

氧对 IZO 低压无结薄膜晶体管稳定性的影响

张耕铭¹⁾²⁾ 郭立强^{2)†} 赵孔胜¹⁾ 颜钟惠¹⁾²⁾

1) (教育部微纳光电子器件重点实验室, 化学生物传感与计量学国家重点实验室, 物理与微电子科学学院, 湖南大学, 长沙 410082)

2) (中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

(2012 年 12 月 17 日收到; 2013 年 3 月 19 日收到修改稿)

本文在室温下制备了无结结构的低压氧化铟锌薄膜晶体管, 并研究了氧分压对其稳定性的影响. 氧化铟锌无结薄膜晶体管具有迁移率高、结构新颖等优点, 然而氧化物沟道层易受氧、水分子等影响, 造成稳定性下降. 在室温下, 本文通过改变高纯氧流量制备氧化铟锌透明导电薄膜作为沟道层、源漏电极, 分析了氧压对于氧化物无结薄膜晶体管稳定性的影响. 为使晶体管在低电压 ($< 2\text{ V}$) 下工作, 达到低压驱动效果, 本文采用具有双电层效应和栅电容大的二氧化硅纳米颗粒膜作为栅介质; 通过电学性能测试, 制备的晶体管工作电压仅为 1 V 、开关电流比大于 10^6 、亚阈值斜率小于 100 mV/decade 以及场效应迁移率大于 $20\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. 实验研究表明, 通氧制备的氧化铟锌薄膜的电阻率会上升, 导致晶体管的阈值电压向正向漂移, 最终使晶体管的工作模式由耗尽型转变为增强型.

关键词: 薄膜晶体管, 无结, 氧化铟锌, 氧分子

PACS: 72.80.Ey, 73.40.Qv, 73.61.Ga

DOI: 10.7498/aps.62.137201

1 引言

近年来, 在微电子器件以及材料研究领域, 人们将有机薄膜晶体管作为研究的热点, 很少关注器件结构上的创新以及性能改善^[1-4]. 最近在纳米线晶体管的报道中, 出现了一种新型结构称为无结结构, 它最大的特点是纳米线同时作为晶体管的沟道层、源漏电极^[5,6]. 无结晶体管极大地简化了晶体管结构, 降低了制备难度和成本, 同时有效地减少了纳米线晶体管的短沟道效应, 减小了亚阈值斜率和减缓了晶体管的退化^[5-7], 从而提高了晶体管的整体性能. 无结结构是将源漏电极作为沟道层的一部分, 它要求沟道层的电导率介于导体与半导体之间. 非晶态 n 型氧化物半导体是一种理想的无结结构的可选择性材料, 这类材料在厚度较薄时表现出半导体特性, 较厚时表现出导体特性. 吴惠楨等人用射频磁控溅射技术制备了厚度为 20 nm 的氧化铟 (In_2O_3) 作为沟道层, 得到场效应迁移率为 $6.3\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 阈值电压为 -0.9 V 的薄膜晶体管^[8]. 王雄等人利用厚度为 40 nm 氧化铟锡

(ZnSnO) 作为沟道层, 制备了底栅薄膜晶体管, 场效应迁移率达到 $9.1\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ^[9]. Fortunato 等人实验研究发现在室温下, 氧化铟锌 (IZO) 薄膜的迁移率可达 $60\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 电导率可达 $5 \times 10^{-4}\ \Omega\cdot\text{cm}$ ^[10], 由此可见 IZO 薄膜作为无结结构材料制备低压驱动无结薄膜晶体管具有极大地研究价值和经济价值. 我们前期研究发现 IZO 薄膜晶体管具有大于 10^6 的开关电流比, 小于 200 mV/decade 的亚阈值斜率以及大于 $10\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 的载流子迁移率, 且不存在薄膜晶粒间界造成薄膜晶体管性能下降的问题. 但是由于非晶态 IZO 薄膜暴露在空气中时, 会吸附空气中的氧、水分子等, 改变薄膜中载流子浓度, 进而造成晶体管的阈值电压漂移和迁移率的下降^[11], 这种影响严重地限制了晶体管器件在高湿和高氧环境中的应用.

