

文章编号: 1000-7032(2015)12-1427-07

粉末靶制备的 AZO/Ag/AZO 透明导电薄膜的光电性能

刘思宁, 周艳文*, 吴 川, 吴法宇

(辽宁科技大学 材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 室温下, 采用射频磁控溅射 AZO 粉末靶和 Ag 靶在玻璃基底上制备 Ag 层厚度分别为 12 nm 和 15 nm 两组对称结构掺铝氧化锌/银/掺铝氧化锌(AZO/Ag/AZO)透明导电薄膜, 研究了 Ag 层和 AZO 层厚度对薄膜光电性能的影响。结果表明: 3 层薄膜的可见光区平均透光率达到了 80%, 550 nm 处的最高透过率达到了 88%, 方块电阻小于 $5 \Omega/\square$ 。Ag 层厚度是影响 AZO/Ag/AZO 薄膜光电性能的主要因素, AZO 层的厚度对薄膜光学性能影响较大。

关键词: 多层透明导电薄膜; 金属基透明导电薄膜; 粉末靶; 射频磁控溅射

中图分类号: O484.4; TM24 文献标识码: A DOI: 10.3788/j.issn.1000-7032.2015.12.1427

Optical and Electrical Properties of AZO/Ag/AZO Transparent Conductive Films Prepared by RF Magnetron Sputtering Using Powder Targets

LIU Si-ning, ZHOU Yan-wen*, WU Chuan, WU Fa-yu

(School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

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

Abstract: The sandwich films composed of aluminum doped zinc oxide (AZO) /silver (Ag) /aluminum doped zinc oxide (AZO) layers were prepared on glass substrates by RF magnetron sputtering using AZO powder target and solid Ag target at room temperature. Two groups of AZO/Ag/AZO films were deposited with Ag thickness of 12 nm and 15 nm. The optical and electrical properties of the sandwich films were investigated. The results show that the average transmittance of the films are about 80% within the visible wavelength, and the highest transmittance is 88% at 550 nm. The sheet resistances of the multilayer films are lower than $5 \Omega/\square$. The thickness of Ag layer is the main factor to affect the optical and electrical properties of AZO/Ag/AZO films. The thickness of AZO layer has a certain effect on the optical properties of the sandwich films.

Key words: TCO multilayer films; metal matrix TCO films; powder target; RF magnetron sputtering

1 引 言

随着电子器件的飞速发展,其对透明导电薄膜电极的性能要求也越来越高。除了对更低电阻、更高透过率的要求外,还有红外反射性等其他方面的更高要求。金属基透明导电膜能够满足这

些要求。金属基透明导电膜可利用其在可见光区高反射、低吸收、导电性好的金属层来保证其良好的导电性,用适当厚度的高折射率的电介质膜消减反射作用来获得在可见光区的高透过率^[1-2]。金属基透明导电膜还表现出奇特的性能可调性,即通过改变膜层的厚度,可以对光、电性能进行调

收稿日期: 2015-08-10; 修订日期: 2015-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(51172101, 51372109); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LR2012009)资助项目

控^[3],以适应器件在不同范围的应用要求。根据特征矩阵进行膜层的优化设计,能够实现各膜层的优化组合^[4]。除了设计灵活性,此类薄膜还具有较低的成本和良好的机械加工性。目前商用透明导电薄膜 90% 是氧化铟锡(ITO),因其半导体导电机制的关系,其最佳理论电导率为 $2.5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ ^[1,3],限制了它的应用。铟属稀缺金属,价格昂贵^[5],也需找到廉价替代品。

在金属薄膜材料中,银(Ag)对可见光波段吸收小,红外反射性能和导电性能好,常被作为复合多层膜的金属层材料^[6]。在透明导电氧化物中,铝掺杂氧化锌(AZO)具有价廉无毒的优点,其带宽 3.3 eV 大于可见光子能量^[7-8],在可见光照射下不会引起本征激发,对可见光是透明的。AZO 还具有优良的光电性能、化学稳定性和热稳定性,有望成为 ITO 的替代品^[9]。另外,Ando 等^[10-11]的研究表明,在常温下通过磁控溅射制备出的 AZO/Ag/AZO 薄膜不仅具有良好的光电性能,还有一定的抗潮能力。磁控溅射法是目前最成熟的镀膜方法,适用于低温下镀膜,沉积速率高、附着力好,易于实现工业化大面积镀膜。

