

文章编号:1007-2780(2009)04-0557-05

退火温度对 ZnO 薄膜晶体管电学性能的影响

张新安^{1,2}, 张景文², 张伟风¹, 侯 洵^{1, 2}

(1. 河南大学 物理与电子学院, 河南 开封 475004, E-mail: xinanzhang@henu.edu.cn;

2. 西安交通大学 陕西省信息光子技术重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 采用光刻剥离法和射频磁控溅射技术在带有热氧化层的硅衬底上制备了以氧化锌 (ZnO) 为沟道层的薄膜晶体管 (ZnO-TFT)。研究了不同温度退火处理对 ZnO-TFT 电学性能的影响, 发现随着 ZnO 薄膜退火温度的增加, ZnO-TFT 的阈值电压减小, 电子的场效应迁移率增大。用原子力显微镜 (AFM) 对 ZnO 薄膜的微区结构进行观察, 发现 ZnO 薄膜的平均粒径随退火温度的增加而增大, 表明 ZnO-TFT 电学性质和沟道层薄膜晶粒大小密切相关。

关 键 词: 氧化锌; 薄膜; 晶体管; 退火

中图分类号: O472⁺.4 **文献标识码:** A

1 引 言

薄膜晶体管 (Thin Film Transistor, TFT) 是场效应晶体管的一种, 是为适应全膜化集成电路的需要而发展起来的, 被广泛应用在平板显示器、存储器、探测器和气敏传感器等多个领域^[1,2]。TFT 是靠多数载流子传输电流的单极性器件, 包括衬底、半导体沟道层、绝缘层、栅极、源极和漏极等几个组成部分, 其中半导体沟道层的性质对器件性能和制备工艺有很大影响。在 TFT 不断寻求沟道层材料改进以满足其应用需求的过程中, 最初以优越的紫外发光性能而倍受关注的宽禁带半导体 ZnO 材料, 因其光电性质与 TFT 技术改进需求的契合点越来越多, 而逐渐受到人们的重视^[3,4]。ZnO 在室温下的禁带宽度为 3.37 eV, 在常温常压下为稳定的六方纤锌矿结构。ZnO 薄膜具有生长温度低、电子迁移率高、易于刻蚀、对衬底要求不高等优点^[5,6], 在白光二极管、紫外探测器、气敏传感器、声表面波器件中有重要的应用。高质量的 ZnO 薄膜在可见光波段有很高的透过率, 所以可用来制备全透明 TFT, 并应用到高开口率有源阵列驱动显示器件和透明电子线路中^[7]。

至今为止, 我国在 ZnO 材料的研究仍然主要集中在高质量 ZnO 外延薄膜、P 型掺杂、ZnO 单

晶生长和 ZnO 稀磁特性等方面, 在 ZnO-TFT 领域的研究还很少见。本文采用磁控溅射法和两步光刻工艺在带有热氧化层的硅衬底上成功制备了 ZnO-TFT, 并研究了不同 ZnO 薄膜退火温度对 TFT 电学性质的影响。

2 实 验

采用 P 型重掺杂硅片 (电阻率 $1\sim10\ \Omega\cdot\text{cm}$) 为 ZnO-TFT 的衬底, 同时也将其作为薄膜晶体管的栅极。以干氧氧化法生长的 SiO_2 薄膜为绝缘层, SiO_2 薄膜的厚度为 180 nm。

ZnO 有源层由射频磁控溅射结合光刻剥离工艺 (lift-off) 制备。首先将粘度为 45% 的 BP218 正型光刻胶均匀旋涂到 SiO_2/Si 衬底上, 并经过前烘、曝光、显影和坚膜等工艺定义好 ZnO 有源层图形, 其面积为 $800\ \mu\text{m}\times800\ \mu\text{m}$, 图形部分无胶, 而衬底其它部分均为光刻胶膜所覆盖。沟道层图形完成后, 将样品放置到磁控溅射生长室, 预抽本底真空度到 $6\times10^{-4}\ \text{Pa}$ 。所用 ZnO 陶瓷靶材的纯度为 99.99%, Ar 和 O_2 的流量比为 3:1, 溅射气压为 0.7 Pa, 溅射功率为 100 W, 生长温度为室温。样品取出后, 在丙酮溶液中将光刻胶超声剥离, 得到图形化的 ZnO 有源层, 用台阶仪测定 ZnO 薄膜的厚度约为 130 nm。电学测试发现, 室温生长的 ZnO 薄膜的电阻率很高。为提高

