材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022110202

氧分压对射频溅射制备 ZTO 沟道层的薄膜晶体管器件性能的影响

施苏恒[1]，岳　兰[2*]，孟繁新[3*]，陈家荣[2]，任达森[2]

（1. 贵州民族大学 化学工程学院，贵阳 550025；2. 贵州民族大学 材料科学与工程学院，贵阳 550025；
3. 中国振华集团永光电子有限公司，贵阳 550018）

摘　要： 以锌锡氧化物(ZTO)薄膜作为沟道层，聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)薄膜作为介质层低温(100 ℃)制备了顶栅共面结构的薄膜晶体管(TFT)，并研究了 ZTO 沟道层成膜过程中氧分压对器件性能的影响。结果表明，ZTO 沟道层具有稳定的非晶结构、较高的可见光透明性(在 400～700 nm 范围内平均透过率大于等于 89.61%)，且增大氧分压有利于其可见光透明性的提升。霍尔测试结果表明，增大氧分压(由 3.5×10^{-2} Pa 增大到 7.5×10^{-2} Pa)会降低 ZTO 电子载流子浓度(由 4.73×10^{15} cm^{-3} 降低到 6.11×10^{12} cm^{-3})，致使基于 ZTO 沟道层 TFT 器件的能耗降低(表现为关态电流的降低和耗尽型器件阈值电压的正向移动)。此外，增大氧分压还有益于沟道层/介质层界面状态的优化，即亚阈值摆幅减小。

关键词： 薄膜晶体管；锌锡氧化物；氧分压；顶栅结构；低温

中图分类号： TN321.5　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0092－06

Effect of Oxygen Partial Pressure on The Performance of Thin-film Transistors Devices with ZTO Channel Layer Prepared by RF Sputtering

SHI Suheng[1], YUE Lan[2], MENG Fanxin[3], CHEN Jiarong[2], REN Dasen[2]

（1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, CHN;
2. School of Material Science and Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, CHN;
3. ZhenHua Group YongGuang Electronics Co., Ltd., Guiyang 550018, CHN）

Abstract: Thin-film transistors (TFT) with top-gate and top-contact structure were prepared using zinc-tin-oxide (ZTO) film as the channel layer and polymethyl methacrylate (PMMA) film as the dielectric layer at low temperature (100 ℃), and the effect of oxygen partial pressure on the device performance was investigated during the ZTO channel layer formation process. The results show that ZTO channel layer has stable amorphous structure and high visible light transparency (average transmittance ≥89.61% in the range of 400～700 nm), and increasing the oxygen partial pressure is beneficial to the improvement of visible light transparency. Hall test results show that the increase of oxygen partial pressure (from 3.5×10^{-2} Pa to 7.5×10^{-2} Pa) will reduce the ZTO electron carrier concentration (from 4.73×10^{15} cm^{-3} to 6.11×10^{12} cm^{-3}), resulting in a reduction in the energy consumption of TFT devices based on ZTO channel layer (shown as the reduction of the off state current and the forward

收稿日期：2022－11－02.

基金项目：国家自然科学基金项目(62064001)；贵州省科学技术基金项目(黔科合基础-ZK[2021]一般 238)；贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2017]131)；贵阳市科技计划基金项目(筑科合同[2021]43-2 号).

* **通信作者：**岳　兰，孟繁新.

E-mail：yuelan0316@sina.com；
mengf11@fudan.edu.cn

shift of the depletion device threshold voltage). In addition, increasing the oxygen partial pressure is also conducive to the optimization of the channel/dielectric layer interface state (that is, the subthreshold swing is reduced).

Key words: thin-film transistors; zinc-tin-oxide; oxygen partial pressure; top-gate configuration; low temperature

0　引言

近年来，非晶氧化物薄膜晶体管(AOS TFT)凭借其AOS沟道层优异的电学性能、高的可见光透明性、良好的均匀性、低的制造成本，以及可低温制备等优点[1]，在新一代透明显示、柔性显示、裸眼3D、大屏显示等技术中表现出巨大的应用潜力。自非晶铟镓锌氧化物薄膜晶体管(a-IGZO TFT)被报道以来[2]，以a-IGZO TFT为代表的AOS TFT成为平板显示领域的研究热点[3-4]。

