

In₂O₃透明薄膜晶体管的制备 及其电学性能的研究*

徐天宁¹⁾²⁾ 吴惠桢^{1)†} 张莹莹¹⁾ 王 雄¹⁾ 朱夏明¹⁾ 原子健¹⁾

1) (浙江大学物理系, 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

2) (浙江工业大学之江学院理学系, 杭州 310024)

(2009 年 7 月 24 日收到; 2009 年 11 月 12 日收到修改稿)

采用磁控溅射方法在玻璃衬底上生长了 In₂O₃ 晶体薄膜. 该薄膜具有(111)晶面择优取向, 晶粒尺寸达到 33 nm. 利用光刻工艺制作了以 In₂O₃ 晶体薄膜为沟道层的底栅式薄膜晶体管. In₂O₃ 薄膜晶体管具有良好的栅压调制特性, 场效应迁移率达到 $6.3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 开关电流比为 3×10^3 , 阈值电压为 -0.9 V . 结果表明, In₂O₃ 薄膜晶体管在新型平板显示领域具有潜在的应用前景.

关键词: In₂O₃ 晶体薄膜, 磁控溅射, 薄膜晶体管, 场效应迁移率

PACC: 7360, 7360F, 7360L

1. 引 言

近年来, 氧化物薄膜晶体管(TFT)因具有高的迁移率、可见光区透明和可低温制备等特点而受到人们的广泛关注. 高迁移率意味着大的沟道电流和高的开关速度, 可以用来驱动有源矩阵有机发光二极管显示器件(AMOLED)^[1]. 可见光区透明可以提高 TFT 器件的开口率, 降低功率消耗. 低温制备工艺使得氧化物 TFT 可以与柔性衬底相匹配, 这对发展新型大面积显示器件而言, 是十分有利的^[2]. 目前, 用作 TFT 沟道层材料的氧化物主要以 ZnO 及其三元系(ZnSnO, InZnO)和四元系(InGaZnO)化合物为主^[3-9]. 由于 ZnO 薄膜通常存在氧空位和锌填隙等缺陷, 使得室温条件下很难生长出高结晶质量和低载流子浓度的 ZnO 薄膜, 这直接影响了 ZnO TFT 的性能的提高. 国内少数几个课题组报道了 ZnO TFT 器件的研制结果, 场效应迁移率最高仅为 $2.7 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ^[3-5].

最近, Wang 等^[10]报道了场效应迁移率高达 $\sim 140 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 的 In₂O₃ TFT, 这使得 In₂O₃ 在 TFT 方面的应用开始成为人们关注的热点^[11-13].

In₂O₃ 是一种宽带隙(3.6—3.75 eV)半导体材料, 具有高的可见光透过率(大于 80%)和高的单晶体迁移率($160 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$). 这些特点使得 In₂O₃ 在制作高性能 TFT 方面具有潜在优势. 但是在国内方面, 据我们所知还未见报道有关 In₂O₃ 沟道的 TFT 器件研制方面的工作. 另外, Wang 等^[10]获得的高性能 In₂O₃ TFT 是基于离子辅助沉积(IAD)技术和有机物作为栅绝缘层材料. 离子辅助沉积技术使得 TFT 制作成本较为昂贵, 而有机物与 In₂O₃ 界面黏合的热稳定性还不明确. 而且, 他们制作的 TFT 沟道宽度为 5 mm, 远大于实际应用的 TFT 尺寸. 这些因素都影响了 In₂O₃ TFT 的实用性. 因此, 要使 In₂O₃ TFT 将来在显示领域发挥作用, 还需开展更多的研究.

针对国内在 In₂O₃ 薄膜晶体管器件研制的空白, 我们利用磁控溅射技术在玻璃衬底上生长了 In₂O₃ 晶体薄膜, 对薄膜的晶体结构、表面形貌、光学性质和电学性质进行了研究. 并采用光刻技术制作了 In₂O₃ 为沟道层, SiN_x 为栅绝缘层的底栅式 TFT 结构, 获得栅压调制性能较好的 TFT 器件. 研究结果表明, 在类似的制作工艺下, In₂O₃ 比 ZnO 更容易制作出高性能的 TFT.

