文章编号：1007-2780(2026)08-1134-10

AZO电极厚度对低温退火MgZnO/ZTO-TFT性能的影响

郝云鹏[1]，王　超[2,3*]，郭　亮[2,3]，孙　瑜[1]，徐琳博[1]
(1. 延边职业技术学院 装备制造与智能控制系，吉林 延吉 133002；
2. 吉林建筑大学 寒地建筑综合节能教育部重点实验室，吉林 长春 130118；
3. 吉林省建筑电气综合节能重点实验室，吉林 长春 130118)

摘要：为适配柔性电子低温制备需求，本文采用300 ℃低温退火工艺，制备了以铝锌氧化物薄膜(AZO)为透明电极的MgZnO/ZTO薄膜晶体管(TFT)，并系统研究AZO电极厚度(110 nm、165 nm、220 nm、275 nm)对器件性能的影响。利用紫外-可见分光计、原子力显微镜、扫描电镜、X射线光电子能谱技术对薄膜进行表征测试，结果表明，AZO电极厚度为165 nm时器件性能最佳，场效应迁移率为0.482 $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$，阈值电压为6.362 V，亚阈值摆幅为3.418 V/dec，电流开关比可以达到10^7数量级。经分析认为，当AZO电极为165 nm时，薄膜中的氧空位浓度处于最佳，适当的氧空位浓度为薄膜提供了充足的载流子从而提高了导电性，有效地保障了电荷的注入与传输效率。同时本文对器件进行了正偏压应力(PBS)和负偏压应力(NBS)稳定性的测试，该器件在栅偏置压力为±20 V、应力时间为1 000 s时，阈值电压偏移仅为+1.99 V与−3.62 V，其稳定性略优于传统的ITO电极器件。最终结果表明，当AZO电极厚度为165 nm时，低温退火下的MgZnO/ZTO-TFT具有良好的电学性能与稳定性，为低温无铟透明TFT器件的制备提供了可行性方案。

关　键　词：AZO电极；MgZnO/ZTO-TFT；低温退火；XPS；稳定性
中图分类号：TN321+.5　**文献标识码：**A　**doi：**10.3724/CJLCD.2026-0085　**CSTR：**32172.14.CJLCD.2026-0085

Effect of AZO electrode thickness on the performance of low-temperature annealed MgZnO/ZTO thin-film transistors

HAO Yunpeng[1], WANG Chao[2,3*], GUO Liang[2,3], SUN Yu[1], XU Linbo[1]

(1. *Department of Equipment Manufacturing and Intelligent Control, Yanbian Vocational & Technical College, Yanji* 133002, *China*;
2. *Key Laboratory for Comprehensive Energy Saving of Cold Regions Architecture of Ministry of Education, Jilin Jianzhu University, Changchun* 130118, *China*;
3. *Jilin Provincial Key Laboratory of Architectural Electricity & Comprehensive Energy Saving, Jilin Jianzhu University, Changchun* 130118, *China*)

Abstract: To meet the low-temperature fabrication requirement of flexible electronics, MgZnO/ZTO TFT with aluminum zinc oxide(AZO) transparent electrodes were fabricated via a low-temperature annealing

收稿日期：2026-05-14；**修订日期：**2026-07-14.
基金项目：吉林省科技厅项目（No. 20260206041ZP）
Supported by Project of Department of Science and Technology of Jilin Province (No. 20260206041ZP)
*通信联系人，E-mail：girl.alice@foxmail.com

process at 300 ℃. The effects of AZO electrode thickness (110 nm, 165 nm, 220 nm, and 275 nm) on device performance were systematically investigated. The thin films were characterized by ultraviolet-visible spectrophotometry (UV-Vis), atomic force microscopy(AFM), scanning electron microscopy (SEM), and X-ray photoelectron spectroscopy(XPS). The results show that the device with an AZO electrode thickness of 165 nm exhibits the optimal electrical performance, achieving a field-effect mobility of 0.482 $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$, a threshold voltage of 6.362 V, a subthreshold swing of 3.418 V/dec, and an on/off current ratio up to the order of 10^7. Analysis reveals that the oxygen vacancy concentration in the thin film reaches an optimal level at the AZO thickness of 165 nm. The appropriate oxygen vacancy concentration provides sufficient carriers for the thin film to enhance electrical conductivity, which effectively guarantees the injection and transport efficiency of charge carriers. Furthermore, the positive bias stress(PBS) and negative bias stress(NBS) stability of the device were evaluated. Under a gate bias stress of ±20 V for 1 000 s, the threshold voltage shifts are only +1.99 V and −3.62 V, respectively, and the stability is slightly superior to that of conventional ITO-based devices. The final results demonstrate that the low-temperature annealed MgZnO/ZTO-TFT with a 165 nm-thick AZO electrode possesses favorable electrical properties and bias stability, providing a feasible strategy for the fabrication of low-temperature indium-free transparent TFT devices.