锌锡氧化物(ZTO)薄膜是一种宽禁带n型半导体，因为其丰富的储量、低廉的价格、良好的环境稳定性等优点致使ZTO成为AOS TFT研究中被关注较多的一种非晶氧化物沟道层材料[5-6]。然而，研究表明由于ZTO薄膜中存在大量的氧空位缺陷使得其电子载流子浓度过高，导致基于ZTO沟道层的TFT器件的关态电流(I_{OFF})过高[7-8]，严重劣化了器件的电学性能。为了解决ZTO薄膜作为沟道层其电子载流子浓度过高这一难题，有研究报道向ZTO薄膜中引入低负电性元素(如：Li[9]，W[10]，Nb[11]，Mo[12]，N[13]，Y[14]等)以及对ZTO薄膜成膜后进行后续热处理[15-17]，可通过抑制ZTO薄膜中氧空位的形成来降低其电子载流子浓度[18]。然而，研究发现基于ZTO沟道层中低负电性元素的引入来降低ZTO薄膜中电子载流子浓度致使器件关态电流降低的同时器件的迁移率也会大幅减小[19]；基于热处理工艺来降低ZTO薄膜中电子载流子浓度的途径由于其热处理温度(大于200 ℃)相对有机基底太高，也无法满足柔性显示的发展需求[20]。事实上，通过调整ZTO成膜的工艺条件也许同样能调控ZTO薄膜中电子载流子浓度从而有望改善基于ZTO沟道层TFT器件的电学性能。然而，关于ZTO TFT器件性能与ZTO沟道层成膜工艺条件间的依赖关系却鲜有报道。其次，以传统无机材料(如：SiO_2，Al_2O_3，Si_3N_4等[21])为主的介质层当前被广泛应用于AOS TFT的研究中，对于这类介质层的成膜，基于传统磁控溅射工艺往往需要较大的溅射功率以提高溅射产额亦或者基于低成本的溶液法成膜却往往需借助高的退火温度(大于350 ℃)，为了避免无机介质层制备过程中上述高能或高温退火过程对氧化物沟道层带来的负面影响，在TFT的研究报道中多采用底栅结构的器件设计，但底栅结构中氧化物沟道层直接暴露在大气中，大气中的水分和氧气等吸附在氧化物沟道层上又劣化了器件的电学稳定性[22]。考虑到聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate，PMMA)具备高的可见光透明性、良好的绝缘性、较低的成本，且其基于溶液法的低温成膜过程不仅与柔性衬底兼容，同时也可与顶栅结构AOS TFT器件制备工艺相兼容的优势，有望替代传统的无机材料介质层来低成本研制顶栅结构的AOS TFT器件。

本文尝试基于低成本溶液法制备的聚甲基丙烯酸甲酯薄膜作为介质层，以传统磁控溅射工艺室温制备的ZTO沟道层低温(100 ℃)研制顶栅结构的ZTO TFT器件，并初步研究了ZTO沟道层制备过程中氧分压这一成膜工艺条件对ZTO TFT器件电学性能的影响。

1　实验方法

本文中ZTO TFT器件均采用顶栅共面结构，如图1所示。具体制备流程如下：首先，在洗净的玻璃衬底上采用磁控溅射法基于锌锡氧化物靶材(纯度99.99%，锌锡摩尔比为Zn∶Sn=1∶2)沉积36 nm厚的ZTO薄膜作为沟道层。为了研究氧分压这一ZTO沟道层成膜工艺条件对ZTO TFT器件电学性能的影响，实验中固定0.5 Pa的氩气工作气压和97.2 W的射频溅射功率，调整氧分压依次为0，3.5×10^{-2}，5.5×10^{-2}，7.5×10^{-2}以及9.5×10^{-2} Pa来沉积ZTO薄膜，并分别作为器件的沟道层；其次，在ZTO沟道层上结合掩膜版采用电阻热蒸发法蒸镀60 nm厚的Al薄膜作为源(S)/漏(D)电极；随后，在ZTO沟道层和S/D电极上利用溶液法结合浸渍提拉镀膜工艺制备PMMA介质层。实验过程如下：先称取适量的PMMA粉末溶解于丙

酮溶液中充分搅拌得到质量浓度为 50 mg/ml 的 PMMA 前驱体溶液，然后以 1.0 mm/s 的速率提拉成膜并放入鼓风干燥箱中 100 ℃下烘烤 40 min 使其固化，得到 240 nm 厚的 PMMA 薄膜；最后，在 PMMA 介质层上采用电阻热蒸发法蒸镀 60 nm 厚的 Al 薄膜作为栅(G)电极。实验中 TFT 沟道长(L)和宽(W)分别为 100 和 500 μm。

