

文章编号:1007-2780(2022)11-1439-07

溅射功率对钨掺杂 ZnO 薄膜晶体管性能的影响

李 慧¹, 杨小天^{2,3*}, 王艳杰^{1,2*}, 王 超^{1,2}, 杨 帆^{1,2}, 聂晓渊¹

(1. 吉林建筑大学 电气与计算机学院 吉林省建筑电气综合节能重点实验室,
吉林 长春 130118;
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. 吉林师范大学, 吉林 四平 136099)

摘要:为有效提高薄膜晶体管的电学和光学性能,本文采用射频磁控溅射法在 P 型硅衬底上沉积钨掺杂氧化锌薄膜(WZO),并制备成薄膜晶体管(TFT)器件,研究钨(W)的溅射功率对 WZO 薄膜晶体管电学和光学性能的影响,并对 WZO 薄膜进行表征。实验结果表明,W 的溅射功率会影响薄膜的结晶质量。随着 W 溅射功率的增加,薄膜结晶质量逐渐变好。达到某个值后继续增加 W 的溅射功率,薄膜结晶质量并没有很大的改善。本文中研究的 WZO 薄膜均在(002)晶面择优生长,且当 W 的溅射功率为 2 W 时,WZO 薄膜晶体管综合性能最好,开关比达到 5.24×10^5 ,阈值电压为 16.89 V,在 400~1 400 nm 波段平均透过率达到 90%。

关键词:薄膜晶体管;氧化锌钨薄膜;钨的溅射功率

中图分类号: TN321⁺.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2022-0180

Effect of sputtering power on properties of W-doped ZnO thin film transistors

LI Hui¹, YANG Xiao-tian^{2,3*}, WANG Yan-jie^{1,2*}, WANG Chao^{1,2}, YANG Fan^{1,2}, NIE Xiao-yuan¹

(1. Jilin Provincial Key Laboratory of Architectural Electricity & Comprehensive Energy Saving,
School of Electrical and Computer Science, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China;
2. Key Laboratory for Comprehensive Energy Saving of Cold Regions Architecture of
Ministry of Education, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China;
3. Jilin Normal University, Siping 136099, China)

Abstract: In order to improve the electrical and optical properties of thin film transistors (TFTs), the tungsten-doped ZnO thin films (WZO) were deposited on p-type silicon substrates by RF magnetron

收稿日期: 2022-05-31; **修订日期:** 2022-07-12.

基金项目: 吉林省科技发展计划 (No. YDZJ202201ZYTS430, No. 20200201177JC); 吉林省教育厅科学技术研究项目 (No. JJKH20210276KJ, No. JJKH20210277KJ); 吉林省科技计划 (No. 20210203021SF, No. 2022-KL-09)

Supported by Jilin Province Science and Technology Development Plan Project (No. YDZJ202201ZYTS430, No. 20200201177JC); Science and Technology Research Project of Jilin Education Department (No. JJKH20210276KJ, No. JJKH20210277KJ); Science and Technology Program of Jilin Province (No. 20210203021SF, No. 2022-KL-09)

*通信联系人, E-mail: hanyxt@163.com; wangyanjie@jlju.edu.cn

sputtering, and the thin film transistors (TFTs) were fabricated. The effects of sputtering power of tungsten (W) on the electrical and optical properties of WZO thin film transistors were investigated. The results show that the sputtering power of W affects the crystallization quality of the films. With the increase of the sputtering power of W, the crystalline quality of the films is gradually improved, and when the sputtering power of W reaches a certain value, the crystalline quality of the films is not greatly improved. The WZO films studied in this paper were grown on (002) crystal plane. When the sputtering power of W is 2 W, the comprehensive properties of WZO thin film transistors are the best, the switching ratio is 5.24×10^5 , the threshold voltage is 16.89 V, and the average transmissivity is 90% between 400 nm and 1 400 nm.