本文通过改变氧流量制备 IZO 薄膜, 并作为薄膜晶体管沟道层、源漏电极. 比较研究了在有氧和无氧条件下制备的薄膜晶体管稳定性. 研究发现有氧沉积的 IZO 薄膜暴露在空气中不易与水和氧气发生反应, 增强了晶体管的稳定性和减缓了晶体管的老化效应; 但氧流量过大会使 IZO 薄膜的电阻率

† 通讯作者. E-mail: guoliqiang@nimte.ac.cn

上升, 导致晶体管的整体性能下降.

2 实验过程

本文采用 ITO/SiO₂/IZO 三明治结构制备无结 IZO 薄膜晶体管, 其结构示意图如图 1 所示. 为减少晶体管制备过程中的污染, 本文首先对氧化铟锡 (ITO) 玻璃进行清洗; 然后将 ITO 玻璃放入等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 系统腔室中制备 SiO₂ 栅介质层, 其中采用硅烷 (SiH₄) 和氧气 (O₂) 为反应源气体, 流量分别为 18 sccm 和 3 sccm, 采用氩气 (Ar) 为起辉和保护气体, 流量为 45 sccm, 反应压强为 30 Pa, 射频功率为 100 W, 反应时间为 30 min, 制备出的 SiO₂ 栅介质的厚度约为 2 μm; 最后利用磁控溅射系统在保持其他条件不变的情况下, 采用 Ar 为保护气体, 流量为 14 sccm, 通过改变氧气流量由 0—0.5 sccm 制备了 IZO 薄膜, 其中反应压强为 0.5 Pa, 射频功率为 100 W, 溅射沉积 3 min, IZO 薄膜厚度约为 30 nm. 在制备 IZO 薄膜的同时, 本文采用一步掩膜法, 同时形成了无结薄膜晶体管的阵列结构, 该晶体管阵列中, 每个器件的宽、长分别为 150 μm 和 1000 μm. 为了保证溅射的纳米级 IZO 薄膜不受外界环境影响, 最后我们采用掩膜版覆盖电极部分, 用原子层沉积 (ALD) 系统在器件上沉积了一层氧化铝 (Al₂O₃) 薄膜作为钝化层, 厚度约为 30 nm. 采用 Veeco Dimension 3100V 扫描探针显微镜 (SEM) 和 Lambda 950 型 Spectrometer 分析了 IZO 薄膜的表面形貌特征和微结构特征. 在室温下和黑暗环境中, 采用 Solartron1260A 阻抗分析仪和 Keithley4200 半导体参数分析仪测量了薄膜晶体管的电学特性.

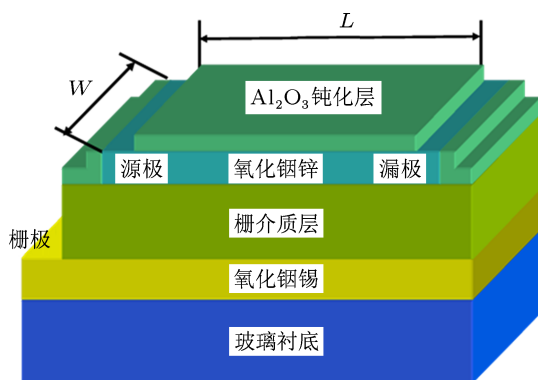


图 1 IZO 薄膜晶体管结构示意图

3 实验结果及讨论

由图 2 IZO 薄膜的透射率图谱可见, 在可见光波长范围内 (300—700 nm), IZO 的平均透射率约为 84%, 这说明 IZO 薄膜具有良好的光透射性; 由图 2 IZO 薄膜的原子力显微镜 (AFM) 表面形貌图可见, IZO 薄膜表面平整, 致密度很好, 没有明显的颗粒, 均方根粗糙度 R_q 和平均粗糙度 R_a 分别为 1.04 nm, 0.837 nm, 最大粗糙度 R_{max} 也仅 8.01 nm.