Key words: AZO electrode; MgZnO/ZTO-TFT; low-temperature annealing; XPS; stability

1　引　　言

金属氧化物薄膜晶体管(Thin Film Transistor, TFT)因其出色的电学性能，使其在透明显示[1]、柔性电子[2-3]等领域占据重要地位。在传统的器件制备过程中，高温退火工艺能够有效提升晶体管的性能，但不适用于柔性器件的制备工艺。当前柔性器件的制备主要以聚酰亚胺(PI)薄膜为衬底，而PI薄膜可承受的最高退火温度为300 ℃[4]。因此在有源层的制备方面，低温退火工艺成为了当前研究的热点之一。

此外，在透明电极材料的选取方面，氧化铟锡(ITO)材料因其优异的电学性能一直备受研究人员的青睐[5]。然而铟元素的稀缺性和潜在毒性对其发展产生一定制约性，目前研究人员正积极探索替代方案。近年来，诸如铝锌氧(AZO)[6]、碳纳米管[7]、石墨烯[8]、银纳米线[9]等无铟透明电极材料受到了广泛关注。其中AZO电极因其高透明度、良好的兼容性、高稳定性展现出广泛的应用潜力，且AZO电极的制备方式简便，原材料丰富且成本较低，使其成为ITO电极的有效替代选择。

本文的研究方向为低温退火条件下制备无铟透明电极薄膜晶体管，主要研究了MgZnO/ZTO薄膜在低温退火条件下，AZO电极厚度对MgZnO/ZTO-TFT器件性能的影响，并对其稳定性进行研究。

2　实　　验

本实验采用p-Si为衬底，厚度为285 nm的SiO_2为器件绝缘层。首先将衬底进行超声清洗，以降低表面杂质对器件性能的影响。采用磁控溅射法制备MgZnO/ZTO薄膜作为有源层，其中MgZnO薄膜使用纯度为99.9%的Mg靶材和ZnO靶材进行共溅射沉积，ZTO薄膜使用99.9%的ZTO靶材(m(ZnO)∶m(SnO)=7∶3)进行沉积。随后将制备好的有源层进行300 ℃、时长1 h的退火优化。AZO电极的制备依旧采用磁控溅射法，使用纯度99.9%的Al靶材和ZnO靶材进行共溅射沉积，溅射功率分别为40 W和100 W，溅射氩氧比为90%∶10%，溅射压强为1.0 Pa，溅射的薄膜厚度分别为110 nm、165 nm、220 nm、275 nm(AZO电极在有源层退火完成后未进行任何退火处理)，器件的沟道宽度与长度分别为300 μm和10 μm。器件结构如图1所示。

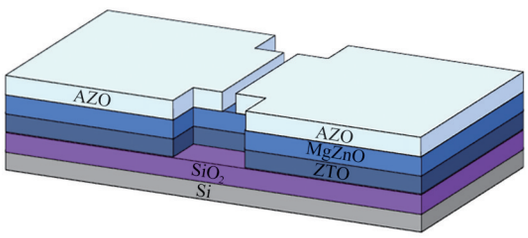


图 1 AZO 电极 MgZnO-TFT 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of MgZnO-TFT with AZO electrodes

3 实验结果及讨论

3.1 AZO/MgZnO/ZTO 薄膜光学透射性测试

对不同厚度的 AZO/MgZnO/ZTO 薄膜进行紫外光透射测试(UV-2600 型紫外-可见分光光度计,UV-Vis)。如图 2 所示,在波长为 800 nm 时,随着 AZO 电极厚度的增加,光透过率呈现下降趋势,但 4 种样品的透射率均可达到 93% 以上,展现出了良好的光学透过性,满足透明器件的制备要求。

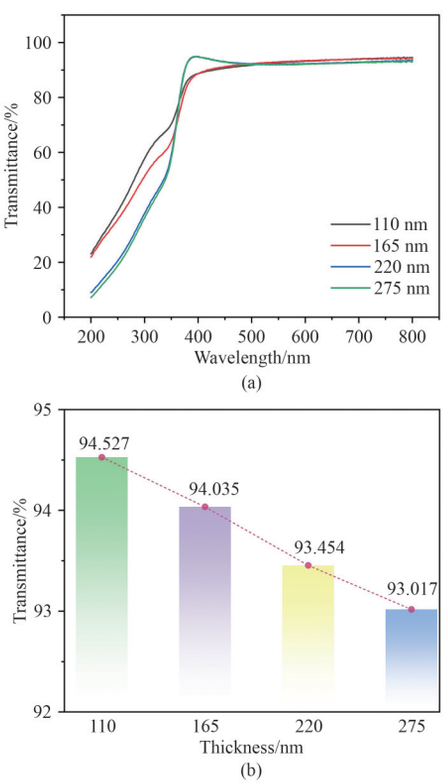


图 2 (a) AZO/MgZnO/ZTO 薄膜在不同 AZO 电极厚度下的紫外光透射图谱;(b)波长 800 nm 时的透射率结果。

Fig. 2 (a) UV transmittance spectra of AZO/MgZnO/ZTO thin films with different AZO electrode thicknesses; (b) Transmittance results at 800 nm wavelength.

