

文章编号: 1000-7032(2018)09-1272-08

磁控溅射制备本征 ZnO/Ag/ZnO 透明导电薄膜的性质研究

李 彤^{1,2}, 周艳文^{2*}, 王艳雪², 赵 卓^{1,2}, 武俊生², 王晓明², 高 鹏³

(1. 辽宁科技大学 化学工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 辽宁科技大学 表面工程研究所, 辽宁 鞍山 114051;

3. 鞍钢集团钢铁研究院 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 室温下采用射频磁控溅射氧化锌(ZnO)粉末靶、银(Ag)靶,在玻璃衬底上制备 ZnO/Ag/ZnO 透明导电薄膜。首先,ZnO厚度为30 nm时,改变 Ag厚度制备3层透明导电薄膜,研究 Ag层厚度及膜层间配比对光电性能的影响;其次,按 ZnO:Ag厚度比为30:11比例制备不同厚度的3层透明导电薄膜,研究多层厚度对薄膜光电性能的影响。结果表明:Ag厚度为8 nm及11 nm的 ZnO/Ag/ZnO表面相对平整,结晶程度较好,在可见光范围内最高透过率达到90%及86%,并且方块电阻为6 Ω/□及3.20 Ω/□,具有优良的光电性;当按配比制备 ZnO/Ag/ZnO 3层膜时,增加 ZnO厚度对 Ag层的增透作用反而减弱,同时增加 Ag层厚度也会降低3层薄膜的整体光学性。

关键词: 透明导电薄膜; 射频磁控溅射; 粉末靶; 镀膜

中图分类号: O484.4; TM24

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20183909.1272

Properties of ZnO/Ag/ZnO Transparent Conducting Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering

LI Tong^{1,2}, ZHOU Yan-wen^{2*}, WANG Yan-xue²,
ZHAO Zhuo^{1,2}, WU Jun-sheng², WANG Xiao-ming², GAO Peng³

(1. School of Chemistry Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

2. Institute of Surface Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

3. State Key Laboratory of Metal Materials and Applications for Marine Equipment, Angang Iron and Steel Research Institute, Anshan Iron and Steel Group, Anshan 114051, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhouyanwen@ustl.edu.cn

Abstract: At room temperature, ZnO/Ag/ZnO transparent conductive films were prepared on glass substrate by RF magnetron sputtering of zinc oxide(ZnO) powder and silver(Ag). When the thickness of ZnO was 30 nm, the thickness of Ag was changed to prepare three layers of transparent conductive films, and the influence of the thickness of Ag layer and the ratio between the layers on the photoelectric properties were studied. According to the ZnO/Ag ratio of 30:11, different thickness of three transparent conductive films were prepared, and the effect of multilayer thickness on the photovoltaic properties was researched. The results show that the surface of ZnO/Ag/ZnO with thickness of 8 nm and 11 nm are relatively flat, and have good degree of crystallinity with the maximum transmittance of 90% and 86% in the visible range and the sheet resistance of 6 Ω/□ and 3.20 Ω/□. The photoelectricity is excellent. When ZnO/Ag/ZnO three-layer films are prepared

收稿日期: 2017-12-18; 修订日期: 2018-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(51672119); 辽宁省教育厅校企成果转化项目(601009817-01); 辽宁省教育厅海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室-辽宁科技大学联合基金(SKLMEA-USTL-201709)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(51672119); School Enterprise Cooperation and Achievement Transformation Project of Liaoning Province Education Department(601009817-01); Project of Liaoning Province Education Department(SKLMEA-USTL-201709)

according to the ratio of 30:11, increasing the thickness of ZnO layer on the contrary enhances the light transmittance of Ag layer but decreases the overall optical layer thickness of the three-layer films.

Key words: transparent conductive films; RF magnetron sputtering; powder target; coating

1 引言

透明导电氧化物膜(TCO)广泛应用在各大领域,如发光器件、显示器件等。随着生产生活的需要,人们更加追求低廉高效的产品。因此作为窗口电极使用的超薄 TCO/金属/TCO 多层薄膜成为研究热点。由于商用透明导电薄膜锡氧化物(ITO)中具有稀缺金属锡,因此超薄 TCO/金属/TCO 多层膜有望取代它^[1-3]。此外,TCO/金属/TCO 多层膜的设计灵活,可通过适当地调节膜间厚度来实现光电调控。其中因为氧化锌(ZnO)禁带宽度大于可见光子能量(3.4 eV),在光照下不会引起本征激发,对可见光段透明,在该波段有较高的折射率,因而选择其做为介质层 TCO 比较适合^[4-8]。金属 Ag 在可见至红外波段透明,且在该波段具有较高反射率和低折射率,对光吸收少^[9-13]。虽然金属金(Au)同样导电性能好,但 Au 在波长为 360 nm 处的反射率仅为 36.3%,大幅低于金属 Ag。同时,当最上层的 ZnO 厚度满足光程差 $\Delta = (2m + 1)\lambda/4$ 时,可以有减少反射、增加光透的效果^[14-17]。此外,Ando 等^[18]表示,ZnO/Ag/ZnO 多层膜在常温下具有一定的抗潮能力,稳定性优异。

