

文章编号: 1000-7032(2015)11-1300-07

## 用粉末靶在玻璃和 PI 衬底上制备 AZO/Ag/AZO 薄膜

刘思宁, 周艳文\*, 沙天怡

(辽宁科技大学 材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要:** 室温下在玻璃和聚酰亚胺两种不同衬底上, 采用射频磁控溅射法溅射掺铝氧化锌 (AZO) 粉末靶和固体 Ag 靶, 制备了两组 AZO/Ag/AZO 3 层透明导电薄膜, 研究了 AZO 层厚度对不同衬底 3 层膜结构和光电性能的影响。结果表明: 不同衬底的两组 AZO/Ag/AZO 薄膜均为多晶膜。当 Ag 层厚度不变时, 随着 AZO 层厚度的增加, 两组薄膜电学性能变化不大, 透射峰向长波方向移动。玻璃和 PI 衬底上制备的 AZO(30 nm)/Ag(14 nm)/AZO(30 nm) 薄膜, 在 550 nm 处的透光率分别为 85% 和 70%, 方块电阻分别为  $2.6 \Omega/\square$  和  $4.6 \Omega/\square$ 。

**关键词:** 粉末靶; 有机衬底; 多层透明导电薄膜; 磁控溅射

中图分类号: O484.4; TM24 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20153611.1300

## Preparation of AZO/Ag/AZO Transparent Conductive Films Deposited on Glass and Polyimide Substrates Using Powder Targets

LIU Si-ning, ZHOU Yan-wen\*, SHA Tian-yi

(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 ions doped zinc oxide (AZO)/silver (Ag)/AZO films were prepared on polyimide (PI) and glass substrates by RF magnetron sputtering using the powder AZO target and the solid Ag target at room temperature. The effect of the thicknesses of AZO layers on the structure, optical and electrical properties of the sandwich films was investigated. The results show that the as-deposited films are polycrystalline on both PI and glass substrates. The changes of the electrical properties of the sandwich films are not obvious, and the positions of the highest transmittance shift towards the long wavelength region with the increasing of AZO thickness. When the thicknesses of the films are 30 nm of AZO and 14 nm of Ag, the sheet resistances are as low as  $2.6 \Omega/\square$  and  $4.6 \Omega/\square$  on glass and PI substrates, respectively. The transmittances of the films at 550 nm are 85% on glass and 70% on PI substrates.

**Key words:** powder target; organic substrate; TCO multilayer film; magnetron sputtering

### 1 引 言

透明导电薄膜 (Transparent conductive oxide,

TCO) 通常是沉积在玻璃衬底上, 具有良好的光电性能。玻璃是硬脆材料, 不能弯曲, 容易破碎, 限制了其在某些方面的应用<sup>[1]</sup>。柔性衬底透明导

收稿日期: 2015-08-04; 修订日期: 2015-09-24

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

电薄膜不仅具有硬质衬底透明导电薄膜的光电性能,而且具有可挠曲性、易于卷对卷大面积生产<sup>[2]</sup>、耐冲击不易破碎、破损后比玻璃安全、重量轻便于运输以及价格低等优点<sup>[3]</sup>。柔性衬底透明导电薄膜可用于柔性发光器件、液晶显示器、太阳能电池、电磁屏蔽等方面<sup>[4-6]</sup>,有望成为硬质衬底材料的替代产品。但柔性衬底不耐高温,真空环境中放气率较大,在薄膜制备过程中有机元素容易释放出来,这些缺点给制膜带来了一定的难度。所以对柔性衬底的选择和制备工艺的优化,是制备优质柔性透明导电膜的关键因素。

PI 薄膜有一定的耐高温和力学性能,还有挠度好、不易损坏、价格较低等优点,是首选的柔性衬底材料。在透明导电氧化物中,AZO 价廉无毒,带宽为 3.3 eV,化学稳定性和热稳定性好,有望成为 ITO 的替代品。多层膜中的金属层可以保证薄膜良好的导电性能,高折射率的介质膜消减了金属薄膜对光的反射作用,确保在可见光区获得较高透过率<sup>[7]</sup>。在金属中,Ag 对可见光波段吸收最小,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<sup>[8-9]</sup>。磁控溅射法是目前最成熟的镀膜方法,适用于低温下镀膜,可制备高熔点物质的薄膜。磁控溅射法可以大面积制取均匀的膜层,容易控制膜的成分,膜层附着力强,有效解决了柔性基底不耐高温等问题。