3.2 AZO 薄膜表面形貌测试

利用原子力显微镜(MFP-3D 型原子力显微镜,AFM)对不同厚度的 AZO 薄膜进行扫描分析,如图 3 所示,在 10 μm² 区域内导出的均方根粗

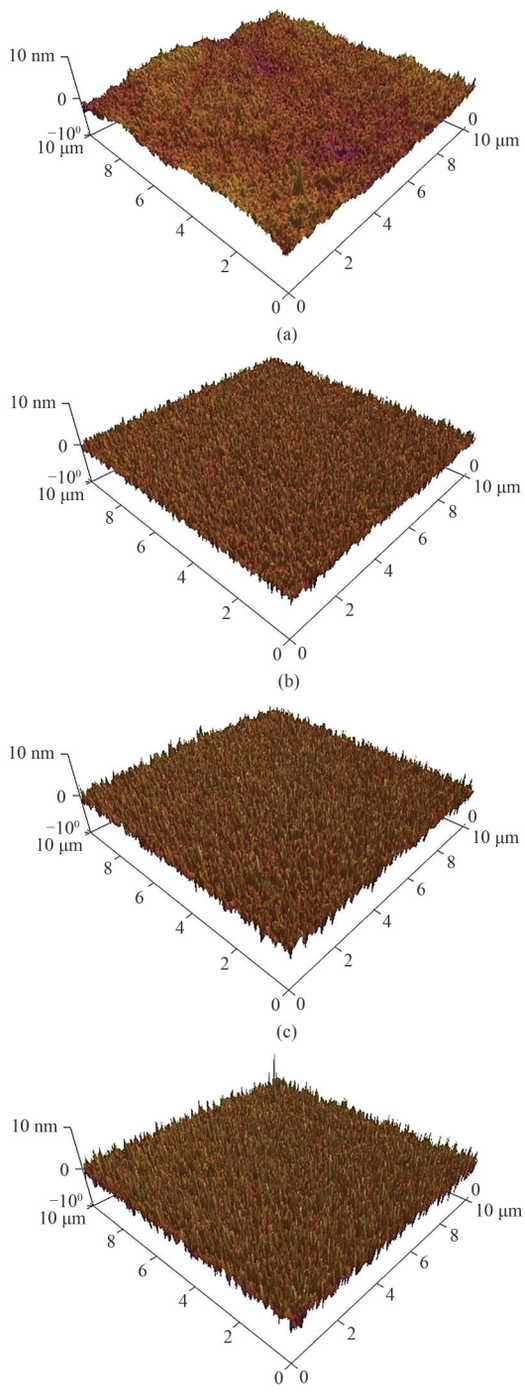


图 3 AZO 薄膜在厚度为(a) 110 nm、(b) 165 nm、(c) 220 nm、(d) 275 nm 时的 AFM 图像。

Fig. 3 AFM images of AZO thin films with thicknesses of (a) 110 nm, (b) 165 nm, (c) 220 nm, (d) 275 nm.

糙度分别为 0.995 nm、0.945 nm、1.24 nm、1.493 nm。随着薄膜厚度的增加，其均方根粗糙度呈先减小后增大的趋势，在薄膜厚度为 165 nm 时均方根粗糙度最低为 0.945 nm。

采用扫描电子显微镜（JSM-7610F，SEM）对不同厚度的 AZO 薄膜进行扫描，图 4 为不同厚度的 AZO 薄膜的 SEM 图像。如图 4 所示，当薄膜厚度为 110 nm 时，晶粒尚未完全形成，薄膜连续性较差。随着薄膜厚度提升至 165 nm，薄膜表面致密且连续，晶粒尺寸均匀、表面均方根粗糙度达到极小值，电极的有效接触面积最大化。在薄膜厚度进一步增至 220 nm、275 nm 时，长时间的溅射引发薄膜中晶粒尺寸增大，呈现出些许不规则态并出现孔洞，薄膜表面起伏加剧、粗糙度显著升高，薄膜质量变差进而引发接触质量下降。

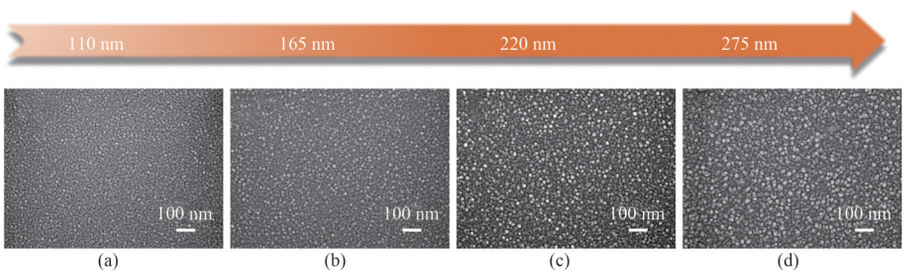


图 4　AZO 薄膜厚度为（a）110 nm、（b）165 nm、（c）220 nm、（d）275 nm 的 SEM 图像。

Fig. 4　SEM images of AZO thin films with thicknesses of (a) 110 nm, (b) 165 nm, (c) 220 nm, (d) 275 nm.

3.3　AZO 薄膜 XPS 测试

采用 X 射线光电子能谱（XPS）对 AZO 薄膜进行表征分析。图 5 为不同厚度下 AZO 薄膜的 O 1s XPS 图谱。如图 5 所示，O 1s XPS 图谱具体表现为 O_i（（530.4±0.25）eV）、O_{ii}（（531.2±0.15）eV）、O_{iii}（（533.4±0.25）eV）三种不同化学态。其中，O_i 为晶格氧，对应 AZO 薄膜中 Zn—O 与 Al—O 键结合产生的理想晶格氧；O_{ii} 为薄膜中的氧空位（V_O）浓度，显著影响载流子浓度与导电性能，是决定薄膜电学特性的关键因素；O_{iii} 对应薄膜表面吸附羟基（—OH）等含氧杂质，主要来自于表面吸附的水分子与含氧基团。