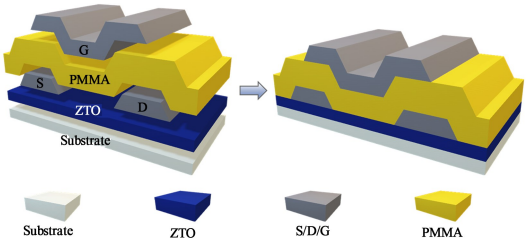


图 1 ZTO TFT 器件结构示意图

采用 Kosaka ET3000 型表面轮廓仪测量薄膜的厚度，使用 Evolution 220 型 X 射线衍射仪(XRD)和 UV2450 型紫外可见分光光度计分析 ZTO 薄膜样品的晶体结构和透过率，利用霍尔效应(Bio-Rad Micro-Science HL5500)对 ZTO 薄膜样品的电学性能进行测量，通过 Keithley 4200-SCS 型半导体性能测试仪对器件性能进行测试。

2 结果与讨论

图 2 所示为氧分压依次选用 0、3.5×10^{-2}、5.5×10^{-2}、7.5×10^{-2} 和 9.5×10^{-2} Pa 的条件下制备的 ZTO 薄膜的 XRD 图谱。可以看出，所有样品的 XRD 图谱中均没有明显的衍射峰，只呈现出一个馒头状的漫射峰。可见，在不同氧分压下沉积的 ZTO 薄膜均为非晶结构，这表明本文制备的 ZTO 薄膜作为沟道层适宜于研制具备良好均匀性的器件[23]。

图 3 所示为不同氧分压下沉积的 ZTO 薄膜的透射图谱。为了定量考查氧分压对 ZTO 薄膜光学性能的影响，我们对所有制备的 ZTO 薄膜样品在可见光范围内(400～700 nm)的平均透过率 T_{avg} 进行了计算，结果如表 1 所示。显然，随着氧分压由 0 Pa 逐渐升高到 9.5×10^{-2} Pa，薄膜的平均透射率从 89.61%逐渐提升到 96.74%，这表明通过提高 ZTO 薄膜沉积过程中的氧分压可以促进薄膜可见光透明性的提升。这可能是由于氧分压的提高，薄膜内氧空位缺陷被减少，从而减弱了光的散射而提高了其可见光范围内的透过率[24-25]。整体来看，本实验条件下制备的 ZTO 薄膜均具备较高的可见光透明性(在 400～700 nm 范围内平均透过率大于等于 89.61%)，这表明本实验中制备的 ZTO 薄膜有潜力应用于制备全透明 TFT 器件。

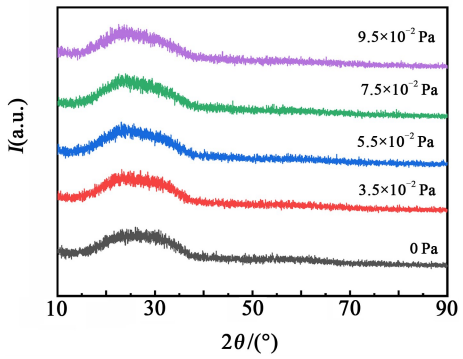


图 2 在不同氧分压下沉积的 ZTO 薄膜的 XRD 图谱

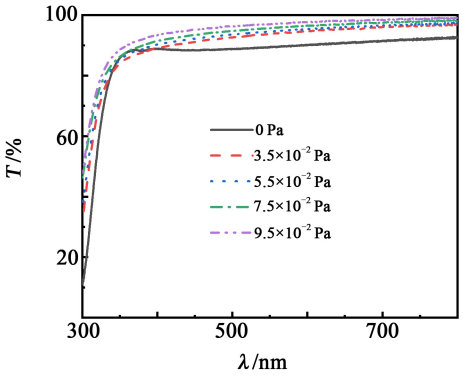


图 3 在不同氧分压下沉积的 ZTO 薄膜的透射图谱

表 1 在不同氧分压下沉积的 ZTO 薄膜在可见光范围(400～700 nm)内的平均透过率

氧分压/($\times10^{-2}$ Pa)	T_{avg}/%
0	89.61
3.5	93.42
5.5	94.25
7.5	95.36
9.5	96.74