作为成熟镀膜技术磁控溅射,适用于在低温下、以较高沉积速率制备与基体附着力较良好的薄膜。在本实验中,磁控溅射镀膜机采用粉末 ZnO 靶替换陶瓷靶材。由于粉末可循环使用,降低了耗材成本,避免了陶瓷靶易裂造成的靶材损失。其次,制备过程中既没有通入氧气也没有进行加热,保证 Ag 靶材与 Ag 膜在制备过程中不被氧化。

2 实验

2.1 实验制备

实验采用大连远东公司的非平衡磁控溅射粉末靶镀膜机,使用射频(RF)电源,溅射频率为 13.56 MHz。将 99.99% 的 ZnO 粉末均匀地平铺在铜(Cu)托盘上压实成粉末靶,银(Ag)靶材为

南昌国材科技有限公司生产的纯度 99.99% 的固体靶。将型号为 No. 7101 的帆船牌载玻片依次放入盛有丙酮、酒精、去离子水的烧杯中,各超声清洗 15 min。将洗好试样用高温胶粘在腔体中盛放基体的托盘上,均在本底真空为 3.0×10^{-3} Pa 条件下镀膜。通入氩气,并在室温下制备一组上下层 ZnO 厚度为 30 nm,中间 Ag 层厚度分别为 8,11,14 nm 的多层透明导电薄膜。另一组根据膜厚 30:11 的搭配比制备出 ZnO 与 Ag 层厚度比为 45:16.5 与 66:22 的夹心光电薄膜。

2.2 检测手段

用 Alpha-step 台阶仪分析膜厚,扫描长度为 2 nm,范围为 100 μm ,触针测量力为 0.03 mg。用 Hall8800 霍尔效应仪分析试样电学性,电流为 4 A,电压为 1 V。用 Lambda900 紫外-可见分光光度计测量试样在 300 ~ 800 nm 波长范围的透光率,分析光学性。用 X'Pert Pro X 射线衍射仪(XRD)分析试样结构。测试时使用小角衍射,范围为 $20^\circ \sim 80^\circ$ 。用本原 C5PM5500 原子力显微镜(AFM)分析形貌,导电试样(有 Ag 层)扫描模式均在接触模式下进行,频率为 1.5 Hz,扫描范围为 3 000 nm。用 FEI 公司的 Quanta Inspect 型扫描电子显微镜(SEM)观察分析试样的显微形貌。

3 结果与讨论

3.1 ZnO/Ag/ZnO 形貌及 Ag 分布

图 1(a)、(b)、(c)为 ZnO 厚度 30 nm,中间 Ag 层厚度分别为 8,11,14 nm 的 ZnO/Ag/ZnO 3 层薄膜的 AFM 表面形貌图,(d)、(e)为按 ZnO 层膜厚与 Ag 层膜厚的搭配比为 30:11 制备的多层薄膜的 AFM 表面形貌图。由图 1 可知,薄膜表面平整,颗粒生长完整。随着 Ag 厚度的变化,薄膜表面粗糙度及颗粒度有所变化。表 1 中示出了用 Imager 4.60 软件分析的薄膜的平均表面粗糙度、颗粒度。由表 1 对 ZnO/Ag 的表面粗糙度及颗粒度的分析数据可见,随着 Ag 厚度增加,2 层膜的表面粗糙度及颗粒度均增大。比较图 1(a) ~

(c), 即 ZnO 层膜厚为 30 nm、Ag 层厚度从 8 nm 增至 14 nm 时, 粗糙度及颗粒度分别从 7.22 nm、83.68 nm 明显增加到 14.5 nm、132 nm。说明此时 3 层薄膜的粗糙度及颗粒度由 Ag 层所决定。

当 ZnO 与 Ag 厚度均增加时, 薄膜粗糙度及平均颗粒度由 14.5 nm、132 nm 分别下降到 2.32 nm、80.49 nm。当 ZnO 的厚度增加时, 薄膜的粗糙度及颗粒度则由 ZnO 薄膜的形貌决定。