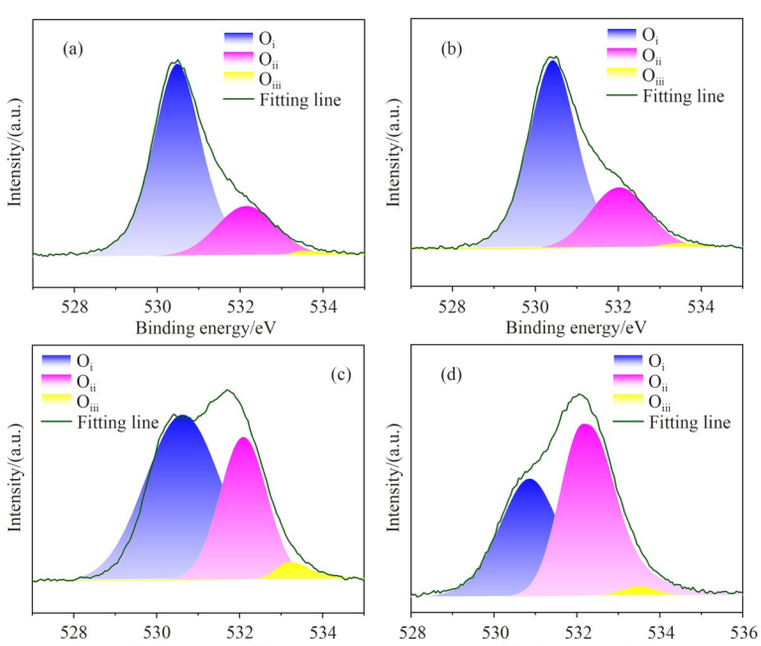


图 5　AZO 薄膜厚度为（a）110 nm、（b）165 nm、（c）220 nm、（d）275 nm 时的 O 1s XPS 图谱。

Fig. 5　O 1s XPS spectra of AZO thin films with thickness of (a) 110 nm, (b) 165 nm, (c) 220 nm, (d) 275 nm.

各组分在O 1s谱中的相对面积占比定量结果如表1所示。由不同厚度AZO薄膜的O 1s XPS图谱组分结果可见，随着薄膜厚度的增加，O_i含量从76.58%下降至41.93%，O_{ii}含量由22.05%上增至56.48%，而O_{iii}占比在不同厚度AZO薄膜中均较低。其中，O_{ii}占比的上升说明随着薄膜厚度的增加，其内部氧空位浓度也随之提高。足量的氧空位浓度可提供更多的自由电子，有利于提升薄膜中的载流子浓度与电导率[10-11]，此外氧空位浓度还直接调控电极与有源层异质界面接触势垒的核心参量，薄膜中氧空位占比处于最优区间，薄膜同时具备高导电特性与低晶格缺陷密度，电荷注入势垒达到极小值[12-13]。但随着氧空位浓度的持续增加，将诱发晶格畸变，导致薄膜中的晶格有序度下降，造成晶界增多、缺陷复杂化，从而增强电子散射，使薄膜的导电性能降低，最终造成电极导电性能与界面电荷输运能力同步衰减[14]。

表1 不同厚度下AZO薄膜的O 1s XPS图谱组分

Tab. 1 O 1s XPS spectral components of AZO thin films with different thicknesses

厚度/nm	O_i/%	O_{ii}/%	O_{iii}/%
110	76.58	22.05	1.37
165	72.52	25.89	1.59
220	59.70	36.46	3.84
275	41.93	56.48	1.60

3.4 电学性能分析

使用Keysight B1500A半导体参数测试仪对所制备的MgZnO/ZTO-TFT器件进行电学性能测试。在测试转移特性时，栅极电压的扫描范围为0～40 V，步长为5 V，源漏电压在0～40 V之间扫描。

图6为AZO电极不同厚度时MgZnO/ZTO-TFT的输出特性曲线。如图6所示，4种电极不同厚度的样品源漏电流与栅极电压的变化成正比且展现出较好的饱和趋势。在源漏电压40 V、

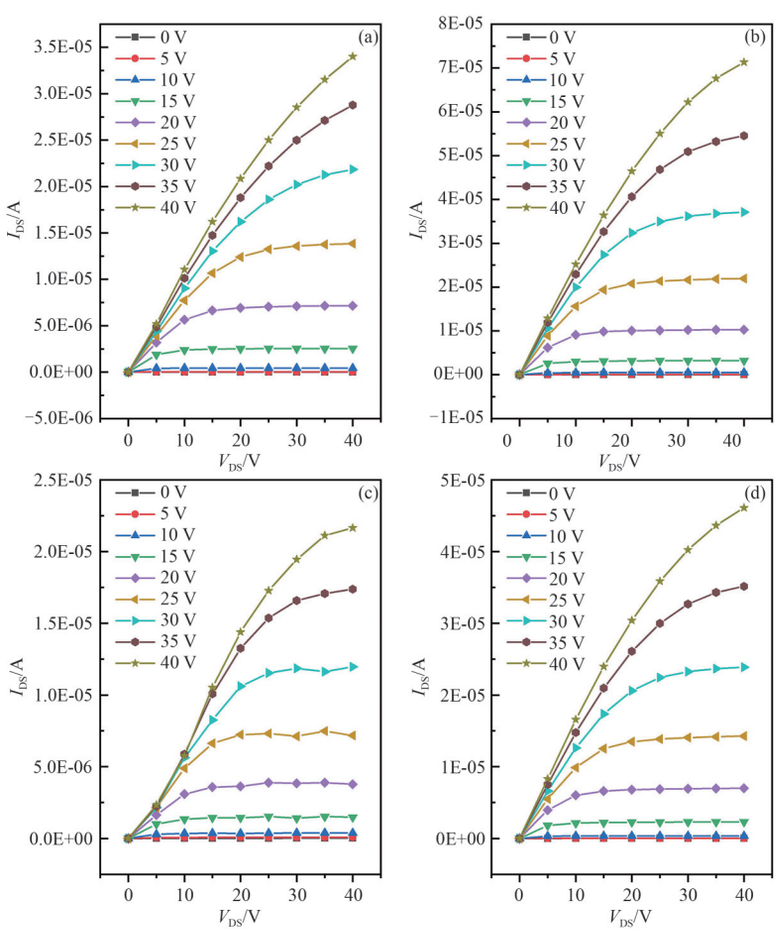


图6 AZO电极厚度为(a) 110 nm、(b) 165 nm、(c) 220 nm、(d) 275 nm时制备的MgZnO-TFT的输出特性曲线。

Fig. 6 Output characteristic curves of MgZnO-TFTs fabricated with AZO electrodes of (a) 110 nm, (b) 165 nm, (c) 220 nm, (d) 275 nm.