本实验使用从大连远东定制的封闭非平衡磁控溅射粉末靶镀膜机,在室温下采用射频磁控溅射法来分别溅射 AZO 粉末靶和 Ag 靶,在玻璃基底上制备了 AZO/Ag/AZO 透明导电薄膜。在目前的磁控溅射制膜工艺中,TCO 均以陶瓷为溅射用靶材^[12-13],还未见用粉末靶制备 3 层薄膜的报道。Kelly 等^[14-16]采用粉末靶材磁控溅射法成功地制备了高质量、无缺陷的铝掺杂氧化锌薄膜,并指出粉末靶材磁控溅射法特别适合于多组分薄膜的制备。

本实验中除通入必要的氩气外,没有通入氧气、氢气等气体,没有进行加温等处理,降低了材料成本。许多研究人员通过氧化反应制备多层膜,Wendt 和 Ellmer 等^[17-19]的报道表明,氧分压是制备薄膜过程中较难控制的参数。在金属氧化物多层透明导电膜的制备过程中,如果氧化物是通过氧化反应制得的,则应需要先解决金属层的氧化保护问题。另外,Ag 加热时易氧化。本实验保证了 Ag 靶、Ag 膜不被氧化。采用射频磁控溅射可保证导电性较差的氧化物粉末靶能够被有效地溅射。

2 实 验

2.1 膜层厚度设计

在玻璃基体上制备 AZO/Ag/AZO 多层透明导电薄膜。通过适当地设计上、中、下薄膜的厚度和折射率,在可见光范围内可以减小反射率而使透射率提高。Ag 膜厚度低于 11 nm 时容易形成不连续膜,导电性差^[20];大于 20 nm 时对近紫外及可见光透过率很低^[21];Ag 膜的厚度在 11 ~ 20 nm 之间时易获得良好的导电率和透光率。所以我们选择 Ag 层的厚度为 12 nm 和 15 nm 来做此次实验。薄膜厚度是入射光在该介质中波长的 1/4 时,在薄膜两个面上反射光的光程恰好等于半个波长的奇数倍,即 $\Delta = 1/2(2k+1)\lambda$ 时,将发生干涉相消,减少光的反射损失,增大透射光的强度^[22]。氧化物的厚度一般为 18 ~ 60 nm 可起到减反增透作用^[23]。所以本实验选择 AZO 膜的上下层的厚度分别为 20, 25, 30, 65 nm。

2.2 制备过程

AZO 靶材用 99.99% 的氧化铝(Al_2O_3)粉末与 99.99% 的氧化锌(ZnO)粉末按 Al 摩尔分数为 2% 混合搅拌均匀后,没有经过任何加温烧结等工艺处理,直接将粉末铺于磁铁上方的铜托盘上,轻压而成。Ag 靶为纯度 99.99% 的固体靶。基片为 SAIL7101 型号载玻片。先用丙酮、酒精和去离子水超声清洗、氮气吹干等工序完成对载玻片的外部清洗,然后置于镀膜机真空腔内。溅射前将系统的真空抽至 3.0×10^{-3} Pa,随后充入纯度 99.99% 的氩气,工作气压为 0.3 Pa。在室温条件下,制备了中间 Ag 层厚度为 12 nm 和 15 nm、上下层 AZO 膜厚度分别为 20, 25, 30, 65 nm 两组 AZO/Ag/AZO 透明导电薄膜。

2.3 检测方法

用 Alpha-step 台阶仪对膜厚进行分析。用 Hall8800 霍尔效应仪对试样进行电学性能分析。用 Lambda900 紫外-可见分光光度计对试样 300 ~ 800 nm 波长范围的透光率进行测试。用 XPert Pro X 射线衍射仪(XRD)对试样进行物相结构分析,测试时使用小角衍射,范围为 $20^\circ \sim 80^\circ$ 。用本原 CSPM5500 原子力显微镜(AFM)进行形貌分析,扫描模式为轻敲模式,频率为 2 Hz,扫描范围为 3 000 nm。