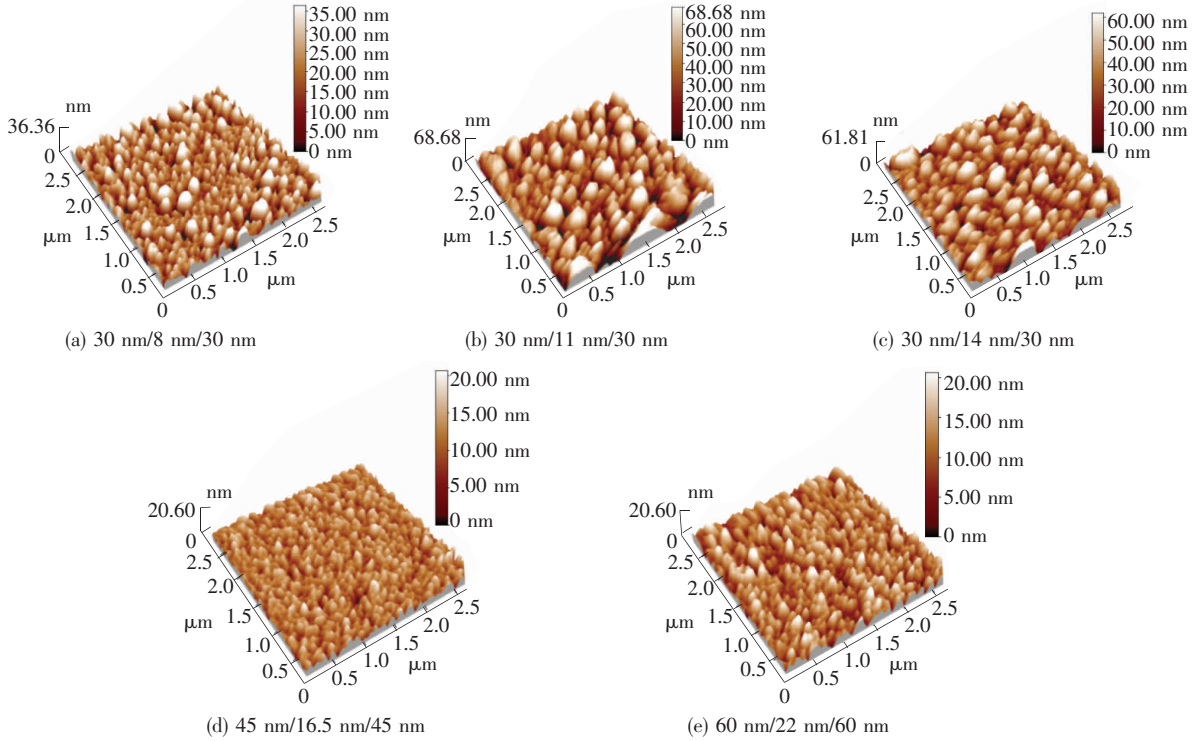


图 1 不同薄膜厚度的 ZnO/Ag/ZnO 多层薄膜的 AFM 表面形貌
Fig.1 AFM micrographs of ZnO/Ag/ZnO films with different thickness

表 1 薄膜的粒度分析

Tab.1 Summaries of the grain size within different films

薄膜厚度/nm	平均粗糙度/nm	平均直径/nm	薄膜厚度/nm	平均粗糙度/nm	平均直径/nm
30	1.67	51.76			
30/1	1.86	64.14	30/1/30	5.81	53.33
30/5	3.15	74.23	30/5/30	7.96	58.43
30/8	3.50	79.48	30/8/30	7.22	83.68
30/11	4.79	93.67	30/11/30	11.8	124.9
30/14	6.53	99.84	30/14/30	14.5	132
			45/16.5/45	3.02	82.34
			60/22/60	2.32	80.49

图 2 为 ZnO/Ag/ZnO 的 SEM 图, 图 2(a) ~ (e) 为 ZnO/Ag/ZnO 薄膜的表面形貌图, 图 2(a1) ~ (e1) 为 ZnO/Ag/ZnO 薄膜中 Ag 的分布图。当 Ag 厚度较薄时, Ag 颗粒逐渐长大并呈现椭球状, 每个颗粒孤立且均匀分布。随着 Ag 层

溅射时间的增加, 膜厚增加, Ag 薄膜粒径逐渐增大, 同时球状结构逐渐融并。

换言之, 在相同基体颗粒度下, 图 1(a) 及图 2(c)、(c1) 中 Ag 层溅射时间短, 衬底温度较低, 厚度薄, 可能出现连续度较差的点状分布, 因此

Ag 层之上的 ZnO 复制了基体层的颗粒度; 随着图 1(b)、(c) 及图 2(d)、(d1) 与 2(e)、(e1) 中 Ag 层溅射时间增加, 小岛逐渐聚合而长大, 其顶层的 ZnO 则反映了生长 Ag 层的颗粒度。比较图 1(b)、(d) 与 (e) 则反映了随 ZnO/Ag/ZnO 3 层膜厚度增加, 薄膜颗粒度及粗糙度的变化。Ag 膜上