目前采用磁控溅射法制备 TCO 薄膜,多数以氧化物陶瓷靶为溅射用靶材。陶瓷靶材需要经过高温压制、高温烧结等复杂工艺,使用过程中易开裂,利用率不高,增加了制膜成本。而粉末靶不经过任何后序工艺处理,直接将按比例均匀混合后的粉末铺于磁铁上方的铜托盘,轻压而成<sup>[10-12]</sup>,具有配制灵活、操作简便的优点。Kelly 等<sup>[11,13-14]</sup>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份薄膜的制备。

本实验在室温下用射频磁控溅射法来溅射 AZO 粉末靶、固体金属 Ag 靶。在玻璃和 PI 衬底上分别制备了两组掺铝氧化锌/银/掺铝氧化锌(AZO/Ag/AZO)的 3 层透明导电薄膜。为了使沉积工艺完全相同,将玻璃和 PI 衬底同时放入真空室里制备出这两组薄膜。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。Wendt 和 Ellmer 等<sup>[15-17]</sup>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,应先解决金属层的氧化保护问题。另外,Ag 加热时易氧化。本实验没有加入氧气,保证了中间 Ag 层不被氧化。薄膜制备过程中没有加温,没有加热退火等处理,不会使 Ag 薄膜因热膨胀而改变结构<sup>[18-19]</sup>,同时也避免了柔性衬底不耐高温的问题。

## 2 实 验

### 2.1 膜厚设计

通过优化上、中、下层薄膜的厚度,在可见光范围内可以减少 Ag 层反射率使透射率提高。当 Ag 膜厚度小于 12 nm 时,薄膜容易形成不连续膜且导电性差<sup>[20-21]</sup>;厚度大于 20 nm 时,近紫外及可见光区的透射率又会很低<sup>[22]</sup>,Ag 膜的厚度在 12 ~ 20 nm 之间时易获得良好的导电率和透光率。本实验选择 Ag 层厚度为 14 nm。AZO 层厚度的选择是从薄膜干涉理论得知,薄膜厚度在满足光程差  $\Delta = (2m + 1)\lambda/4$  时可以起到减反增透作用<sup>[23]</sup>。根据光学导纳理论及相应公式,可估算氧化物的厚度一般为 18 ~ 60 nm 时,其折射率能与金属膜的反射率相匹配,使氧化物/金属/氧化物多层膜具有好的透光性<sup>[24]</sup>。所以本实验选择 AZO 膜的上下层的厚度分为 20, 30, 65 nm 来制备这两组 AZO/Ag/AZO 透明导电薄膜。

### 2.2 薄膜制备

薄膜是使用大连远东定制的封闭非平衡磁控溅射粉末靶镀膜机制备的,采用 AE600X 射频电源溅射镀膜,射频频率为 13.56 MHz。AZO 靶材用 99.99% 的氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )粉末与 99.99% 的氧化锌(ZnO)粉末,按 Al 的摩尔分数为 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。溅射前将系统的真空抽至  $3.0 \times 10^{-3}$  Pa,再充入纯度 99.99% 的氩气,溅射气体压强为 0.3 Pa。在室温条件下,采用 SAIL7101 型号载玻片和有机聚合物薄膜聚酰亚胺(PI)作为衬底同时进行溅射。中间 Ag 层厚度固定为 14 nm,两侧 AZO 层厚度分别为 20, 30, 65 nm。

### 2.3 表征

使用 Alpha-step 台阶仪检测膜厚度。采用四

探针测试仪测试薄膜的电学性能。采用 Lambda 900 紫外-可见分光光度计测试薄膜在 300 ~ 800 nm 波长范围内的透光率。采用 X'Pert Pro X 射线衍射仪 (XRD) 对薄膜进行物相结构分析,测试时使用小角衍射,范围为  $20^\circ \sim 80^\circ$ 。采用本原 CSPM5500 型原子力显微镜 (AFM) 进行形貌分析,以轻敲模式在频率 2 Hz 下扫描 2 000 nm 范围,并用 AFM 的 Imager 4.6 软件对薄膜的粒度进行了分析。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 结构分析

图 1 是在玻璃与 PI 两种不同衬底上制备的 AZO 层厚度分别为 20, 30, 65 nm 时的两组 3 层 AZO/Ag(14 nm)/AZO 薄膜的 XRD 图谱。