3 结果与讨论

3.1 结构分析

图 1 是 Ag 层厚度固定为 12 nm 和 15 nm、两侧 AZO 层厚度分别为 20、25、30、65 nm 的两组对称结构的 AZO/Ag/AZO 薄膜的 XRD 比较图。从图 1 中可知: 所有多层膜都出现了 ZnO 的 (002)、

(102)、(103) 衍射峰和 Ag 的 (111)、(200)、(220)、(311) 衍射峰, 表明制备的 AZO/Ag/AZO 多层膜呈现多晶结构。AZO 的 (002) 峰强度具有最大的相对强度, 表明 AZO 层具有 ZnO 的六方纤锌矿结构, *c* 轴 (002) 方向的择优取向; Ag 的 (111) 峰具有最大的相对强度, 表明 Ag 层呈立方结构, 具有 (111) 择优取向。

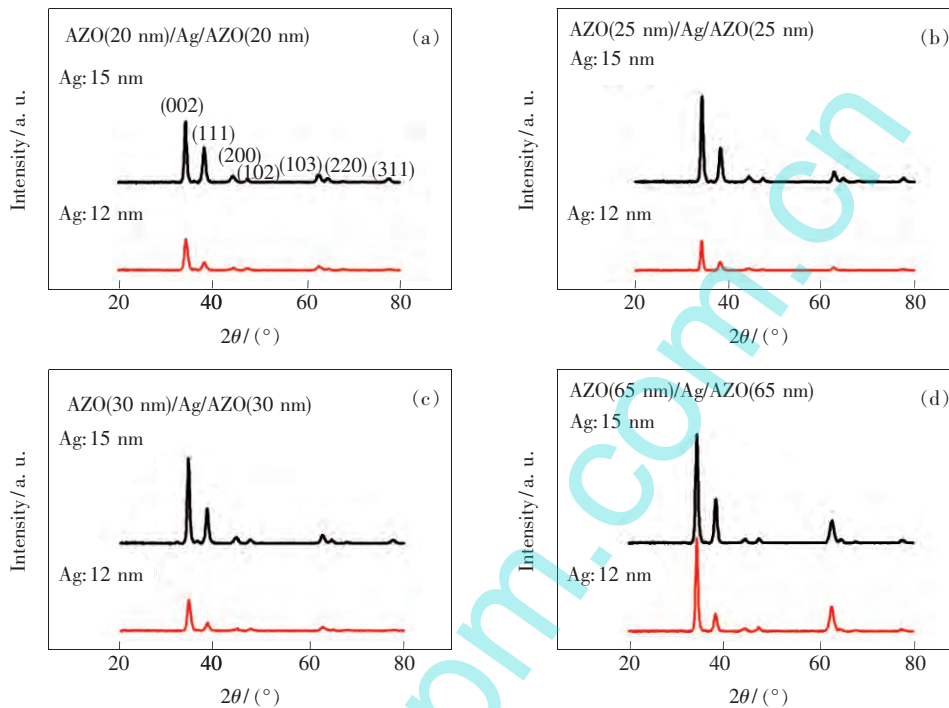


图 1 AZO 厚度为 20 nm (a)、25 nm (b)、30 nm (c)、65 nm (d) 的 AZO/Ag/AZO 膜的 XRD 图。

Fig. 1 XRD patterns of AZO/Ag/AZO films with AZO thickness of 20 nm (a), 25 nm (b), 30 nm (c), 65 nm (d), respectively.

在 Ag 层厚度固定不变时, 随着 AZO 层厚度的增加, AZO (002) 衍射峰逐渐增强, Ag (111) 衍射峰也略微增强。AZO (002) 方向的衍射峰增强, 主要是因为随着 AZO 层逐渐变厚, 沿 (002) 方向生长的晶面增多; Ag (111) 衍射峰略微增强, 是由于随着底层 AZO 厚度的增加, AZO 层的结晶度逐渐变好, 中间 Ag 层晶粒更容易生长在结晶度好的晶面上, 因而 Ag (111) 衍射峰略微增强。AZO 层越厚, 越有利于 Ag 层形成晶状结构, 这表明底层 AZO 的结晶度能影响其上一层 Ag 的结晶度。

在 AZO 层厚度相同时, Ag 层厚度为 15 nm 的多层膜比 Ag 层厚度为 12 nm 的多层膜的 AZO (002)、Ag (111) 衍射峰强度高。这表明较厚的 Ag 层有助于薄膜结晶。由 Scherrer 公式 $D = k\lambda /$