生长的 ZnO 厚度为 30 nm 时, 其颗粒度及粗糙度还遗传了 Ag 的特点, 如图 1(b) 所示; 而当 ZnO 厚度继续增加时, 3 层膜的表面粗糙度及颗粒度则反映了本征 ZnO 的特点, 因此其粗糙度及颗粒度的变化不大, 如图 1(d)、(e)。同时, 随 ZnO 薄膜厚度增加, 其致密度提高, 粗糙度下降。

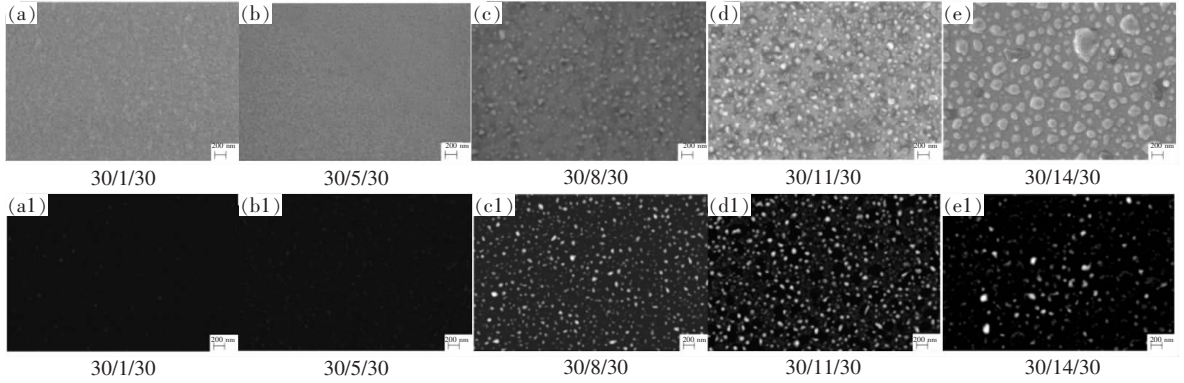


图 2 ZnO/Ag/ZnO 的 SEM 图

Fig. 2 SEM micrographs of ZnO/Ag/ZnO films

3.2 结构分析

图 3(a) 示出了玻璃基底上单层 Ag 膜厚度分别为 8, 11, 14, 16.5, 22 nm 的 XRD 衍射谱。随着 Ag 层厚度的增加, Ag 的 (111)、(200)、(220) 和 (311) 的衍射峰强度逐渐增大 (01-087-0719)。Ag 的 (111) 衍射峰呈现最大相对强度, 说明 Ag 层呈现立方结构, (111) 为择优取向。图 3(b)、(c) 是玻璃基底上 ZnO/Ag/ZnO 5 种不同厚度的 3 层膜的 XRD 对比图。在图 3(b)、(c) 中同时出现了 ZnO 的 (002)、(102) 和 (103) 的衍射峰 (00-001-1136), 以及 Ag 的 (111)、(200)、(220) 和 (311) 的衍射峰, 说明 ZnO/Ag/ZnO 为多晶结构。且 ZnO 的 (002) 峰强相对最大, 说明 ZnO 呈现六

方纤锌矿结构, (002) 为择优取向。

当 ZnO 层厚度不变时, 随着 Ag 层厚度的增加, Ag 的 (111) 衍射峰峰强逐渐增大。这说明较厚的 Ag 有助于薄膜结晶。由 Scherrer 公式 $D = k\lambda / (\beta \cos\theta)$, 其中 D 为晶粒尺寸, k 取 0.9, λ 为 X 射线的波长 (0.154 18 nm), β 为峰的半高宽, θ 为衍射角。表 2 给出了不同厚度下, Ag 薄膜的晶粒度。由表 2 可见, 随 Ag 层厚度增大, 其晶粒度由 7.3 nm 增至 22.7 nm。由此可见, 当 ZnO 厚度增至 45 nm 以上的 3 层薄膜的颗粒度不再变化来自于 ZnO 的特征。用 Scherrer 公式计算 3 层膜中 ZnO 的晶粒度并比较发现, ZnO 的晶粒度大小浮动不大。因此进一步证实该观点。

