

文章编号: 1007-2780(2013)03-0315-08

ZnO 基薄膜晶体管有源层制备技术的研究进展

苏 晶, 刘玉荣*, 莫昌文, 简 平, 李晓明

(华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510640, E-mail: sujing0928@163.com)

摘 要: 氧化锌基薄膜晶体管(ZnO-TFT)器件的性能受到多种因素的影响,如半导体有源层、栅介质层的质量、栅介质与有源层的界面质量,其中有源层的质量起到至关重要的作用,而在影响器件有源层方面,制备方法是其中一个重要的因素。目前,已有多种 ZnO 半导体有源层制备技术应用于 ZnO-TFT 的制备(如原子层沉积、脉冲激光沉积、射频磁控溅射、溶液法等)。为了更直观地了解各种制备技术所获得的 ZnO-TFT 器件性能的优劣,并让研究者在选择制备技术时有所参考,文章概述了各种有源层制备技术的特点,并比较了这些制备方法所制备的 ZnO-TFT 器件性能。通过对比各器件性能参数可以发现,脉冲激光沉积和射频磁控溅射所制备的 ZnO 有源层具有较优的性质,并被广泛使用。文章还对 ZnO-TFT 的优化方法做了简单介绍。

关 键 词: 氧化锌; 薄膜晶体管; 有源层; 制备方法

中图分类号: TN321⁺.5

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20132803.0315

Research Development on Preparation Technologies of Active Layer Preparation of ZnO-Based Thin Film

SU Jing, LIU Yu-rong*, MO Chang-wen, JIAN Ping, LI Xiao-ming

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology,

Guangzhou 510640, China, E-mail: sujing0928@163.com)

Abstract: The performances of zinc oxide based thin film transistor(ZnO-TFT) are effected by many factors, such as the qualities of semiconductor active layer and dielectric, and the interface characteristics between active layer and dielectric. Among these factors, the quality of semiconductor active layer is the key factor. However, in the case of active layer, the fabrication method is an important factor. Nowadays, lots of fabrication methods are used to fabricate the active layer of ZnO-TFT, such as atomic layer deposition, pulsed laser deposition, radio frequency magnetron sputtering and solution-processed. In order to intuitively understand the performances of ZnO-TFT by different fabrication methods, and offer the reference for researchers in choosing fabrication methods, the characteristics of these methods are reviewed systematically, and the performances of their corresponding ZnO-TFT are discussed. Through comparing the performance parameters of devices, it can be found that pulsed laser deposition and radio frequency magnetron sputtering can make the performances of ZnO active layer better. The optimization methods of ZnO-TFTs are simply described.

Key words: zinc oxide; thin film transistor; active layer; fabrication methods

收稿日期: 2013-01-25; 修订日期: 2013-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 61076113)

作者简介: 苏晶(1988—), 女, 福建建瓯人, 硕士研究生, 主要从事半导体器件的研究。

* 通信联系人, E-mail: phlyr@scut.edu.cn

1 引 言

从 1962 年 P. K. Weimer 发明 CdS 薄膜晶体管(TFT)至今,非晶硅薄膜晶体管(a-Si TFT)的大规模产业化已有 50 年历史^[1],TFT 技术已经取得了长足的进展,成为平板显示行业的核心部件^[2]。目前用于有源矩阵液晶显示(AMLCD)、有源矩阵有机发光二极管(AMOLED)较为成熟的 TFT 技术主要有非晶硅薄膜晶体管(a-Si TFT)和多晶硅薄膜晶体管(p-Si TFT)。a-Si TFT 由于工艺温度低、性能稳定和生产成本低而获得大规模的应用,但 a-Si TFT 仍然存在迁移率(μ)低和易产生光生载流子等不足^[3]。p-Si TFT 虽具有 μ 高、抗干扰能力强、容易实现高度集成化等优点,但 p-Si 大面积制作工艺复杂、低温工艺难以实现,从而限制了在大面积平板显示领域的广泛应用^[4]。有机薄膜晶体管(OTFT)具有加工温度低、低成本、重量轻、可折叠、不易破碎等特点,使得对它的研究也日益活跃;但是,目前报道的 OTFT 的 μ 较低(一般小于 $1.0 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$),仍停留在 a-Si TFT 水平,另外其致命缺点是 OTFT 的寿命低且不耐高温,并存在严重的老化问题^[5],这些都限制了其应用范围。

近些年,以 ZnO-TFT 为代表的氧化物薄膜晶体管受到了广泛的关注,已成为薄膜晶体管领域的研究热点。这是因为,ZnO 具有多种优良的性质。ZnO 是直接宽带隙半导体化合物、具有高的激子束缚能,而且原料来源丰富、价格低廉、无毒无污染、抗辐射能力强^[6]、制造工艺简单、对可见光不敏感等优点。此外,ZnO 因具有优良的光电特性,在太阳能电池、光电探测器、集成芯片、二极管等领域显示出广阔的应用前景^[7]。