* 国家自然科学基金(批准号:60676003)和浙江省自然科学基金(批准号:Z406092)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: hzwu@zju.edu.cn

2. 实 验

In₂O₃ 晶体薄膜通过磁控溅射方法在室温条件下沉积在玻璃和白宝石衬底上. 生长室的本底气压小于 6×10^{-5} Pa, 溅射生长采用的靶源为高纯 In₂O₃ 陶瓷靶 (99.99%), 溅射气体为高纯 Ar 气 (99.999%), 气流大小为 7 sccm, 溅射功率为 100 W. 玻璃和白宝石衬底的清洗步骤是: 去离子水超声波清洗三次, 玻璃在 Na₂CO₃ 溶液中 80 ℃ 水浴 15 min, 然后在浓度 3%—5% 的醋酸溶液中浸泡 30 s, 而白宝石在浓硫酸: 浓磷酸 = 3: 1 溶液中 80 ℃ 水浴 15 min (每一步后均用去离子水反复冲洗), 最后用高纯氮气吹干后放入磁控溅射设备. In₂O₃ 晶体薄膜的晶体结构和结晶质量通过 D/max-rA 转靶多晶 X 射线衍射仪 (XRD) 进行表征, 射线为 Cu K_{α1} 线 ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). 表面形貌通过日本精工公司生产的型号为 SPI3800N 的原子力显微镜 (AFM) 进行测量.

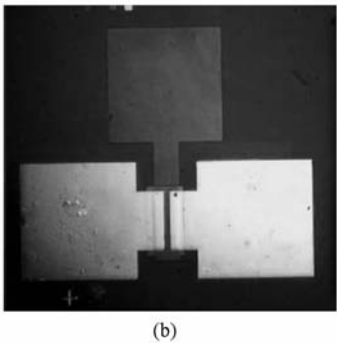
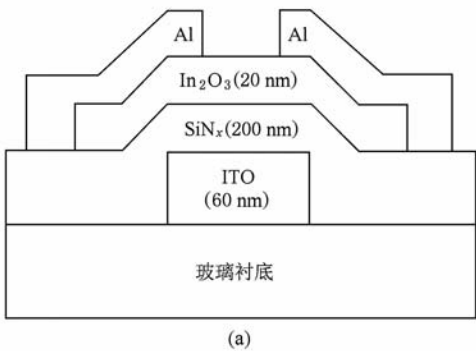


图 1 In₂O₃ 薄膜晶体管的截面示意图和实物显微照片 (a) 截面示意图, (b) 实物显微照片

3. 结果和讨论

3.1. In₂O₃ 晶体薄膜

In₂O₃ 晶体薄膜的结晶质量和表面形貌直接影响 TFT 的性能. 图 2 是室温条件下在 ITO 覆盖的玻璃表面磁控溅射生长的 In₂O₃ 晶体薄膜的 AFM 表面形貌图. 由图 2 可知薄膜表面分布着尺寸均匀的 In₂O₃ 结晶岛状结构 (平均高度约 12 nm), 表面均方根粗糙度为 2.4 nm, 与文献 [10] 报道的相同衬底上生长的 In₂O₃ 薄膜的表面均方根粗糙度为 2.1 nm 相接近. 这说明我们生长的 In₂O₃ 晶体薄膜是均匀、致密和平整的. 作为 TFT 的沟道层, 较小的表面粗

光学透过率通过日本岛津公司生产的 UV-3150 型紫外可见分光光度计进行测量, 波长范围为 200—800 nm. 电学性质如载流子浓度和迁移率通过霍尔测试仪 (美国 BIO-RAD 公司生产的 HL5500 霍尔效应测量系统) 和 van der Pauw 法进行测量.