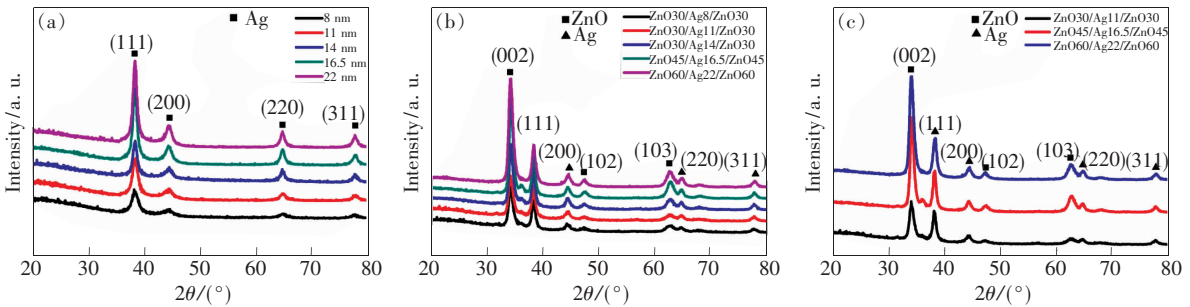


图 3 玻璃基底上制备薄膜的 XRD 图。(a) 单层 Ag 薄膜; (b) 不同 Ag 层厚度的 ZnO/Ag/ZnO 薄膜; (c) ZnO 与 Ag 膜厚比为 30:11 的 ZnO/Ag/ZnO 薄膜。

Fig. 3 XRD patterns of thin film on glass substrate. (a) Ag films. (b) ZnO/Ag/ZnO films with different thickness of Ag layer. (c) ZnO/Ag/ZnO films prepared by ZnO and Ag film thickness ratio of 30:11.

表 2 单层 Ag 薄膜及 ZnO/Ag/ZnO 薄膜的晶粒度

Tab.2 Grain size of Ag films and ZnO/Ag/ZnO films

薄膜厚度/ nm	晶粒度/ nm	薄膜厚度/ nm	晶粒度/ nm
8	7.3	30/8/30	15.1
11	8.2	30/11/30	12.2
14	11.3	30/14/30	14.1
16.5	12.8	45/16.5/45	15.6
22	22.7	60/22/60	13.7

3.3 光电性

3.3.1 光学性

由图 4 给出的 Ag 薄膜的光透过率曲线可知,随着 Ag 层厚度的增加,透光率下降。这是因为 Ag 层越厚对光的吸收越大。图 5(a) 则示出了 ZnO/Ag/ZnO 薄膜的可见光区透过率曲线。由图可知,当上下层 ZnO 薄膜厚度相同时,ZnO 起到的减少反射并增加透光的效果相同,曲线形态相类似。随着 Ag 层厚度的增加,可见光区透过率下降。当 Ag 层厚度为 8 nm 及 11 nm 时,其可见光区平均透过率 > 80%。随着 ZnO/Ag/ZnO 3 层薄膜厚度增大到 45/16.5/45 nm 时,其透过率曲线形态开始发生变化,薄膜的透过率在长波方向开始增大。而当 3 层薄膜厚度增至 60/22/60 nm 时,由于其厚度逐渐远离减少反射并增加透光的范围,透过率曲线从波长为 400 nm 处开始走平。图 5(b) 示出了 ZnO/Ag/ZnO 薄膜在近红外光区的透过率曲线。由图可见,厚度分别为 45/16.5/45 nm、60/22/60 nm 的 ZnO/Ag/ZnO 薄膜透光率高于 30/14/30 nm 的透光率。说明随着 ZnO 厚度的增加,对 ZnO/Ag/ZnO 3 层膜起到红外增透的作用。