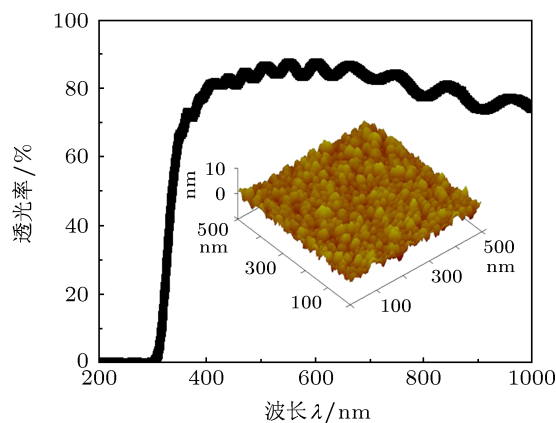


图 2 给出了在室温下制备典型的 IZO 薄膜的透射率图谱和 AFM 表面形貌图

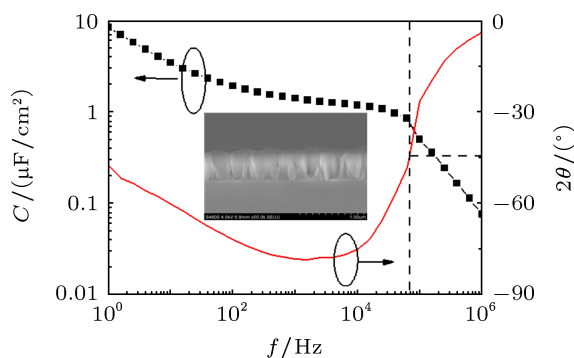


图 3 SiO₂ 电容随频率变化的图谱以及相角变化图 (插图为 SEM 截面图)

图 3 为 SiO₂ 栅介质电容和相角随频率变化的特征曲线. 由图 3 可以看出, 在频率为 1 Hz 的时候, 单位面积电容高达 8.2 μF/cm². 这是因为室温沉积的 SiO₂ 形成纳米柱状微孔结构 (图 3 中 SEM 图), 里面的 H⁺ 离子在栅极加正偏压的作用下通过柱状阵列的间隙向沟道层移动, 最终在 SiO₂ 栅介质和 IZO 薄膜沟道层之间的界面层积聚. 当 H⁺ 离子积累到一定程度, 由于电荷感应, IZO 薄膜沟道层内会形成极性相反的负电荷层; 另一方面, 栅介质在靠近栅极的地方, 由于 H⁺ 离子的离开, 剩下

了大量负电荷,这样就构成了双电层^[12],造成栅介质电容相当大.由于双电层大电容的强烈静电耦合作用,将使晶体管在一个很小的工作电压($< 2\text{ V}$)内实现晶体管的开启和关断.同时我们也可以看出在低频($f > 70\text{ kHz}$, $\theta(f) > -45^\circ$)的时候,相角曲线主要表现出电容特性,在高频时($f > 70\text{ kHz}$, $\theta(f) > -45^\circ$),则主要表现出电阻特性.