ZnO-TFT 的性能会受到清洗工艺、实验条件、制备技术等因素的影响,而制备技术又是其中一个重要因素。就目前而言,关于制备技术对 ZnO-TFT 性能的影响的报到还非常少,本文总结了各种制备技术的优缺点,并对所制备的 ZnO-TFT 器件性能进行了比较,这将成为研究 ZnO-TFT 甚至其他半导体器件的工作人员一个有利的参考。

2 ZnO 基薄膜晶体管的基本性质

2.1 ZnO 晶体的结构及薄膜特性

ZnO 是一种新型 II-VI 族宽禁带直接带隙化

合物半导体材料^[8],在常温常压下的稳定相是纤锌矿结构,属于六角晶系。优质的 ZnO 薄膜由具有 c 轴择优取向的晶粒组成,每个晶粒都具有纤锌矿结构。ZnO 的这种晶体结构特性,使得它适合于采用定向外延薄膜生长技术获得高质量的 ZnO 薄膜^[9-10]。图 1 是典型的 ZnO 薄膜的 XRD 图谱^[11]。

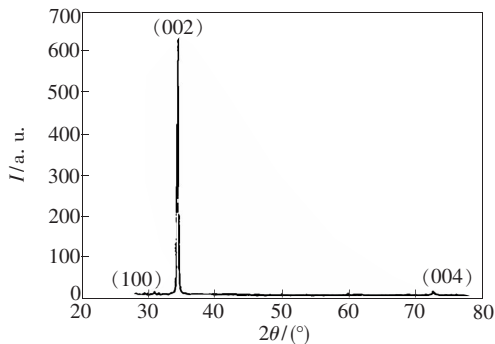


图 1 ZnO 薄膜的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD spectra of ZnO thin film

2.2 ZnO-TFT 的光学和电学性质

宽带隙 ZnO 薄膜对可见光是完全透明的,然而对于实际的 ZnO-TFT 器件而言,其可见光透过率往往与制备工艺相关。E. Fortunato 等人^[12]用射频磁控溅射(RF)的方法在 $\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{Glass}$ 衬底上制备了 ZnO-TFT,并对器件在可见光范围内的透过率进行了测试,透射光谱如图 2 所示。由图 2 中可知,所制备的 TFT 在可见光范围内是透明的,透过率大于 80%,其他文献中也多有报道^[13-14]。因此在 ZnO-TFT 显示面板制备中不需要增加不透明金属掩模板(黑矩阵)来阻挡光线对 TFT 的照射,使得 TFT-LCD 和 TFT-OLED 的工艺更加简单,从而有利于降低制作成本^[3]。

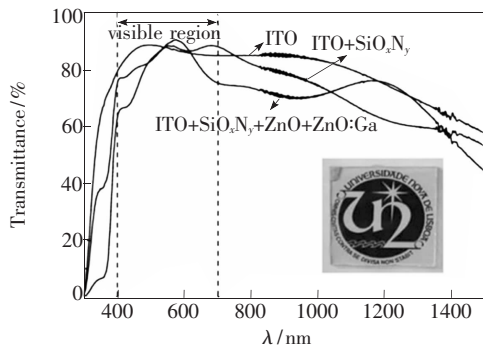


图 2 在 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 玻璃衬底上整个 ZnO-TFT 的透过率
Fig. 2 Optical transmission spectra for the entire ZnO-TFT structure in the $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ glass substrate

ZnO-TFT 的工作原理与 MOSFET 相似,图 3(a)和(b)是我们课题组用 RF 方法在常温下制备的 ZnO-TFT 典型的转移和输出曲线。从图 3(a)可以看出,该器件为 N 沟道增强型,漏极电流 (I_d)随栅压 V_G 的变化较显著,表明 ZnO 沟道层中的电子被栅压有效控制。从输出曲线图 3(b)可知,ZnO-TFT 器件呈现出良好的夹断和饱和特性。