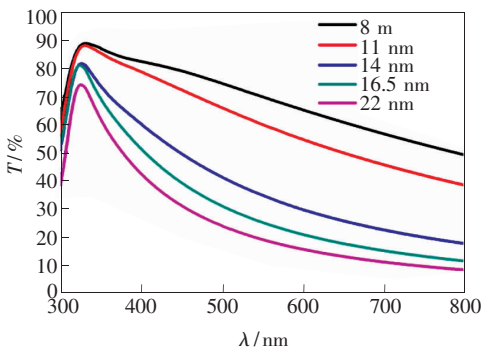


图 4 Ag 薄膜的光透过率曲线

Fig. 4 Transmittance curve of Ag films

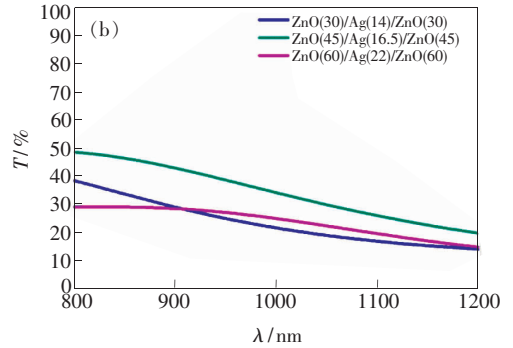
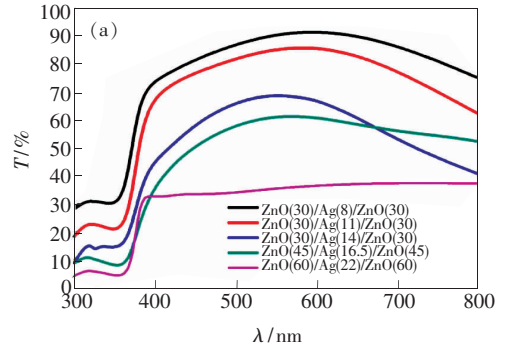


图 5 ZnO/Ag/ZnO 薄膜的光透过率曲线。(a) 可见光区;(b) 近红外光区。

Fig. 5 Transmittance curve of ZnO/Ag/ZnO films. (a) Visible light region. (b) Near infrared region.

3.3.2 电学性

图 6 为单层 Ag 与 ZnO/Ag/ZnO 薄膜随 Ag 层厚度增加的电学性能变化。图 6(a) 中,单层 Ag 与 ZnO/Ag/ZnO 的曲线趋势相同,方块电阻均随 Ag 层厚度增加而下降。ZnO/Ag/ZnO 3 层薄膜可视为 3 个并联电阻构成的导电电极。由并联电阻公式 $1/R = 1/R_{Ag} + 2/R_{ZnO}$ 可知,其电阻取决于最小电阻的大小,即主要取决于中间 Ag 层。由 6(a) 可见,3 层薄膜的电阻及电阻率均略低于 Ag 层,也与公式相符。但值得注意的是,随 Ag 及 3 层膜厚度增加到 14 nm 之后,Ag 及 3 层膜的方块电阻下降速率变慢。也就是说,不应再继续以增加金属层厚度来增强薄膜导电性。图 6(b) 与图 6(a) 比较,3 层膜的电阻率和方块电阻的折线变化基本一致。

图 6(c) 示出了不同 Ag 厚度下,Ag 及 3 层薄膜的载流子浓度。当 ZnO 膜厚相同时,载流子浓度随着 Ag 层厚度的增加而增加。这是因为当 Ag 层为 8 ~ 14 nm 时,薄膜逐渐由小岛连成大岛,金属性逐渐增强,ZnO 层吸附电子能力弱,因此呈现高的载流子浓度。当 Ag 层为 16.5 nm 与 22 nm

时,Ag 膜渐渐长大并形成连续薄膜,Ag 层中电子扩散能力增强,同时具有较厚 ZnO 层的薄膜更容易吸附电子,因此载流子浓度呈现下降趋势。注意到 ZnO/Ag/ZnO 的折线始终趋于单层 Ag 的载流子浓度折线下方。这是因为 ZnO 吸附电子使得 3 层膜的载流子浓度低于 Ag^[19]。图 6(d)中,

当 Ag 晶粒逐渐生长并趋于连续时,阻碍载流子运动的势垒由高变低,因此 ZnO/Ag/ZnO 载流子迁移率的下降状态趋于平缓。当 Ag 为连续薄膜时,电流可直接从 Ag 层流过,因此当 Ag 层膜厚增大时,3 层膜的迁移率快速上升。而单层 Ag 的迁移率则在 3.56 ~ 4.78 cm² · V⁻¹ · s⁻¹之间。