$(\beta \cos\theta)$ 可计算 Ag 层的晶粒大小。其中 β 为峰的半高宽, k 取 0.9, θ 为衍射角, λ 为 X 射线的波长 (0.154 18 nm), D 为晶粒尺寸。Ag 层厚度为 12 nm 时的粒径为 14 nm, Ag 层厚度为 15 nm 时的粒径为 21 nm。这进一步证明, 随着 Ag 层厚度增加, Ag 层的晶粒在长大, Ag 层的结晶程度在增加。这会影响 Ag 层上面即顶层 AZO 的结晶性, 从而导致 Ag 层厚度为 15 nm 的多层膜比 12 nm 的多层膜的 AZO (002) 衍射峰强度高。

3.2 形貌分析

图 2 (a)、(b)、(c)、(d) 是 Ag 层厚度为 15 nm、AZO 厚度分别为 20、25、30、65 nm 的 AZO/Ag/AZO 薄膜的 AFM 表面形貌图, (a₁)、(b₁)、(c₁)、(d₁) 是 Ag 层厚度为 12 nm、两侧 AZO 厚度分别为 20、25、30、65 nm 的 AZO/Ag/AZO 薄膜的

AFM 表面形貌图。表 1 是 AFM 的 Imager 4.6 软件对薄膜的表面粗糙度的分析表。薄膜的 AFM 表面形貌图直观反映薄膜表面平整度、均匀性及

表面颗粒尺寸等生长状况,是衡量薄膜生长质量的依据。由图 2 可知,薄膜的表面平整,没有缺陷孔洞,颗粒大小错落均称,晶界明晰,表明所制备

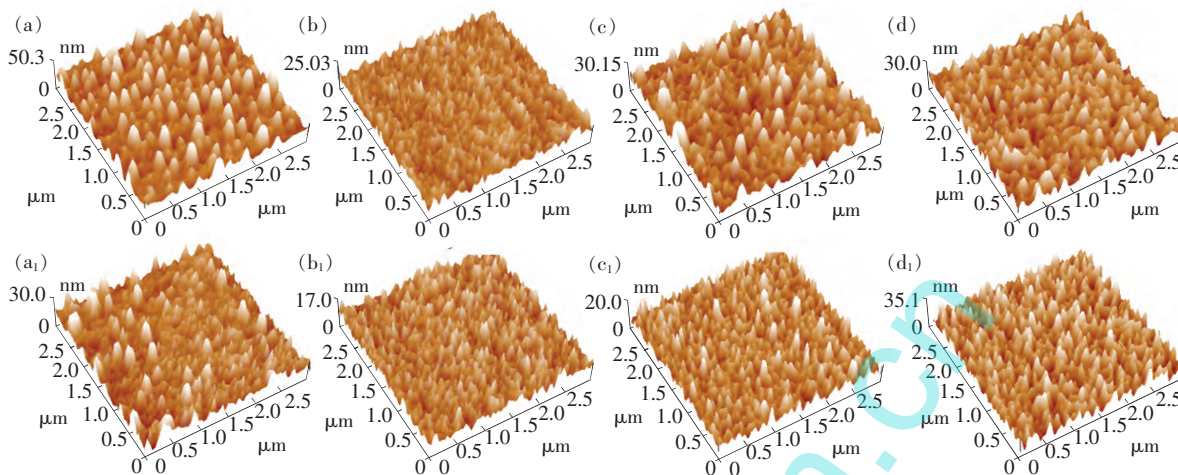


图 2 不同薄膜厚度的 AZO/Ag/AZO 多层薄膜的 AFM 表面形貌。(a) 20 nm/15 nm/20 nm; (b) 25 nm/15 nm/25 nm; (c) 30 nm/15 nm/30 nm; (d) 65 nm/15 nm/65 nm; (a₁) 20 nm/12 nm/20 nm; (b₁) 25 nm/12 nm/25 nm; (c₁) 30 nm/12 nm/30 nm; (d₁) 65 nm/12 nm/65 nm。

Fig. 2 AFM micrographs of AZO/Ag/AZO films with different thickness. (a) 20 nm/15 nm/20 nm. (b) 25 nm/15 nm/25 nm. (c) 30 nm/15 nm/30 nm. (d) 65 nm/15 nm/65 nm. (a₁) 20 nm/12 nm/20 nm. (b₁) 25 nm/12 nm/25 nm. (c₁) 30 nm/12 nm/30 nm. (d₁) 65 nm/12 nm/65 nm.

