

一步掩膜法制备超低压 ITO 沟道纸上薄膜晶体管*

毛延凯[†] 蒋杰 周斌 窦威

(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)

(2011 年 5 月 26 日收到; 2011 年 7 月 4 日收到修改稿)

基于一歩掩膜法工艺制备了一种新型的纸上双电荷层超低压薄膜晶体管. 在室温射频磁控溅射过程中, 仅仅利用一块镍掩模板, 就可同时沉积出氧化铟锡 (ITO) 源漏电极和 ITO 沟道. 在此基础上, 以等离子体增强化学气相沉积法 (PECVD) 合成的具有双电荷层效应的微孔 SiO_2 为栅介质, 成功制备出以纸为衬底的超低压氧化物薄膜晶体管. 这种晶体管显示出极好的性能: 超低的工作电压 1.5 V, 场效应迁移率为 $20.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 亚阈值斜率为 188 mV/decade , 开关电流比为 5×10^5 . 这种基于全室温一步掩膜法工艺制备的纸上氧化物薄膜晶体管具有工作电压低, 工艺简单, 成本低廉等优点, 非常有望应用于未来便携式低功耗电子产品的制造中.

关键词: 超低工作电压, 一步掩膜法, 双电荷层, 微孔 SiO_2

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

1 引言

近年来, 基于宽带氧化物透明薄膜晶体管的研究引起了人们的广泛关注, 这种晶体管有望应用在液晶显示器、气敏传感器、以及下一代柔性透明电子产品上^[1,2]. 在众多透明氧化物半导体中, InGaZnO_4 , ITO 等材料由于其具有统一的结构, 光滑的表面, 当室温下沉积为非晶薄膜状态时电子迁移率也通常较高 ($> 10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) 等优点, 近年来引起了广泛的研究兴趣^[3,4]. 然而, 这些薄膜晶体管通常需要很大的驱动电压 ($> 10 \text{ V}$) 才能正常工作, 并获得足够的开关电流比. 工作电压大直接导致了高功耗, 这一点严重制约了其应用于实际的便携式电子产品设计中^[5].

为了解决这个问题, 实现器件在低电压下工作, 近年来许多科研人员采用高 k 栅介质或者复合栅介质的方法来增大器件栅电容, 从而提高栅极与沟道层间的电容耦合, 有效地降低了薄膜晶体管的工作电压^[6-11]. 最近, Crispin 等人^[12,13] 报道了一种新型的利用聚合物电解质来作栅介质的有机双电荷层薄膜晶体管, 电解质内部的可移动离子在外加栅压作用下形成双电荷层, 栅介质单位面积电容高

达 $10 \mu\text{F}/\text{cm}^2$, 工作电压可降低至 1V 左右, 这使得双电荷层晶体管开始成为人们关注的热点.

近来, 我们课题组成功研制出以微孔 SiO_2 为栅介质的氧化物薄膜晶体管. 它具有超低的工作电压 ($< 2 \text{ V}$), 较高的开关电流比 ($> 10^5$), 以及较高的场效应迁移率 ($\sim 20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$). 在此基础上, 我们提出了双电荷层理论成功解释了其独特的低压工作特性^[14,15]: 室温下 SiH_4 和 O_2 作为反应气体, 通过 PECVD 法沉积 SiO_2 栅介质过程中, 从硅烷分裂出来的 H^+ 离子可以进入微孔 SiO_2 绝缘层中, 成为了 SiO_2 中的可移动离子. 在栅极外加正压下, 这些可移动的 H^+ 离子向 SiO_2 上表面移动, 与沟道中的感应电子形成了双电荷层, 以获得较大的栅电容. 因此, 采用我们这种微孔 SiO_2 栅介质制备的薄膜晶体管, 由于其具有双电荷层效应, 可以大大降低其工作电压^[14,15].

为了进一步简化制备工艺的复杂性, 降低工艺成本. 在本文中, 我们选取这种具有双电荷层效应的微孔 SiO_2 为栅介质, 采用一步掩膜法在纸张衬底上成功制备出低压 ITO 沟道薄膜晶体管. ITO 沟道和源漏电极的沉积在一次磁控溅射中同时完成. 由于整个过程仅仅采用了一块镍掩模板, 并且整个

* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(批准号: 2007CB310500) 和国家自然科学基金 (批准号: 10874042) 资助的课题.

