

Study on the Photoelectric Properties of AZO and AZO/Cu/AZO Films

Yu Wang¹, Yunpeng Yu¹, Hanyan Zhang², Gang Lin², Congkang Xu³, Jiangyong Wang^{1*}

¹Department of Physics, Shantou University, Shantou Guangdong

²Shantou Goworld-Display Co., Ltd., Shantou Guangdong

³Wuxi Xumatic Co., Ltd., Wuxi Jiangsu

Email: 15ywang8@stu.edu.cn, wangjy@stu.edu.cn

Received: May 11th, 2018; accepted: May 25th, 2018; published: Jun. 6th, 2018

Abstract

In this paper, ZnO thin films doped Al (AZO) and AZO/Cu/AZO films were prepared on glass substrates by radio frequency magnetron sputtering. The photoelectric properties and compositions of films were characterized by four-point probe, spectrophotometer, XRD and GDOES. The preparation parameters and thickness values of Cu and AZO were adjusted in order to obtain the optimal performance of monolayer and composite layer films. AZO/Cu/AZO films with square resistance as low as 65 Ω/\square and transmittance up to 85% were obtained at room temperature.

Keywords

ZnO, Doping, Composite Films, Sputtering, Square Resistance, Transmittance

AZO单层和AZO/Cu/AZO复合层薄膜光电性能的研究

王宇¹, 余云鹏¹, 张汉焱², 林钢², 徐从康³, 王江涌^{1*}

¹汕头大学物理系, 广东 汕头

²汕头超声显示器有限公司, 广东 汕头

³无锡舒玛天科新能源技术有限公司, 江苏 无锡

Email: 15ywang8@stu.edu.cn, wangjy@stu.edu.cn

收稿日期: 2018年5月11日; 录用日期: 2018年5月25日; 发布日期: 2018年6月6日

*通讯作者。

文章引用: 王宇, 余云鹏, 张汉焱, 林钢, 徐从康, 王江涌. AZO 单层和 AZO/Cu/AZO 复合层薄膜光电性能的研究[J]. 材料科学, 2018, 8(6): 664-676. DOI: 10.12677/ms.2018.86079

摘要

本文采用射频磁控溅射法在玻璃衬底表面制备了Al掺杂的ZnO薄膜(AZO膜)及AZO/Cu/AZO复合层薄膜,使用四探针薄膜方阻仪、分光光度计、XRD和辉光放电发射光谱仪对薄膜光电性能及成分进行了表征分析。研究了制备工艺参数和各膜层厚度对单层AZO及AZO/Cu/AZO薄膜光电性能的影响,并在衬底室温条件下制备了方阻低至 $65 \Omega/\square$ 、平均透过率达85%的复合层薄膜。

关键词

ZnO, 掺杂, 复合层, 溅射, 方阻, 透过率

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

ZnO 作为一种禁带宽度达到 3.3 eV 的半导体材料,具有晶格结构、光学和电学方面的诸多优点[1]。Al 掺杂 ZnO 薄膜(AZO)具有优良光电性能,已在透明导电膜、太阳能电池等光电器件领域[2] [3]获得了广泛的应用。相较目前工业领域应用最为广泛的 Sn 掺杂 In_2O_3 (ITO)薄膜[4], AZO 薄膜由于原材料储量丰富、价格低廉且制备过程不会产生污染[5],有望在透明导电膜领域成为 ITO 薄膜的替代者。磁控溅射技术[6] [7]作为众多 AZO 薄膜制备技术中的一种,具有相对较高的均匀性和沉积速率,被认为是 AZO 薄膜较为理想的制备技术。磁控溅射制备 AZO 薄膜已有很多相关报道[8] [9] [10],但制备工艺参数如氧氩比、基底温度等对 AZO 薄膜光电特性以及微观机制影响总结的仍不够深入系统。且制备的单层 AZO 薄膜的受限于自身半导体导电机理[11],导电性远小于同等厚度金属层,但单一的金属薄膜由于光学透过率较差,难以作为透明导电薄膜应用。因此,怎样提升 AZO 薄膜的光电性能成为一大难题。本文首先研究了制备过程中工艺参数对 AZO 薄膜光电特性和微观机制的影响,进一步制备了一种结构为 AZO/Cu/AZO 的复合层导电薄膜,实验证明复合层薄膜突破了 AZO 薄膜半导体导电机理,导电性能也获得大大提升。

2. AZO 和 AZO/Cu/AZO 薄膜的制备和表征

实验采用射频磁控溅射法,利用 JGP500 型超高真空磁控溅射设备制备 AZO 单层和 AZO/Cu/AZO 复合层薄膜,溅射腔室真空度可达 10^{-4} Pa 量级。制备单层 AZO 薄膜使用陶瓷靶材的成分比例为 ZnO:Al = 98:2% wt。由于 Al_2O_3 掺杂[12] [13]的 AZO 靶材具有制膜工艺更为便捷的优点,AZO/Cu/AZO 复合层薄膜的 AZO 层制备选用 ZnO: Al_2O_3 = 98:2% wt 陶瓷靶材,Cu 层则使用纯度 99.999%的金属靶材。文中提到单层或复合层薄膜衬底均为 NEG OA-10G 型无碱玻璃(3 cm * 3 cm * 0.8 mm)。沉积薄膜前,洗洁精清洗的衬底先后置于分析纯丙酮和酒精中超声清洗 30 min,再置于超纯水中超声清洗 30 min,最后在镁光灯下干燥后备用。薄膜制备后退火处理使用的是 SK-1400 $^\circ\text{C}$ 型超高真空退火炉,仪器真空度可达 10^{-4} Pa 量级。

样品的分析及表征技术:辉光放电发射光谱仪(GDOES)剖析薄膜成分随深度的变化;RTS-9 型双电

测四探针测试仪测试薄膜方阻；Lambda 950 UV/VIS 型紫外可见近红外分光光度计测试薄膜光学通过率；D8 ADVANCE 型 X 射线衍射(XRD)进行物相分析和表征薄膜结构；Dektak XT 台阶仪测量薄膜厚度；

3. 实验结果

样品制备过程中，通过对工艺参数(溅射功率、溅射时间、溅射压强、氧氩比、衬底温度、退火温度)的调节，研究各个参数对薄膜光电性能的影响。文中提到的方阻(电阻率与薄膜厚度之比，单位： $K\Omega/\square$)为薄膜多点方阻均值；膜厚(单位：nm)为台阶仪测得薄膜多点膜厚均值；平均透过率指波长范围 390~780 nm 光(可见光)通过薄膜的透过率均值。

3.1. AZO 单层薄膜的光电性能

图 1 给出 GDOES 逐层剥蚀单层 AZO 薄膜(参数：功率 160 W，时间 20 min，压强 0.5 Pa，纯氩气起辉)，得到其成分随剥蚀时间(深度)的变化。易看出，Zn 元素信号强度保持稳定，直至 Ca 元素信号出现(剥蚀至玻璃衬底)。且观察到明显的 Al 信号，并与 Zn 元素信号变化保持一致。因此，实验证明制备的单层 AZO 薄膜有 Al 掺杂，且十分均匀。

3.1.1. 溅射功率的影响

图 2 给出了不同功率制备 AZO 薄膜的方阻、平均透过率膜厚和 XRD 图谱，AZO 样品的制备参数为：衬底温度室温，溅射压强 0.5 Pa，氩气流量 30 sccm，溅射时间 5 min，溅射功率 40/60/80/100/120/140/160 W。

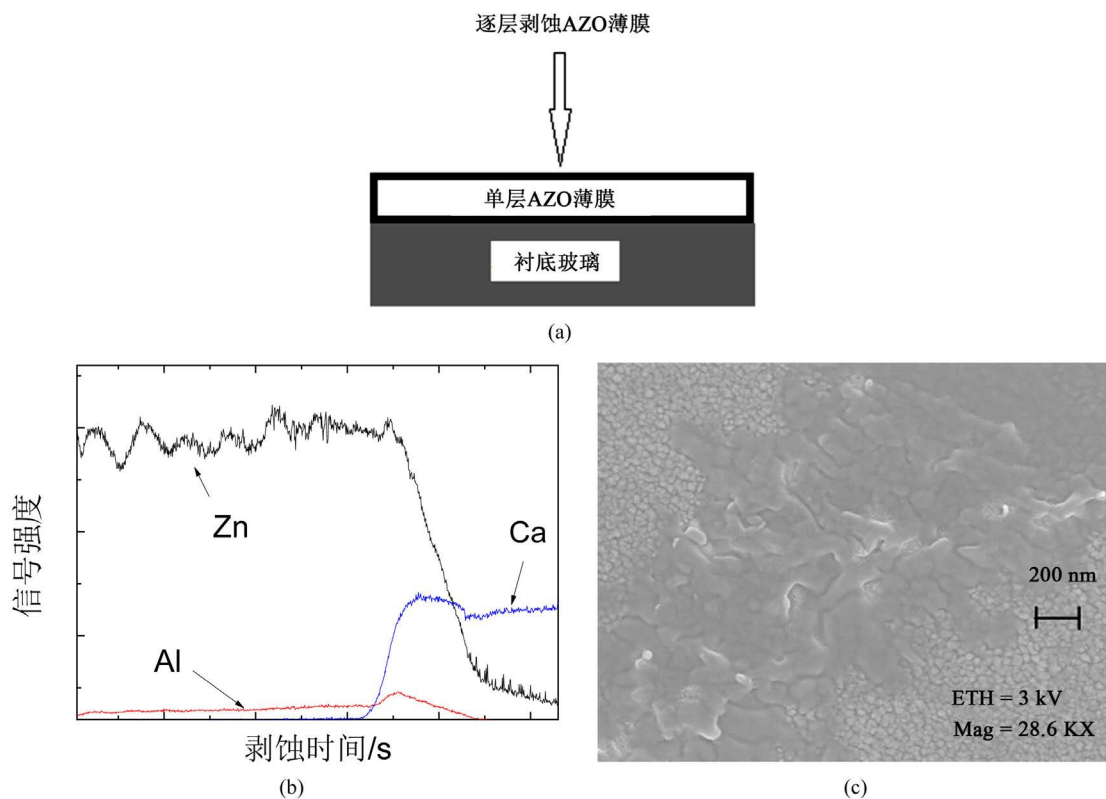


Figure 1. Layer structure of AZO thin film (a); Compositions of AZO thin film measured by GDOES (b); SEM image of AZO thin film (c)

图 1. AZO 单层薄膜结构(a); GDOES 测试单层 AZO 薄膜成分变化(b); SEM 测得 AZO 单层薄膜表面形貌(c)

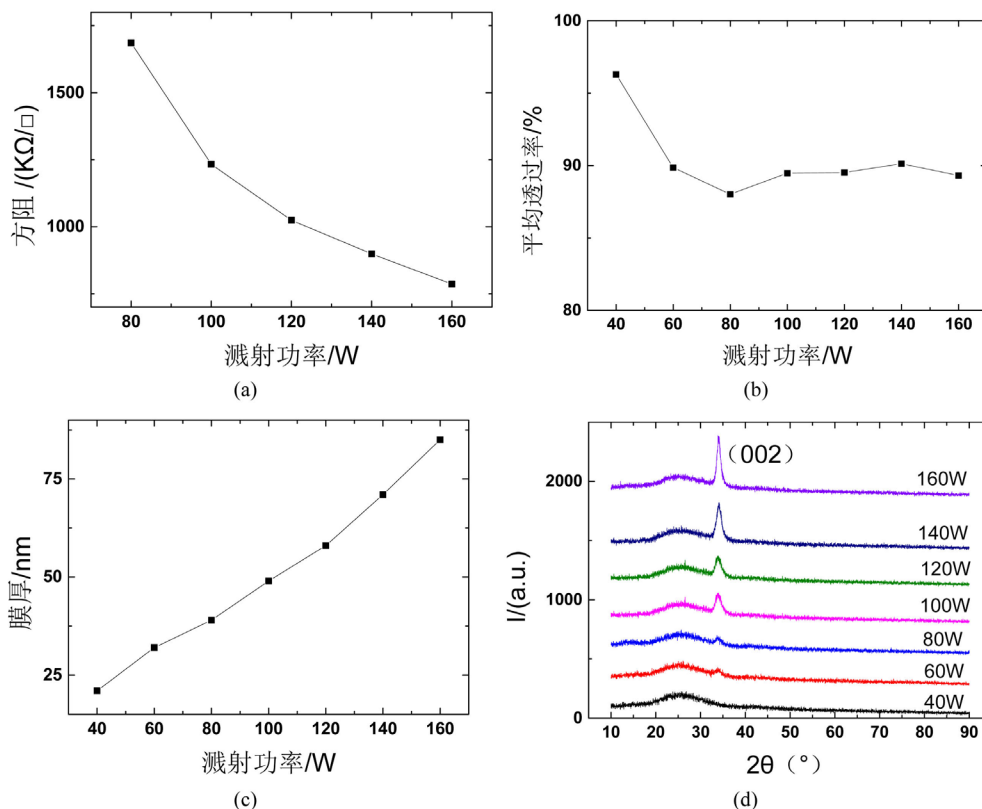


Figure 2. Square resistances (a); Average transmittances (b); Thickness values (c); X-ray diffraction patterns (d) of AZO films under different powers

图 2. AZO 薄膜方阻(a); 平均透过率(b); 膜厚(c); XRD 图谱(d)随溅射功率变化

溅射功率增加, 轰击出靶材的粒子荷载能量增加, 在衬底表面沉积时有足够能量进行扩散迁移, 提高了薄膜的晶化程度, c 轴择优取向逐渐增强。同时, 被轰击出靶材的粒子增加, 有更多粒子在衬底表面沉积, 使得薄膜沉积速率提高厚度更大。功率增大, 薄膜质量提升, 方阻随之减小, 由 10^3 降至 10 K Ω/\square 量级。平均透过率受到 AZO 薄膜质量和膜厚的共同作用, 前者降低薄膜对光的散射作用, 后者相反, 溅射功率增加提升薄膜质量, 同时膜厚也随之增加; 低功率时, 薄膜质量差, 膜厚随功率提升增加, 对光的散射作用加剧, 薄膜平均透过率降幅明显; 高功率时, 薄膜的膜厚和质量都随着功率增加, 二者共同作用使得平均透过率保持稳定。

3.1.2. 溅射时间的影响

图 3 给出了不同溅射时制备 AZO 薄膜的方阻、透过率和平均透过率, AZO 薄膜制备参数: 衬底温度为室温, 溅射功率 160 W, 腔室压强 0.5 Pa, 氩气流量 30 sccm, 溅射时间 2/5/10/20/30/60 min。

溅射时间增加, AZO 薄膜膜厚增加, 薄膜结晶度提升, (002) 的衍射峰越来越尖锐, 择优取向更加明显。薄膜方阻随着溅射时间增加大幅降低。溅射时间增加, 蓝端光透过率明显提升, 薄膜禁带宽度得到一定改善; 溅射时间很长时, 透过率随时间明显下降。

3.1.3. 氧氩比的影响

图 4 给出氧氩比例为 0:10 (纯氩气)/0.5:10/1:10/2:10/5:10 制备 AZO 薄膜的方阻、平均透过率和 XRD 图谱, AZO 薄膜制备参数: 衬底温度室温, 溅射功率 160 W, 溅射压强 0.5 Pa, 溅射时间 20 min, 氧氩混气流量 30 sccm。

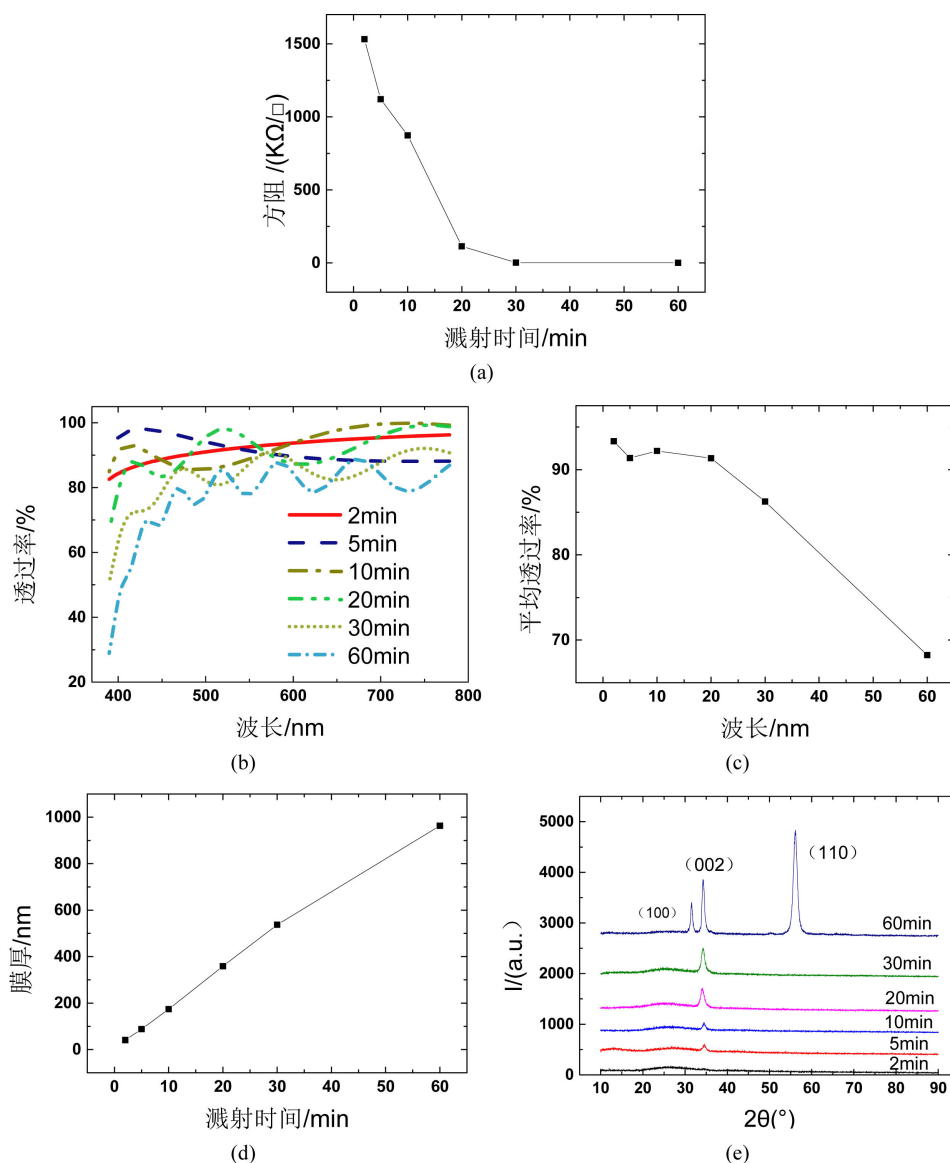


Figure 3. Square resistances (a); Transmittances (b); Average transmittances (c); Thickness values (d); X-ray diffraction patterns (e) of AZO films under different deposition times

图 3. AZO 薄膜方阻(a); 透过率(b); 平均透过率(c); 膜厚(d); XRD 图谱(e)随溅射时间变化

与纯氩气氛溅射相比,氧气的加入减少了薄膜中的氧空位缺陷,弱化了 AZO 薄膜 c 轴择优取向,劣化 AZO 薄膜的电学性能。同时,氧气的加入使得 AZO 沉积速率降低,膜厚变薄,AZO 薄膜光学透过性因此有所提升。

3.1.4. 衬底温度的影响

图 5 给出不同衬底温度制备 AZO 薄膜方阻、平均透过率和 XRD 图谱,AZO 薄膜制备参数:溅射功率 160 W,溅射压强 0.5 Pa,氩气流量 30 sccm,溅射时间 20 min,衬底温度室温/200 $^{\circ}$ C/300 $^{\circ}$ C/400 $^{\circ}$ C。

衬底温度是溅射制膜的重要工艺参数,适当衬底温度(300 $^{\circ}$ C)提高 AZO 薄膜的结晶质量,减少缺陷和应力,可以提高透过率和降低薄膜方阻值;但衬底温度过高时(400 $^{\circ}$ C),AZO 薄膜中出现(100)和(110)衍射峰,c 轴择优取向减弱,劣化了薄膜质量[14],降低薄膜光电性能。

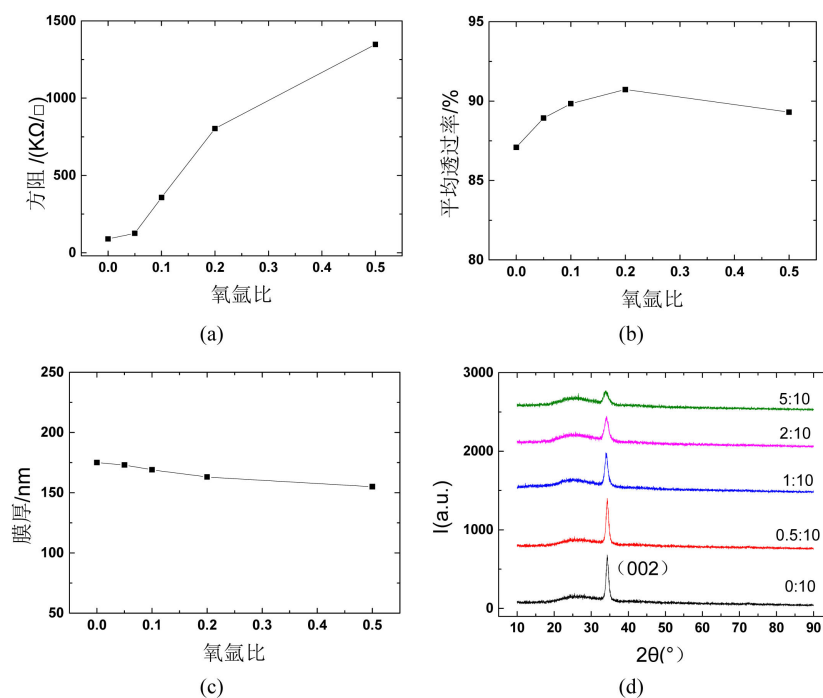


Figure 4. Square resistances (a); Average transmittances (b); Thickness values (c); X-ray diffraction patterns (d) of AZO films under different oxygen to argon ratios

图 4. AZO 薄膜方阻(a); 平均透过率(b); 膜厚(c); XRD 图谱(d)随氧氩比变化

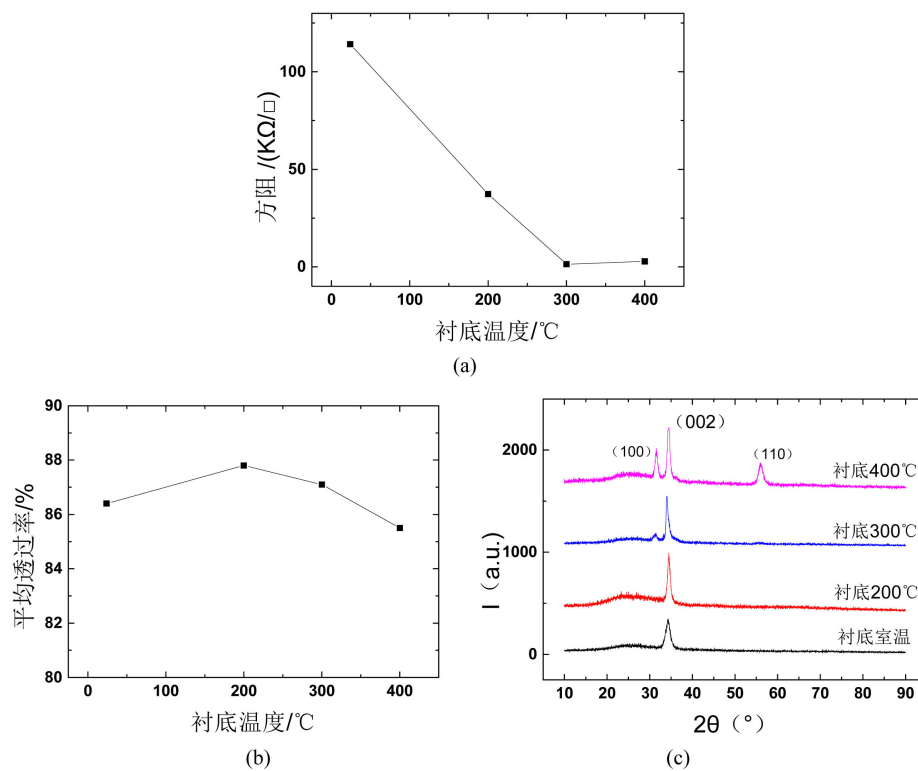


Figure 5. Square resistances (a); Average transmittances (b); X-ray diffraction patterns (c) of AZO films under different substrate temperatures

图 5. AZO 薄膜方阻(a); 平均透过率(b); XRD 图谱(c)随衬底温度变化

3.1.5. 退火温度的影响

图 6 给出不同退火温度处理后 AZO 薄膜方阻、平均透过率和 XRD 图谱, AZO 薄膜制备参数: 溅射功率 160 W, 溅射压强 0.5 Pa, 氩气流量 30 sccm, 溅射时间 2/5/10/20/60 min; 退火条件: 真空度 10^{-3} Pa 氛围, 退火温度 0 (未退火)/200°C/300°C/400°C/500°C 退火 1 小时。

退火可以对 AZO 薄膜中过饱和氧去吸附, 提升薄膜的晶化质量。合理退火温度大大降低薄膜的方阻值, 同时提高 AZO 薄膜透过率。退火温度过高, 劣化薄膜质量; AZO 薄膜的合理退火温度为 400°C。

3.2. AZO/Cu/AZO 复合层薄膜光电性能

金属中间层电学性能优良, 且随着膜厚增加方阻继续减小, 但透过率呈相反趋势随着膜厚增加而减小, 当膜厚大于 20 nm, 透过率大幅下降[15]。因此, 保证优良电学性能同时最大程度的提升光透过性是制备 AZO/Cu/AZO 复合层薄膜的目标。

3.2.1. 不同厚度 Cu 层的 AZO/Cu/AZO 复合层薄膜

图 7 为 Cu 中间层较厚的 AZO/Cu/AZO 复合层薄膜的结构、膜层成分、方阻和透过率, 样品制备参数: AZO 层: 溅射功率 160 W, 溅射压强 0.5 Pa, 氩气流量 30 sccm, 溅射总时间 20 min (上、下层各 10 min); Cu 中间层: 溅射功率 100 W/50 W, 溅射压强 0.5 Pa, 氩气流量 30 sccm。退火条件: 10^{-3} Pa 氛围下 400°C 退火 1 h。薄膜被 GDOES 逐层剥蚀, 得到薄膜从表面到深处依次是上层 AZO, Cu 中间层和下层 AZO。对比 AZO/Cu/AZO 复合层薄膜和溅射时间 20 min 单层 AZO 薄膜(退火前方阻 49 KΩ/□, 平均

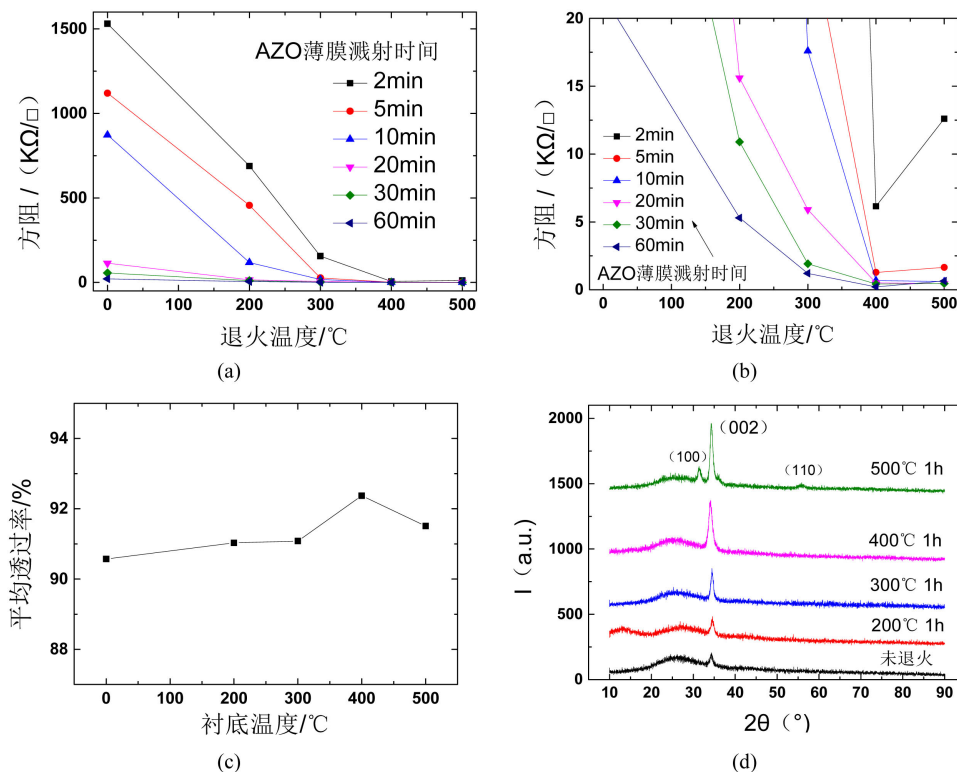


Figure 6. Square resistances of AZO films for different substrate temperatures ((a), (b)), Average transmittances of AZO films prepared by sputtering deposition for ten minutes under different annealing temperatures (c), X-ray diffraction patterns of respective AZO films (d)

图 6. 退火温度对 AZO 薄膜方阻((a), (b)); 溅射时间 10 min。AZO 平均透过率(c)和溅射时间 10 min。AZO 的 XRD 图谱(d)的影响

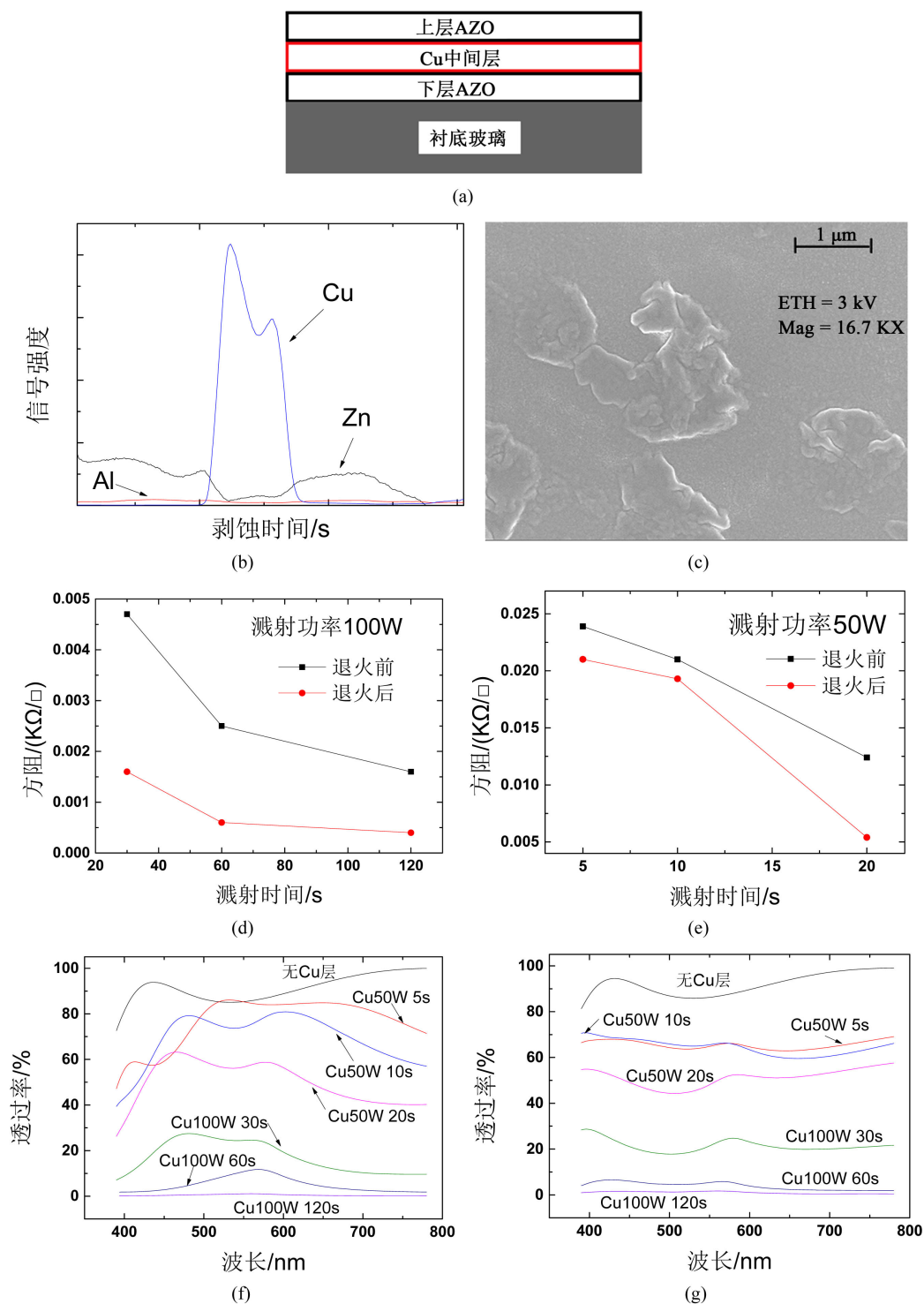


Figure 7. Layer structure of composite films (a); Compositions of AZO/Cu/AZO films (Cu: 100 W, 30 s) measured by GDOES (b); SEM image of composite films (c); Square resistances of composite films by sputtering power 100 W (d); 50 W (e) for different sputtering times of Cu; Average transmittances of composite films under different sputtering times of Cu before (f) and after (g) annealing

图 7. AZO-Cu-AZO 复合层薄膜结构(a); GDOES 测得薄膜(Cu: 100 W, 30 s)成分变化(b); SEM 测得复合层薄膜表面形貌(c); 溅射功率 100 W (d); 50 W (e)复合层薄膜方阻随 Cu 溅射时间变化; 退火前(f)后(g)复合层薄膜透过率随 Cu 层制备参数变化

透过率 85.9%；退火后方阻 $8 \times 10^{-2} \text{ K}\Omega/\square$ ，平均透过率为 86.41%)光电性能。Cu 层参数 100 W，120 s 复合层薄膜方阻低至 $5 \times 10^{-4} \text{ K}\Omega/\square$ ，但平均透过率仅为 0.45%几乎不透光。引入较厚 Cu 中间层时，电学性能得到极大提升，获得较低方阻是复合层薄膜的优势，但较厚的 Cu 中间层同时也增强了复合层薄膜对光的散射作用，使得透过率大幅降低，Cu 层越厚这种作用越明显。

图 8 为溅射功率和溅射时间都较小的 Cu 层膜厚、透过率和平均透过率，样品制备参数为：溅射功率 20 W，溅射压强 0.5 Pa，氩气流量 30 sccm，溅射时间 2/5/10/20/30/40/50/60/80/100 s。由图可知，Cu 层透过率随着膜厚增加急剧下降；超过 40 nm 后，Cu 层平均透过率很快由高于 80%降至 20%以下。因此，为了制备光学性能优良的 AZO/Cu/AZO 复合层薄膜，控制 Cu 层厚度是至关重要的。

图 9 为 Cu 中间层较薄的 AZO/Cu/AZO 复合层薄膜方阻、透过率与单层 AZO 薄膜(二者 AZO 层溅射总时间一致)的比较，样品制备参数：AZO 层：溅射功率 160 W，溅射腔室压强 0.5 Pa，氩气流量 30 sccm，溅射总时间 5/10/20/30 min；Cu 中间层：溅射功率 20 W，溅射压强 0.5 Pa，氩气流量 30 sccm，溅射时间 0(无 Cu 层)/2/5/10/20/30/40/50/60/70/80/90/100 s。图中 Cu 层溅射时间 0 s 表示为单层 AZO 薄膜，易看出引入 Cu 中间层后，不同 AZO 层的复合层薄膜方阻相比于单层 AZO 都有一定程度的降低；Cu 层很薄时，复合层薄膜方阻与 AZO 层厚度相关并随之增加而减小；Cu 层达到一定厚度后，复合层薄膜方阻与 AZO 层基本无关只与 Cu 层厚度有关，方阻随着 Cu 层溅射时间增加进一步减小。Cu 层溅射时间增加，透过率快速下降，这在 AZO 总溅射时间 20/10 min 的复合层表现的较为明显。而 AZO 总溅射时间 5 min 的复合层在 Cu 中间层溅射时间达到 40 s 时仍具有较高的透过率。随着 AZO 层总溅射时间的减小，平均透过率曲线整体呈上升趋势；AZO 总溅射时间 5 min 复合层在 Cu 溅射时间 40 s 时，仍具有很高的平均透过率，高达 85%。

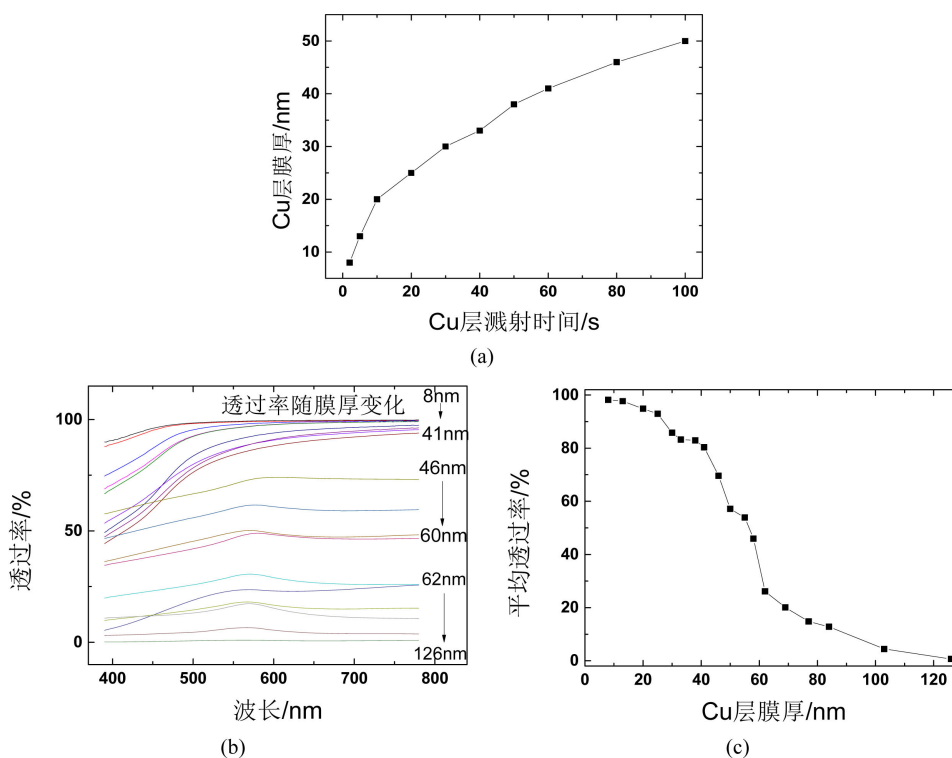


Figure 8. Thickness of Cu layer changes with sputtering time (a); Transmittances of Cu layer under different thicknesses (b); Average transmittances of Cu layer under different thicknesses (c)

图 8. Cu 层膜厚与溅射时间关系(a); Cu 层透过率与膜厚关系(b); Cu 层平均透过率与膜厚关系(c)

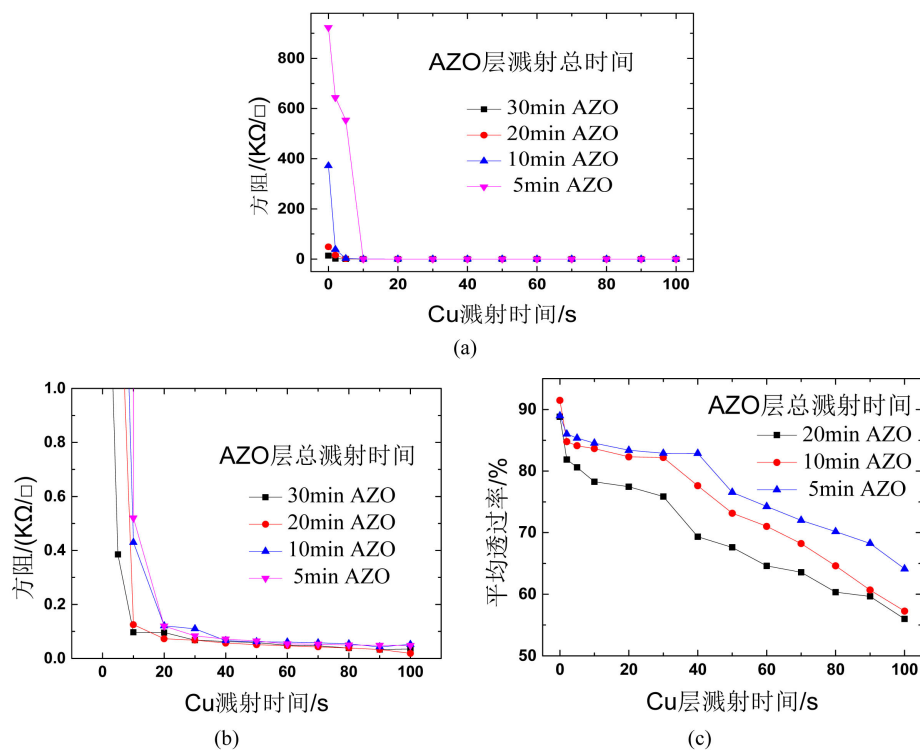


Figure 9. Square resistances ((a), (b)), Average transmittances (c) of composite films for different sputtering deposition times of Cu layer

图 9. 复合层薄膜方阻随 Cu 层溅射时间变化((a), (b))、平均透过率随 Cu 层溅射时间变化(c)

AZO/Cu/AZO 复合层薄膜电学性能优良, 调节 AZO 层和 Cu 层厚度可使得光透过性也满足透明导电薄膜的要求。且不同于 AZO 薄膜有低温衬底制备方阻大缺点[13], 衬底室温时无需经过退火处理就可以制备平均透过率 85%、方阻低至 $65 \Omega/\square$ AZO/Cu/AZO 复合层薄膜。

3.2.2. 退火对 AZO/Cu/AZO 复合薄膜影响

图 10 为 GDOES 测得 AZO/Cu/AZO 复合薄膜退火前后膜层成分, 样品制备参数: AZO 层: 溅射功率 160 W, 溅射压强 0.5 Pa, 氩气流量 30 sccm, 溅射总时间 20 min (上、下层各 10 min); Cu 中间层: 溅射功率 100 W, 溅射压强 0.5 Pa, 氩气流量 30 sccm, 溅射时间 30 s。退火条件: 10^{-3} Pa 氛围下 400°C 退火 1 h。易看出, 退火后 Cu 层信号强度减弱, AZO 层中出现 Cu 信号。退火过程中复合层薄膜发生了层间扩散, 这破坏了复合层薄膜结构。

图 11 为 AZO/Cu/AZO 复合薄膜退火前后方阻和平均透过率。样品制备参数: AZO 层: 溅射功率 160 W, 溅射压强 0.5 Pa, 氩气流量 30 sccm, 溅射总时间 5/10/20 min; Cu 中间层: 溅射功率 20 W, 溅射压强 0.5 Pa, 氩气流量 30 sccm, 溅射时间 0/2/5/10s。退火条件: 10^{-3} Pa 氛围下 400°C 退火 1 h。未退火前, 引入 Cu 层后复合层薄膜方阻大幅下降; 退火后, 复合层方阻与单层 AZO 类似, 方阻大幅下降, 但复合层薄膜比单层 AZO 薄膜方阻稍高。退火后复合层薄膜平均透过率未有所增长, 反而有了不同程度的下降。这是因为退火后 AZO 层与 Cu 层发生层间扩散, 破坏了复合层薄膜的结构, 劣化了复合层薄膜的光电性能。

4. 不同 AZO 薄膜光电性能

本文研究的 Al 掺杂 ZnO 薄膜(AZO-1)的光电性能, 之前工作[13]介绍的 Al_2O_3 掺杂 ZnO 薄膜(AZO-2), 以及 AZO-2/Cu/AZO-2 复合层薄膜, 三种 AZO 薄膜性能对比如表 1 所示。

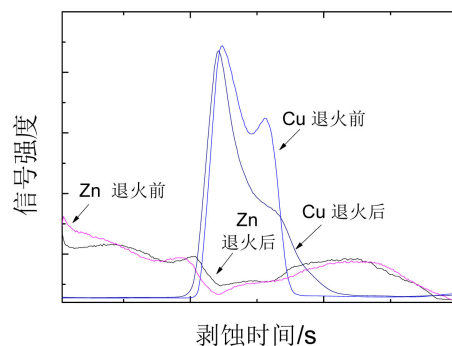


Figure 10. Compositions of composite films (Cu: 100 W, 30 s) before and after annealing measured by GDOES

图 10. GDOES 测得退火前后复合层薄膜(Cu: 100W, 30 s)成分变化

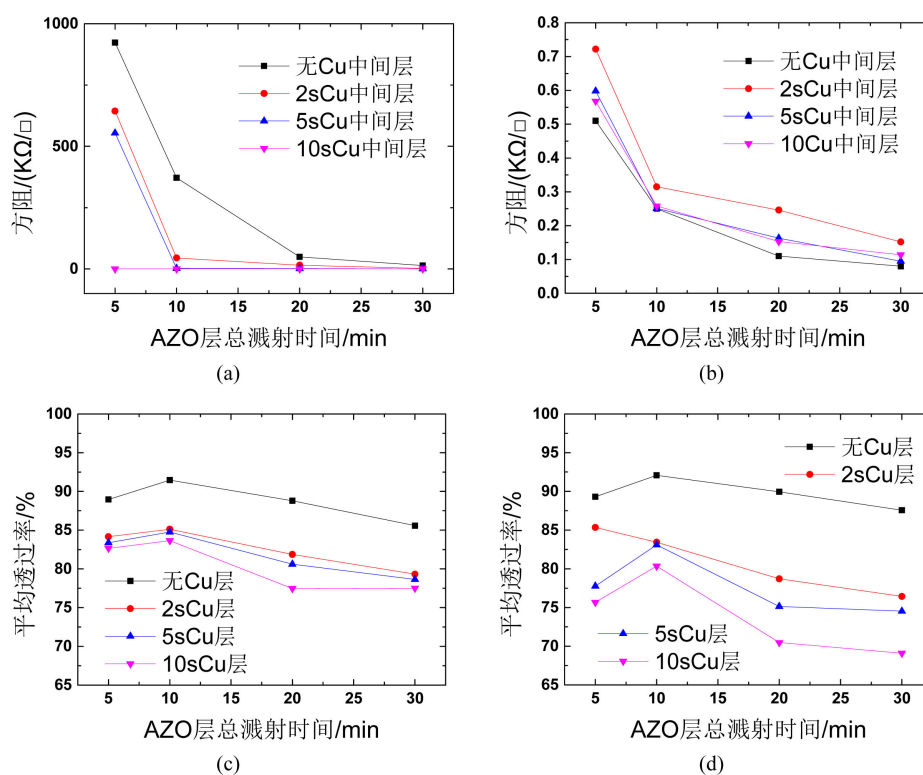


Figure 11. Square resistances ((a), (b)), Average transmittances ((c), (d)) of composite films before and after annealing

图 11. 复合层薄膜退火前(a)、后(b)方阻、复合层薄膜退火前(c)、后(d)平均透过率

对比可知, 薄膜制备过程中, Al 掺杂 ZnO 需考虑工艺参数更多, 电学性能稍弱于另两种薄膜; 相较于 Al 掺杂, Al_2O_3 掺杂无需考虑氧氮比影响, 具有制膜工艺更为便捷的优点。复合层薄膜引入 Cu 中间层, 无需退火和高温衬底即可具备优良光电性能。

5. 总结

本文探究了薄膜制备工艺参数和膜层厚度对 AZO 单层以及 AZO/Cu/AZO 复合薄膜光电性能的影响。实验结果表明: 1) 溅射功率增加有利于获得较好质量的薄膜; 2) 溅射时间增加, AZO 薄膜择优取向更加明显, 薄膜结晶度更好且禁带宽度得到一定改善; 3) 氧气的加入会明显影响 AZO 薄膜的微观结构, 劣化薄膜的电学性能, 但减少了 AZO 薄膜中的氧空位缺陷, 使得薄膜光学透过率得到提升; 4) 适当的

Table 1. Photoelectric properties of AZO films
表 1. 不同 AZO 薄膜光电性能

	AZO-1 (Al 掺杂 ZnO)	AZO-2 (Al ₂ O ₃ 掺杂 ZnO)	AZO-2/Cu/AZO-2 (AZO-2 为 Al ₂ O ₃ 掺杂 ZnO)
膜厚 (膜厚随功率、 时间变化)	方阻由 10 ³ 降至 10 KΩ/□量级； 膜厚过大，透过率低于 70%	方阻由 10 ³ 降至 1 KΩ/□量级； 膜厚过大，透过率低	光电性能与 Cu 层厚度相关， 与 AZO 层几乎无关； 方阻低至 10 ⁻³ KΩ/□， 透过率可达 85%以上
溅射压强	无影响	无影响	无影响
氧氩比	提高透过率，但劣化电学性能	无影响	无影响
氩气流量	无影响	无影响	无影响
衬底温度	室温，方阻 10 ³ KΩ/□；300℃， 方阻 1 KΩ/□，透过率接近 90%	室温，方阻 10 ³ KΩ/□；300℃， 方阻 10 ⁻² KΩ/□，透过率 90%	室温，方阻低至 65 Ω/□， 平均透过率达 85%
退火	提升薄膜质量，降低方阻， 提高透过率	提升薄膜质量，降低方阻， 提高透过率	破坏复合层结构，劣化光电性能

衬底温度和退火温度可以提高薄膜的结晶质量，减少缺陷和应力，提高透过率和降低薄膜方阻值；5) Cu 中间层的引入，大幅降低了复合层薄膜方阻；且 Cu 层达到一定厚度时，复合层薄膜方阻随着 Cu 层厚度增加进一步下降，与 AZO 层无关；6) 与低温衬底制备单层 AZO 薄膜方阻大不同，衬底室温时无需经过退火处理就可以制备方阻低至 65 Ω/□，平均透过率达 85%的 AZO/Cu/AZO 复合层薄膜。

致 谢

感谢广东省科技计划项目(编号 2017A010103021)的赞助。

参考文献

- [1] 马晓翠, 叶家聪, 曹培江, 等. 射频溅射功率对 AZO 薄膜结构及光电特性和热稳定性的影响[J]. 发光学报, 2010, 31(2): 235-238.
- [2] Fortunato, E., Barquinha, P., Gonçalves, G., *et al.* (2008) High Mobility and Low Threshold Voltage Transparent Thin Film Transistors Based on Amorphous Indium Zinc Oxide Semiconductors. *Solid State Electronics*, **52**, 443-448. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2007.10.032>
- [3] Calnan, S., Hüpkes, J., Rech, B., *et al.* (2008) High Deposition Rate Aluminium-Doped Zinc Oxide Films with Highly Efficient Light Trapping for Silicon Thin Film Solar Cells. *Thin Solid Films*, **516**, 1242-1248. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.06.006>
- [4] 马勇, 孔春阳. ITO 薄膜的光学和电学性质及其应用[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2002, 25(8): 114-117.
- [5] Kim, D.H., Kim, H.R., Lee, S.H., *et al.* (2010) Electrical and Structural Properties of Multicomponent Transparent Conducting Oxide Films Prepared by Co-Sputtering of AZO and ITO. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **356**, 1779-1783. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrystol.2010.07.024>
- [6] 赵斌, 唐立丹, 梅海林, 等. 磁控溅射 AZO 透明导电薄膜及其光电性能的研究[J]. 电子元件与材料, 2015(8): 38-41.
- [7] 唐伟忠. 薄膜材料制备原理、技术及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [8] Pei, Z.L., Sun, C., Tan, M.H., *et al.* (2001) Optical and Electrical Properties of Direct-Current Magnetron Sputtered ZnO:Al Films. *Journal of Applied Physics*, **90**, 3432-3436. <https://doi.org/10.1063/1.1398070>
- [9] Chang, J.F., Shen, C.C. and Hon, M.H. (2003) Growth Characteristics and Residual Stress of RF Magnetron Sputtered ZnO:Al Films. *Ceramics International*, **29**, 245-250. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00111-6](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00111-6)

-
- [10] Szyszka, B. (1999) Transparent and Conductive Aluminum Doped Zinc Oxide Films Prepared by Mid-Frequency Reactive Magnetron Sputtering. *Thin Solid Films*, **351**, 164-169. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00158-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00158-3)
- [11] Hosono, H. (2007) Recent Progress in Transparent Oxide Semiconductors: Materials and Device Application. *Thin Solid Films*, **515**, 6000-6014. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.12.125>
- [12] Deng, Z., Huang, C., Huang, J., *et al.* (2010) Effects of Al Content on the Properties of ZnO:Al Films Prepared by Al₂O₃, and ZnO Co-Sputtering. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, **21**, 1030-1035. <https://doi.org/10.1007/s10854-010-0084-0>
- [13] 王宇, 王江涌, 余云鹏, 等. AZO 透明导电膜的光电性能研究[J]. 材料科学, 2018, 8(4): 401-411.
- [14] 何宇亮. 非晶态半导体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [15] 姜辛, 孙超, 洪瑞江, 等. 透明导电氧化物薄膜[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ms@hanspub.org