为了讨论氧分压对 ZTO 薄膜电学性能的影响，我们对不同氧分压下制备的薄膜样品进行了霍尔测试，结果如图 4 所示。可见，随着氧分压(P_{O_2})的增加，ZTO 薄膜的电子载流子浓度(n)从 4.73×10^{15} cm^{-3} 逐渐降低到 6.11×10^{12} cm^{-3}，而电阻率(ρ)从 8.61×10^{3} Ω·cm 升高到 6.35×10^{6} Ω·cm。众所周知，氧空位是 ZTO 薄膜电子载流子的主要来源[26]，而氧化物薄膜沉积过程中氧分压的增加，能够有效抑制薄膜中氧空位的形成[27]。因此，增加 ZTO 沉积过程中的氧分压能够降低薄膜的电子载流子浓度以及提高其电阻率，这是由于 ZTO 薄膜

内氧空位的减少所导致。由此可见，调整 ZTO 薄膜溅射过程中的氧分压即可实现对 ZTO 薄膜电学性能（尤其是电子载流子浓度）的调控。

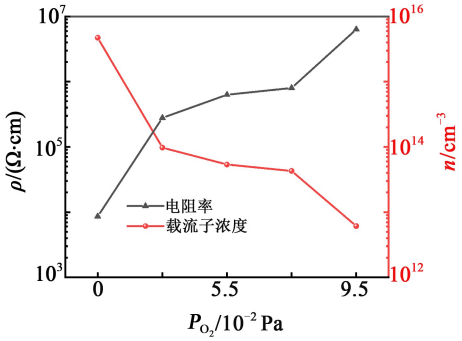
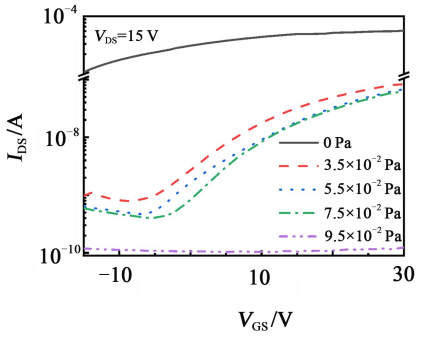
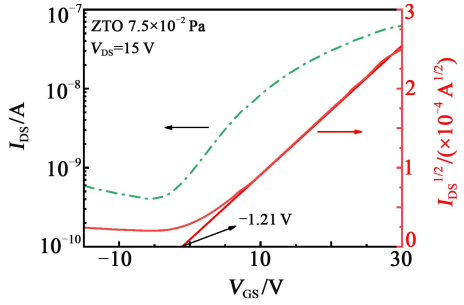


图 4　ZTO 薄膜的电阻率与电子载流子浓度随溅射过程中氧分压的变化关系

为了考察 ZTO TFT 器件性能与 ZTO 沟道层氧分压之间的依赖关系，我们选用不同氧分压下沉积的 ZTO 薄膜作为沟道层制备了 ZTO TFT 器件，器件的转移特性曲线如图 5(a)所示。可以看出，当制备 ZTO 沟道层的氧分压为 0 Pa 时，器件并没有呈现出明显的开关转移特性，这是由于 ZTO 沟道层中过高的电子载流子浓度致使器件转移特性曲线中并没有呈现截止区间的缘故；伴随着 ZTO 沉积过程中氧气的通入（氧分压由 3.5×10^{-2} Pa 到 7.5×10^{-2} Pa），ZTO TFT 器件均呈现了典型的开关特性，且随着氧分压从 3.5×10^{-2} Pa 增加到 7.5×10^{-2} Pa，相应器件的关态电流从 7.88×10^{-10} A 逐渐降低到 4.04×10^{-10} A。然而，当 ZTO 沟道层制备过程中的氧分压进一步升高（如：9.5×10^{-2} Pa），ZTO TFT 器件的开关特性再次消失，这主要源于器件无法开启（即未呈现出开态电流）所致。由此可见，ZTO TFT 器件性能随 ZTO 沟道层氧分压之间的变化规律与 ZTO 薄膜电学性能的分析结果一致：由于未通氧气（氧分压为 0 Pa）所沉积的 ZTO 沟道层中包含大量氧空位致使其电子载流子浓度过高导致器件未呈现出关态，而沟道层制备过程中通入适量氧气（氧分压由 3.5×10^{-2} Pa 到 7.5×10^{-2} Pa），由于抑制了 ZTO 中氧空位的形成从而降低了其电子载流子浓度，致使随着氧分压的增大，器件的关态电流呈现下降趋势；而当氧分压继续加大到 9.5×10^{-2} Pa 时由于沟道层中电子载流子浓度过低、沟道层电阻率过大致使器件未呈现出开态。众所周知，关态电流的高低是影响器件能耗高低的关键因素之一：关态电流越低，则器件的能耗越低。可见，在 ZTO 沟道层溅射过程中，在适当范围内提升其氧分压（$3.5\sim7.5\times10^{-2}$ Pa），有益于降低器件能耗。