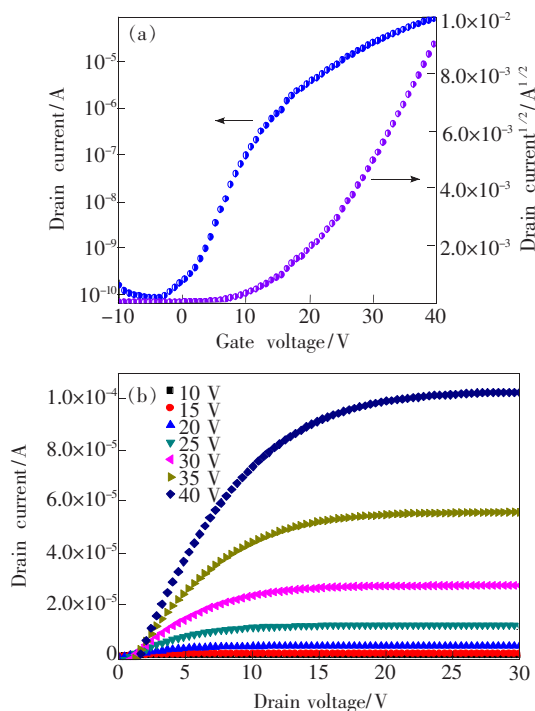


图 3 ZnO-TFT 的(a)转移和(b)输出曲线

Fig. 3 (a) transfer and (b) output characteristics of ZnO-TFT

现在,ZnO-TFT 的性能越来越好,Burhan Bayraktaroglu 等人^[15]以脉冲激光沉积(PLD)方法制备的 ZnO-TFT 器件的 μ 高达 $110 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,并且其亚阈值摆幅(SS)只有 $0.19 \text{ V}/\text{dec}$,开关电流比(ON/OFF)达 10^{12} ;而 M. M. De Souza 等人^[16]以 $\text{SiO}_2/\text{SiN}/\text{AlN}$ 堆垛结构为栅绝缘层,其 μ 也达到了 $110 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。所呈现出的高的 μ 和 ON/OFF,低的 SS,可望实现高速度和低功耗。

3 有源层制备方法及 TFT 特性的比较

通常,ZnO-TFT 器件的性能受多种因素的影响,如半导体有源层的特性、栅介质层的质量、栅介质与有源层的界面质量以及源漏电极接触特

性等,其中有源层的质量具有至关重要的作用。目前,ZnO 半导体有源层的制备方法众多,不同方法生长的 ZnO 薄膜以及所对应的 ZnO-TFT 的器件性能也各不相同。以下对 ZnO-TFT 中有源层的主要制备方法及其对应的器件特性加以概括。

3.1 原子层沉积

原子层沉积(ALD)法是一种可以将物质以单原子膜形式一层一层地沉积在基底表面的方法。此方法能精确地控制薄膜的厚度;另外,该方法具有大面积上的一致性、制备过程简单、成本低,且可在低温下制备出高质量的薄膜,因此可以采用柔性塑料作衬底,制作出大面积的柔性电子器件。然而,通过 ALD 生长的 ZnO 薄膜存在很高的载流子浓度,这将导致器件关态电流(I_{off})过大,从而限制其实际应用。

Byeong-Yun Oh 等人^[17]用 ALD 方法在 p-Si 衬底上制备了 100 nm 的 Al_2O_3 作为栅绝缘层和 50 nm 的 ZnO 作为有源层。经对比发现,基底温度为 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 时制备的器件综合性能较优,饱和迁移率(μ_{sat})为 $11.86 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,ON/OFF 为 3.09×10^7 , I_{off} 为 10^{-10} A ,SS 为 $0.72 \text{ V}/\text{dec}$, 阈值电压(V_{TH})约为 9 V ,在可见光范围内透过率约为 88.5% 。

为了克服 ALD 制备 ZnO 薄膜具有高载流子浓度的缺点,Devin A. Mourey^[18]等人用离子增强原子层沉积(PEALD)方法进行了优化。在 Glass 衬底上,用 PEALD 方法先后制备 30 nm 的 Al_2O_3 栅绝缘层和 30 nm 的 ZnO 有源层,用湿法刻蚀法进行刻蚀。用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和酚醛树脂(Novolak)作为保护层,并进行背部曝光。所得到 TFT 器件线性区有效迁移率(μ_{eff})约为 $16 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, μ_{sat} 达 $20 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, V_{TH} 为 6 V ,SS 为 $140 \text{ mV}/\text{dec}$,ON/OFF $> 10^9$, I_{off} 低于 10^{-12} A 。

3.2 激光分子束外延

激光分子束外延(L-MBE)法结合了分子束外延和脉冲激光沉积这两种生长方法的优势,是一种先进的外延薄膜制备技术。采用该技术已能制备出薄到几十个原子层的 ZnO 薄膜。该方法的特点是膜层生长速率低,束流强度易于精确控制,膜层组分和掺杂浓度可随源的变化而迅速调整。但是 L-MBE 所需要的背底真空度较高,通

常大于 10^{-6} Pa, 设备成本高, 不利于大面积推广。此外, 制备 ZnO 薄膜时, 基片的温度较高, 通常大于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 不能在柔性塑料衬底上制备 TFT 器件, 因此也就不利于制备柔性显示器。

张新安等人^[19]在 SiN_x/Si 衬底上采用 L-MBE 技术在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的基底温度下生长 100 nm 的 ZnO 薄膜作为有源层, 经高纯氧 0.5 h 的 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火处理后的 ZnO 薄膜具有更高的结晶质量, 获得了 μ 为 $1.05\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 的 N 沟道增强型 ZnO-TFT 器件, 但其 V_{TH} 较高为 17.5 V 。目前, 采用该方法制备 ZnO-TFT 的报道较少, 且器件性能相对较差。