[†] E-mail: myk861119@yahoo.cn

器件制备全在室温下完成, 可以极大的降低器件制备工艺的复杂度. 在此基础上, 对晶体管的电学特性进行了详细研究. 测试结果表明, 采用一步掩膜法全室温工艺制备的低压纸上氧化物薄膜晶体管不仅具有良好的器件电学性能, 同时还具有工艺简单, 成本低廉等优点, 有望在下一代的低成本便携式电子产品设计中得到应用.

2 实验

器件制备基于底栅结构, 如图 1(a) 所示. 首先采用铜版纸作为衬底材料, 通过射频磁控溅射在纸上沉积一层约 300 nm 厚的 ITO 薄膜, 用来作为栅极. 然后, 室温下将 SiH_4 和 O_2 作为反应气体, 通过 PECVD 法在 ITO 上生长一层约 4 μm 厚的微

孔 SiO_2 栅绝缘层. 最后室温下采用一步掩膜法同时生成 ITO 源漏电极和沟道: 在生成的 SiO_2 表面固定一块镍掩模板, 在 0.5 Pa 的 Ar 气环境中射频磁控溅射沉积一层约 200 nm 厚 ITO 源漏极, 溅射出的 ITO 颗粒会通过衍射作用进入并沉积在镍掩模板覆盖的区域, 这样 ITO 源漏极形成的同时, 两极之间一层薄薄的 ITO 沟道层也就由于衍射同时形成了. 沟道层最薄处厚度约 30 nm, 沉积过程如图 1(b) 所示. 从图 1(c) ITO 沟道表面扫描电镜图也可以看出, 磁控溅射出的 ITO 颗粒尺寸已经到达纳米级别. 沟道长度和宽度分别为 80 μm 和 1000 μm . ITO 沟道表面和微孔 SiO_2 截面形貌采用场发射扫描电镜测试 (Hitachi S-4800 SEM). 器件的电学特性由 Keithley4200 半导体参数分析仪在室温下黑暗环境中测试得到.