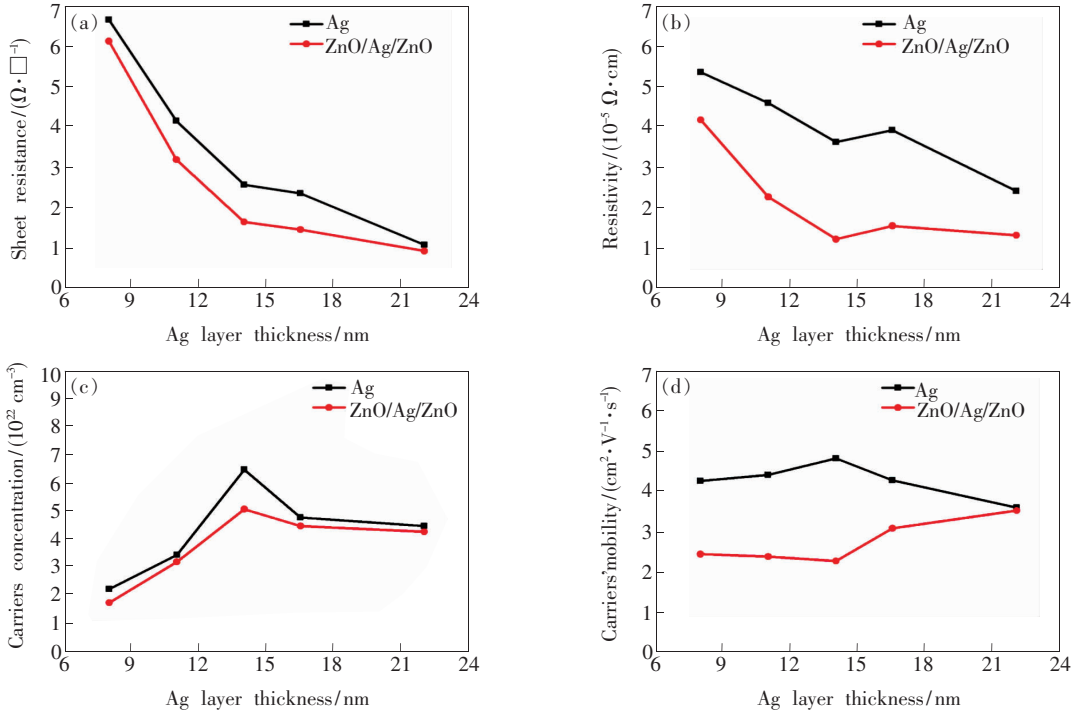


图 6 单层 Ag 与 ZnO/Ag/ZnO 薄膜电学性能变化的对比图。(a)方块电阻;(b)电阻率;(c)载流子浓度;(d)载流子迁移率。

Fig. 6 Comparison of electrical properties of single layer Ag and ZnO/Ag/ZnO thin films. (a) Sheet resistance. (b) Resistivity. (c) Carrier concentration. (d) Carrier mobility.

4 结 论

磁控溅射制备了 ZnO/Ag/ZnO 3 层超薄透明导电薄膜。ZnO/Ag/ZnO 薄膜呈现多晶结构。当 Ag 层厚度为 8 nm 和 11 nm 时,其在可见光区平均透过率分别达 90% 及 86%,方块电阻为 6 $\Omega /$

\square 及 3.2 Ω / \square ,载流子浓度及带电粒子运动能力分别为 $1.73 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 、 $3.18 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 及 $2.41 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $2.35 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,3 层薄膜具有良好的光电性能。按比例增加 ZnO 及 Ag 层厚度,3 层薄膜的方块电阻及其电学性能均略有下降,同时其红外透光率增大。

参 考 文 献:

[1] 李荣荣,赵晋津,司华燕,等. 柔性薄膜太阳能电池的研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(7):878-883.
 LI Y Y, ZHAO J J, SI H Y, *et al.*. Research progress of flexible thin film solar cells [J]. *J. Silicate*, 2014, 42(7): 878-883. (in Chinese)

[2] 申德振,梅增霞,梁会力,等. 氧化锌基材料、异质结构及光电器件 [J]. 发光学报, 2014, 35(1):1-60.
 SHEN D Z, MEI Z X, LIANG H L, *et al.*. Zinc oxide based materials, heterostructures and optoelectronic devices [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(1):1-60. (in Chinese)

[3] 廖雅琴,李愿杰,黄添懋,等. 透明导电薄膜现状与发展趋势 [J]. 东方电气评论, 2014, 128(109):13-18.