表 1 AZO/Ag/AZO 薄膜表面的平均粗糙度

Table 1 Summaries of the average surface roughness of AZO/Ag/AZO films

AZO/Ag/AZO	平均粗糙度/nm	AZO/Ag/AZO	平均粗糙度/nm
20 nm/12 nm/20 nm	4.09	20 nm/15 nm/20 nm	7.53
25 nm/12 nm/25 nm	2.28	25 nm/15 nm/25 nm	2.50
30 nm/12 nm/30 nm	2.66	30 nm/15 nm/30 nm	4.42
65 nm/12 nm/65 nm	3.48	65 nm/15 nm/65 nm	3.95

的薄膜质量较好。

由图 2 可以看出,对于 AZO 厚度都是 20 nm 的两组 AZO/Ag/AZO 薄膜,由于溅射时间短,衬底温度低,溅射到衬底的原子团迁移能力较低,所以薄膜表面出现大颗粒且粗糙。对于 AZO 厚度都是 25 nm 的两组 AZO/Ag/AZO 薄膜,由于溅射时间相对增加,衬底温度较高,溅射到衬底的原子团迁移能力变强,所以薄膜表面颗粒密度增加,晶粒减小,粗糙度减小。对于 AZO 厚度为 30 nm 和 65 nm 的 AZO/Ag/AZO 薄膜,随着 AZO 厚度的增加,溅射时间延长,衬底温度升高,原子的体扩散开始发挥作用,晶粒又开始长大,薄膜经过再结晶,晶粒变得均匀密实。Ag 层 15 nm 比 12 nm 这组晶粒大一些,饱满一些,其形貌相近。这是因

为 Ag 层 15 nm 要比 12 nm 溅射时间长,结晶状况好一些,晶粒趋于完善,长在其上层的 AZO 原子更容易长成晶粒,薄膜表面颗粒尺寸在逐渐增大,颗粒变得圆滑饱满致密。这表明中间 Ag 层的微结构会影响上层 AZO 层的微结构。

3.3 光学性质

图 3 是 Ag 层厚度为 12 nm 和 15 nm、AZO 层厚度为 20 nm、25 nm、30 nm、65 nm 两组对称结构 AZO/Ag/AZO 薄膜的透过率曲线。从图 3 可以看到,Ag 层厚度为 12 nm 的三层膜的透过率高于 Ag 层厚度为 15 nm 的三层膜,透过率对应的波长范围增宽,透过率曲线形状类似。这是因为 Ag 层厚度增加会导致吸光度增大,所以透光率会有所下降。对于两组薄膜,随着 AZO 厚度从 20 nm 增加到 30 nm,

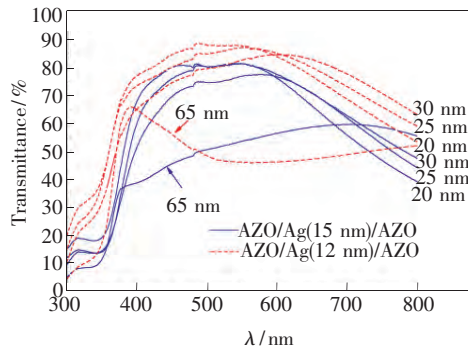


图 3 AZO/Ag/AZO 薄膜的光透过率曲线

Fig. 3 Transmittance spectra of AZO/Ag/AZO films

3 层薄膜的透光率变化不大, 曲线中最高透过率对应的波长向长波方向移动。原因是一定的 AZO 层厚度 对应一定波长的最佳单色光减反射效果。可见光区不是单色的, 而是有一定的频宽, 所以当 AZO 层厚度增加时, 减反射的最佳波长也在增加, 透射峰的位置向长波方向移动, 透射光的范围也在增宽。当两侧 AZO 厚度达到 65 nm 时, 由于其厚度快要离开入射光中波长的 1/4 范围, 减反增透作用很小, 所以透过率降低。从图 3 还可以看出, 无论 Ag 层厚度是多少, 相同厚度的 AZO 层的减反效果是相同的, 多层膜的透过率曲