3.3 金属有机化学气相沉积

金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 法是一种利用金属有机化合物作为源物质的一种化学气相沉积工艺。该方法一般使用二甲基锌 (DMZ) 或者二乙基锌 (DEZ) 作为 ZnO 薄膜中 Zn 的来源, 使用 O_2 、 N_2O 、 CO_2 以及醇类作为 O 源。这种方法制备的 ZnO 有源层组成、膜厚的可控性及均匀性都很好, 可以实现大面积上的一致性, 尤其适合工业上的批量生产。但该方法不容易获得源物质, 而且通常有毒性, 设备和维护费用也较高。

K. Remashan 等人^[20]研究了不同化学计量比的 SiN 栅绝缘层对 ZnO-TFT 的影响。用 PECVD 生长了近化学计量比 (Nr-stoic) 和富 N (N-rich) 的 SiN, 并用 MOCVD 法生长了 110 nm 的 ZnO 作为有源层, 发现 Nr-stoic SiN 的 TFT 器件较 N-rich SiN 的 TFT 器件具有更好的性质: $\mu_{\text{Nr}} = 3.6\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $\text{SS}_{\text{Nr}} = 0.48\text{ V}/\text{dec}$; $\mu_{\text{N}} = 0.5\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $\text{SS}_{\text{N}} = 0.7\text{ V}/\text{dec}$ 。之后, 分别在这两种化学计量比的 SiN 上生长了 SiO_2 和 Mg-ZnO 薄膜, 发现器件的 μ 都有明显的增加, 而在 $\text{SiO}_2/\text{Nr-stoic SiN}$ 制得的 ZnO-TFT 器件的 μ 高达 $23.9\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。

3.4 脉冲激光沉积

脉冲激光沉积 (PLD) 法是一种利用激光对物体进行轰击, 然后将轰击出来的物质沉淀在不同的衬底上, 得到沉淀或者薄膜的一种方法。该方法具有成膜装置简单灵活, 易于再现靶材成分, 成膜所需衬底温度低、生长效率高、沉积过程原子浓度保持稳定等优点。但蒸发 ZnO 陶瓷靶材会使 ZnO 微量分解, 从而导致在衬底上的 ZnO 薄膜会

有较多的氧空位, 因此在生长室中通常需通入适量的氧气。并且由于气态原子和微粒的存在, 会使薄膜的质量降低。

T. Yoshida 等人^[21]采用 PLD 方法在 $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 $\text{SiO}_2/\text{Glass}$ 衬底上制备了 50 nm 和 100 nm 厚的 ZnO 有源层, 并用光刻和湿法化学法进行刻蚀。从 XRD 谱图中可知, 两种厚度的 ZnO 薄膜都呈现出高的结晶质量, 但两者的电特性存在较大差异。 50 nm 厚的 ZnO 对应的 ZnO-TFT 具有 $36.8\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 的 μ , 1.30×10^6 的 ON/OFF, -3.90 V 的 V_{TH} , $0.3\text{ V}/\text{dec}$ 的 SS 及 $5.4\text{ ms}/\text{mm}$ 的跨导 (g_m); 但是 100 nm 厚的 ZnO 对应的 ZnO-TFT 器件却不能很好地关断, 被认为是由于 ZnO 薄膜太厚的缘故。

此外, Burhan Bayraktaroglu 等人^[15], 以 n-Si 为衬底, SiO_2 为栅绝缘层, 采用 PLD 方法制备出的 ZnO-TFT 的 μ 达 $110\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, ON/OFF 高达 10^{12} , I_{off} 小至 10^{-14} A , SS 仅 $0.19\text{ V}/\text{dec}$ 。可见, 采用 PLD 方法可以在低温甚至室温条件下制备出高性能的 ZnO-TFT 器件, 具有很好地应用前景。

3.5 溶液法

溶液法 (Solution-processed) 用于制备 ZnO 有源层主要包括溶胶-凝胶法 (Sol-gel) 和旋涂法 (Spin-coated)。由于 ZnO 是不溶无机物, 因此制备 ZnO 有源层时多使用可溶的前驱物, 如可溶解的金属卤化物、硝酸盐类、纳米颗粒等, 多使用 $2\text{H}_2\text{O}$ 硝酸锌化合物 ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)^[22]。溶液法制备的 ZnO 薄膜均匀性好, 与衬底附着力强, 易于原子级掺杂, 无需真空设备, 工艺简单, 制备成本低。但就目前而言, 这种方法所制备的 ZnO-TFT 性能普遍都不是很好, Sol-gel 法所制备的 ZnO-TFT 器件 μ 通常小于 $1\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 而 Spin-coated 所制备 ZnO-TFT 器件的 μ 最高也只能达到 $4\sim 6\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。