ZnO 薄膜的电学性质,将样品在 O₂ 氛围中 400 ℃、500 ℃、600 ℃退火 1 h,然后检测其电性能的变化。

源漏电极材料为金属 Al,采用真空热蒸发工艺镀膜,光刻形成电极图形。在光刻过程中通过对准标记保证源漏电极图形正好在 ZnO 有源层中心。ZnO-TFT 的沟道长度(*L*)为 20 μm,沟道

宽度(*W*)为 100 μm。

图 1 给出了 ZnO-TFT 的具体制备流程。用 KEITHLEY 4200 型半导体特性测试仪对 ZnO-TFT 的电学性质进行测量。用日本岛津株式会社(SHIMADZU)的 SPM-9500J3 型原子力显微镜(AFM)观察了未退火处理和不同温度下退火处理的 ZnO 薄膜的表面形貌。

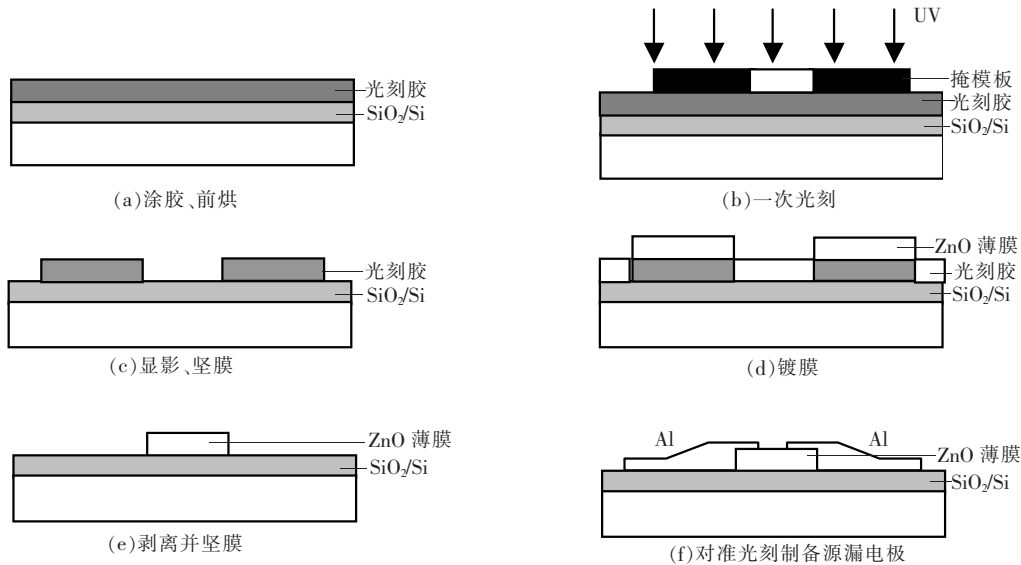


图 1 ZnO-TFT 制备流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ZnO-TFT device fabrication

3 结果与讨论

图 2 是不同温度退火处理的 ZnO-TFT 的输出特性曲线。在对 ZnO-TFT 的电学性质进行测量前,首先用氢氟酸腐蚀 Si 片的背面,露出新鲜 Si 表面作为栅极连接点。用金属 In 焊接引线到栅、源、漏电极,源极接地。由于 ZnO 薄膜具有紫外光敏感特性,同时,具有较多缺陷能级的 ZnO 薄膜在可见光范围也会有较强的敏感性,所以整个测量过程要在无光照条件下进行^[8]。测量时栅极偏压从零增加到 30 V,间隔为 5 V。从图 2 中可以看到,ZnO-TFT 的栅极偏压对器件的电流有很好的控制作用。栅极偏压为零时,源漏电流 IDS 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^[9]。漏极电压逐渐增加,晶体管由线性区过渡到饱和区,并表现出较好的饱和特性。随着

退火温度的增加,薄膜晶体管的饱和电流逐渐增大,600 ℃退火处理的样品的饱和电流达到 80 μA,但是其电流饱和特性比低温退火处理的样品差。

在源漏电压 $V_{DS}=20\text{ V}$ 的情况下,不同退火温度的 ZnO-TFT 的转移特性曲线如图 3 所示,由薄膜晶体管饱和区的电流电压公式:

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

得到:

$$(I_{DS})^{1/2} = \left(\frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} \right)^{1/2} (V_G - V_T) \quad (1)$$

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} 是栅源电压; V_T 为阈值电压。该式常用来计算载流子迁移率^[10]。式 $(I_{DS})^{1/2}$ 和 V_{GS} 为线性关系,且当 $(I_{DS})^{1/2}$ 为零时, V_G 的大小和 V_T 相等。根据转移特性曲线计算得到 ZnO-TFT 的 $(I_{DS})^{1/2}$ - V_{GS} 曲线,再由公式(1),外延漏电流平

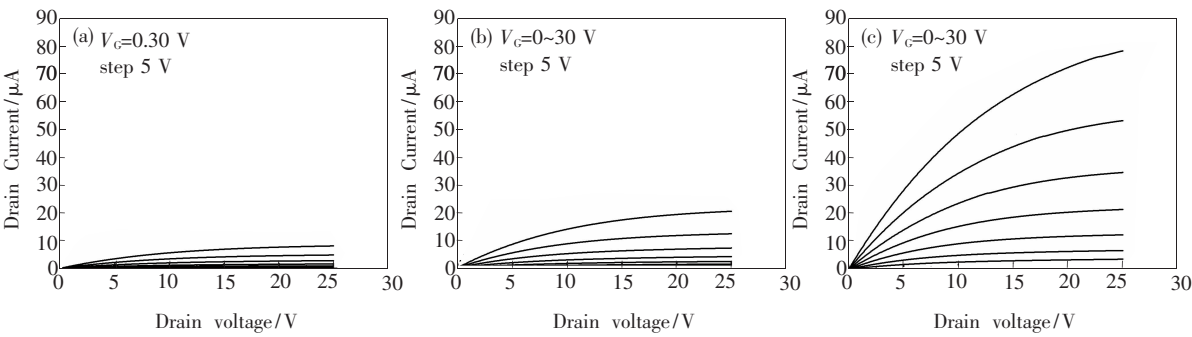


图 2 不同温度退火 ZnO-TFT 的输出特性曲线. (a) 400 °C ;(b) 500 °C ;(c) 600 °C .

Fig. 2 Output characteristics of ZnO-TFT with different anneal temperature. (a) 400 °C ;(b) 500 °C ;(c) 600 °C .

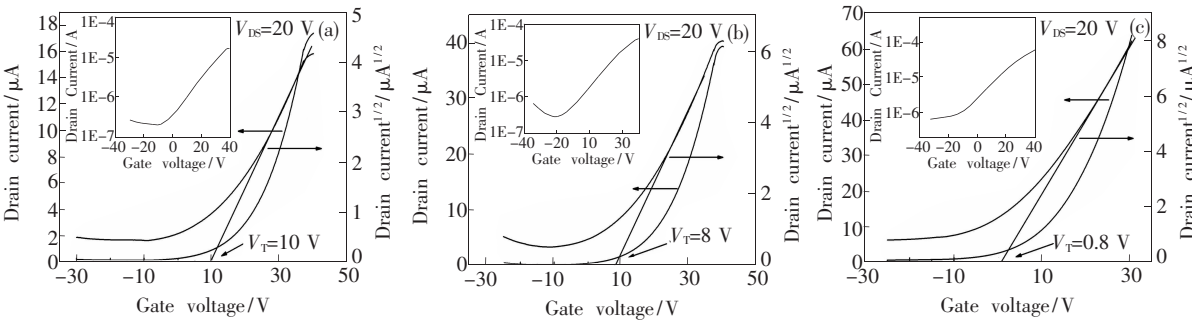


图 3 不同退火温度的 ZnO-TFT 的转移特性曲线. (a) 400 °C ;(b) 500 °C ;(c) 600 °C .

Fig. 3 Transfer characteristics of ZnO-TFTs with different anneal temperature. (a) 400 °C ;(b) 500 °C ;(c) 600 °C .