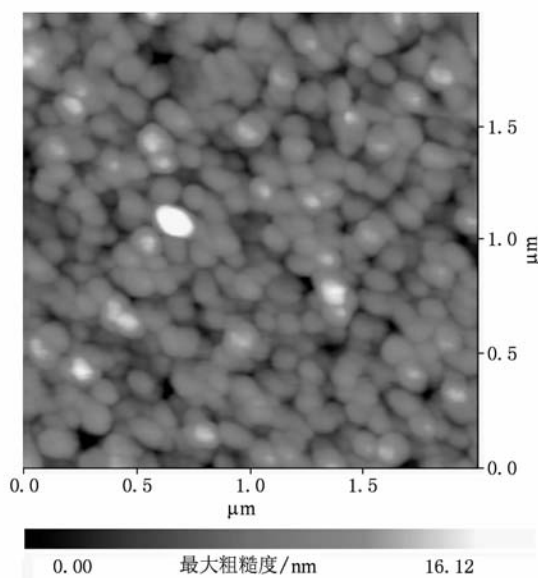
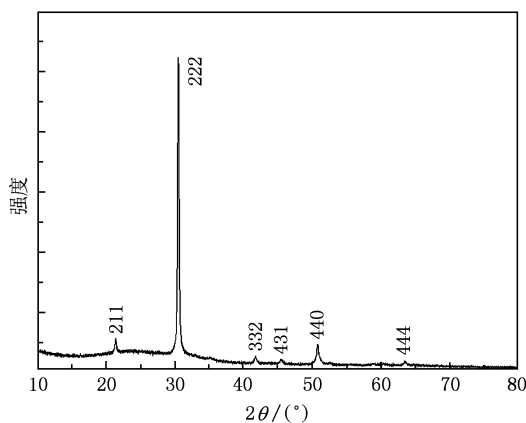
In₂O₃ 薄膜晶体管 (TFT) 的制作步骤如下: 首先在玻璃上镀一层 60 nm 厚的钢锡氧化物 (ITO) 用作栅电极; 然后用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 法蒸镀 SiN_x 作为绝缘层, 其厚度为 200 nm; 随后用磁控溅射生长 20—70 nm 厚的 In₂O₃ 晶体薄膜作为沟道层; 最后热蒸发一层铝作为源漏电极, 厚度约为 100—200 nm. TFT 器件利用通用光刻工艺使得沟道层和电极图案化, 沟道的长度有三种, 分别为 10, 25 和 50 μm , 沟道的宽度为 200 μm . 底栅式 In₂O₃ TFT 结构的截面示意图如图 1 (a) 所示, TFT 的实物显微照片如图 1 (b) 所示. TFT 的性能如输出特性和转移特性曲线由 Keithley 2612 A 半导体参数仪测试得到.

糙度有助于改善器件的电学性能, 有效降低表面缺陷对电荷的俘获和散射^[14].

图 3 是 In₂O₃ 晶体薄膜的 XRD 图. 薄膜的厚度为 400 nm. 由图 3 可知, In₂O₃ 薄膜为多晶薄膜, 主衍射峰位于 30.48°, 对应于 (222) 晶面取向. 这不同于 Wang 等^[10] 报道 Si (200) 基底上生长的 In₂O₃ 薄膜的晶体取向. 这是由于衬底材料和生长技术的差异引起的. 该 (222) 衍射峰的半峰宽仅为 0.27°. 这说明 In₂O₃ 晶体薄膜是沿 (111) 晶面择优取向生长的. 根据 Scherrer 公式^[11]

$$D = \frac{K\lambda}{B\cos\theta},$$

其中, D 为平均晶粒尺寸, K 为常数, 数值大小为 0.95—0.98, λ 为 X 射线的入射波长, B 为半峰宽, θ

图2 In_2O_3 晶体薄膜的表面形貌 AFM 图图3 In_2O_3 晶体薄膜的 XRD 图

为布拉格衍射角,估算出 In_2O_3 晶体薄膜的平均晶粒尺寸为 33 nm. 窄的半峰宽说明 In_2O_3 晶体薄膜的晶粒尺寸分布较均匀,这与 AFM 观察到的结果是一致的.

由于玻璃对紫外光有很强的吸收,不利于获得 In_2O_3 晶体薄膜的光学带隙等信息. 因此,我们在白宝石衬底上用相同的生长条件生长 In_2O_3 薄膜样品,进行透射率测试. 通过对透射谱分析可知, In_2O_3 晶体薄膜在可见光波段具有良好的透过率,平均透过率达到 90%. 同时, In_2O_3 晶体薄膜在紫外光区存在陡峭的吸收边. 为获得 In_2O_3 晶体薄膜的光学带隙,我们绘制 $(\alpha\hbar\omega)^2 \propto \hbar\omega$ 曲线,其中, α 为吸收系数, $\hbar\omega$ 为光子能量. 通过对 $(\alpha\hbar\omega)^2 \propto \hbar\omega$ 曲线的线

性部分外推到 $\alpha = 0$ 处,得到 In_2O_3 晶体薄膜的光学带隙数值为 $E_g = 3.68$ eV. Ar 气氛下室温生长的 In_2O_3 晶体薄膜的电学性质通过霍尔测试仪测量得到:电阻率为 $1.12 \Omega \cdot \text{cm}$,电子浓度为 $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,霍尔迁移率为 $9.6 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. 该迁移率比文献[10]报道的结果要低,可能的原因是国产的 In_2O_3 靶材的实际纯度达不到 99.99%,这是因为高纯 In_2O_3 粉末(99.99%)在压制、烧结成靶的工艺过程容易受到污染,因而薄膜中存在较多杂质散射中心. 另一方面,与氧气氛下 IAD 技术生长的 In_2O_3 相比,纯 Ar 气下生长的 In_2O_3 薄膜可能存在较高密度的氧空位缺陷. 这些因素降低了 In_2O_3 薄膜中载流子的迁移率.