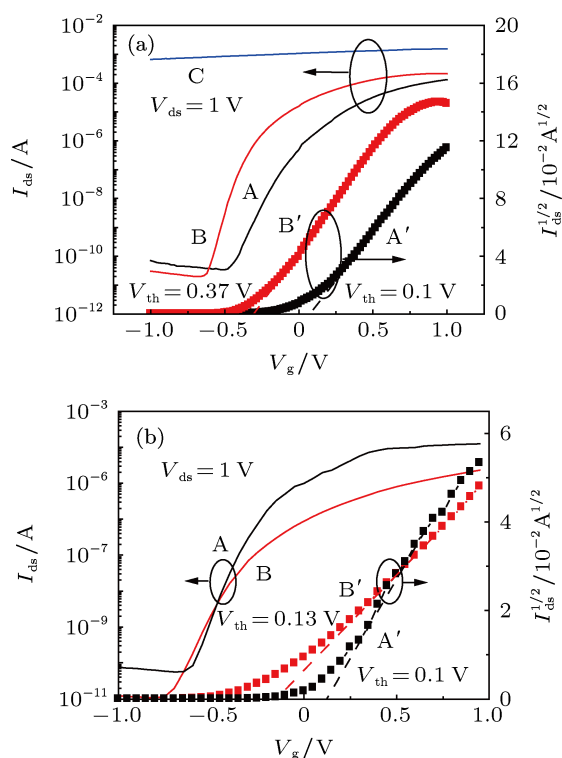


图4 薄膜晶体管的转移曲线以及 $I_{ds}^{1/2}-V_{gs}$ 曲线 (a) 制备后测试结果; (b) 在空气中放置一个星期后测试结果

图4(a)给出了不同氧流量下制备的IZO薄膜作为沟道层、源漏电极的薄膜晶体管的转移特性曲线以及 $I_{ds}^{1/2}-V_{gs}$ 特性曲线.由图4(a)可以看出,栅压 V_{gs} 控制源漏电流起到了良好的静电调控效果^[13],氧气流量为 0.5 sccm 和 0 sccm 时,薄膜晶体管都显示出了非常好的晶体管性能,其中氧气流量为 0.5 sccm 时,薄膜晶体管的开关比为 3.8×10^6 ,亚阈值斜率为 98 mV/dec ;氧气流量为 0 sccm 时,薄膜晶体管的开关比是 1.08×10^7 ,亚阈值斜率 92 mV/dec .值得注意的是,栅压 V_{gs} 为 -1 V 的时候,氧气流量为 0 sccm 时制备的薄膜晶体管的源-漏电流比氧气流量为 0.5 sccm 时制备的薄膜晶体管的源-漏电流小 $8 \times 10^{-5}\text{ A}$,这是因为氧气流量为 0 sccm 时,IZO薄膜沟道层中的多数载流子浓度较大,这也是IZO薄膜沟道层沉积厚度只有 30 nm ,而IZO薄膜晶体管依然能保持良好的晶体管特性的原因;而当相同

的溅射条件下,即保持氧气流量为 0 sccm 时,制备IZO沟道层的厚度增加到 60 nm 时,就可以明显地看出来IZO薄膜沟道层相当导电,栅压将失去调控器件能力,出现“关不断”的情况.在 $(I_{ds})^{1/2}-V_{gs}$ 特性曲线中,通过拟合曲线得到直线与横坐标轴的交点(截距),即为阈值电压,氧气流量为 0 sccm 时和氧气流量为 0.5 sccm 时,薄膜晶体管的阈值电压 V_{th} 分别为 0.1 V , -0.37 V .这说明薄膜晶体管的工作模式随氧气流量的增加由耗尽型逐渐向增强型转变.一般来讲,阈值电压 V_{th} 正向漂移的原因可由两种基本模型解释:电荷陷阱和缺陷^[20].对此Jeong等^[14]明确指出,阈值电压 V_{th} 有变化而亚阈值斜率没有明显变化时,可以认为只是沟道与栅介质表面之间的电荷陷阱的作用.本文以上在氧气流量为 0 sccm 和 0.5 sccm 时,制备的IZO薄膜晶体管的亚阈值斜率分别为 92 mV/dec , 98 mV/dec ,可以认为亚阈值斜率没有显著的变化.因此本文中随氧流量增加造成薄膜晶体管的工作模式由耗尽型逐渐向增强型转变的原因可以用电荷陷阱模型解释.基于此模型,本文认为在栅介质和沟道层之间的界面上过剩电荷中可能有离子化的杂质原子和俘获的载流子,这些过剩电荷产生的电场影响了阈值电压稳定.在栅压 V_{gs} 等于阈值电压 V_{th} 时是薄膜晶体管处于电子浓度等于空穴浓度的临界状态,而薄膜晶体管的工作模式由耗尽型逐渐向增强型转变说明沟道层中由负电荷主导阈值电压的机理转变为了正电荷主导阈值电压的机理.薄膜晶体管饱和和工作区 ($V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$) 的阈值电压 V_{th} 和沟道载流子迁移率 μ 可由以下公式推导得到:

$$I_{ds} = \frac{WC_i\mu}{2L}(V_{gs} - V_{th})^2, \quad (1)$$

其中, L 是沟道长度, W 是沟道宽度 ($W/L = 150\text{ }\mu\text{m}/250\text{ }\mu\text{m}$); C_i 是栅介质的单位面积电容.由此公式,我们计算出氧气流量为 0.5 sccm 和 0 sccm 时,薄膜晶体管载流子迁移率分别为 $24.6\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $45\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$.

图4(b)是薄膜晶体管在室温下暴露在空气中放置一个星期后的转移特性曲线以及 $(I_{ds})^{1/2}-V_{gs}$ 特性曲线.由图4(b)可见,氧气流量为 0 sccm 时制备的薄膜晶体管在饱和区源漏电流最大值为 $2.5 \times 10^{-5}\text{ A}$,亚阈值斜率增加到 115 mV/dec ,源漏电流开关比也从 1.08×10^7 下降到 2.3×10^6 ,因此薄膜晶体管整体性能明显下降.而氧气流量为 0.5 sccm 时制备的薄膜晶体管最大饱和漏电流没有

变化, 亚阈值斜率仍保持在 98 mV/dec, 开关比也仅从 3.8×10^6 下降到 2.2×10^6 . 因此, 本文认为氧气流量为 0.5 sccm 时制备的薄膜晶体管比氧气流量为 0 sccm 时制备的薄膜晶体管性能更稳定.

为加深氧流量对 IZO 薄膜电学特性的研究, 我们给出了氧气流量为 0.5 sccm 和 0 sccm 时, 晶体管 IZO 薄膜沟道层霍尔效应测试的结果, 如表 1 所

示. 由表 1 可以看出, 氧气流量为 0.5 sccm 时 IZO 薄膜的载流子浓度比氧气流量为 0 sccm 时 IZO 薄膜的载流子浓度要小一个数量级, 所以通氧制备的 IZO 薄膜, 其电阻率将会上升, 且其霍尔迁移率也将明显下降; 而在不通氧的情况下, IZO 薄膜厚度为 60 nm 时, 薄膜将呈现出极强的导电特性, 电阻率甚至可达到 $6 \times 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$.

表 1 器件 A, B 和 C 的沟道层 IZO 薄膜的霍尔效应数据

器件	厚度/nm	氧气流量/sccm	霍尔迁移率/($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	载流子浓度/ cm^{-3}	电阻率/ $\Omega\cdot\text{cm}$
A	30	0.5	16.7	-8.77×10^{18}	0.04
B	30	0	37.1	-7.54×10^{19}	2.23×10^{-3}
C	30	0	31.4	-3.30×10^{20}	6.03×10^{-4}

4 结论

本文通过改变高纯氧流量制备 IZO 透明导电薄膜作为沟道层, 分析了氧压对于氧化物无结薄膜晶体管稳定性的影响. 解决了薄膜晶体管暴露在空

气中时, 沟道层材料受到氧、水分子的影响而造成的晶体管稳定性不高以及薄膜晶体管老化效应严重的问题. 解释了在不同氧流量条件下制备的 IZO 透明导电薄膜作为沟道层、源漏电极的薄膜晶体管的阈值电压正向漂移的原因.