方根和栅极电压曲线的线性部分与横坐标的交点即是 ZnO 薄膜晶体管的阈值电压。400、500、600 °C 退火处理的 ZnO-TFT 的阈值电压分别为 10 V、8 V、0.8 V,关态电流分别为 1×10^{-7} A、 2×10^{-7} A、 7×10^{-7} A。由式(1)中斜率,计算得到 ZnO-TFT 的场迁移率分别为 $0.24\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、 $0.61\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、 $2.1\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。由图 3 中对数坐标的输出特性曲线可知,不同温度下退火处理对薄膜晶体管的电流开关比影响不大,三者均为 10^2 左右。

对未退火和不同温度退火处理的 ZnO 沟道层的微区结构进行观察,发现随着温度升高薄膜晶粒增大,晶粒晶界减少,表面粗糙度增加。其原子力显微镜照片如图 4 所示。尤其是 600 °C 退火处理的样品这种变化更为明显,对应到其电学性质,600 °C 退火的 ZnO-TFT 有较低的阈值电压和较高的迁移率。半导体薄膜中晶粒间界是主要的载流子散射中心,晶粒间界的减少有助于增加薄膜的载流子迁移率;但是,晶粒太大又会导致薄膜晶体管的关态电流的增大,降低电流开关比。该现象同样存在于多晶硅薄膜晶体管中,同时过高的退火温度会导致其和现有显示技术兼容性变

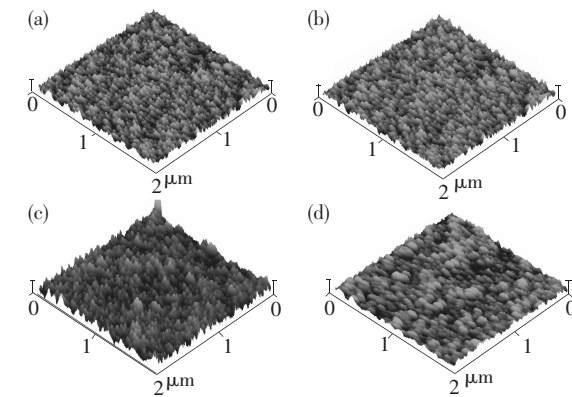


图 4 未退火和不同温度退火的 ZnO 薄膜的 AFM 图. (a)未退火;(b) 400 °C ;(c) 500 °C ;(d) 600 °C .

Fig. 4 AFM images of as-grown(a) and annealed ZnO films at (b) 400 °C ;(c) 500 °C ;(d) 600 °C .

差^[11]。以上结果表明 ZnO-TFT 电学性质和沟道层薄膜晶粒大小密切相关,需要对 ZnO 薄膜的生长和退火工艺开展进一步的研究工作,以期获得综合性能良好的 ZnO-TFT 器件。

4 结 论

用光刻剥离工艺和射频磁控溅射法在带有氧

化层的 P 型 Si 衬底上制备了以 ZnO 为沟道层的薄膜晶体管, P 型 Si 衬底兼为栅极, SiO₂ 层为栅绝缘层, 热蒸镀的金属 Al 作为源漏电极。研究了不同的 ZnO 薄膜退火温度对器件电学性能的

影响, 发现 600 ℃退火的 ZnO-TFT 有较低的阈值电压和较高的电子迁移率。用 AFM 对 ZnO 沟道层进行观察, 发现器件的电学性质和沟道层薄膜晶粒大小密切相关。

参 考 文 献:

- [1] Klaik H, Gundlach D J, Jackson T N. Fast organic thin-film transistor circuits [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 1999, 20(6):289-291.
- [2] Servati P, Prakash S, Nathan A, *et al.* Amorphous silicon driver circuits for organic light-emitting diode displays [J]. *J. Vacuum Science & Technology A—Vacuum Surfaces and Films*, 2002, 20(4):1374-1378.
- [3] Bea H S, Seongil Im. ZnO-based thin film transistors of optimal device performance [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2004, B22(3):1191-1195.
- [4] Kim I D, Lim M H, Kang K, *et al.* Room temperature fabricated ZnO thin film transistor using high-K Bi_{1.5}Zn_{1.0}Nb_{1.5}O₇ gate insulator prepared by sputtering [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(2):022905(1-3).
- [5] Ozgur U, Alivov YI, Liu C, *et al.* A comprehensive review of ZnO materials and devices[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 98(4):041301(1-103).
- [6] Look D C. Recent advances in ZnO materials and devices [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2001, 80(1-3): 383-387.
- [7] Masuda S, Kitamura K, Okumura Y, *et al.* Transparent thin film transistors using ZnO as an active channel layer and their electrical properties [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 93(3):1624-1630.
- [8] Bae H S, Yoon M H, Kim J H, *et al.* Photodetecting properties of ZnO-based thin-film transistors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(25):5313-5315.
- [9] Kwon Y, Li Y, Heo Y W, *et al.* Enhancement-mode thin film field effect transistor using phosphorus-doped (Zn, Mg)O channel [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(14):2685-2687.
- [10] Hsieh H H, Wu C C. Scaling behavior of ZnO transparent thin film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(4):041109(1-3).
- [11] Angelis C T, Dimitriadis C A, Miyasaka M, *et al.* Effect of excimer laser annealing on the structural and electrical properties of polycrystalline silicon thin-film transistors [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, 86(8):4600-4606.