Chen Sha Li 等人^[14]在 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 基底上用滴涂法 (Drop-coated) 和旋涂法 (Spin-coated) 制备了 ZnO-TFT, 并在 $490\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下炉式退火, 发现采用 Drop-coated 所制备的 ZnO 晶粒较 Spin-coated 大些, 薄膜也厚些。通过分析计算得到 Drop-coated 和 Spin-coated 法所制备的 ZnO-TFT 的 μ_{sat} 分别为 $4.9\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 和 $5.2\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; ON/OFF 分别为 3.6×10^5 和 6.7×10^5 。前者的线性迁移率

(μ_{lin})约为 $3.0 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, V_{TH} 约为 2 V , 但后者的 μ_{lin} 约为 $1.6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 降低的幅度较为明显, 而 V_{TH} 大于 20 V 。此外, Drop-coated 法制备的 ZnO-TFT 的 μ 经几十次测试就变差了, 而 Spin-coated 法制备的 ZnO-TFT 的 μ 经 100 次测试还仍然保持为常数。因此, 要获得高性能的 ZnO-TFT 器件, 这种廉价、简单的制备 ZnO 薄膜技术还有待进一步提高。

3.6 射频磁控溅射法

射频磁控溅射法(RF)法是利用 Ar 离子对靶材进行轰击, 在衬底上成膜的一种方法。这种方

法所制备的 ZnO 薄膜对衬底有较好的附着性, 制备温度低, 可在柔性塑料衬底上制备, 有利于制备柔性显示器。RF 制备的 ZnO 薄膜可以在较大面积上获得均匀的厚度, 且容易实现对成分的精确控制。但是溅射生长的 ZnO 薄膜内部具有较大的应力、晶粒尺寸也比较小, 对应的晶界缺陷密度较大, 这些特征都将影响 ZnO 薄膜的光学、电学特性, 如光致发光强度、发光的量子效率、电流电压响应等。在众多的方法中, 目前报道的最多, 且不需要过多的优化就能获得较好特性的 TFT 器件应该就属于磁控溅射了。

表 1 用不同制备方法制备的 ZnO-TFT 的主要性能参数

Table 1 Main characteristics of ZnO-TFT by different fabrication methods

方法	衬底	绝缘层	栅	源/漏	(宽/长)/ μm	迁移率/ $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	阈值电 压/V	亚阈值摆幅/ $(\text{V} \cdot \text{dec}^{-1})$	开关电/ 流比	关态电 流/A	文献
ALD	n-Si	HfO ₂	n-Si	Ti/Au	200/20	12.2	2.6	0.5	10^7	10^{-10}	[23]
ALD	n-Si	Al ₂ O ₃	n-Si	Ti/Au	170/100	17.6	6.0	2.5	10^4	10^{-10}	[23]
ALD	p-Si	Al ₂ O ₃	p-Si	Ti/Au	2 000/300	11.86	~9.0	0.72	3.09×10^7	10^{-10}	[17]
PEALD	Glass	Al ₂ O ₃	Cr	Ti	205/12	~20	~6	0.14	10^9	10^{-12}	[18]
ALD	Si	Al ₂ O ₃	ITO	ZnO:Al	—	1.13	0.8	1.65	10^6	10^{-10}	[24]
ALD	n-Si	SiO ₂	n-Si	Ti/Au	400/100	1.912	7.55	0.68	4.7×10^5	10^{-11}	[25]
L-MBE	n-Si	SiN _x	In	Al	1 000/200	1.05	11.7	—	—	—	[19]
MOCVD	Glass	SiO ₂ /SiN	ITO	Ti/Pt/Au	200/20	23.9	-5.0	1.0	3×10^7	~ 10^{-11}	[20]
MOCVD	Glass	MgZnO/SiN	ITO	Ti/Pt/Au	200/20	10.1	-1.5	0.3	2.3×10^8	~ 10^{-11}	[20]
MOCVD	n-Si	SiN	—	—	500/15	18.0	~5.0	0.5	10^7	10^{-10}	[26]
MOCVD	Glass	Si ₃ N ₄	ITO	Ti/Pt/Au	200/20	6.5	2.05	0.8	10^8	10^{-12}	[27]
MOCVD	Glass	MgZnO/Si ₃ N ₄	ITO	Ti/Pt/Au	200/20	2.3	-6.75	0.78	6.4×10^7	~ 10^{-12}	[28]
PLD	n-Si	SiN _x	n-Si	Al	40/40	12.85	8.0	—	10^6	~ 10^{-11}	[13]
PLD	n-Si	SiO ₂	Ti	Ti/Au	25/2	110.0	—	0.19	10^{12}	~ 10^{-14}	[15]
PLD	TiO ₂ /SiO ₂ / PEN	HfO ₂	Ti/Au	Ti/Au	—	52.4	-1.2	0.2	2.4×10^6	~ 10^{-7}	[29]
PLD	Si	HfO ₂	—	Ti/Al/Au	—	8.8	1.5	0.144	6×10^9	10^{-13}	[30]
Spin-coated	Glass	ATO	ITO	—	1 000/90	5.2	23.0	1.0	6.7×10^5	~ 10^{-8}	[14]
Drop-coated	Glass	ATO	ITO	—	1 000/90	4.9	5.0	1.0	3.6×10^5	~ 10^{-8}	[14]
Sol-gel	Glass	ATO	ITO	—	1 000/90	5-6	20.0	6.5	10^5 - 10^6	~ 10^{-8}	[31]
RF	Glass	SiO _x N _y	ITO	ZnO:Ga	200/40	70.0	1.8	0.68	5×10^5	~ 10^{-9}	[12]
RF	Glass	Ta ₂ O ₅	ITO	Al	2 000/50	60.4	1.1	0.23	1.22×10^7	~ 10^{-10}	[23]
RF	Glass	SiO ₂	ITO	Al	4 000/80	28.8	2.0	0.084	3×10^6	~ 10^{-10}	[32]
RF	Glass	STS*	ITO	Al	2 000/35	52.4	2.0	0.28	4.1×10^6	~ 10^{-9}	[33]
RF	Glass	SiO ₂	ITO	Al	2 000/50	11.2	4.2	0.61	3.1×10^6	3×10^{-10}	[34]