3.2. In_2O_3 薄膜晶体管

通过对三种沟道长度的 In_2O_3 TFT 的电学性能进行测试,发现 25 μm 沟道长度的 TFT 具有较好的栅压调制特性和较高的场效应迁移率,因此只给出该沟道长度的 In_2O_3 TFT 的测试结果. 图 4 是 In_2O_3 TFT 的输出特性曲线. 由图 4 可知,该 TFT 在 0 V 栅压 ($V_{\text{GS}} = 0$) 时导通,而加负栅压时沟道层截断,并且正栅压越大源漏电流 (I_{D}) 也越大,说明 In_2O_3 TFT 工作于 n 型耗尽模式. 同时由图 4 可以看出, In_2O_3 TFT 具有较好的栅压调制特性和饱和特性.

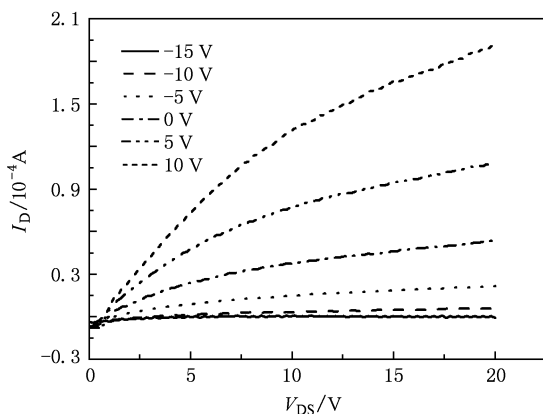
图4 In_2O_3 薄膜晶体管的输出特性曲线

图 5 是 In_2O_3 TFT 的非饱和区 (源漏电压 $V_{\text{DS}} = 3$ V) 和饱和区 ($V_{\text{DS}} = 18$ V) 的转移特性曲线. V_{GS} 测量范围从 -15 V 到 25 V. 开关电流比为 3×10^3 ,关态电流为 2.6×10^{-7} A. 较高的关态电流造成较低的开关电流比. 这与我们生长的 In_2O_3 晶体薄膜具有较高的载流子浓度有关. 饱和状态下沟道中载流子

场效应迁移率(μ_{EF})和阈值电压(V_{TH})的计算是通过线性拟合饱和区的 $\sqrt{I_{\text{DS}}} \propto V_{\text{GS}}$ 曲线,并根据饱和区的表达式^[2]

$$I_{\text{DS}} = \left(\frac{C_{\text{SiN}_x} \mu_{\text{EF}} W}{2L} \right) (V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}})^2,$$
$$V_{\text{DS}} > V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}},$$

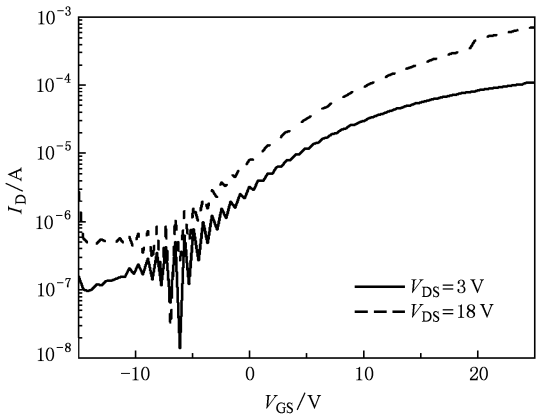


图5 In₂O₃ 薄膜晶体管的转移特性曲线

其中, W 是沟道宽度, L 是沟道长度, C_{SiN_x} 是 SiN_x 栅绝缘层的单位面积电容(约 $33 \text{ nF} \cdot \text{cm}^{-2}$),计算出 $\mu_{\text{EF}} = 6.3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, $V_{\text{TH}} = -0.9 \text{ V}$. 这些 TFT 的性能参数已经明显优于 $\alpha\text{-Si}$ TFT,也比国内研制的 ZnO TFT 的性能高得多^[3-5]. 但是这一结果与文献[10]报道的结果存在差距. 主要原因是文献[10]中

用作沟道层的 In_2O_3 薄膜载流子浓度仅为 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,远低于我们生长的 In_2O_3 薄膜的载流子浓度($2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). 低的载流子浓度说明薄膜中杂质散射中心少,有利于提高载流子的迁移率. 另外,有机物作为绝缘层虽然热稳定性方面还有待研究,但其绝缘性和电容率都优于传统的 SiO_2 和 SiN_x ,这些特点也有助于提高 TFT 的性能. 因此,通过与文献[10]报道的结果的比较和分析可知,要提高以磁控溅射法制备 In_2O_3 薄膜为沟道层的 TFT 的性能,还需开展更多的研究工作,如选择更高纯度的 In_2O_3 靶材和进一步优化生长条件来提高 In_2O_3 薄膜的表面平整度和降低载流子浓度等.