Effect of Annealing Temperature on Electrical Properties of ZnO-TFT

ZHANG Xin-an^{1,2}, ZHANG Jing-wen², ZHANG Wei-feng¹, HOU Xun^{1,2}

(1. School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475001, China, E-mail: xinanzhang@henu.edu.cn;

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

Abstract

ZnO-TFT was fabricated on thermally oxide silicon substrates by RF magnetron sputtering and lift-off technology. The effect of annealing temperature on electrical properties of devices was investigated which revealing that the threshold voltage decreased and the field effect mobility increased with the increase of annealing temperature. The surface morphology of the ZnO films were characterized by atomic force microscopy, which showed that the average grain size increased with the increase of

annealed temperature. The results indicate that there are close correlation between electrical properties of ZnO-TFT and the grain size of the channel layer.

Key words: ZnO; thin film; transistor; anneal

作者简介:张新安(1977—),男,河南开封人,讲师,从事宽带隙半导体光电器件研究。



《光机电信息》征稿启事

本刊由中国光学学会、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。
本刊征集光学和应用光学、光电子学和激光、微纳科技、材料科学、电磁学和电子学、机械、信息科学和技术等几大领域如下形式的文章:

1. 研究信息快报
本栏目主要报道最新研究成果、阶段新结果、片段新结果的介绍或说明,不要求是纯学术论文。目的是为那些尚未能形成正式研究论文,但希望把已有的最新研究成果、阶段或片断新结果抢先发表的科研工作者提供一个平台,保护广大科研人员的知识产权。主要内容包括研究背景简介、研究过程或实验过程简述、观察到的结果、数据及相关信息说明、评论等,附图表数据等,也可附参考文献(一般不要求)。本栏目发表的论文数据不影响在正式发表论文时使用。

本栏目出版周期:收稿日期为每月 5 日之后、25 日之前收到,下月即出版发表。如为当月 5 号之前收到,当月发表。

2. 研究快报
本栏目主要征集研究新成果的快速报道,要求同其他刊物的研究快报。要求具有如下内容:摘要、关键词、研究背景(引言)、研究过程或实验过程、研究结果、参考文献。

3. 研究评论
主要是对当前最新研究结果或研究动态的评论或展望,也可是基于他人研究结果的二次开发或更深层次的研究结果报道。

4. 综述文章
(1)综述本领域或本学科的研究成果和进展、发展动态和趋势;(2)作者本研究群体的研究工作综述。

5. 研究论文
征集研究新结果的学术论文。

6. 应用开发类论文
接受各类大学、研究所、企业自主研发的新产品性能报道和新应用报道;新型器件在系统应用结果方面的报道等。是反映企业研发创新和对自身产品的再认识的能力、并能够让用户更好地了解产品性能、拓展应用范围的手段。本栏目论文具有产品推广广告作用。

7. 成果信息和研发信息
本栏目主要为大学、研究所等研发部门发布研究成果信息或项目工程研发信息;企业需要开发或攻关的项目信息等。目的是为研发部门和企业之间架起沟通桥梁。

8. 各类形式的企业宣传、广告,具体来电来函商谈,本刊做各类宣传、广告,费用低廉。
“好酒也怕巷子深”——您的产品多一份广告就会多一份收益,低廉的费用可以节约一个推销员的出差费用,而效果和范围则要比一个销售人员大得多。

在我们这里刊登的广告哪怕只为您带来一个客户——您就收回了广告成本,同时也给您带来了久远的影响和效益。

纸版的广告+电子版的广告——更值得客户信赖,更能为您培养潜在的中、远期客户。

网上投稿:Email: gjdxxw@gmail.com xxfw@ciomp.ac.cn