栅压40 V、AZO电极厚度为165 nm时，源漏电流达到7.133×10^{-5} A，高于其他3种样品。当电极厚度为220 nm时，器件呈现明显的非欧姆特征。这是由于AZO溅射时间更长，离子轰击与热累积效应加剧，导致电极与有源层界面之间的残余应力升高，造成接触电阻增大；同时该厚度下薄膜出现明显孔洞，有效接触面积减小，使载流子的注入效率进一步降低[15-16]。当电极厚度升至275 nm时，虽界面劣化，但氧空位浓度大幅提升，由此抵消了部分接触电阻的负面影响。

图7为所制备4种样品的转移特性曲线，其中源漏电压为20 V，栅极电压扫描范围为−40～40 V。如图7所示，AZO电极厚度不同时MgZnO-TFT均具有较为明显的开关性能，且开关速度较快。

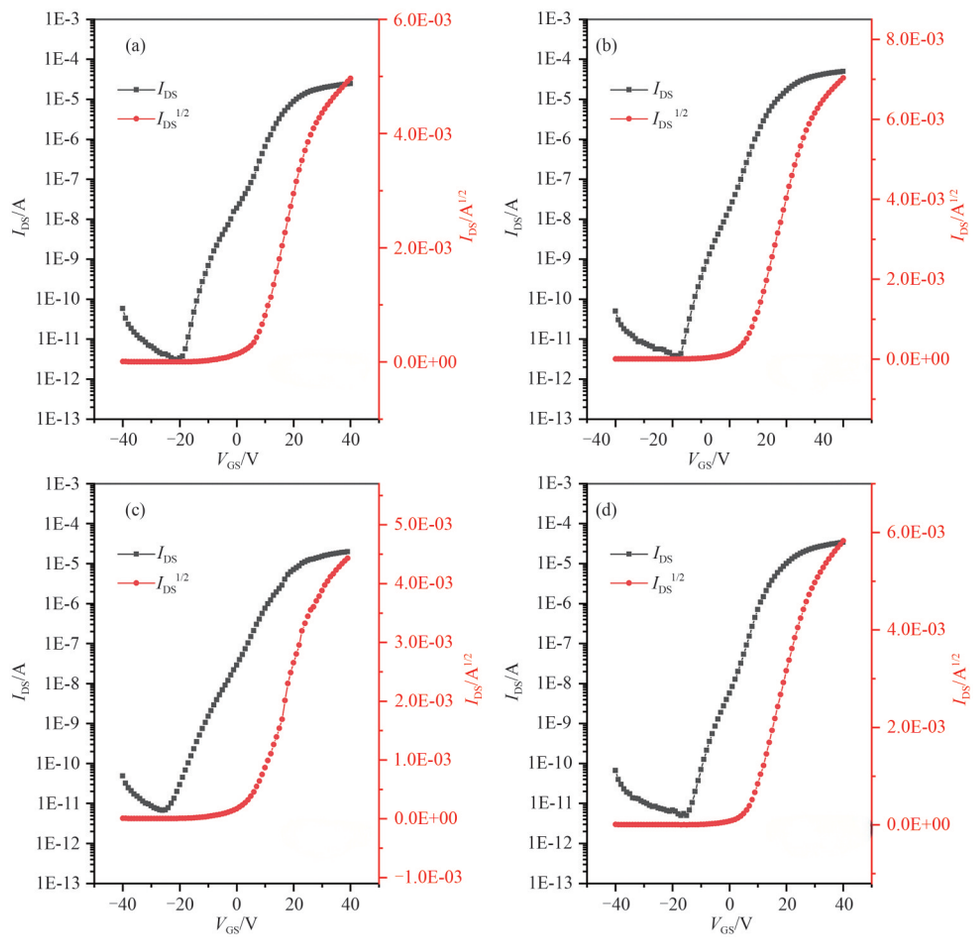


图7　AZO电极厚度为(a) 110 nm、(b) 165 nm、(c) 220 nm、(d) 275 nm时制备的MgZnO-TFT的转移特性曲线。

Fig. 7　Transfer characteristics of MgZnO-TFTs with AZO electrode thicknesses of (a) 110 nm, (b) 165 nm, (c) 220 nm, (d) 275 nm.

表2为不同AZO电极厚度对应的MgZnO/ZTO-TFT的电学性能参数。根据公式(1)～(3)可以计算出TFT器件的场效应迁移率、亚阈值摆幅和电流开关比：

$$\mu_{sat}=\frac{2L}{WC_i}\left(\frac{\partial\sqrt{I_{DS}}}{\partial V_{GS}}\right)^2, \tag{1}$$

$$SS=\frac{dV_{GS}}{d(\log I_{DS})}, \tag{2}$$

$$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}=\frac{(I_{DS})_{max}}{(I_{DS})_{min}}. \tag{3}$$

由表2可知，当AZO电极厚度为165 nm时，MgZnO/ZTO-TFT器件开关性能最佳，其电流开关比高出其他3个样品一个数量级，可以达到10^7。此外，随着电极厚度的增加，场效应迁移率呈现先上升后下降的趋势，在165 nm时场效应迁移率最佳，这与上文中所测试的AZO薄膜表面

表 2 不同 AZO 电极厚度所制备的 MgZnO/ZTO-TFT 的电学性能参数

Tab. 2 Electrical performance parameters of MgZnO/ZTO-TFT fabricated with AZO electrodes of different thicknesses

AZO 薄膜厚度/nm	μ_{sat}/($cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)	V_{TH}/V	SS/($V \cdot dec^{-1}$)	I_{on}/I_{off}
110	0.293	7.188	3.211	8.2×10^6
165	0.482	6.362	3.418	1.304×10^7
220	0.312	8.914	5.507	2.973×10^6
275	0.336	7.178	3.647	6.807×10^6

均方根粗糙度结果成正相关。因为电极的表面粗糙度会影响源漏电流的传输与电荷的注入，当源漏电极注入的电荷较多时可以更好激发有源层中载流子的移动，从而对器件的场效应迁移率产生一定影响[17]。与此同时，AZO 电极厚度与有源层表面之间热应力也有一定联系，AZO 电极厚度由溅射时长直接决定，电极与有源层接触界面在溅射初期开始形成。随着溅射时间的延长，Ar 离子持续轰击所带来的能量会透过生长中的薄膜传递至底层界面，导致衬底能量累积、温升显著增加，持续引入缺陷与内应力，改变界面接触势垒。此外，随着溅射时间的增加，铝原子所带来的热负荷也越高，同样造成薄膜表面的热应力增大[18-19]。较大的热应力会弱化源漏电极与有源层之间的界面接触，造成源漏电流传输困难，对器件性能产生较大影响[20-21]。此外，结合前文 XPS 氧空位的相关分析可知，AZO 电极为 165 nm 时，表面氧空位含量适中，界面能级匹配度最佳，电荷注入势垒最低，因此器件获得最优场效应迁移与开关特性；在电极厚度超过 165 nm 时，薄膜中过量氧空位诱发晶格畸变、加剧载流子散射，界面电荷输运效率下降，器件电学性能随之衰减。

3.5 稳定性分析

经上文分析，在 AZO 电极厚度为 165 nm 时 MgZnO/ZTO-TFT 器件性能最佳，故而本文对此条件下制备的 TFT 器件进行偏压稳定性测试（PBS、NBS）。图 8、图 9 为 MgZnO/ZTO-TFT 在源漏电压为 20 V，栅偏置压力分别为 10 V、20 V，−10 V、−20 V 时不同应力时间下的转移特性曲线。图 10 为不同栅偏置压力下 MgZnO/ZTO-TFT 的测试结果。

如图 8 和图 9 所示，在应力时间为 1 000 s 时 MgZnO/ZTO-TFT 在 4 种不同栅偏压力下 ΔV_{TH} 分别为＋1.51 V、＋1.99 V、−1.44 V、−3.62 V。表 3 为不同 TFT 器件的偏压稳定性对比。根据表 3 可知，在低温退火条件下，采用 AZO 电极的 MgZnO/ZTO-TFT 具有更优的偏压稳定性。因为，AZO 电极中的 Al^+ 有效抑制了氧空位的形成，使电极与有源层之间产生良好的界面接触，使器件在施加栅偏置压力时，减弱了界面之间陷阱对电子的捕获[25-26]。而反观 ITO-TFT，ITO 电极在溅射过程中受到温度的变化以及施加栅偏置压力时，可

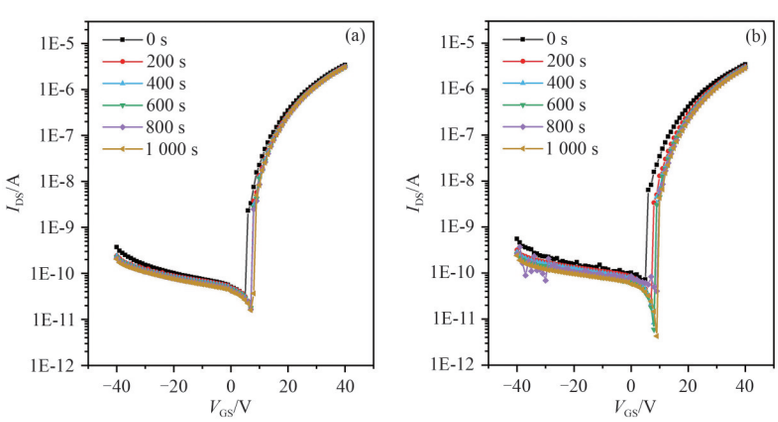


图 8 AZO 电极厚度为 165 nm 时 MgZnO/ZTO-TFT 在(a) 10 V、(b)20 V 栅偏置压力下不同应力时间的转移特性曲线。

Fig. 8 Transfer characteristic curves of MgZnO/ZTO-TFT with 165 nm AZO electrode under different stress times at gate bias stresses of (a) 10 V and (b) 20 V

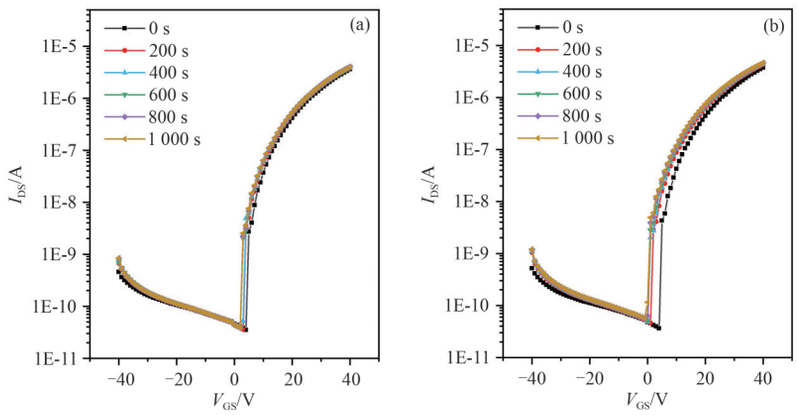


图 9　AZO 电极厚度为 165 nm 时 MgZnO/ZTO-TFT 在（a）－10 V、（b）－20 V 栅偏置压力下不同应力时间的转移特性曲线。

Fig. 9　Transfer characteristic curves of MgZnO/ZTO-TFT with 165 nm AZO electrode under different stress times at gate bias stresses of (a) －10 V and (b) －20 V

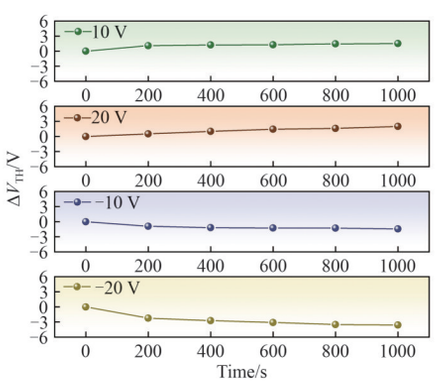


图 10　不同栅偏置压力下 MgZnO/ZTO-TFT 的测试结果

Fig. 10　Test results of MgZnO/ZTO-TFTs under different gate bias stresses

能会使薄膜介面处发生铟转移现象，即 In＋扩散到有源层表面。In^{+}的扩散增加了界面之间的缺陷态密度，在器件施加电流时造成自由电子的捕获，使沟道中载流子浓度发生变化，打破原先的平衡状态，造成更大的阈值电压偏移[27-28]。此外，在偏压条件下对器件施加漏源电流时，电流主要在 MgZnO/ZTO 界面进行流动，上层有源层 MgZnO 薄膜中由于 Mg^{2+}的引入使导带边缘能量上移，形成了更高的能量势垒，有效抑制了电子从沟道向栅介质层中界面陷阱态的隧穿或热发射，在电流传输过程中减少了对自由电子的捕获[29-31]。而 MgZnO/ZnO 异质结的形成可以在界面处产生更高的电子密度，从而通过极化效应形成更稳定的电子传输路径[32-34]。

表 3　不同 TFT 器件的偏压稳定性对比

Tab. 3　Comparison of bias stability for different TFT devices

有源层	电极	退火温度/℃	栅偏置压力/V	应力时间/s	ΔV_{TH}/V
a：In_2O_3/a：In_2O_3[22]	Al	280	30	1 000	＋19.8
a：In_2O_3/a：In_2O_3[22]	Al	280	－30	1 000	－12.5
IGZO[23]	ITO	350	20	1 500	＋5.23
nc-IGZO[24]	ITO	450	20	1 000	约＋3
MgZnO/ZTO	AZO	300	20	1 000	＋1.99
MgZnO/ZTO	AZO	300	－20	1 000	－3.62

4　结　　论

本文采用 300 ℃低温退火工艺，制备了不同 AZO 电极厚度的 MgZnO/ZTO-TFT 器件，系统研究了电极厚度对器件光电性能的影响。结果表明，AZO 电极厚度为 165 nm 时，薄膜透光率可达 93% 以上，满足透明器件的制备要求。经过表征测试，薄膜表面平整、氧空位浓度适中，可为电

荷注入与传输提供良好的传输路径。此时器件性能最优，场效应迁移率为0.482 $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$，电流开关比达$1.304\times10^7$。偏压稳定性测试显示，在栅极偏置压力为±20 V、应力时间1 000 s下制备的器件阈值电压漂移较小，稳定性显著优于传统ITO电极器件。综上，AZO电极厚度为165 nm时，低温退火条件下的MgZnO/ZTO-TFT能够兼顾优良的光电性能与偏压稳定性，为透明无铟TFT器件的制备提供了可行性方案。

参考文献：

[1] WAGER J F. Transparent electronics [J]. *Science*, 2003, 300(5623): 1245-1246.

[2] LEE S, JEON S, CHAJI R, *et al*. Transparent semiconducting oxide technology for touch free interactive flexible displays [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 103(4): 644-664.

[3] MEI Z K, DENG L A, HUANG B T, *et al*. Advances in organic thin-film transistor technology for flexible analog front ends in wearable electronics [J]. *IEEE Journal on Flexible Electronics*, 2024, 3(11): 508-521.

[4] WANG L, YANG Z L, LANG L, *et al*. Flexible multifunctional MXene/polyimide films with Janus structure for superior electromagnetic interference shielding [J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025, 8(1): 26.

[5] PARK J H, SEOK H J, JUNG S H, *et al*. Rapid thermal annealing effect of transparent ITO source and drain electrode for transparent thin film transistors [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(3): 3149-3158.

[6] PATEL J, SHARME R K, QUIJADA M A, *et al*. A review of transparent conducting films (TCFs): prospective ITO and AZO deposition methods and applications [J]. *Nanomaterials*, 2024, 14(24): 2013.

[7] SHOUKAT R, KHAN M I. Carbon nanotubes: a review on properties, synthesis methods and applications in micro and nanotechnology [J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27(12): 4183-4192.

[8] KOLAHDOUZ M, XU B Q, NASIRI A F, *et al*. Carbon-related materials: graphene and carbon nanotubes in semiconductor applications and design [J]. *Micromachines*, 2022, 13(8): 1257.

[9] GAN L, LIU Y, YANG X J, *et al*. Stability of silver nanowire transparent conductive film and strategies for improvement [J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2025, 50(1): 1-53.

[10] KURTARAN S. Al doped ZnO thin films obtained by spray pyrolysis technique: influence of different annealing time [J]. *Optical Materials*, 2021, 114: 110908.

[11] LI Z B, LI L B, ZHANG G Q, *et al*. AZO work function enhanced by oxygen plasma immersion ion implantation [J]. *Vacuum*, 2023, 212: 112038.

[12] SHEN J X, QIAN H Q, ZHANG Y, *et al*. Influence of oxygen vacancy on resistive switching property of Ag/Nb: $SrTiO_3$/Ti structure [J]. *Materials Technology*, 2013, 28(6): 375-379.

[13] NI Z, WANG H, HU H J, *et al*. Combined effects of oxygen vacancy and copper capping layer on infrared-transparent conductive properties of indium tin oxide films [J]. *Chinese Physics B*, 2025, 34(8): 088503.

[14] LEE N, LEE J, KIM H, *et al*. Correlation among process, microstructure/stoichiometry, and transport in spin-coated al-doped ZnO thin-film transistors subjected to annealing-induced electrical performance enhancement [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2026, 8(8): 3562-3570.

[15] TUN C J, SHEU J K, LEE M L, *et al*. Effects of thermal annealing on Al-doped ZnO films deposited on p-type gallium nitride [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2006, 153(4): G296-G298.

[16] JEONG J H, YOON S H, LEE S H, *et al*. Improved specific contact resistivity in amorphous IGZO transistors using an ALD-derived Al-doped ZnO interlayer [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2024, 45(5): 849-852.

[17] LI B C, HAN C Y, LAI P T, *et al*. Effects of source/drain-electrode material, thickness and fabrication method on the electrical performance of pentacene thin-film transistor [J]. *Thin Solid Films*, 2018, 667: 28-33.

[18] VINCI R P, ZIELINSKI E M, BRAVMAN J C. Thermal strain and stress in copper thin films [J]. *Thin Solid Films*, 1995, 262(1/2): 142-153.

[19] SHINZATO S, SUMOMOGI T, KOFUNE S, *et al*. Internal stress in sputter-deposited Al_2O_3 films [J]. *Thin Solid Films*, 1982, 97(4): 333-337.

[20] THORNTON J A, HOFFMAN D W. Stress-related effects in thin films [J]. *Thin Solid Films*, 1989, 171(1): 5-31.

[21] JOHNSON C A, RUUD J A, BRUCE R, *et al*. Relationships between residual stress, microstructure and mechanical properties of electron beam-physical vapor deposition thermal barrier coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1998, 108-109: 80-85.

[22] HAN C Z, WANG J J, LIU G X, *et al*. Performance improvement of thin-film transistors with In_2O_3 channel engineering [J]. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2022, 10(3): 660-665.

[23] 詹润泽，谢汉萍，董承远. 采用不同透明电极的非晶铟镓锌氧化物薄膜晶体管[J]. 液晶与显示，2013，28(1)：55-58.
ZHAN R Z, XIE H P, DONG C Y. Amorphous InGaZnO thin film transistors with different transparent electrodes [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1): 55-58. (in Chinese)

[24] KANG Y J, LEE W, KIM J, *et al*. Effects of crystalline structure of IGZO thin films on the electrical and photo-stability of metal-oxide thin-film transistors [J]. *Materials Research Bulletin*, 2021, 139: 111252.

[25] LIU H Y, CHEN H W, SONG C Y, *et al*. A comparative study of InSnZnO transparent thin-film transistors with AZO and GZO electrodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2024, 71(6): 3684-3690.

[26] ZOU X, FANG G J, WAN J W, *et al*. Enhanced performance of *a*-IGZO thin-film transistors by forming AZO/IGZO heterojunction source/drain contacts [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2011, 26(5): 055003.

[27] KANG J, MOON K J, LEE T I, *et al*. Migration of indium ions in amorphous indium-gallium-zinc-oxide thin film transistors [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(8): 3509-3512.

[28] LEE S, BIERIG B, PAINE D C. Amorphous structure and electrical performance of low-temperature annealed amorphous indium zinc oxide transparent thin film transistors [J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520(10): 3764-3768.

[29] TSAI Y S, CHEN J Z. Positive gate-bias temperature stability of RF-sputtered $Mg_{0.05}Zn_{0.95}O$ active-layer thin-film transistors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, 59(1): 151-158.

[30] KU C J, DUAN Z Q, REYES P I, *et al*. Effects of Mg on the electrical characteristics and thermal stability of $Mg_xZn_{1-x}O$ thin film transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(12): 123511.

[31] 王超，郝云鹏，郭亮，等. 不同退火氛围下MgZnO-TFT的制备及其性能[J]. 液晶与显示，2024，39(10)：1295-1303.
WANG C, HAO Y P, GUO L, *et al*. Effect of atmosphere dependent annealing on the preparation and properties of MgZnO thin-film transistors [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(10): 1295-1303. (in Chinese)

[32] LEE J H, JANG N W, YUN Y, *et al*. A study of electrical enhancement of polycrystalline MgZnO/ZnO bi-layer thin film transistors dependence on the thickness of ZnO layer [J]. *Current Applied Physics*, 2015, 15(9): 1010-1014.

[33] HAO Y P, WANG C, GUO L, *et al*. Fabrication and electrical characterization of MgZnO/ZTO thin-film transistors [J]. *Nanomaterials*, 2025, 15(23): 1809.

[34] 初学峰，胡小军，张祺，等. 氧化锌锡薄膜晶体管的制备与性能研究[J]. 液晶与显示，2024，39(1)：40-47.
CHU X F, HU X J, ZHANG Q, *et al*. Performances and preparation of zinc-tin oxide thin-film transistors [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(1): 40-47. (in Chinese)

作者简介：



郝云鹏，男，硕士，助教，2025年于吉林建筑大学获得硕士学位，主要从事氧化物半导体薄膜材料生长与性能的研究。E-mail：apeng0031@163.com



王　超，女，博士，教授，2019年于吉林大学获得博士学位，主要从事氧化物半导体薄膜材料生长与性能的研究。E-mail：girl.alice@foxmail.com