- [1] Kim C, Huang P Y, Jhuang J W, Chen M C, Ho J C, Hu T S, Yan J Y, Chen L H, Lee G H, Facchetti A, Marks T J 2010 *Org. Electron.* **11** 1363
- [2] Nie G Z, Peng J B, Zhou R L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 127304 (in Chinese) [聂国政, 彭俊彪, 周仁龙 2011 物理学报 **60** 127304]
- [3] Yuan G C, Xu Z, Zhao W L, Zhang F J, Xu N, Tian X Y, Xu X R 2009 *Chin Phys. B* **18** 3990
- [4] Shi W W, Li W, Yi D M, Xie L H, Wei W, Huang W 2013 *Acta Phys. Sin.* **61** 228502 (in Chinese) [石巍巍, 李雯, 仪明东, 解令海, 韦玮, 黄维 2013 物理学报 **61** 228502]
- [5] Ionescu A M 2010 *Nature Nanotech.* **5** 178
- [6] Colinge J P, Lee C W, Afzalain A, Akhavan N D, Yan R, Ferain I, Razavi P, O'Neill B, Blake A, White M, Kelleher A M, McCarthy B, Murphy R 2010 *Nature Nanotech.* **5** 225
- [7] Lee C W, Afzalain A, Akhavan N D, Yan R, Ferain I, Colinge J P 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 053511
- [8] Wu H Z, Zhang Y Y, Wang X, Zhu X M, Yuan Z J, Xu T N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5022 (in Chinese) [吴惠贞, 张莹莹, 王雄, 朱夏明, 原子健, 徐天宁 2010 物理学报 **59** 5022]
- [9] Wang X, Cai X K, Yuan Z J, Zhu X M, Qiu D J, Wu H Z, 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 037305 (in Chinese) [王雄, 才玺坤, 原子健, 朱夏明, 邱东江, 吴惠贞 2011 物理学报 **60** 037305]
- [10] Fortunato E, Pimentel A, Goncalves A, Marques A, Martins R 2006 *Thin Solid Films* **502** 104
- [11] Kang D, Lim H, Kim C, Song I, Park J, Park Y, Chung J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 192101
- [12] Jiang J, Dai M Z, Sun J, Zhou B, Lu A X, Wan Q 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 054501
- [13] Zhao K S, Xuan R J, Han X, Zhang G M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 197201 (in Chinese) [赵孔胜, 轩瑞杰, 韩笑, 张耕铭 2012 物理学报 **61** 197201]
- [14] Jeong J K, Yang H W, Jeong J H, Mo Y G, Kim H D 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 123508

Effect of oxygen on stability performance of the IZO junctionless thin film transistors

Zhang Geng-Ming¹⁾²⁾ Guo Li-Qiang^{2)†} Zhao Kong-Sheng¹⁾ Yan Zhong-Hui¹⁾

1) (*Key Laboratory for Micro-Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education States Key Laboratory of Chemo/Biosensing and Chemometrics Hunan University, Changsha 410082, China*)

2) (*Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China*)

(Received 17 December 2012; revised manuscript received 19 March 2013)

Abstract

We report in this paper that low-voltage indium-zinc oxide (IZO) junctionless thin-film transistors (TFT) can be fabricated at room temperature, and the device stability performance influenced by oxygen pressure is studied. IZO junctionless TFT has a high mobility and novel structure, but the oxide channel layers are vulnerable due to the influence of oxygen and water molecules, which will lead to the degradation of the device stability. In this study, we fabricate transparent and conductive IZO thin-films at room temperature as channel layers, and source/drain electrodes by controlling the oxygen flow, and also analyze the effect of oxygen on the stability of oxide junctionless TFT. In order to operate at low-voltage (< 2 V), the TFT device employs the SiO₂ nanoparticle films as gate dielectric, which have electron double layers (EDL) effect and large gate capacitance, and the TFTs show excellent electrical performance with small operating voltage of 1 V, large on/off ratio ($> 10^6$), small subthreshold swing (< 100 mV/decade) and high mobility (> 20 cm²/V·s). The study indicates that the resistivity of IZO thin-film fabricated in increasing oxygen content, leads the threshold voltage to drift in a positive direction, and makes operating mode of TFT change from depletion mode to enhanced mode.

Keywords: thin-film transistor, junctionless, indium zinc oxide, oxygen molecules

PACS: 72.80.Ey, 73.40.Qv, 73.61.Ga

DOI: 10.7498/aps.62.137201

† Corresponding author. E-mail: guoliqiang@nimte.ac.cn