*注:STS指 SiO₂/Ta₂O₅/SiO₂

L. Zhang 等人^[35]用 RF 方法在 Glass 衬底上分别溅射了 100 nm 的 Ta₂O₅ 作为栅绝缘层, 25 nm 的 ZnO 作为有源层, 所制得 ZnO-TFT 的 ON/OFF 为 1.22×10^7 , SS 为 0.23 V/dec, V_{TH} 为 1.1 V, 载流子的 μ_{eff} 高达 $60.4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。当考虑到该器件的几何结构并忽略边缘电场效应后, 也得到了 $40.5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 的 μ 。

为了更加直观地了解以上方法制备的 ZnO-TFT 的性能差异, 表 1 给出了采用以上制备方法制得的未掺杂 ZnO-TFT 器件的主要性能参数。

由表 1 可知, 从器件的 μ 方面看, PLD 和 RF 的 μ 普遍较高(通常大于 $10 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, PLD 甚至做到了 $110 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$), 其次为 ALD 和 MOCVD, 而 Solution-processed 的 μ 则较低; 从 V_{TH} 来看, RF 的 V_{TH} 大部分可控制在 2 V 以内, 而 Solution-processed 的 V_{TH} 在这方面仍然不是很好; 从 SS 来看, 大部分方法所制备的器件都较低, 其中 MOCVD、PLD 及 RF 控制得更低, RF 甚至做到了 84 mV/dec; 对于 ON/OFF, 每种方法可以能做到 5 个量级以上。在现今的制备方法中, PLD 和 RF 所制备出的 ZnO-TFT 器件的整体性能相对最优, 成为制备 ZnO-TFT 最主要的两种方法。但近些年来, 对于 Solution-processed 方法的研究也越来越多, 虽然它所制备 ZnO-TFT 的性质还不算特别好, 但是其价格低廉、方法简

单也是吸引人之处, 随着技术的不断进步, 所制备的器件性能也将会越来越好。

由上面分析可知, 在制备 TFT 的过程中, 也许不仅要用到一种制备技术, 需要多种方法结合使用, 才能在低成本、低功耗的前提下制备出高性能的 TFT 器件。除了使用不同的制备方法外, 还可以从栅绝缘层、有源层等方面进行优化和改进, 如栅介质使用高-k 材料, 如 SiO_xN_y^[12]、Al₂O₃^[24]、Si₃N₄^[27]、HfO₂^[30]、Ta₂O₅^[35] 来降低栅绝缘层的物理厚度, 从而降低阈值电压; 对有源层进行掺杂, 如 In-Zn-O^[36]、In-Ga-Zn-O^[37]、Ga-Sn-Zn-O^[38] 等, 大部分有源层掺杂后在相同的条件下可获得更好的性质; 此外, 退火^[39-41]、增加缓冲层^[20, 28, 42] 等也能提高 TFT 的性能。

4 结 论

对不同制备技术的优缺点进行了概括总结, 并比较了所制备的 ZnO-TFT 器件的各种参数, 发现普遍用得最多的制备技术当属 PLD 和 RF, 并且所得到的 ZnO-TFT 的光学和电学性质都较优。同时, 其他方法如 ALD、MBE、MOCVD、Solution-processed 等方法各自有其吸引人之处。在制备过程中, 也许需要多种制备技术配合使用, 并对有源层、栅绝缘层及后续工艺进行优化, 才能制备出高性能的 ZnO-TFT。

参 考 文 献:

- [1] 张斌, 矫士博, 刘武君, 等. 氧化物 TFT 最新研究进展 [J]. 材料导报网刊, 2011, 6(2): 5-9.
- [2] Cheri R K, Paul A, 编. 薄膜晶体管(TFT)及其在平板显示中的应用 [M]. 廖燕平, 王军, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 1-2.
- [3] 程松华, 曾祥斌. ZnO 基薄膜晶体管的研究 [J]. 液晶与显示, 2006, 21(5): 515-520.
- [4] 许洪华, 陈跃宁, 袁广才. 基于 ZnO 活性层薄膜晶体管的研究进展 [J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2007, 25(1): 34-36.
- [5] 张新安, 张景文, 张伟风, 等. 氧化物半导体薄膜晶体管的研究进展 [J]. 现代显示, 2009, 20(4): 28-33.
- [6] 吴为敬, 颜骏, 许志平, 赖志成. IGZO TFT 与 ZnO TFT 的性能比较 [J]. 液晶与显示, 2011, 26(2): 147-153.
- [7] Hong W K, Song S, Hwang D K, *et al.* Effects of surface roughness on the electrical characteristics of ZnO nanowire field effect transistors [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, 254(23): 7559-7564.
- [8] Nomura K, Ohta H, Ueda K, *et al.* Thin-film transistor fabricated in single-crystalline transparent oxide semiconductor [J]. *Sci. China*, 2003, 300(5623): 1269-1272.
- [9] 余旭浒, 马瑾, 计峰, 等. 射频磁控溅射制备 ZnO:Ga 透明导电膜及特性 [J]. 半导体学报, 2005, 26(2): 314-318.
- [10] 杨邦朝, 王文生. 薄膜物理与技术 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1994: 78.
- [11] 马仙梅, 荆海, 马凯, 等. ZnO 薄膜及 ZnO-TFT 的性能研究 [J]. 液晶与显示, 2009, 24(3): 393-395.
- [12] Fortunato E, Pimentel A, Pereira L, *et al.* High field-effect mobility zinc oxide thin film transistors produced at room

- temperature [C]//*20th International Conference on Amorphous and Microcrystalline Semiconductors*, Campos Do Jordao, Brazil; Elsevier Science, 2004;806-809.
- [13] Shin P K, Aya Y, Ikegami T, *et al.* Application of pulsed laser deposited zinc oxide films to thin film transistor device [J]. *Thin Solid Films*, 2008,516(12):3767-3771.
- [14] Li C S, Li Y N, Wu Y L, *et al.* Performance improvement for solution-processed high-mobility ZnO thin-film transistors [J]. *J. Phys.*, 2008,41(12):125102(1-6).
- [15] Bayraktaroglu B, Leedy K, Neidhard R, *et al.* Microwave ZnO thin-film transistors [J]. *IEEE Electr. Dev. Lett.*, 2008,29(9):1024-1026.
- [16] De Souza M M, Jejurikar S, Adhi K P. Impact of aluminum nitride as an insulator on the performance of zinc oxide thin film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008,92(9):093509(1-3).
- [17] Oh B Y, Kim Y H, Lee H J, *et al.* High-performance ZnO thin-film transistor fabricated by atomic layer deposition [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2011,26(8):085007(1-5).
- [18] Mourey D A, Zhao D A, Jackson T N. Self-aligned-gate PEALD ZnO TFT circuits [C]//*2009 Device Research Conference*, USA; IEEE, 2009;187-188.
- [19] 张新安, 张景文, 杨晓东, 等. L-MBE法制备以 ZnO 为沟道层的薄膜晶体管 [J]. *半导体学报*, 2006,27(6):1051-1054.
- [20] Remashan K, Choi Y S, Park S J, *et al.* Impact of near-stoichiometric silicon nitride gate insulator on the performance of MOCVD-grown ZnO thin-film transistors [J]. *J. Solid State Sci. Technol.*, 2012,1(4):Q70-Q78.
- [21] Yoshida T, Tachibana T, Maemoto T, *et al.* Pulsed laser deposition of ZnO grown on glass substrates for realizing high-performance thin-film transistors [J]. *Appl. Phys. A*, 2010,101(4):685-688.
- [22] Wang X Y, Dong G F, Qiao J, *et al.* Preparation and field-effect property of solution-processed multilayer zinc oxide [J]. *Acta Phys. Chim. Sin.*, 2010,26(1):249-252.
- [23] Carcia P F, Mclean R S, Reily M H. High-performance ZnO thin-film transistors on gate dielectrics grown by atomic layer deposition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006,88(12):123509(1-3).
- [24] Park S H K, Hwang C S, Jeong H Y, *et al.* Transparent ZnO-TFT arrays fabricated by atomic layer deposition [J]. *Electrochem. Solid-State Lett.*, 2008,11(1):H10-H14.
- [25] Bang S, Lee S, Park J, *et al.* Investigation of the effects of interface carrier concentration on ZnO thin film transistors fabricated by atomic layer deposition [J]. *J. Phys. D:Appl. Phys.*, 2009,42(23):235102(1-6).
- [26] Jo J, Choi H, Yun J, *et al.* Improvement of on/off ratio in ZnO thin-film transistor by using growth interruptions during metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Thin Solid Films*, 2009,517(23):6337-6340.
- [27] Remashan K, Choi Y S, Park S J, *et al.* Enhanced performance of MOCVD ZnO TFTs on glass substrates with nitrogen-rich silicon nitride gate dielectric [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2010,157(1):H60-H64.
- [28] Remashan K, Choi Y S, Park S J, *et al.* High performance MOCVD-grown ZnO thin-film transistor with a thin MgZnO layer at channel/gate insulator interface [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2010,157(12):H1121-H1126.
- [29] Higaki T, Tachibana T, Kimura Y, *et al.* Flexible zinc oxide thin-film transistors using oxide buffer layers on polyethylene naphthalate substrates [C]//*2011 International Meeting for Future of Electron Devices*, Kansai, Japan; IEEE, 2011:92-93.
- [30] Siddiqui J J, Phillips J D, Leedy K, *et al.* Bias temperature stress analysis of ZnO thin film transistors with HfO₂ gate dielectrics [C]//*2011 69th Annual Device Research Conference*, USA; IEEE, 2011:75-76.
- [31] Li C, Li Y, Wu Y, *et al.* Fabrication conditions for solution-processed high-mobility ZnO thin-film transistors [J]. *J. Mater. Chem.*, 2009,19(11):1626-1634.
- [32] Hu Y, Lu A X, Wang L P, *et al.* Low-voltage ZnO thin-film transistors operating at 2.0 V gated with mesoporous SiO₂ dielectric processed at room-temperature [J]. *Physica E*, 2009,42(2):154-157.
- [33] Zhang L, Li J, Zhang X W, *et al.* Glass-substrate-based high-performance ZnO-TFT by using a Ta₂O₅ insulator modified by thin SiO₂ films [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2010,207(8):1815-1819.
- [34] Zhang L, Li J, Zhang X W, *et al.* Low-voltage-drive and high output current ZnO thin-film transistors with sputtering SiO₂ as gate insulator [J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2010,10(5):1306-1308.