(a) ZTO TFT 器件的转移特性曲线



(b) 基于氧分压为 7.5×10^{-2} Pa 沉积 ZTO 沟道层的器件转移特性曲线与相应的 $I_{DS}^{1/2}$-V_{GS} 曲线

图 5　ZTO TFT 器件性能与 ZTO 沟道层氧分压之间的依赖关系

为了定量的考查 ZTO 成膜过程中氧分压对 ZTO TFT 器件电学性能的影响，我们计算了决定器件性能的关键电学参数，如：电流开关比（$I_{ON/OFF}$）、亚阈值摆幅（SS）、阈值电压（V_{th}）以及迁移率（μ_{sat}）。具体计算方法如下：电流开关比（$I_{ON/OFF}$）由转移特性曲线上的“开态电流”与“关态电流”的比值进行计算。亚阈值摆幅（SS）可以由式(1)进行计算：

$$SS=\frac{dV_{GS}}{d(\log I_{DS})} \tag{1}$$

V_{th} 和 μ_{sat} 可由式(2)进行计算：

$$I_{DS}^{1/2}=\sqrt{\frac{W}{2L}\mu C_{OX}}(V_{GS}-V_{th}) \tag{2}$$

式中，V_{GS} 是栅源电压，I_{DS} 是器件源漏电极间的电流，W/L 是沟道的宽长比，C_{OX} 是介质层单位面积的电容。由式(2)结合器件的转移特性曲线可以作出器件的 $I_{DS}^{1/2}$-V_{GS} 曲线，图 5(b)即给出了所制备的典型 ZTO TFT 器件代表（ZTO 氧分压为 7.5×10^{-2} Pa）的 $I_{DS}^{1/2}$-V_{GS} 曲线，由曲线切线的斜率结合式(2)可计算出 μ_{sat}，作曲线线性区域反向延长线与

横轴相交，截距即为 V_{th}。表 2 给出了所有制备器件的电学性能参数。可以看出，随着 ZTO 沟道层的氧分压从 3.5×10^{-2} Pa 增加到 7.5×10^{-2} Pa，尽管相应器件的 $I_{ON/OFF}$ 和 μ_{sat} 都比较接近（$I_{ON/OFF}$ 均为 10^2 数量级，μ_{sat} 均处于 $2.1\sim2.5\times10^{-3}$ cm^2/Vs 范围），但器件的 *SS* 却从 11.28 V/dec 下降到 9.76 V/dec。SS 的高低反映了沟道层/介质层界面状态的好坏，*SS* 越小，说明沟道层/介质层界面缺陷态密度越低[28]。由此可见，增加 ZTO 沟道层溅射过程中的氧分压将有助于促进 ZTO TFT 器件中沟道层/介质层界面状态的优化。此外，随着沟道层氧分压由 3.5×10^{-2} Pa 增加到 7.5×10^{-2} Pa，表 2 中 V_{th} 由 −3.95 V 正向移动到 −1.21 V，这源于增加氧分压致使沟道层内受栅压调制的电子载流子浓度降低。事实上，V_{th} 的大小是决定器件能耗高低的另一关键因素——耗尽型器件的 V_{th} 更接近 0 V，则表明其只需施加一个较小的电压即能使器件处于关闭状态，此时器件具有更低的能耗[29]。综合来看，基于氧分压为 7.5×10^{-2} Pa 时沉积 ZTO 沟道层的 ZTO TFT 器件有着相对较好的沟道层/介质层界面状态、更低的能耗（接近于 0 V 的 V_{th} 和更低的关态电流）。即基于氧分压为 7.5×10^{-2} Pa 时制备的 ZTO 沟道层的 ZTO TFT 器件有着较优的器件综合性能。