线形状类似, 但宽展幅度不相同。AZO(20 nm) / Ag(12 nm) / AZO(20 nm) 这组薄膜在 550 nm 处的透光率达到了 88%, 可见光 390 ~ 760 nm 范围的平均透光率为 79%; AZO(25 nm) / Ag(12 nm) / AZO(25 nm) 这组薄膜在 550 nm 处的透光率为 87%, 可见光 390 ~ 760 nm 范围的平均透光率为 80%。

3.4 电学性能

图 4 为 Ag 层分别为 12 nm 和 15 nm、两侧 AZO 厚度为 20, 25, 30, 65 nm 两组 AZO/Ag/AZO 薄膜的电学性能对比图。从图 4 中看到, Ag 层厚度为 15 nm 这组薄膜的方块电阻、电阻率比 Ag 层厚度为 12 nm 这组薄膜低, 载流子浓度、迁移率比 Ag 层厚度为 12 nm 这组薄膜高, 即电学性能更好。这表明多层膜的电学性能主要取决于中间 Ag 层的厚度。

Ag 层厚度为 15 nm 和 12 nm 这两组薄膜, 随着 AZO 厚度的增加, AZO/Ag/AZO 薄膜的方块电阻、电阻率、载流子浓度、迁移率变化趋势相同。当 AZO 层厚度为 20, 25, 30 nm 时, 由于薄膜的厚度只有几十纳米, 多层膜中的传导电子主要受到薄膜的表面和晶界的非弹性散射作用^[24], 所以方

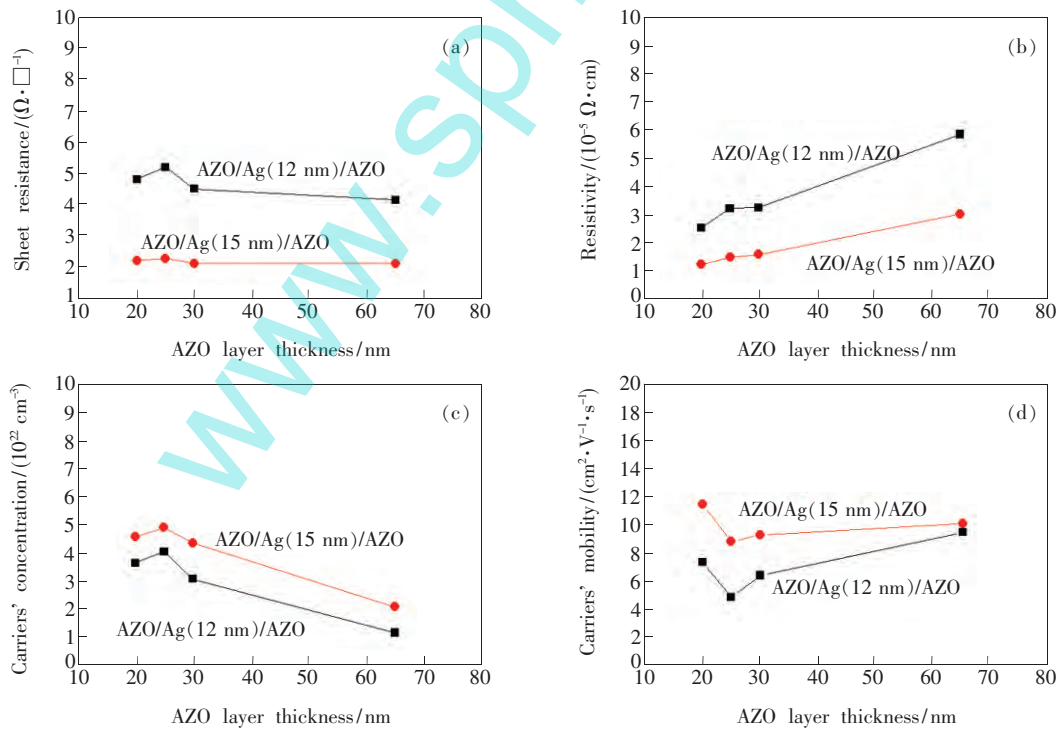


图 4 两组 AZO/Ag/AZO 薄膜电学性能随两侧 AZO 层厚度变化的对比图。(a) 方块电阻; (b) 电阻率; (c) 载流子浓度; (d) 载流子迁移率。

Fig. 4 Electrical properties of two groups AZO/Ag/AZO films changed with the thickness of AZO layers. (a) Sheet resistance. (b) Resistivity. (c) Carrier concentration. (d) Carrier mobility.