Key words: thin film transistor; zinc tungsten oxide thin film; tungsten doping content

1 引言

由于薄膜晶体管 (TFT) 在有源矩阵显示器、射频识别标签、大面积传感器和计算机^[1]等电子市场的广泛应用^[2],人们对 TFT 进行了大量的研究工作。与非晶硅和多晶硅薄膜晶体管相比,金属氧化物半导体具有低成本、高透明、高迁移率和大面积均匀性等优点,使其成为最有前途的薄膜晶体管沟道层材料之一^[3]。

氧化锌 (ZnO) 具有高的化学永久性、宽的直接带隙 ($E_g \sim 3.37$ eV)、低廉的价格、不具毒性、易光刻加工,且在 H 等离子体中稳定的优异性能^[4],因此以 ZnO 为代表的金属氧化物半导体作为 TFT 沟道层引起国内外学者的广泛关注。但是 ZnO 存在氧空位和锌间隙等本征缺陷^[5],严重影响了 TFT 的性能。为解决这一问题,研究者通常引入掺杂元素^[6]。常见的掺杂有铝 (Al)、铟 (In)^[7]、镓 (Ga)、锡 (Sn)^[8]、钼 (Mo) 和钨 (W) 等,其中 Al、In 和 Ga 均属于低价态掺杂^[9],Mo 和 W 属于高价态掺杂。高价态元素的掺杂可以在保证一定载流子的情况下,降低掺杂的含量,减少杂质散射,改善载流子迁移率,其中高价态元素钨 (W) 掺杂 ZnO (WZO) 薄膜受到了许多研究者的关注。但是关于 WZO 薄膜晶体管方面的报道还比较少,因此,以 WZO 薄膜为沟道层制备高性能的薄膜晶体管器件具有重要的研究意义。

本文通过使用射频磁控共溅射沉积 WZO 沟道层材料制备 TFT,改变沉积过程中 W 的溅射功率,探究 W 的溅射功率对 WZO 薄膜微观结构、表面形貌的影响,以及对 WZO-TFT 光学和电学性能的影响^[10],期望得到高开关比、高透过率和高迁移率的 WZO-TFT。

2 实验

本实验使用负胶工艺在 P 型 Si 衬底上用射频磁控共溅射法沉积 WZO 薄膜,通过电子束蒸发制备 WZO-TFT 器件。

2.1 WZO 薄膜的制备

将 $1.5 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$ 的 Si 衬底依次用丙酮、酒精和去离子水各超声清洗 15 min,用氮气吹干,通过旋涂、光刻和显影进行图案化处理。将纯度为 99.99% 的 ZnO 靶材和 99.99% 的 W 靶材放置于 PVD75 型号磁控溅射设备进行共溅射,溅射气体为氩气和氧气,其流量比为 95:5。ZnO 的溅射功率 150 W,沉积压强为 1.07 Pa,沉积时间为 15 min。在室温条件下,改变 W 的溅射功率,依次为 1, 2, 3, 4, 5 W,分别溅射镀膜得到相对应的 WZO 薄膜样品。

2.2 WZO-TFT 的制备

将制备的 WZO 薄膜依次用丙酮、酒精和去离子水各超声清洗 15 min,用氮气吹干,进行图案化处理,再采用电子束蒸发技术沉积 50 nm 的铝作为源、漏电极。电极生长结束后,将其依次放置于丙酮、酒精和去离子水中剥离 10 min。得到 WZO-TFT,如图 1 所示。

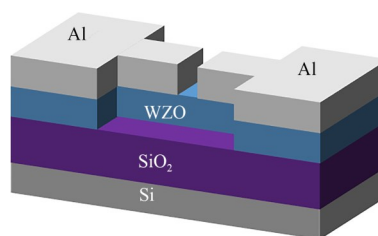


图1 WZO-TFT 结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of WZO-TFT

利用 D8 Discover 型 X 射线衍射 (XRD) 对薄膜的结构特性进行表征, JSM-7610F 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察薄膜表面形貌, UV-2600 型紫外可见分光光度计分析薄膜的光学性能, B1500 半导体参数分析仪分析器件的电学性能^[11]。

3 结果讨论

3.1 微观结构分析

表 1 是通过 Jade 软件进行估算得到的不同溅射功率下 WZO 薄膜的晶粒尺寸和半峰全宽 (FWHM)。从表 1 可以看出, 溅射功率为 2 W 时的薄膜结晶质量最好, 晶粒尺寸最大为 12.9 nm, 半峰全宽为 0.654°。

表 1 不同溅射功率下 WZO 薄膜的微观结构参数

Tab. 1 Microstructure parameters of WZO thin films under different sputtering power

W 溅射功率/W	半峰全宽/(°)	晶粒尺寸/nm
1	0.693	12.1
2	0.654	12.9
3	0.709	11.9
4	0.813	10.3
5	0.890	9.4

图 2 为不同溅射功率下制备的 WZO 薄膜的 XRD 图谱, 所有的 WZO 薄膜有明显的 (002) 衍射峰, 这意味着其晶体结构为六角结构, c 轴垂直于衬底^[12]。从图 2 可以发现, 衍射峰基本都在 34°~35° 之间的位置^[13], 非常接近于 34.29°, 此外没有其他的衍射峰, 这个标准的 ZnO 晶体峰表明 W

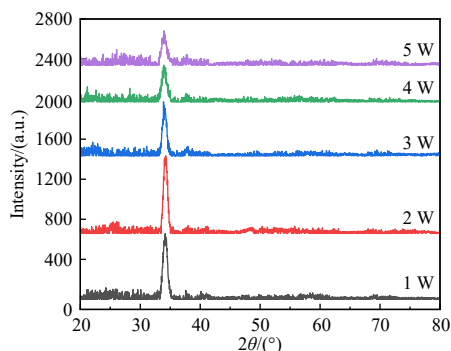


图 2 不同溅射功率下 WZO 薄膜的 XRD 图

Fig. 2 XRD patterns of WZO thin films under different sputtering power

取代了六方结构中的 Zn^[14]。随着溅射功率的增大, (002) 峰的强度先增大后减小, 半峰全宽先减小后增大。这是因为溅射功率增加, 溅射的粒子能量变大, 沉积在衬底时会有较强的扩散能力, 有利于 WZO 薄膜晶粒的生长。但是随着溅射功率的持续增大, W 靶材溅射出的粒子增多, 到达衬底时还没来得及扩散到合适的位置就被后到达的粒子所覆盖, 破坏了已经沉积的 WZO 薄膜, 影响晶粒的生长, 导致薄膜结晶度变差。

3.2 表面形貌分析

图 3 为不同溅射功率下制备的 WZO 薄膜的 SEM 显微图, 放大倍数为 100 000 倍。从图 3 可以看出, 当溅射功率为 1 W 时, WZO 薄膜晶粒致密均匀, 此时溅射功率小, 薄膜的生长速度慢, 溅射到衬底上的 WZO 粒子有充分的时间扩散到合适的位置; 随着溅射功率的增大, 粒子的能量增大, 扩散能力增强, 使得 WZO 薄膜的晶粒尺寸增大, 表面更加平整均匀; 当 W 的溅射功率进一步增大时, 溅射粒子的平均自由程减小, 导致溅射粒子损失了较多的能量, 溅射的粒子会破坏已经沉积的 WZO 薄膜, WZO 薄膜的表面缺陷增多, 晶粒尺寸减小。

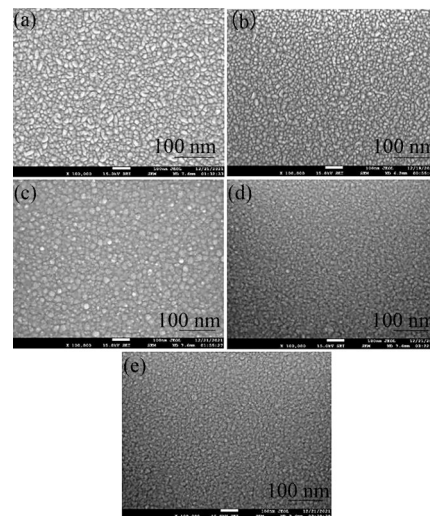


图 3 不同溅射功率下 WZO 薄膜的 SEM 图。(a) 1 W; (b) 2 W; (c) 3 W; (d) 4 W; (e) 5 W。

Fig. 3 SEM images of WZO films under different sputtering power. (a) 1 W; (b) 2 W; (c) 3 W; (d) 4 W; (e) 5 W.

3.3 WZO-TFT 器件分析

图 4 为不同溅射功率下制备的 WZO-TFT 的输

出特性曲线和转移特性曲线。从图 4 可以看出,随着栅压 V_G 增大,源漏电流先增加后趋向于饱和,说明该器件是 N 沟道场效应晶体管,并且工作在增强型模式下。在源漏电压 V_D 较高时出现饱和区,意味着器件具有夹断特性;在源漏电压较低时存在线性区,说明器件有良好的欧姆接触。当 W 的溅射功率为 2 W 时,电流 I_D 是 $6.65 \mu\text{A}$,器

件的输出特性最好。当溅射功率为 5 W 时,电流 I_D 是 7.21 nA,器件的输出特性最差。图 4(f) 为漏电压 $V_D=20 \text{ V}$ 时不同溅射功率下的 WZO-TFT 的转移特性曲线,可以看出当溅射功率为 2 W 时,开关比最大,开态电流最大为 $9.05 \times 10^{-6} \text{ A}$ 。随着溅射功率的增大,器件的开关比减小。

表 2 为 WZO-TFT 的电学性能参数,可以发

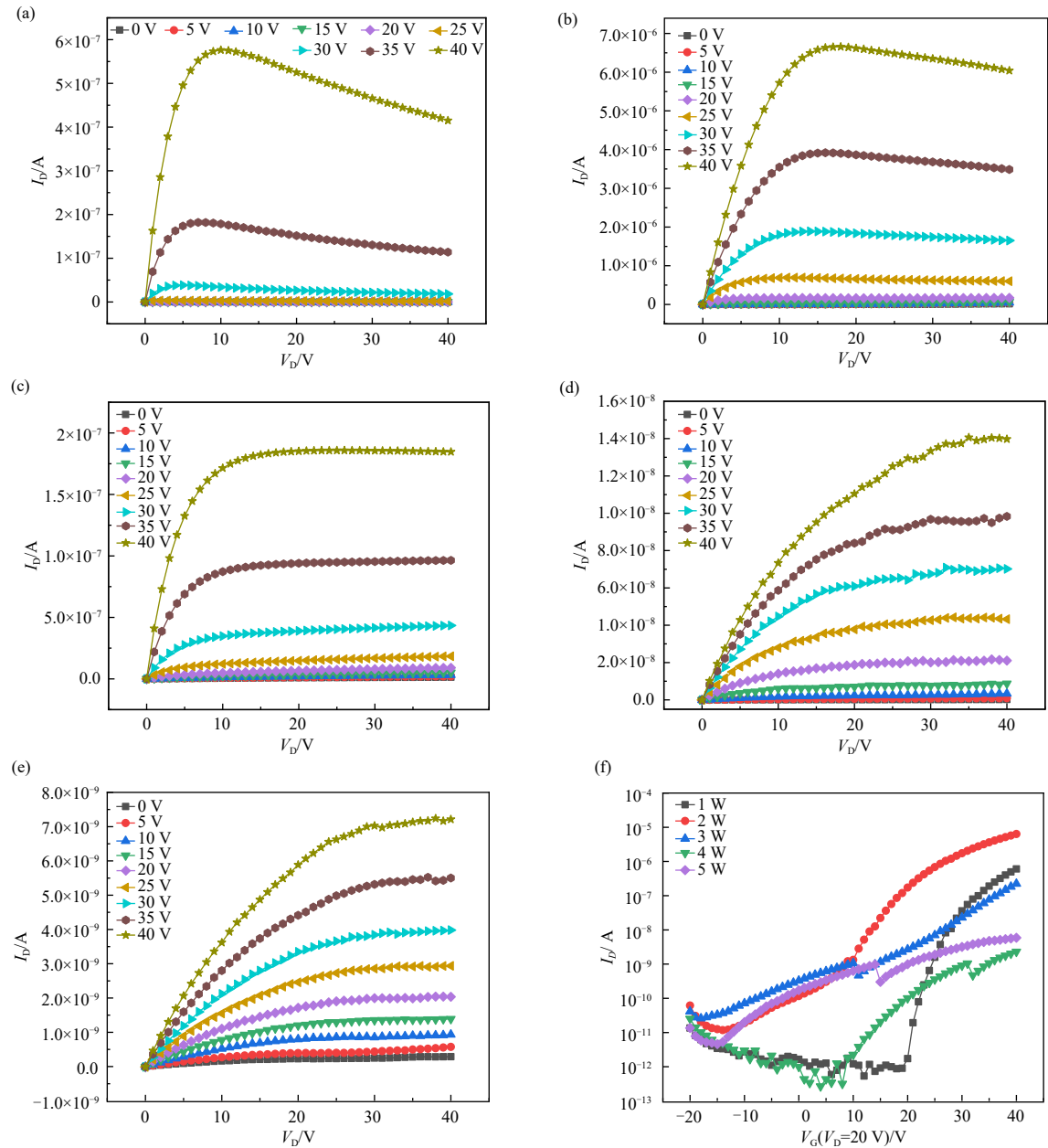


图 4 不同溅射功率下 WZO-TFT 的输出特性曲线和转移特性曲线。(a) 1 W 下的输出特性曲线; (b) 2 W 下的输出特性曲线; (c) 3 W 下的输出特性曲线; (d) 4 W 下的输出特性曲线; (e) 5 W 下的输出特性曲线; (f) 转移特性曲线。

Fig. 4 Output characteristic curves and transfer characteristic curves of WZO-TFT under different sputtering power. (a) Output curves at 1 W; (b) Output curves at 2 W; (c) Output curves at 3 W; (d) Output curves at 4 W; (e) Output curves at 5 W; (f) Transfer characteristic curves of WZO-TFT.

现当溅射功率增加到 2 W 时,器件的开关比为 5.24×10^5 ,载流子迁移率从 $0.041 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 增加到 $0.157 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,阈值电压降低为 16.89 V。随着溅射功率进一步增加,器件开关比和载流子迁移率逐渐降低,在溅射功率为 5 W 时,载流子迁移率最小。这主要是由于溅射功率增加,薄膜厚度增大,缺陷增多,载流子运动过程中会发生散射现象,导致载流子迁移率降低,器件的性能变差。

表 2 W 的不同溅射功率制备的 WZO-TFT 性能参数
Tab. 2 WZO-TFT performance parameters prepared by W under different sputtering power

溅射功率/W	阈值电压/V	开关比	迁移率/ ($\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	28.03	1.03×10^5	0.041
2	16.89	5.24×10^5	0.157
3	24.70	1.61×10^4	0.011
4	24.12	2.26×10^4	0.000 12
5	5.20	1.05×10^3	

3.4 光学特性分析

图 5 显示的是在波长 200~1 400 nm 范围内 W 的不同溅射功率下制备的 WZO 薄膜的光学透射光谱。从图 5 可以看出,在 200~1 400 nm 波长范围内,沉积的 WZO 薄膜具有高的透过率,在可见光 400~600 nm 范围内的平均透过率超过 90%。随着溅射功率的增加,薄膜的透过率降低,主要是由于溅射功率增大,薄膜的厚度也增大,影响 WZO 薄膜的光透过率。此外,在红外区域^[15],WZO 薄膜的平均透过率在 80%

左右。薄膜的透过率有所下降并出现波动,主要是由于薄膜表面颗粒不均匀,界面反射效应引起干涉效应^[16]。

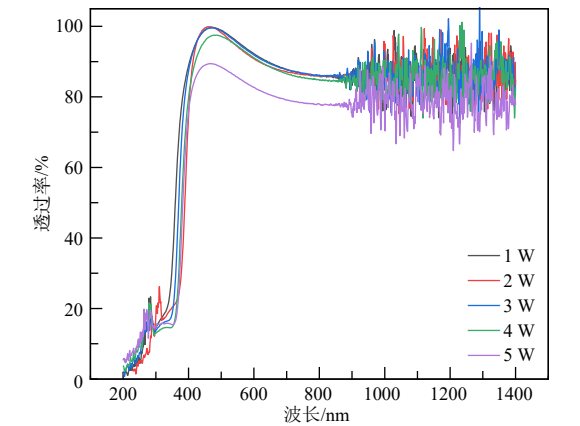


图 5 不同溅射功率下的 WZO 薄膜的光学透射率曲线
Fig. 5 Optical transmittance curves of WZO films under different sputtering power

4 结 论

本文采用射频磁控溅射法在 P 型 Si 衬底上制备了 W 掺杂 ZnO 薄膜晶体管,研究 W 的溅射功率对 WZO 薄膜晶体管电学和光学性能的影响,并对 WZO 薄膜进行表征。结果表明,W 的溅射功率为 2 W 时,器件的综合性能最佳,电流开关比达到 10^5 ,阈值电压 16.89 V,载流子迁移率为 $0.157 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,薄膜在可见光波长下的平均透过率 90% 左右,且薄膜的结晶度较好,表面更加致密平整。

参 考 文 献:

[1] 张文通,高晓红. 退火气氛对 ZnO 薄膜晶体管电学稳定性的影响[J]. 吉林建筑大学学报,2019,36(5):81-86.
ZHANG W T, GAO X H. Effect of rapid annealing gas atmosphere on hysteretic stability of ZnO thin film transistors [J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2019, 36(5): 81-86. (in Chinese)

[2] 邹呈,高延子,于美娜,等. 液晶/高分子复合材料及其在反式电控调光膜中的应用研究进展[J]. 应用化学,2021, 38(10):1213-1225.
ZOU Z, GAO Y Z, YU M N, *et al.* Recent advances in liquid crystal/polymer composites and their applications in reverse-mode electrically switchable light-transmittance controllable films [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1213-1225. (in Chinese)

[3] 龙腾. 金属氧化物薄膜晶体管稳定性的研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
LONG T. Study on stability of metal-oxide thin-film transistors [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)

[4] 张翅,陈新亮,王斐,等. 衬底温度对反应磁控溅射 W 掺杂 ZnO 薄膜的微观结构及光电性能的影响[J]. 物理学报,

- 2012, 61(23): 238101.
- ZHANG C, CHEN X L, WANG F, *et al.* Temperature-dependant growth and properties of W-doped ZnO thin films deposited by reactive magnetron sputtering [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 238101. (in Chinese)
- [5] 顾军渭, 程蓓, 杨旭彤. 液晶功能化氮化硼/液晶环氧树脂导热复合材料的制备[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1382-1388.
- GU J W, CHENG B, YANG X T. Liquid crystal functionalized boron nitride fillers/liquid crystal epoxy thermally conductive composites [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1382-1388. (in Chinese)
- [6] 崔永杰, 钟佳鑫, 廖勤凡, 等. 液晶分子在有机太阳能电池中的应用研究进展[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1326-1339.
- CUI Y J, ZHONG J X, LIAO X F, *et al.* Research progress of liquid crystal molecules for application in organic solar cells [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1326-1339. (in Chinese)
- [7] LEE Y J, LIM B W, KIM J H, *et al.* Thin transparent W-doped indium-zinc oxide (WIZO) layer on glass [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, 12(7): 5604-5608.
- [8] 杨祥. 溶液法制备掺钨氧化锌锡薄膜晶体管的研究[D]. 上海: 上海大学, 2019.
- YANG X. Study of tungsten doping zinc tin oxide thin film transistor via solution process [D]. Shanghai: Shanghai University, 2019. (in Chinese)
- [9] 陈雪莲, 陈新亮, 张存善, 等. 电子束沉积技术生长 WZO-TCO 薄膜及其特性研究[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(11): 1655-1659.
- CHEN X L, CHEN X L, ZHANG C S, *et al.* Research on WZO-TCO thin films grown *via* reactive electron beam vapor deposition [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(11): 1655-1659. (in Chinese)
- [10] 洪卫, 王立权, 林嘉平. 高分子多级微相结构与性能的研究进展[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1310-1325.
- HONG W, WANG L Q, LIN J P. Research progress of polymeric hierarchical microstructures and their properties [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1310-1325. (in Chinese)
- [11] 邓媛, 范遥见, 陶磊, 等. 含有偶氮苯液晶纳米粒子的合成及其超分子结构和光控取向行为[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1353-1361.
- DENG Y, FAN Y J, TAO L, *et al.* Liquid crystal nanoparticles containing azobenzene: synthesis, supramolecular structure and their applications in light-controlled orientation [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1353-1361. (in Chinese)
- [12] ZHANG C, CHEN X L, GENG X H, *et al.* Temperature-dependent growth and properties of W-doped ZnO thin films deposited by reactive magnetron sputtering [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 274: 371-377.
- [13] CHEN Y C, HU Y H, ZHANG X H, *et al.* Investigation of the properties of W-doped ZnO thin films with modulation power deposition by RF magnetron sputtering [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, 28(7): 5498-5503.
- [14] ZHANG H F, LIU H F, LEI C X, *et al.* Tungsten-doped ZnO transparent conducting films deposited by direct current magnetron sputtering [J]. *Vacuum*, 2010, 85(2): 184-186.
- [15] 胡文婷, 左波, 聂振洲, 等. 光驱动液晶弹性体扭曲环带致动器的有限元分析[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1397-1404.
- HU W T, ZUO B, NIE Z Z, *et al.* Finite element analysis of light-driven liquid crystal elastomer twisted toroidal ribbon soft actuators [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1397-1404. (in Chinese)
- [16] 郭胜利, 胡跃辉, 胡克艳, 等. 溅射压强对 W 掺杂 ZnO 薄膜结构及光学性能的影响[J]. *人工晶体学报*, 2016, 45(4): 1126-1130.
- GUO S L, HU Y H, HU K Y, *et al.* Effect of sputtering pressure on structure and the optical properties of WZO films deposited by RF magnetron sputtering [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2016, 45(4): 1126-1130. (in Chinese)

作者简介:



李 慧(1998—),女,河南南阳人,硕士研究生,2020年于周口师范学院获得学士学位,主要从事半导体材料与器件方面的研究。E-mail:Lh715611@163.com



王艳杰(1989—),女,吉林长春人,博士,讲师,2019年于吉林建筑大学获得博士学位,主要从事半导体材料与器件方面的研究。E-mail:wangyanjie@jlju.edu.cn



杨小天(1969—),男,吉林长春人,博士,教授,2004年于吉林大学获得博士学位,主要从事半导体材料与器件方面的研究。E-mail:hanyxt@163.com