $\text{ZnO}(0002)$ 和 $\text{ZnO}(0004)$ 两个衍射峰, 薄膜具有六方纤锌矿结构, 而且 $\text{ZnO}(0002)$ 峰十分锐利, 表明 ZnO 薄膜有很高的结晶质量, 并在 c 轴方向高度择优取向^[6]. 目前, 外延 ZnO 薄膜的衬底材料多选用蓝宝石、单晶硅和 SiC 等, 该实验结果表明在非晶的 SiN_x 薄膜上同样可以外延高质量的 ZnO 薄膜.

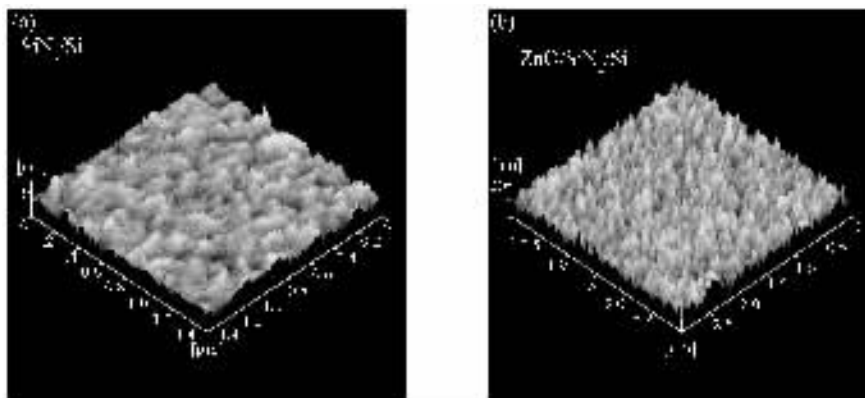


图 2 SiN_x (a) 和 ZnO (b) 薄膜的表面形貌

Fig.2 Surface morphologies of SiN_x (a) and ZnO (b) films

在无光照条件下, 测量了结构为 $\text{Al}/\text{ZnO}/\text{SiN}_x/\text{Si}(111)$ TFT 的电学性质, 用铟(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 , 图 4 为不同栅极偏压下 TFT 的 $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 特性曲线, 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, 栅极正向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, 并且晶体管表现很好的饱和特性, 栅极电压为 30V 时, 漏源饱和电流约达到 $8.5\mu\text{A}$.

薄膜晶体管工作在饱和区时 ($V_{\text{DS}} > V_{\text{GS}} - V_{\text{T}}$), 栅极电压和漏电流满足^[7]:

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

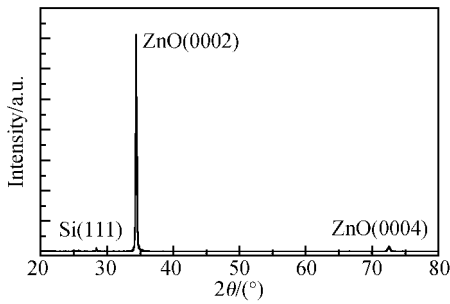


图 3 ZnO/SiN_x/Si(111) 2θ-ω 扫描图

Fig.3 2θ-ω scan of ZnO/SiN_x/Si(111)

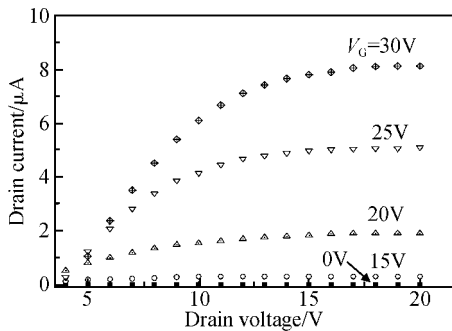


图 4 ZnO-TFT 的 ID-VD 特性曲线

Fig.4 ID-VD curves obtained from ZnO-TFT

其中 I_{DS} 为漏极电流; μ 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. 人们常用该式计算载流子迁移率.