- LIAO Y Q, LI Y J, HUANG T M, *et al.*. Status and development trend of transparent conductive film [J]. *Dongfang Electric Rev.*, 2014, 128(109):13-18. (in Chinese)
- [4] 刘晓菲, 王小平, 王丽军, 等. 透明导电薄膜的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10):26-35.
LIU X F, WANG X P, WANG L J, *et al.*. Research progress of transparent conductive thin films [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2012, 49(10):26-35. (in Chinese)
- [5] 李源浩, 武聪伶, 杨君礼, 等. 基于 $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ 透明阳极的顶发射 OLED 的模拟计算与制备 [J]. 发光学报, 2015, 36(4):459-465.
LI Y H, WU C L, YANG J L, *et al.*. Simulation and preparation of top emitting OLED based on $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ transparent anode [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(4):459-465. (in Chinese)
- [6] 于仕辉, 丁玲红, 薛闯, 等. 氧氟比对 $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ 透明导电膜光电性能的影响 [J]. 光子学报, 2012, 41(9):1086-1089.
YU S H, DING L H, XUE C, *et al.*. Influence of O_2/Ar ration on the properties of transparent conductive $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ trilayer film [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2012, 41(9):1086-1089. (in Chinese)
- [7] TANG K, GU S L, YE J D, *et al.*. Mutually beneficial doping of tellurium and nitrogen in ZnO films grown by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2012, 30(5):051508-1-9.
- [8] 刘思宁, 周艳文, 吴川, 等. 粉末靶制备的 AZO/Ag/AZO 透明导电薄膜的光电性能 [J]. 发光学报, 2015, 36(12):1427-1433.
LIU S N, ZHOU Y W, WU C, *et al.*. Optical and electrical properties of AZO/Ag/AZO transparent conductive films prepared by RF magnetron sputtering using powder targets [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(12):1427-1433. (in Chinese)
- [9] 吴伟梁, 林文杰, 赵影文, 等. 金属氧化物多层膜背接触晶体硅太阳能电池 [J]. 太阳能, 2017(4):35-38.
WU W L, LIN W J, ZHAO Y W, *et al.*. Metal oxide multilayer film back contact crystalline silicon solar cells [J]. *Solar Energy*, 2017(4):35-38. (in Chinese)
- [10] 孙瑶, 汪洪. 介质/金属/介质透明导电多层膜的椭圆偏振光谱研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10):259-266.
SUN Y, WANG H. Ellipsometric study of D/M/D transparent conductive multilayers [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2016, 53(10):259-266. (in Chinese)
- [11] 郭亮, 赵东旭, 张振中, 等. ZnO/Ag/ZnO 多层结构薄膜的光电性质 [J]. 发光学报, 2011, 32(9):920-923.
GUO L, ZHAO D X, ZHANG Z Z, *et al.*. Photoelectric properties of ZnO/Ag/ZnO multilayer structure thin films [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(9):920-923. (in Chinese)
- [12] 刘汉法, 张化福, 王振环. 薄膜厚度对 TGZO 透明导电薄膜光电性能的影响 [J]. 真空科学与技术学报, 2011, 31(2):183-186.
LIU H F, ZHANG H F, WANG Z H. Effect of film thickness on photoelectric properties of TGZO transparent conductive thin films [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2011, 31(2):183-186. (in Chinese)
- [13] 战可涛, 曾凡强. 铝镧共掺 ZnO 透明导电薄膜的微观结构和光电性能研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(s1):s100110.
ZHAN K T, ZENG F Q. Microstructure and optical and electrical properties of Al-lanthanum-doped ZnO transparent conducting thin films [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2011, 31(s1):s100110. (in Chinese)
- [14] VAN EEK S, YAN X, LI W M, *et al.*. Investigation of material properties and thermal stabilities of magnetron-sputter-deposited ZnO: Al/Ag/ZnO: Al transparent conductive coatings for thin-film solar cell applications [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2017, 56:08MA12-1-6.
- [15] KIM J H, LEE J H, KIM S W, *et al.*. Highly flexible ZnO/Ag/ZnO conducting electrode for organic photonic devices [J]. *Ceram. Int.*, 2015, 41:7146-7150.
- [16] 汤洋, 郭通达, 张增光, 等. 硝酸铵诱导电沉积氧化锌纳米柱的铝掺杂及光学性质操控 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(5):1288-1296.
TANG Y, GUO L D, ZHANG Z G, *et al.*. Aluminum doping and optical property control of electrodeposited zinc oxide nanorods induced by ammonium nitrate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1288-1296. (in Chinese)
- [17] 彭廉钦, 田晶, 王域, 等. 磁控溅射制备 CdS/ZnO 复合薄膜及其光电性能研究 [J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2015, 41(1):77-82.

PENG L Q, TIAN J, WANG Y, *et al.*. Preparation of CdS/ZnO composite films by magnetron sputtering and their photoelectric properties [J]. *J. Southwest Univ. Nation. (Na. Sci. Edi.)*, 2015, 41(1):77-82. (in Chinese)

- [18] ANDO E, MIYAZAKI M. Moisture resistance of the low-emissivity coatings with a layer structure of Al-doped ZnO/Ag/Al-doped ZnO [J]. *Thin Solid Films*, 2001, 392(2):289-294.
- [19] MEREU B, CAGLAR O, CASHMORE J S, *et al.*. Window p-layer in amorphous pin solar cells using ZnO as transparent conductive oxide [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2016, 152:147-154.



李彤(1994-),女,辽宁锦州人,硕士研究生,2016年于辽宁科技大学获得学士学位,主要从事透明导电薄膜材料制备及性能方面的研究。

E-mail: 646136529@qq.com



周艳文(1966-),女,辽宁鞍山人,教授,硕士生导师,2005年于英国索尔福德大学获得博士学位,主要从事薄膜材料制备及应用方面的研究。

E-mail: zhouyanwen@ustl.edu.cn