- [35] Zhang L, Li J, Zhang X W, *et al.* High performance ZnO-thin-film transistor with Ta₂O₅ dielectrics fabricated at room temperature [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(7):072112(1-3).
- [36] Barquinha P, Pimentel A, Marques A, *et al.* Effect of UV and visible light radiation on the electrical performances of transparent TFTs based on amorphous indium zinc oxide [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2006, 352 (9220): 1756-1760.
- [37] Kim M, Jeong J H, Lee H J, *et al.* High mobility bottom gate InGaZnO thin film transistors with SiO_x etch stopper [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(21):212214(1-3).
- [38] Kim D H, Kim H R, Kwon J D, *et al.* Sputter-deposited Ga-Sn-Zn-O thin films for transparent thin film transistors [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2011, 208(12):2934-2938.
- [39] 张新安, 张景文, 张伟风, 等. 退火温度对 ZnO 薄膜晶体管电学性能的影响 [J]. *液晶与显示*, 2009, 24(4):557-561.
- [40] 彭丽萍, 方亮, 杨小飞, 等. In 掺杂和退火对磁控溅射制备 ZnO 薄膜的结构和光电性质的影响 [J]. *真空科学与技术学报*, 2011, 30(6):680-684.
- [41] 刘玉荣, 任力飞, 杨任花, 等. 退火温度对 ZnO 薄膜晶体管电特性的影响 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(9):104-107.
- [42] Bang S, Lee S, Jeon S, *et al.* Al₂O₃ buffer in a ZnO thin film transistor with poly-4-vinylphenol dielectric [J]. *Semi-cond. Sci. Technol.*, 2009, 24(2):025008 (1-6).

欢迎订阅《液晶与显示》

《液晶与显示》是中国最早创办的液晶学科专业期刊,也是中国液晶学科和显示技术领域中的唯一的综合性专业学术期刊。它由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会液晶分会和中国光学光电子行业协会液晶分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以创新性、综合性、实用性为办刊特色,内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,既是启迪科技人员开拓创新思路的参考期刊,又是从事液晶和显示技术研究与开发的广大科技人员、大专院校师生及相关领域的科技工作者进行学术交流的论坛,也是图书、情报等部门必不可少的信息来源。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价 40.00 元,全年 240.00 元,国内外公开发售。国内邮发代号:12-203,国内读者可在当地邮局订阅;也可通过“全国非邮发报刊联合发行部”订阅(E-mail:lhzd@public.tpt.tj.cn,网址:www.lhzd.com),本刊的代号为:5074。国外读者可通过中国国际图书贸易总公司订阅(电话:010-68433171),国外发行代号:4868BM。同时,《液晶与显示》编辑部将竭诚为广大读者服务,随时办理订阅。

地 址:长春市东南湖大路 3888 号 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

《液晶与显示》编辑部

邮 编:130033

电 话:0431-86176059 0431-84613406

传 真:0431-84627061

E-mail: yjxs@ciomp.ac.cn; yjyxs@126.com

http://www.yjyxs.com