块电阻、电阻率、载流子浓度、迁移率在小数值范围内波动变化。当 AZO 层厚度增加到 65 nm 时, 两组薄膜的方块电阻变化不大, 这是由于多层膜的方块电阻主要取决于 Ag 层厚度。但电阻率有所升高, 这是因为电阻率为方块电阻与薄膜厚度之积, 薄膜厚度增加导致电阻率增大。AZO 层厚度达到 65 nm 之后, AZO 层的导电性在 3 层薄膜中的作用开始有所体现, 载流子浓度下降, 迁移率略有提高。原因是磁控溅射时, 随着 AZO 层厚度的增加, 溅射粒子为基体提供了更多能量, 使基体温度会略微升高, Ag 层中的电子扩散增强, 所以较厚的 AZO 层更容易吸附电子, 使 3 层薄膜的载流子浓度降低。载流子浓度降低的同时, 其受表面、界面及晶体缺陷的散射度下降, 电子运动速率有所加快, 迁移率略有增加。当 Ag 层厚度为 15 nm 时, 3 层薄膜的最低方阻为 $2.01 \Omega/\square$ 。

3.5 稳定性

薄膜的稳定性十分重要。为表征薄膜性能的稳定性, 将本次实验制得的薄膜置于空气中, 每隔 3 个月测量一次方阻值, 测得的数据绘制于图 5。从图 5 中可以看到, 多层膜的电学性能不是线性变化, 只是波动变化。可以推断多层膜方阻的变化与测量环境及测量误差有关。半年的时间证明了这组薄膜的稳定性。这是因为磁控溅射法制备的薄膜的致密性较高, 而 AZO 层致密性越高, 3 层薄膜中的 Ag 层受氧化、受湿的几率就越低, 多

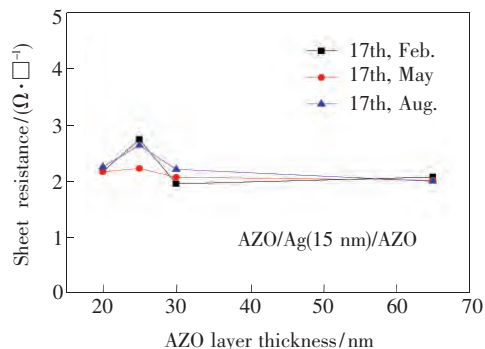


图 5 不同时间下测得的 AZO/Ag(15 nm)/AZO 薄膜的方块电阻

Fig. 5 Sheet resistance of AZO/Ag(15 nm)/AZO films measured at different time

层膜的光、电稳定性就越高。

4 结 论

采用粉末靶射频磁控溅射方法将 AZO/Ag/AZO 多层薄膜沉积在玻璃衬底上, Ag 层厚度为 12 nm 和 15 nm。薄膜在可见光区的平均透光率达到了 80%, 550 nm 处的透过率最高达 88%, 方阻小于 $5 \Omega/\square$, 具有优良的光、电性能。在 AZO/Ag/AZO 多层薄膜中, Ag 层是影响多层膜光、电性能的主要因素。AZO 层厚度在可见光区入射光波长的 1/4 范围内时, 随着 AZO 层厚度的增加, 多层膜的透射峰向长波方向移动, 可见光透射范围变宽。

参 考 文 献:

- [1] Li J M, Cai X, Mao Y F. TiO₂/Ag/TiO₂ nano-multilayer [J]. *Mater. Mechan. Eng.* (机械工程材料), 2004, 28(2): 34-37 (in Chinese).
- [2] Zuo J, Guo X Y, Liu X Y. V₂O₅/Ag/V₂O₅ multilayer transparent conductive films based on sol-gel and electron beam evaporation techniques [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2014, 35(3): 360-365 (in Chinese).
- [3] Cai X. Progress in research of the adjustable transparent conducting multilayers [J]. *J. Funct. Mater.* (功能材料), 2007, 38(S1): 1-3 (in Chinese).
- [4] Wang Z G, Cai X. Progress in research of metal-based compound transparent conducting multilayers [J]. *Mater. Mechan. Eng.* (机械工程材料), 2005, 29(2): 1-3 (in Chinese).
- [5] Guo M X. Preparation and characterization of Al-Ti co-doped zinc oxide films [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* (液晶与显示), 2011, 26(2): 161-164 (in Chinese).
- [6] Fang R C. *Solid State Spectroscopy* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001: 26 (in Chinese).
- [7] 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.* (光学精密工程), 2015, 23(5): 1288-1296 (in Chinese).
- [8] Shen D Z, Mei Z X, Liang H L, et al. ZnO-based material, heterojunction and photoelectric device [J]. *Chin. J.*

- Lumin.* (发光学报), 2014, 35(1): 1-60 (in Chinese).
- [9] Shi S J, Zhu D L, Lv Y M, *et al.* Effects of post-annealing in Ar atmosphere on the electrical properties of HAZO films [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2012, 33(7): 742-746 (in Chinese).
- [10] 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.
- [11] Ando E, Miyazaki M. Moisture degradation mechanism of silver-based low-emissivity coatings [J]. *Thin Solid Films*, 1999, 351(1-2): 308-313.
- [12] Lv K, Zhu B L, Li K, *et al.* Effect of hydrogen and Cu interlayer on the optical and electrical properties of GZO thin film [J]. *J. Inorg. Mater.* (无机材料学报), 2014, 29(5): 493-497 (in Chinese).
- [13] Yu S H, Ding L H, Xue C, *et al.* Influence of O₂/Ar ration on the properties of transparent conductive SnO₂/Ag/SnO₂ trilayer film [J]. *Acta Photon. Sinica* (光子学报), 2012, 41(9): 1086-1089 (in Chinese).
- [14] Kelly P J, Zhou Y W. Zinc oxide-based transparent conductive oxide films prepared by pulsed magnetron sputtering from powder targets: Process features and film properties [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2006, 24(5): 1782-1789.
- [15] Kelly P J, Zhou Y W, Postill A. A novel technique for the deposition of aluminium-doped zinc oxide films [J]. *Thin Solid Films*, 2003, 426(1/2): 111-116.
- [16] Kelly P J, Zhou Y W, Postill A, *et al.* The characteristics of aluminium-doped zinc oxide films prepared by pulsed magnetron sputtering from powder targets [J]. *Thin Solid Films*, 2004, 447/448(1): 33-39.
- [17] Wendt R, Ellmer K. Desorption of Zn from a growing ZnO: Al films deposited by magnetron sputtering [J]. *Surf. Coating Technol.*, 1997, 93(1): 27-31.
- [18] Wendt R, Ellmer K. DC and RF (reactive) magnetron sputtering of ZnO: Al films from metallic and ceramic target: A comparative study [J]. *Surf. Coating Technol.*, 1997, 93(1): 21-26.
- [19] Ellmer K. Influence of discharge parameters on the layer properties of reactive by magnetron sputtered ZnO: Al films of Zn from a growing ZnO: Al films [J]. *Thin Solid Films*, 1994, 247(1): 15-23.
- [20] Liu J, Liu D, Gu Z A. Research progress of D/M/D transparent conductive multilayer films [J]. *Mater. Rev.* (材料导报), 2005, 19(8): 9-12 (in Chinese).
- [21] Jiang X, Sun C, Rui H J, *et al.* *Transparent Conductive Oxide Films* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 5-6 (in Chinese).
- [22] Lu J J, Liu W G. *Optical Thin Film Technology* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005: 16-27 (in Chinese).
- [23] Jia F, Qiao X L, Chen J G, *et al.* Research on metal-based compound transparent conducting multilayer films [J]. *Chin. J. Rare met.* (稀有金属), 2006, 30(4): 505-509 (in Chinese).
- [24] Lin Y Q, Feng S M, Wang K X, *et al.* Effects of film thickness less than electrical mean free path on reflectivity [J]. *Acta Photon. Sinica* (光子学报), 2011, 40(2): 263-265 (in Chinese).



刘思宁(1990-) ,女,辽宁海城人,硕士研究生,2013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: liuxiyiji@163.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