测得晶体管在 $V_{DS} = 20V$ 下的 $I_{DS} - V_{GS}$ 曲线, 并绘出 $(I_{DS})^{1/2} - V_{GS}$ 曲线, 如图 5 所示. 外推 $(I_{DS})^{1/2} - V_{GS}$ 曲线中的线性部分, 即得到晶体管的阈值电压为 17.5V, 和 $I_{DS} - V_{DS}$ 特性图基本一致. 由该图和 (1) 式计算得到该薄膜晶体管的场迁移率为

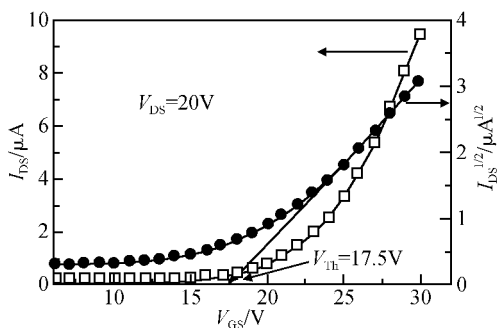


图 5 ZnO-TFT 的 ID-VD 特性曲线

Fig.5 ID-VD curves obtained from ZnO-TFT

1.05cm²/(V·s), 达到目前 a-Si TFT 的水平, 显示了 ZnO-TFT 在有源矩阵驱动显示领域的潜在应用前景.

4 结论

设计并制作了一种以 ZnO 薄膜为沟道层的薄膜晶体管, 衬底采用 p 型 (111) Si, 以等离子体化学气相沉积制备 SiN_x 作为绝缘层, 并采用激光分子束外延法在绝缘层上制备了 ZnO 薄膜, 然后在 ZnO 薄膜上热蒸发 Al 形成源漏电极. 用 XRD 和 AFM 对 ZnO 薄膜的结晶质量、表面形貌进行表征, 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, 阈值电压为 17.5V, 电子的场迁移率达到 1.05cm²/(V·s).

参考文献

- [1] Ge Changjun, Jin Zaiyuan, Cheng Jianbo. Fabrication of active layer used in 640×640 TFT-AMLCD. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(3): 254 (in Chinese) [葛长军, 靳在渊, 成建波. 640×640 TFT-AMLCD 有源层的制备. 半导体学报, 1999, 20(3): 254]
- [2] Rao Rui, Xu Zhongyang, Wang Chang'an, et al. Poly-Si TFT and its application in AMLCD. Chinese Magazine of Semiconductors, 2000, 25(4): 46 (in Chinese) [饶瑞, 徐重阳, 王安, 等. 多晶硅 TFT 及其在 AMLCD 中的应用. 半导体杂志, 2000, 25(4): 46]
- [3] 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
- [4] Kwon Y, Li Y, Heo 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
- [5] Liu Hongwu. Three-terminal AML CD. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 1998, 3(3): 208 (in Chinese) [刘洪武. 三端子有源矩阵液晶显示器. 液晶与显示, 1998, 3(3): 208]
- [6] Muthukumar S, Gorla C R, Emanetoglu N W, et al. Control of morphology and orientation of ZnO thin films grown on SiO₂/Si substrates. J Cryst Growth, 2001, 225(2~4): 197
- [7] Garcia P F, McLean R S, Reilly M H, et al. Transparent ZnO thin-film transistor fabricated by rf magnetron sputtering. Appl Phys Lett, 2003, 82(7): 1117

Fabrication of ZnO Thin-Film Transistors by L-MBE*

Zhang Xin'an^{1,2,†}, Zhang Jingwen², Yang Xiaodong², Lou Hui¹,
Liu Zhenling², Zhang Weifeng¹, and Hou Xun^{1,2}

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

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

Abstract: High quality ZnO films are deposited on SiN_x/Si substrate by laser molecular beam epitaxy(L-MBE). XRD and AFM are used to investigate the crystallite and surface of the films, respectively. The results show that the films are homogeneous and crack-free with highly preferred *c* orientation. We fabricate thin film transistors with ZnO as an active channel layer that works well in the n-channel enhancement mode and have a threshold voltage of 17.5V and a mobility rate as high as 1.05cm²/(V·s).

Key words: L-MBE; ZnO thin films; thin film transistor

PACC: 7280E; 7340Q; 7360F

Article ID: 0253-4177(2006)06-1051-04

* Project supported by the Outstanding Figure Innovation Fund of Henan Province(No.0421001500)

† Corresponding author. Email: xinanzhang@henu.edu.cn

Received 28 October 2005, revised manuscript received 28 February 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics