材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023063001

高性能 ZnSnO：Li/ZnSnO 双有源层 TFT 电学性能的研究

高瑞妍[1,2]，郭　亮[1,3*]，王　冲[1,2]，王　超[1,2]，
杨　帆[1,2]，初学峰[1,2]，迟耀丹[1,2]，杨小天[1,4]

（1. 吉林建筑大学 寒地建筑综合节能教育部重点实验室，长春 130118；2. 吉林建筑大学 电气与计算机学院，长春 130118；
3. 吉林建筑大学 基础科学系，长春 130118；4. 吉林师范大学，吉林 四平 136000）

摘　要： 双有源层以迁移率高、开关比高、大面积均匀性好等优点成为近年研究热点。采用射频磁控溅射方法，制备了 ZnSnO：Li/ZnSnO 薄膜晶体管（TFT），对其电学特性进行了测试，并研究了器件迁移率提高的原因及其内在的微观机制。研究发现，ZTO：Li/ZTO TFT 表现出了良好的电学特性，其场效应迁移为率为 13.98 $cm^2/(V\cdot s)$，亚阈值摆幅为 0.84 V/dec，开关比为 1.13×10^9。通过 XPS 对其薄膜进行分析发现，Li 的引入导致薄膜中氧和金属结合键的浓度增加，氧空位浓度减少，从而使得 TFT 的迁移率增大，开关比增大，亚阈值摆幅减小。

关键词： 薄膜晶体管；双有源层；Li 掺杂；锌锡氧化物

中图分类号： TN321.5　**文章编号：** 1001－5868(2023)06－0907－06

Study on the Electrical Properties of High-performance ZnSnO：Li/ZnSnO Dual Active Layer TFT

GAO Ruiyan[1,2], GUO Liang[1,3], WANG Chong[1,2], WANG Chao[1,2],
YANG Fan[1,2], CHU Xuefeng[1,2], CHI Yaodan[1,2], YANG Xiaotian[1,4]

(1. Key Lab. of Comprehensive Energy Conservation of Cold Land Buildings, Ministry of Education, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, CHN; 2. School of Electrical Engin. and Computer, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, CHN; 3. Dept. of Basic Science, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, CHN; 4. Jilin Normal University, Siping 136000, CHN)

Abstract: The dual active layer has become a research hotspot in recent years due to its high mobility, high switching ratio, and strong uniformity in large area. In this paper, ZnSnO：Li/ZnSnO thin-film transistors were fabricated by RF magnetron sputtering, and their electrical properties were tested, and the reasons for the increase of device mobility and its internal microscopic mechanism were studied. It is found that the ZTO：Li/ZTO TFT exhibits good electrical characteristics, with a field-effect migration rate of 13.98 $cm^2/(V\cdot s)$, a subthreshold swing of 0.84 V/dec, and a switching ratio of 1.13×10^9. Through the analysis of the thin film by XPS, it was found that the introduction of Li led to an increase in the concentration of oxygen-metal binding bonds and a decrease in the concentration of oxygen vacancies in the film, which in turn increased the mobility of TFT, increased the switching ratio, and decreased the subthreshold swing.

收稿日期：2023－06－30.

基金项目：吉林省科技厅项目（YDZJ202301ZYTS489）；吉林省自然科学基金项目（20200201177JC）.

* **通信作者：**高瑞妍，郭 亮　**E-mail:** grydd666888@163.com；guoliang@jlju.edu.cn

Key words: thin-film transistors; double active layers; Li doped; zinc-tin oxides

0 引言

非晶氧化物薄膜晶体管(Amorphous Oxide Thin Film Transistor,AOS TFT)具有迁移率高、电学均匀性好、透过性好和成本低等优势[1],广泛应用于透明显示、柔性显示和平板显示等领域。商用非晶铟镓锌氧薄膜晶体管(a-IGZO TFT)虽然实现了较高的迁移率,但是在温度、偏压等外界条件的影响下[2],会出现短沟道效应而导致器件性能退化的问题。同时铟元素(In)和镓元素(Ga)稀有性,也阻碍了其进一步的应用发展。为了追求更低的功耗和更高的分辨率,多元金属氧化物 TFT,如 InGaZnO(IGZO)[3],InZnSnO(IZTO)[4],ZnSnO(ZTO)[5],InZnO(IZO)[6] TFT 等成为了潜在的应用材料。其中 ZTO 作为一种无稀有金属的半导体材料因其稳定性更好、功耗更低等优异的性能,被认为是最有潜力的下一代商用材料[7-8]。

2022 年,Wang 等[9]采用射频磁控溅射法制备出迁移率为 12.64 $cm^2/(V \cdot s)$ 的高性能 ZTO TFT;同年,Pan 等[10]通过调节退火氛围来控制氧缺陷的数量,制备出迁移率为 19.8 $cm^2/(V \cdot s)$ 的高性能无铟 ZTO 薄膜晶体管。上述研究结果证明了 ZTO 优异的特性以及潜在应用价值。然而,ZTO 中缺少像 Ga 一样易与氧结合从而调控氧空位的载流子抑制剂[11],导致 ZTO TFT 器件的关态电流过高,开关特性严重劣化。为了解决上述难题,研究人员在不同掺杂元素(Al,Mg,Sn,Li)的研究中[12-15]发现,引入低浓度经济、无毒的 Li 既可以减少界面附近的氧空位[16],降低关态电流、又可以作为提供剂,且不会损害薄膜的质量[17-18],同时,Zn^{2+} 也可以在不造成晶格畸变[19-20]下被 Sn^{4+} 所取代。2020 年,Abliz 等[21]制备了不同浓度 Li 掺杂 ZnO 的薄膜晶体管,其饱和迁移率 μ_{sat} 高达 28.5 $cm^2/(V \cdot s)$,研究发现 Li 掺杂不仅可以提高载流子浓度,同时也可降低氧空位缺陷和界面缺陷密度。

此外,采用双有源层结构提升开关特性的方法也有报道。然而,关于引入 Li 的双有源层结构的研究较少。2018 年,北京交通大学的 Su 等[22]采用射频磁控溅射制备了非晶的 IZO∶Li/ZTO∶Li TFT,对 ZTO∶Li 厚度进行优化后,TFT 的 μ_{sat} 为 33.2 $cm^2/(V \cdot s)$,亚阈值摆幅 SS 为 0.6 V/dec,开关电流比 I_{on}/I_{off} 为 3.2×10^8。2020 年,Lee 等[23]采用 IGZO/ZTO 双层结构设计,使 TFT 的场效应迁移率达到 18.39 $cm^2/(V \cdot s)$。2022 年,山东大学 Yuan 等[24]制备了 a-IGZO/Ga_2O_3 薄膜晶体管,与单层的 TFT 相比,IGZO/Ga_2O_3 的迁移率约为 22.2 $cm^2/(V \cdot s)$,是基准 TFT(11.5 $cm^2/(V \cdot s)$)的 2 倍。研究表明 Li 可以利用空穴对自由电子的补偿作用使暗电流降低,掺杂后的 Li 有两种工作模式[25-26]:1)取代 Zn^{2+} 离子;2)Li 原子嵌入间隙位形成 Li^+,并贡献自由电子(e)。

本文采用磁控溅射工艺基于硅衬底,以 SiO_2 为绝缘层,在引入 Li 的基础上,制备 ZTO∶Li/ZTO 双有源层 TFT,并探究 ZTO∶Li 层对 ZTO∶Li/ZTO 薄膜性能以及 TFT 器件电学性能的影响,对比两组实验样品的迁移率、阈值电压、亚阈值摆幅和开关比等电学参数。

1 材料制备

双有源层薄膜晶体管采用 p^+-Si 作为衬底和栅(Gate,G)电极,285 nm 厚的 SiO_2 作为绝缘层。薄膜制备条件如下:压强为 8 mtorr,氩氧比为 90∶10,氧化物溅射功率为 100 W,制备 ZTO 薄膜时采用 100 W 的 ZnO 和 15 W 的 Sn 共同溅射 10 min。薄膜厚度由场发射扫描电子显微镜测得约为 82 nm。制备 ZTO∶Li/ZTO 双有源层薄膜时下层采用 100 W 的 LZO 与 15 W 的 Sn 共溅射 5 min,薄膜厚度约为 41 nm;上层采用 100 W 的 ZnO 和 15 W 的 Sn 共溅射 5 min,厚度约为 41 nm。

器件制备流程如下:首先依次使用无水丙酮、无水酒精、高纯水对衬底进行超声清洗;采用旋涂光刻胶方法进行预处理;并使用掩膜版对有源层进行图案化;随后采用射频磁控溅射(RF)法依次沉积有源层,然后退火、利用掩膜版进行二次套刻;最后使用电子束蒸发镀膜设备(EB)蒸发 Al 形成漏(Drain,D)极和源(Source,S)极,厚度为 50 nm,以此制备两组底栅顶接触型薄膜晶体管。器件结构示意图如图 1(a)所示,样品的沟道长度(L)和宽度(W)由所用掩膜版图形确定,分别为 10 和 300 μm。

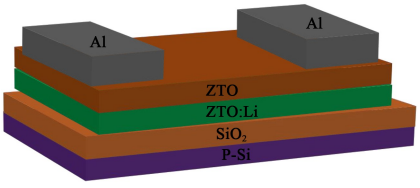
磁控溅射采用的是美国 Lesker 公司生产的 PVD75 型设备;电子束蒸镀采用的是中国台湾亮杰科技公司的 EB420 型设备;原子力显微镜(AFM)

采用牛津仪器公司的 MFP-3D 型设备，对薄膜表面形貌进行测试；X 射线衍射仪（X-ray diffraction，XRD）采用的是 D8 Discover 型设备；采用 X 射线光电子能谱仪（X-ray Photoelectron Spectroscopy，XPS）确认薄膜表面元素成分以及价态的分布；电学性能测试采用的是 Keysight 公司生产的 B1500A 型半导体参数仪及搭配的探针台。

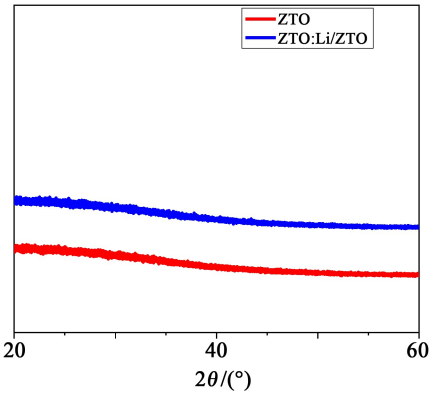
2　结果与分析

2.1　薄膜的形貌表征与分析

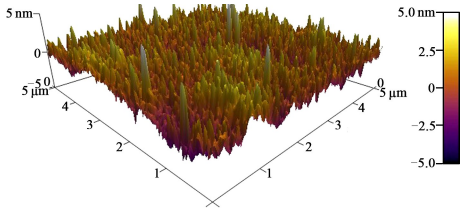
为了研究双有源层结构对薄膜内部结构的影响，对相应薄膜进行 XRD 测试，结果如图 1(b)所示，XRD 谱中无其他对应晶体的结晶衍射峰，由此可以判断所制备的 ZTO 和 ZTO：Li/ZTO 薄膜均为非晶结构，这表明本文所制备的薄膜作为沟道层适宜于研制具有良好均匀性的器件。为了研究所制备薄膜的形貌以及粗糙度，对其进行 AFM 测试，如图 1(c)和 1(d)所示，表面粗糙度分别为 0.987 和 1.050 nm，结果表明，具有双层结构的 ZTO：Li/ZTO 薄膜与原来的 ZTO 薄膜相比其表面粗糙度无明显变化。



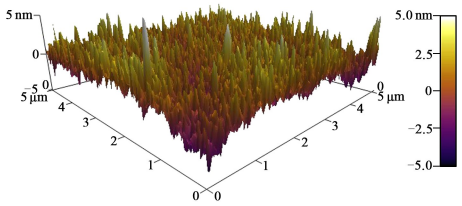
(a) ZTO：Li/ZTO 器件结构示意图



(b) XRD 图



(c) 单层 ZTO 的 AFM 图



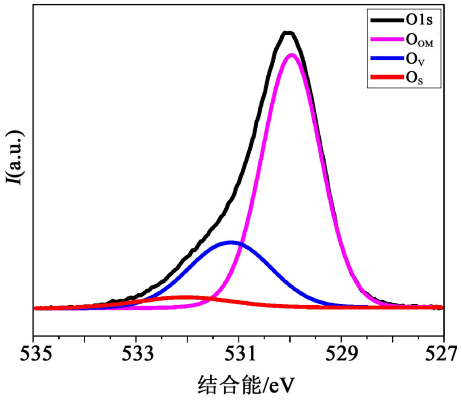
(d) 双层 ZTO：Li/ZTO 的 AFM 图

图 1　器件结构示意图、XRD 图，以及单有源层 ZTO 和双有源层(ZTO：Li/ZTO)的 AFM 图

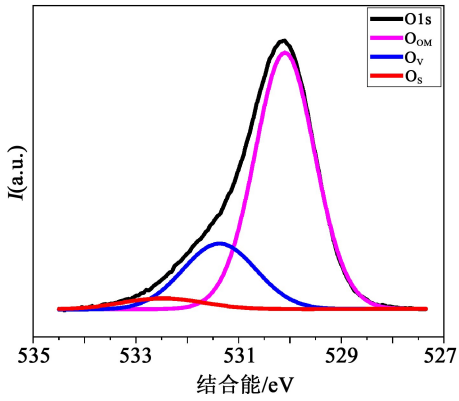
2.2　XPS 光电子能谱分析

图 2 所示为 ZTO 和 ZTO：Li/ZTO 薄膜中 O 元素进行 XPS 的测试结果，采用高斯-洛伦兹拟合法来卷积 XPS 光谱，将其分解成三个亚峰。这三个亚峰的中心分别位于 530.15 eV(M-O)，531.5 eV(V_O)和 532.2 eV(—OH)，分别代表 OⅠ，OⅡ和 OⅢ。其中，以 530.15 eV 为中心的低结合能表示 O^{2-} 离子被 Zn(或 Sn)原子及其周围的氧所取代(即 O_{OM})；以 531.5 eV 为中心的 OⅡ峰代表氧空位(即 O_v)[27-28]；以 532.2 eV 为中心的高结合能峰表示 ZTO 表面存在松散结合的氧或者是带有化学吸附的氧(即 O_S)，如—OH、H_2O 或者 $—CO_3$[29-30]。

通过分析可知，与 ZTO 薄膜相比，ZTO：Li/ZTO 薄膜中 V_{OM} 的含量逐渐增多(O_{OM} 含量从 70.34%增加到 73.23%)，而 V_O 含量逐渐减少(O_V 含量从 24.94%降至 22.35%)，游离氧也逐渐减少(O_S 含量从 4.72%下降到 4.42%)。原因是在制备双有源层结构 ZTO：Li/ZTO 薄膜时，先沉积掺 Li 的 ZTO 薄膜。该薄膜中，Li 与 O 的结合能较高，因此 Li 作为氧空位抑制剂可以抑制 ZTO 薄膜中的氧空位的形成，同时增加薄膜接触面内 M-O 的浓度。由此可见，调整薄膜内部氧空位有助于改善薄膜通道中电子的传导路径，提高双有源层器件的迁移率[31]。



(a) ZTO

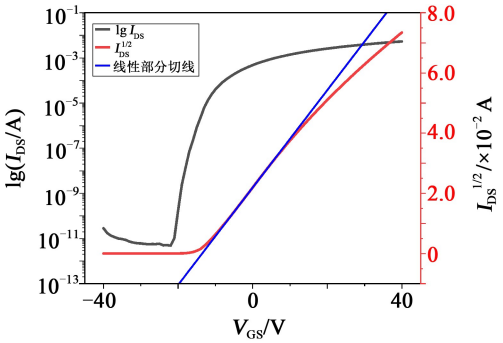


(b) ZTO∶Li/ZTO

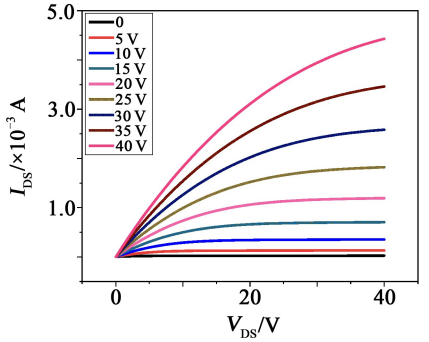
图 2 ZTO 和 ZTO∶Li/ZTO 薄膜 O 1s 的 XPS 图

2.3 ZTO TFT,ZTO∶Li/ZTO TFT 电学性能分析

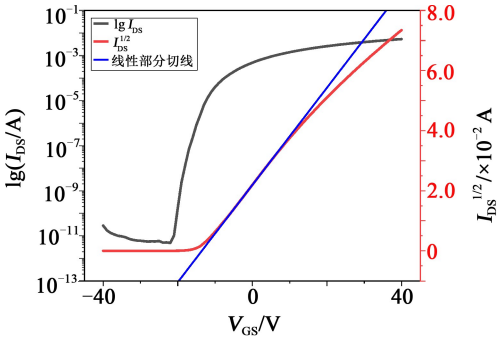
为了研究 TFT 的电学性能,使用半导体参数仪对 ZTO TFT 和 ZTO∶Li/ZTO TFT 进行测试,器件的特性曲线如图3所示,其中图3(a),(b)分别



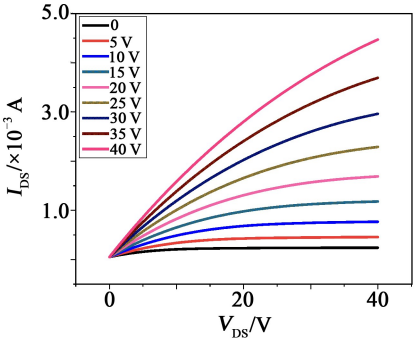
(a) 单层 ZTO 的转移特性曲线图



(b) 单层 ZTO 的输出特性曲线图



(c) ZTO∶Li/ZTO 的转移特性曲线图



(d) ZTO∶Li/ZTO 的输出特性曲线图

图 3 ZTO TFT 和 ZTO∶Li/ZTO TFT 的转移和输出特性曲线

为 ZTOTFT 的转移特性和输出特性曲线;图 3(c)和(d)分别为 ZTO∶Li/ZTO TFT 的转移特性和输出特性曲线。转移特性曲线是在源漏电压(V_{DS})为 40 V、栅极和源极之间的电压(V_{GS})为 −40～40 V 时进行扫描并绘制的曲线图;输出特性曲线是以源极至漏极电流(I_{DS})相对于源极至漏极电压(V_{DS})的关系绘制的曲线图,范围为 0～40 V,步长为 5 V。

从图 3(b)可知,当 V_{DS} 接近 0V 时,漏极电流(I_{DS})未出现拥堵现象,这表明 ZTO 有源层和 Al 源漏电极之间有良好的欧姆接触特性。当施加正向 V_{GS} 时,随着 V_{DS} 从 0 V 增加到 40 V,I_{DS} 显著增加,呈现出良好的饱和趋势,表明该器件具有较大的驱动电流。此外,当该器件的 V_{DS} 和 V_{GS} 均为 40 V 时,器件达到饱和状态,此时饱和的漏电流为 3.96×10^{-3} A。同理,ZTO∶Li/ZTO TFT 的饱和漏电流为 5.4×10^{-3} A。

由图 3(a)、(c)中传输曲线的线性部分,经过式(1),(2)和(3)计算,得到切线斜率、$(I_{DS})_{max}$ 和 $(I_{DS})_{min}$:

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

$$I_{ON}/I_{OFF}=\frac{(I_{DS})_{max}}{(I_{DS})_{min}} \tag{2}$$

$$SS=\frac{dV_{GS}}{d(\log I_{DS})} \tag{3}$$

式中,C_i 是栅极绝缘单位面积电容(1.25×10^{-8}),W 是沟道宽度(300 μm),L 是长度(10 μm),V_{GS} 表示施加在栅极上的电压,I_{DS} 是漏电流。由式(1)结合器件的转移特性曲线图可以作出 $I_{DS}^{1/2}$-V_{GS} 曲线,由切线斜率结合式(1),可以计算出 ZTO∶Li/ZTO TFT 的迁移率为 13.98 $cm^2/(V\cdot s)$,迁移率越高

越适合于高清晰度和高分辨率的显示器。Li 元素能通过对自由电子进行受体空穴补偿，以减小暗电流[32]，从而降低关态电流，并获得更高的开关比。更低的亚阈值摆幅为 0.84，较小的 SS 值可以提高系统的速度并降低功耗[33]。通过进行线性拟合和使用公式计算，得到饱和迁移率（μ_{sat}）、阈值电压（V_{th}）和电流开关比，数值列于表 1。

表 1　ZTO 和双层 ZTO：Li/ZTO TFT 的迁移率、阈值电压、亚阈值摆幅和开关比

TFT	μ_{sat}/(cm^2/(V·s))	V_{th}/V	SS(V/dec)	I_{on}/I_{off}	I_{on}/A	I_{off}/A
ZTO	12.08	−8.13	0.91	7.14×10^{8}	3.96×10^{-3}	5.55×10^{-12}
ZTO：Li/ZTO	13.98	−13.54	0.84	1.13×10^{9}	5.4×10^{-3}	4.8×10^{-12}

计算结果显示，ZTO TFT 和双层 ZTO：Li/ZTO TFT 的电学性能如表 1 所示。相比于 ZTO TFT，ZTO：Li/ZTO TFT 具有更高的迁移率，更低的亚阈值摆幅，开态电流从 3.96×10^{-3} A 增加到 5.4×10^{-3} A，关态电流从 5.55×10^{-12} A 下降到 4.8×10^{-12} A，从而提高开关比。制备的双层 ZTO：Li/ZTO TFT 比单层 ZTO TFT 具有更好的电学性能，包括较小的 SS 和降低的功耗，在一定程度上解决了 ZTO TFT 关态电流过高的问题，并实现了良好的开关特性。通过上述分析，我们认为引入掺 Li 的 ZTO：Li 作为下层，有助于降低薄膜内部的氧空位等缺陷，并提高金属与氧结合键的浓度，从而改善了薄膜通道中电子的传导路径，是以器件的迁移率提高。此外，将具有高导电性的 ZTO：Li 作为下层，用低载流子浓度的 ZTO 作为上层，利用下层对上层进行调控，能够制备出具有高迁移率、低关态电流和高开关比的 TFT 器件。这种新型的双层结构为提升 TFT 的性能提供了新的途径。

3　结论

通过溅射法制备了 ZTO 和 ZTO：Li/ZTO 薄膜及器件，利用双有源层结构来提升 TFT 的迁移率。实验结果显示 ZTO TFT 的迁移率为 12.08 cm^2/(V·s)，阈值电压为 −8.13 V，亚阈值摆幅为 0.91 V/dec，开关比为 7.14×10^{8}。综合来看，具有双有源层的 ZTO：Li/ZTO TFT，迁移率提升至 13.98 cm^2/(V·s)，SS 为 0.84 V/dec，开关比提升至 1.13×10^{9}，表现出更优越的性能。通过对工作机理的分析，发现 Li 具有低标准电极电位值（−3.04 V），且与氧离子的结合能较高，有助于降低薄膜中与氧空位相关的缺陷。此外，Li 还能够最大程度地积累电荷并减少散射，从而提升器件的迁移率。

参考文献：

[1] Fortunato E, Barquinha P, Martins R. Oxide semiconductor thin film transistors: A review of recent advances[J]. Adv. Mater., 2012, 24(22): 2945-2986.

[2] Park J S, Maeng W J, Kim H S, et al. Review of recent developments in amorphous oxide semiconductor thin-film transistor devices[J]. Thin Solid Films, 2012, 520(6): 1679-1693.

[3] Zan H W, Yeh C C, Meng H F, et al. Achieving high field-effect-mobility in amorphous indium-gallium-zinc oxide by capping a strong reduction layer[J]. Adv. Mater., 2012, 24: 3509-3514.

[4] Su J, Wang Y, Ma Y, et al. Preparation and electrical characteristics of N-doped In-Zn-Sn-O thin film transistors by radio frequency magnetron sputtering[J]. J. Alloys Compd., 2018, 750: 1003-1006.

[5] Dai S, Wang T, Li R, et al. Preparation and effects of post-annealing temperature on the electrical characteristics of Li-N co-doped ZnSnO thin film transistors[J]. Ceram. Int., 2017, 43: 4926-4929.

[6] Peng Y, Wang H, Zhang W, et al. Fabrication and electrical characterization of InZnO：N thin film transistors prepared by radio frequency magnetron sputtering[J]. J. Electron. Mater., 2016, 45: 3340-3342.

[7] Raj R, Gupta H, Purohit L P. ZTO transparent conducting thin films for optoelectronic applications[J]. Bulletin of Materials Science, 2021, 44(2): 165.

[8] Yu S, Xu W, Zhu H, et al. Effect of sputtering power on structure and properties of ZTO films[J]. J. of Alloys and Compounds, 2021, 883: 160622.

[9] 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.

[10] Pan W, Zhou X, Li Y, et al. High performance of ZnSnO thin-film transistors engineered by oxygen defect modulation[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2022, 151: 106998.

[11] Feng J, Jeon S H, Park J, et al. Improvement in switching characteristics and bias stability of solution-processed zinc-tin oxide thin film transistors via simple low-pressure thermal annealing treatment[J]. Nanomaterials, 2023, 13(11): 1722.

[12] Shewale P S, Lee S H, Yu Y S. Effects of annealing temperature of spin-coated ZnO seed-layer on UV photo-sensing properties of PLD grown ZnO：Mg thin films[J]. J. Alloys Compd., 2019, 774: 461-470.

[13] Tang J F, Lu Y M, Chu S Y. The growth of AZO

nanostructures with high doping concentration using vertical reaction layer synthesizing method and their applications[J]. Sensors and Actuators B: Chem., 2016, 225: 327-333.

[14] Shewale P S, Yu Y S. UV photodetection properties of pulsed laser deposited Cu-doped ZnO thin film[J]. Ceram. Int., 2017, 43: 4175-4182.

[15] Shewale P S, Yu Y S. H_2S gas sensing properties of undoped and Ti doped ZnO thin films deposited by chemical spray pyrolysis[J]. J. Alloys Compd., 2016, 684: 428-437.

[16] Bang K, Son G C, Son M, et al. Effects of Li doping on the structural and electrical properties of solution-processed ZnO films for high-performance thin-film transistors[J]. J. Alloys Compd., 2018, 739: 41-46.

[17] Rahman M A, Phillips M R, Ton-That C. Efficient multi-coloured Li-doped ZnO thin films fabricated by spray pyrolysis [J]. J. Alloys Compd., 2017, 691: 339-342.

[18] Salah M, Azizi S, Boukhachem A, et al. Structural, morphological, optical and photodetector properties of sprayed Li-doped ZnO thin films[J]. J. Mater. Sci., 2017, 52: 10439-10454.

[19] Supatutkul C, Pramchu S, Jaroenjittichai A P, et al. Density functional theory investigation of surface defects in Sn-doped ZnO [J]. Surf. Coat. Technol., 2016, 298: 53-57.

[20] Özgür M, Pat S, Mohammadigharehbagh R, et al. Sn doped ZnO thin film deposition using thermionic vacuum arc technique [J]. J. Alloy. Compd., 2019, 774: 1017-1023.

[21] Abliz A, Wan D, Duan H, et al. Low-frequency noise in high performance and stability of Li-doped ZnO thin-film transistors [J]. J. of Phys. D: Appl. Phys., 2020, 53(41): 415110.

[22] Su J, Wang Q, Ma Y, et al. Amorphous InZnO：Li/ZnSnO：Li dual-active-layer thin film transistors [J]. Materials Research Bulletin, 2019, 111: 165-169.

[23] Lee H, Lee S, Kim Y, et al. Improvement of stability and performance of amorphous indium gallium zinc oxide thin film transistor by zinc-tin-oxide spray coating[J]. IEEE Electron Device Lett., 2020, 41(10): 1520-1523.

[24] Ji X, Yuan Y, Yin X, et al. High-performance thin-film transistors with sputtered IGZO/Ga_2O_3 heterojunction[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2022, 69(12): 6783-6788.

[25] Bang K, Son G C, Son M, et al. Effects of Li doping on the structural and electrical properties of solution-processed ZnO films for high-performance thin-film transistors[J]. J. Alloys Compd., 2018, 739: 41-46.

[26] Lee W, Leem J Y. Ultraviolet photoresponse properties of Li-doped ZnO thin films prepared by sol-gel spin-coating method[J]. J. Nanosci. Nanotechnol., 2017, 17: 5697-5700.

[27] Ahn C H, Yun M G, Lee S Y, et al. Enhancement of electrical stability in oxide thin-film transistors using multilayer channels grown by atomic layer deposition[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2013, 61(1): 73-78.

[28] D'Arienzo M, Mostoni S, Crapanzano R, et al. Insight into the influence of ZnO defectivity on the catalytic generation of environmentally persistent free radicals in ZnO/SiO2 systems [J]. J. Phys. Chem. C, 2019, 123: 21651-21661.

[29] Drici A, Djeteli G, Tchangbedji G, et al. Structured ZnO thin films grown by chemical bath deposition for photovoltaic applications[J]. Phys. Status Solidi A, 2004, 201: 1528-1536.

[30] Hsieh P T, Chen Y C, Kao K S. Luminescence mechanism of ZnO thin film investigated by XPS measurement[J]. Appl. Phys. A: Solids Surf., 2007, 90: 317-321.

[31] Jeong J H, Park S, Kim B J, et al. Improving the visible-light photoresponse characteristics of a ZnO phototransistor via solution processable Li dopants[J]. J. of Materials Chemistry C, 2021, 9(30): 9650-9658.

[32] Zhu X, Xie Q, Tian H, et al. High photoresponse sensitivity of lithium-doped ZnO (LZO) thin films for weak ultraviolet signal photodetector[J]. J. of Alloys and Compounds, 2019, 805: 309-317.

[33] Yang W, Yang H, Su J, et al. Preparation and electrical characteristics of Li-N co-doped InZnAlO thin film transistors by radio frequency magnetron sputtering[J]. Vacuum, 2022, 205: 111419.

作者简介：

高瑞妍(1999—)，女，河北省邢台市人，硕士研究生，主要研究方向为半导体薄膜及器件；

郭　亮(1983—)，男，吉林省长春市人，博士，副教授，硕士生导师，主要研究方向为透明氧化物薄膜晶体管以及半导体紫外光电探测器。