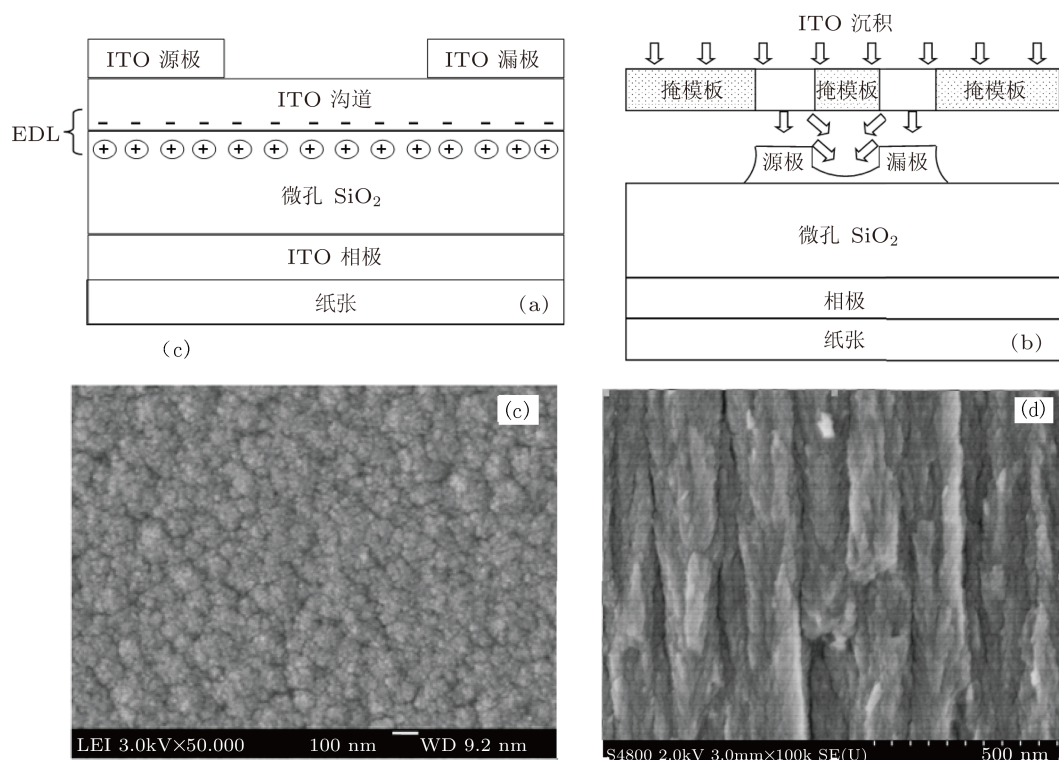


图 1 (a) ITO-TFT 器件结构示意图, 并示意沟道与微孔 SiO_2 间形成的双电荷; (b) 一步掩膜法过程示意图; (c) ITO 沟道截面扫描电镜图; (d) PECVD 法制备的微孔 SiO_2 扫描电镜图

3 结果与讨论

图 1(d) 是我们制备的微孔 SiO_2 栅介质的扫描电镜图. 从图上可以看出, 它具有疏松、柱状的排列结构, 其间有很多孔隙. 因而, 采用 SiH_4 和 O_2 作为反应气体并以 PECVD 法制备的微孔 SiO_2 , 正是

由于具有这种疏松的多孔结构, 当外加偏压时, 非常适合离子的运动. ITO 源漏极厚度约 200 nm, 沟道层厚度从源漏极边缘向中心递减, 中间最薄处约 30 nm. 霍尔效应测试显示出 ITO 薄膜电阻率与其厚度相关. 200 nm 厚的 ITO 源漏极与 30 nm 厚的沟道层电阻率分别为 $5.86 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$

和 $1.19 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$. 而对应的载流子浓度分别为 $3.47 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ 和 $3.03 \times 10^{21}/\text{cm}^3$.

图 2(a) 显示了该 ITO-TFT 的输出特性曲线 ($I_{\text{ds}}-V_{\text{ds}}$). 如图, V_{ds} 由 0 V 扫描至 1.5 V, 同时, V_{gs} 由 -0.4 V 扫描至 1 V, 每次增加 0.2 V. 由图可知, 较高的 V_{ds} 下器件显示出了很好的电流饱和特性, 而在较低 V_{ds} 下 I_{ds} 也具有较好的线性特性, 器件具有良好的欧姆接触. 晶体管工作在 n 型耗尽型模式, 在偏压 $V_{\text{ds}} = 1.5 \text{ V}$ 和 $V_{\text{gs}} = 1 \text{ V}$ 下具有较高的饱和电流 ($\sim 28 \mu\text{A}$). 由于上文提到的双电荷层效应 [14,15], 本器件显示出了超低的工作电压 1.5 V.

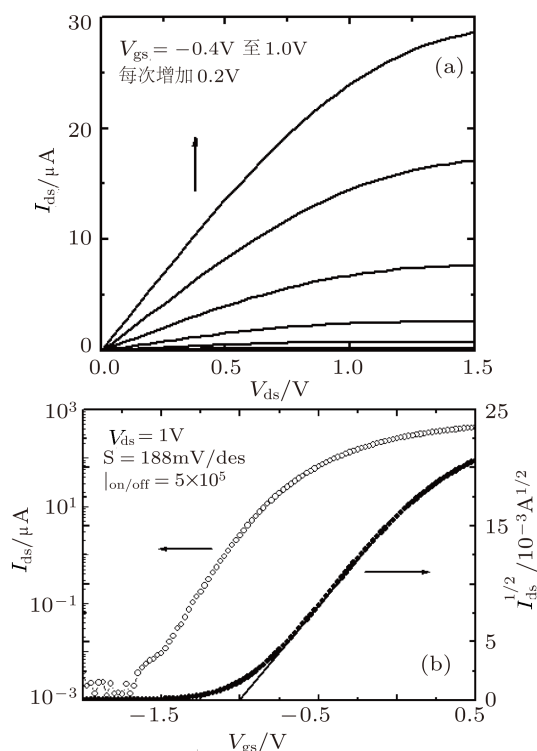


图 2 (a)ITO-TFT 的 $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 输出特性曲线; (b) ITO-TFT 的 $I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$ 转移特性曲线, 以及 $V_{\text{ds}} = 1 \text{ V}$ 下对应的 $I_{\text{DS}}^{1/2}-V_{\text{GS}}$ 曲线