表 2 基于不同氧分压 ZTO 沟道层的 ZTO TFT 器件性能参数比较

P_{O_2}/$\times10^{-2}$ Pa	$I_{ON/OFF}$	*SS*/(V/dec)	V_{th}/V	μ_{sat}/($\times10^{-3}$ cm^2/Vs)
0	——	——	——	——
3.5	1.05×10^2	11.28	−3.95	2.43
5.5	1.46×10^2	11.11	−1.43	2.29
7.5	1.54×10^2	9.76	−1.21	2.11
9.5	——	——	——	——

3 结论

本文基于传统磁控溅射法沉积的 ZTO 薄膜作为沟道层，以低成本溶液法制备的 PMMA 薄膜作为介质层，在较低温度（100 ℃）下成功制备了顶栅共面结构的 ZTO TFT 器件，并探讨了氧分压这一沟道层成膜工艺条件对基于 ZTO 沟道层的 ZTO TFT 器件性能的影响。研究发现本实验中制备的 ZTO 沟道层均具有稳定的非晶结构并在可见光范围内具有较高的可见光透明性（在 400～700 nm 范围内平均透过率大于等于 89.61%），且增大沟道层的氧分压有利于其可见光透明性的提升。此外，霍尔测试结果显示，增加氧分压可降低沟道层内的电子载流子浓度，提高其电阻率，表明调整 ZTO 沟道层溅射过程中的氧分压即可实现对其电学性能的调控，这也使得基于 ZTO 沟道层的 TFT 器件随 ZTO 氧分压由 3.5×10^{-2} Pa 增加到 7.5×10^{-2} Pa，器件的阈值电压、关态电流以及亚阈值摆幅这些决定器件性能优劣的关键性能参数有所提升，表现为阈值电压正向移动，关态电流和亚阈值摆幅被降低。综合来看，基于氧分压为 7.5×10^{-2} Pa 时制备 ZTO 沟道层的 ZTO TFT 器件表现出较好的综合性能。

参考文献：

[1] Kang D, Lim H, Kim C, et al. Amorphous gallium indium zinc oxide thin film transistors: Sensitive to oxygen molecules [J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 90(19): 192101.1-192101.3.

[2] Nomura K, Ohta H, Takagi A, et al. Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors[J]. Nature, 2004, 432(25): 488-492.

[3] Lahr O, Bar M S, Wenckstern H V, et al. All-oxide transparent thin-film transistors based on amorphous zinc tin oxide fabricated at room temperature: Approaching the thermodynamic limit of the subthreshold swing[J]. Adv. Electron. Mater., 2020, 6(10): 2000423.

[4] Weng S, Chen R, Zhong W, et al. High-performance amorphous zinc-tin-oxide thin-film transistors with low tin concentration[J]. IEEE J. Electron Devices Society, 2019, 7: 632-637.

[5] Hong S, Oh G, Kim E K. Electrical properties of thin film transistors with zinc tin oxide channel layer[J]. J. Korean Phys. Soc., 2017, 71(8): 500-505.

[6] Oh S J, Han C J, Kim J W, et al. Improving the electrical properties of zinc tin oxide thin film transistors using atmospheric plasma treatment[J]. Electrochem. Solid State Lett., 2011, 14(9): H354-H357.

[7] Pan W, Zhou X, Li Y, et al. High performance of ZnSnO thin-film transistors engineered by oxygen defect modulation [J]. Mat. Sci. Semicon. Proc., 2022, 151: 106998.

[8] Wu C, Li X, Lu J, et al. Characterization of amorphous Si-Zn-Sn-O thin films and applications in thin-film transistors[J]. Appl. Phys. Lett., 2013, 103(8): 082109.1-082109.4.

[9] Cho I H, Park H W, Chung K B, et al. Influence of lithium doping on the electrical properties and ageing effect of ZnSnO thin film transistors[J]. Semicond. Sci. Technol., 2018, 33(8): 085004.

[10] Yang X, Jiang S, Li J, et al. Improvement of the long-term stability of ZnSnO thin film transistors by tungsten incorporation using a solution-process method[J]. RSC

Advances, 2018, 8(37): 20990-20995.

[11] Jeng J S. Improvement of transistor characteristics and stability for solution-processed ultra-thin high-valence niobium doped zinc-tin oxide thin film transistors[J]. J. Alloys and Compounds, 2016, 676: 86-90.