4. 结 论

利用磁控溅射方法在玻璃衬底上室温生长出(111)择优取向的 In_2O_3 晶体薄膜. 薄膜具有小的表面粗糙度(均方根粗糙度为 2.4 nm)和高的结晶质量((222)衍射峰的半高全宽为 0.27°). 利用 In_2O_3 晶体薄膜作为沟道层, SiN_x 作为栅绝缘层,成功制作出具有良好栅压调制特性的 TFT. In_2O_3 TFT 的场效应迁移率达到 $6.3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 阈值电压为 -0.9 V ,开关电流比为 3×10^3 . 这些结果已经优于 $\alpha\text{-Si}$ TFT 的性能参数,而且也优于类似工艺条件下制备的 ZnO TFT 器件的性能参数.

[1] Son K S, Kim T S, Jung J S, Ryu M K, Park K B, Yoo B W, Park K C, Kwon J Y, Lee S Y, Kim J M 2009 *Electrochemical and Solid-State Lett.* **12** H26

[2] Nomura K, Ohta H, Takagi A, Kamiya T, Hirano M, Hosono H 2004 *Nature* **432** 488

[3] Wu H Z, Liang J, Jin G F, Lao Y F, Xu T N 2007 *IEEE Trans. Electron Devices* **54** 2856

[4] Zhu X M, Wu H Z, Wang S J, Zhang Y Y, Cai C F, Si J X, Yuan Z J, Du X Y, Dong S R 2009 *J. Semicond.* **30** 033001

[5] Zhang X A, Zhang J W, Zhang W F, Wang D, Bi Z, Bian X M, Hou X 2008 *Thin Solid Films* **516** 3305

[6] Presley R E, Munsee C L, Park C H, Hong D, Wager J F, Keszler D A 2004 *J. Phys. D* **37** 2810

[7] Chiang H Q, Wager J F, Hoffman R L, Jeong J, Keszler D A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 013503

[8] Zhang J Y, Deng T S, Shen X, Zhu K T, Zhang Q F, Wu J L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4156 (in Chinese) [张俊艳、邓天松、沈 昕、朱孔涛、张琦锋、吴锦雷 2009 物理学报 **58** 4156]

[9] Suresh A, Wellenius P, Dhawan A, Muth J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 123512

[10] Wang L, Yoon M H, Lu G, Yang Y, Facchetti A, Marks T J 2006 *Nature Mater.* **5** 893

[11] Wang K, Vygranenko Y, Chaji R, Nathan A 2009 *J. Vac. Sci. Technol. B* **27** 612

[12] Lavareda G, Carvalho C N, Fortunato E, Ramos A R, Alves E, Conde O, Amaral A 2006 *J. Non-Cryst. Solids* **352** 2311

[13] Vygranenko Y, Wang K, Nathan A 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 263508

[14] Kim C S, Jo S J, Lee S W, Kim J W, Baik H K, Lee S J, Hwang D K, Im S 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 243515

Fabrication and performance of indium oxide based transparent thin film transistors^{*}

Xu Tian-Ning¹⁾²⁾ Wu Hui-Zhen^{1)†} Zhang Ying-Ying¹⁾
Wang Xiong¹⁾ Zhu Xia-Ming¹⁾ Yuan Zi-Jian¹⁾

1) (State Key Laboratory for Modern Optical Instruments, Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

2) (Department of Science, Zhijiang College of Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024, China)

(Received 24 July 2009; revised manuscript received 12 November 2009)

Abstract

Indium oxide thin film was deposited on glass substrate by radio frequency magnetron sputtering at room temperature. The In_2O_3 film was polycrystalline with a preferred (111) orientation and a grain size of 33 nm was estimated. The bottom-gate staggered thin film transistors (TFTs) were fabricated by standard photolithography, with In_2O_3 as active channel layers. The In_2O_3 TFTs exhibit good gate bias controlling characteristic with a field effect mobility of $6.3 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, an on-off current ratio of 3×10^3 , and a threshold voltage of -0.9 V . Device performance and room temperature fabrication technology make In_2O_3 TFTs promising for display panel applications.

Keywords: indium oxide film, magnetron sputtering, thin-film transistors, field effect mobility

PACC: 7360, 7360F, 7360L

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60676003) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. Z406092).

[†] Corresponding author. E-mail: hzwu@zju.edu.cn