图 2(b) 显示了其对应的转移特性曲线 ($I_{\text{ds}}-V_{\text{gs}}$). 由图可知, V_{ds} 固定在 1 V, 栅压 V_{gs} 由 -2.0 V 扫描至 0.5 V, 器件的开关电流比高达 5×10^5 , 亚阈值斜率 S 为 188 mV/decade. 器件的阈值电压可以通过 $\sqrt{I_{\text{ds}}}-V_{\text{gs}}$ 曲线取得, 如图可知阈值电压 V_{th} 为 -1 V. 因而饱和区 ($V_{\text{gs}} > V_{\text{gs}} - V_{\text{th}}$) 场效应迁移率可以根据以下公式获得:

$$I_{\text{ds}} = \frac{\mu_{\text{FE}} C_{\text{ox}} W}{2L} (V_{\text{gs}} - V_{\text{th}})^2, \quad (1)$$

式中 L 为沟道长度 $80 \mu\text{m}$, W 为沟道宽度 $1000 \mu\text{m}$, C_{ox} 为我们课题组制备的微孔 SiO_2 单位面积电容 [14,15], 约为 $2 \mu\text{F}/\text{cm}^2$. 通过计算可得, 饱和区场

效应迁移率 μ_{FE} 约为 $20.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

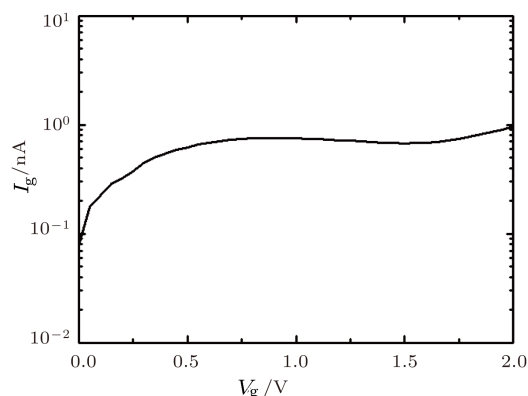


图 3 室温下 PECVD 法沉积的微孔 SiO_2 漏电流曲线

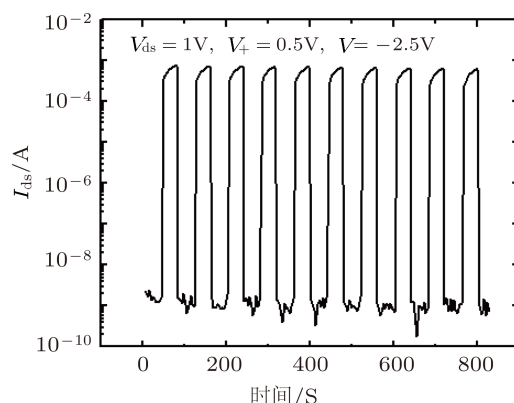


图 4 ITO 薄膜晶体管的脉冲响应

图 3 为室温下 PECVD 法制备的微孔 SiO_2 的栅漏电流曲线图. 2V 偏压下漏电流约为 0.9 nA, 比采用聚合物电解质要小得多 [12,13]. 虽然微孔 SiO_2 具有多孔结构, 但是由于其内部没有电化学现象, 离子电流也很小, 所得的漏电流比沟道电流小了 5 个数量级, 这就保证了器件的正常工作不会受到栅漏电流的影响.

图 4 为该 ITO 薄膜晶体管的脉冲响应图. 在 V_{ds} 外加电压 1 V, V_{g} 外加 -2.5 V 和 0.5 V 的脉冲测试信号下, 器件依然显示出很好的性能: 重复性比较好, 器件开关电流比一直大于 10^5 . 这些表明在栅极偏压下, ITO 沟道层和微孔 SiO_2 之间没有明显的电化学掺杂发生, 器件显示出了较好的稳定性.