[12] Peng C, Dong P, Li X. Improvement of solution-processed Zn-Sn-O active-layer thin film transistors by novel high valence Mo doping[J]. Nanotechnology, 2020, 32(2): 025207.

[13] Zhang Y, Zhang H, Che B, et al. A new "ammonia bath" method for realizing nitrogen doping in ZnSnO transistors [J]. IEEE Electron Device Lett., 2020, 41(3): 389-392.

[14] Alexis M, Herbert R S, Danick B. Yttrium zinc tin oxide high voltage thin film transistors[J]. Appl. Phys. Lett., 2018, 113(13): 132101.1-132101.5.

[15] Wang C, Guo L, Lei M, et al. Effect of annealing temperature on electrical properties of ZTO thin-film transistors[J]. Nanomaterials, 2022, 12(14): 2397.

[16] Kazuo S, Shuichi M, Yusuke K, et al. Effect of postannealing on properties of ZnO-SnO_2 thin film transistors [J]. J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2018, 36(2): 02C105.1-02C105.5.

[17] Zhang Q, Ruan C, Gong H, et al. Low-temperature and high-performance ZnSnO thin film transistor activated by lightwave irradiation[J]. Ceramics International, 2021, 47(14): 20413-20421.

[18] Dai S, Wang T, Li R, et al. Preparation and electrical properties of N-doped ZnSnO thin film transistors[J]. J. Alloys and Compounds, 2018, 745: 256-261.

[19] Zuo H, Zhang X, Yang Y, et al. The influence of oxygen partial pressure on the performance of back-channel-etched a-ZTO thin-film transistors[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(s1): 216-219.

[20] Hu M, Xu L, Zhang X, et al. In-situ Ar plasma treatment as a low thermal budget technique for high performance InGaSnO thin film transistors fabricated using magnetron sputtering[J]. Appl. Surf. Sci., 2022, 604: 154621.

[21] Pons-Flores C A, Mejia I, Hernandez I, et al. High performance, low temperature processed Hf-In-Zn-O/HfO_2 thin film transistors, using PMMA as etch-stop and passivation layer [J]. Microelectronic Engineering, 2019, 205: 1-5.

[22] Shijeesh M R, Saritha A C, Jayaraj M K. Investigations on the reasons for degradation of zinc tin oxide thin film transistor on exposure to air[J]. Mat. Sci. Semicon. Proc., 2018, 74: 116-121.

[23] Fernandes C, Santa A, Santos Â, et al. A sustainable approach to flexible electronics with zinc-tin oxide thin-film transistors[J]. Adv. Electron. Mater., 2018, 4(7): 1800032.

[24] Zhang M, Lu K, Xu Z, et al. The investigation of indium-free amorphous Zn-Al-Sn-O thin film transistor prepared by magnetron sputtering[J]. Coatings, 2021, 11(5): 585.

[25] Zhang Q, Xia G, Li L, et al. High-performance zinc-tin-oxide thin film transistors based on environment friendly solution process[J]. Current Appl. Phys., 2018, 19(2): 174-181.

[26] Lim J H, Jeong H J, Oh K T, et al. Semiconductor behavior of Li doped ZnSnO thin film grown by mist-CVD and the associated device property[J]. J. Alloys Compounds, 2018, 762: 881-886.

[27] Kumar A, Lee S Y. Effect of the oxygen dependent device parameters on the electrical properties of a-Si-Zn-Sn-O thin film transistors [J]. Microelectron. Eng., 2022, 261: 111794.

[28] Pal N, Thakurta B, Chakraborty R, et al. Application of a microwave synthesized ultra-smooth a-C thin film for the reduction of dielectric/semiconductor interface trap states of an oxide thin film transistor[J]. J. Mater. Chem. C, 2022, 10: 14905-14914.

[29] Pak K, Seong H, Choi J, et al. Synthesis of ultrathin, homogeneous copolymer dielectrics to control the threshold voltage of organic thin-film transistors[J]. Adv. Funct. Mater., 2016, 26(36): 6672.

作者简介：

施苏恒(1996—)，男，江苏省盐城市人，硕士研究生，主要研究方向为半导体薄膜及器件；

岳　兰(1982—)，女，湖北省汉川市人，博士，教授，硕士生导师，主要研究方向为半导体薄膜材料及器件。