4 结论

我们介绍了一种基于纸上, 采用一步掩膜法生成源漏电极和沟道的新型双电荷层 ITO 薄膜晶体管. 室温下 PECVD 法制备的微孔 SiO_2 绝

缘层与沟道感应电子形成双电荷层, 由于双电荷层效应^[14,15]的存在, 这种晶体管显示出了很好的性能: 超低的工作电压 1.5 V, 场效应迁移率为 $20.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 较低的亚阈值斜率 188 mV/decade ,

和高达 5×10^5 的开关电流比. 并由于它成功的制作在铜版纸衬底上, 因而这种超低电压晶体管也有望应用在未来的低成本低功耗电子器件上.

-
- [1] Ryu M K, Yang S, Park S, Hwang C S, Jeong J K 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 072104
 - [2] Xu T N, Wu H Z, Zhang Y Y, Wang X, Zhu X M, Yuan Z J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5018(in Chinese) [徐天宁, 吴惠桢, 张莹莹, 王雄, 朱夏明, 原子健 2010 物理学报 **59** 5018]
 - [3] Lim W, Douglas E A, Kim S H, Norton D P, Pearton S J, Ren F, Shen H, Chang W H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 252103
 - [4] Jeong J K, Jeong J H, Yang H W, Park J S, Mo Y G, Kim H D 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 113505
 - [5] Kim I D, Choi Y W, Tuller H L 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 043509
 - [6] Su N C, Wang J S, Chin A 2009 *IEEE Electron Device Lett.* **30** 1317
 - [7] Kim J B, Fuentes H C, Kippelen B 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 242111
 - [8] Bartic C, Jansen H, Campitelli A, Borghs S 2002 *Org. Electron.* **3** 65
 - [9] Raval H N, Tiwari S P, Navan R R, Mhaisalkar, Rao V R 2009 *IEEE Electron Device Lett.* **30** 484
 - [10] Liu Y R, Chen W, Liao R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8088 (in Chinese) [刘玉荣, 陈伟, 廖荣 2010 物理学报 **59** 8088]
 - [11] Kim D H, Cho N G, Kim H G, Kim H S, Hong J M, Kim I D, 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 032901
 - [12] Larsson O, Said E, Berggren M, Crispin X 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 3334
 - [13] Cho J H, Lee J, He Y, Kim B, Lodge P T, Frisbie C D 2008 *Adv. Mater.* **20** 686
 - [14] Sun J, Liu H X, Jiang J, Lu A X, Wan Q 2010 *J. Mater. Chem.* **20** 8010
 - [15] Lu A X, Sun J, Jiang J, Wan Q 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 222905

One-shadow-mask ultralow-voltage indium-tin-oxide thin-film transistors on paper substrates*

Mao Yan-Kai[†] Jiang Jie Zhou Bin Dou Wei

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

(Received 26 May 2011; revised manuscript received 4 July 2011)

Abstract

A new kind of electric-double-layer indium-tin-oxide (ITO) thin-film transistor (TFT) is fabricated on a paper substrate by one-shadow-mask process. The channel layer can be simultaneously self-assembled between ITO source/drain electrodes by only one shadow mask during RF magnetron sputtering deposition at room temperature. Base on this, we choose microporous SiO₂ with electric double layer effect as a gate dielectric, and successfully develop the ultralow-voltage oxide TFT on a paper substrate. The TFT exhibits a good performance with an ultralow operation voltage of 1.5 V, a field-effect mobility of 20.1 cm²/Vs, a subthreshold swing of 188mV/decade, and a large on-off ratio of 5×10^5 . The full-room-temperature oxide TFT on the paper substrate by one-shadow-mask process shows a lot of advantages, such as low operation voltage, simple device process, low cost, etc. Such a TFT is very promising for the application of low-power and portable electronic products in the future.

Keywords: ultralow operation voltage, one-shadow-mask, electric double layers, microporous SiO₂

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

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB310500), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10874042).

[†] E-mail: myk861119@yahoo.cn