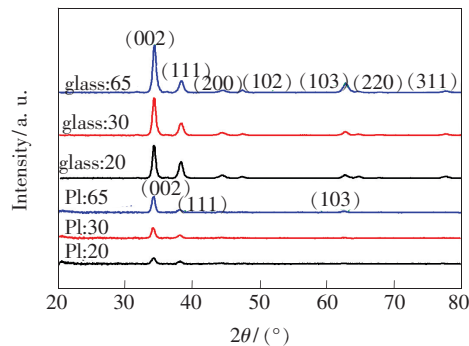


图 1 玻璃衬底和 PI 衬底上的 AZO/Ag(14 nm)/AZO 薄膜的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of AZO/Ag(14 nm)/AZO films deposited on glass and PI substrates

由图 1 可知,在玻璃衬底上制备的 AZO/Ag(14 nm)/AZO 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,在 PI 衬底上只出现了 ZnO 的 (002)、(103) 衍射峰和 Ag 的 (111) 衍射峰。这表明玻璃衬底与 PI 衬底上制备的 AZO/Ag(14 nm)/AZO 多层膜都为多晶结构,ZnO 的 (002) 峰具有最大的相对强度,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) 峰都具有较大的相对强度,表明 Ag 层呈立方结构,具有 (111) 择优取向。

通过比较玻璃与 PI 两种衬底上 3 层膜衍射峰的相对强度,发现在相同工艺条件下制备相同厚度的薄膜,玻璃衬底样品的衍射峰强度明显高于 PI 衬底,表明在玻璃衬底上薄膜的结晶要比在

PI 衬底上好。原因是柔性衬底 PI 的表面惰性大,与 AZO 薄膜的晶格匹配不如玻璃衬底好;PI 衬底热稳定性较玻璃衬底差,高能溅射粒子的长时间轰击会使其温度升高而膨胀变形,PI 的热膨胀系数与 AZO 相差较大,薄膜容易产生残余热应力等缺陷,影响 AZO 结晶。另外,柔性衬底 PI 为有机物,其结构本身存在大量的氧,溅射过程中容易分解溢出,造成额外的氧分压,降低 AZO 晶化程度。所以相同条件下,PI 衬底上沉积的 AZO 薄膜结晶性不如玻璃衬底上的好。这样导致 Ag 层薄膜生长在其上的结晶质量也较差,进一步使得上层 AZO 层的结晶质量下降,从而影响整个多层膜的结晶。因此 PI 衬底上的薄膜衍射峰强度较低。另外,不论是 PI 衬底还是玻璃衬底,随着 AZO 层厚度增加,AZO (002) 衍射峰的强度逐渐提高,这是因为随着 AZO 厚度逐渐变厚,沿 (002) 方向生长的晶粒增多。

#### 3.2 形貌分析

图 2 是 AZO 层厚度分别为 20, 30, 65 nm 时,两组 AZO/Ag(14 nm)/AZO 薄膜的 AFM 表面形貌图,玻璃衬底样品标号为 a、b、c,PI 衬底样品标号为  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 。表 1 是 AFM 的 Imager 4.6 软件对薄膜的粒度分析表。结合图 2 和表 1 可知,在相同的制备条件下,玻璃衬底上的多层膜随 AZO 层厚度的增加,薄膜粒径减小,表面粗糙度也减小。PI 衬底上的多层膜随 AZO 层厚度的增加,薄膜粒径增大,表面粗糙度也增大。两组薄膜制备工艺完全一致,但形貌却不相同。这是由于磁控溅射法沉积薄膜是以惰性气体放电产生的正离子轰击靶材,入射离子与靶材发生碰撞,把靶材表面原子溅射出来,被溅射出来的原子带有一定的动能沿一定的方向射向衬底,在衬底上沉积出薄膜。虽然溅射过程是在室温下进行,但衬底上受高能粒子的碰撞是会升温的,而且衬底温度随镀膜时间的延长而升高。室温下溅射时,衬底温度对玻璃衬底薄膜表面结晶度影响不大。随着 AZO 层厚度的增加,颗粒密度增大,薄膜表面的粒径在减小,表面粗糙度也在减小。由于玻璃衬底比较平整,AZO 薄膜生长在其上面,很容易长成晶体小颗粒,随着溅射时间的延长,晶粒不断完善。而对于 PI 衬底上的 3 层膜,当 AZO 层厚度为 20 nm 时,3 层膜表面比较平整,膜层致密,晶界明晰。这是由于这组薄膜较薄,溅射时间短,衬底的温度



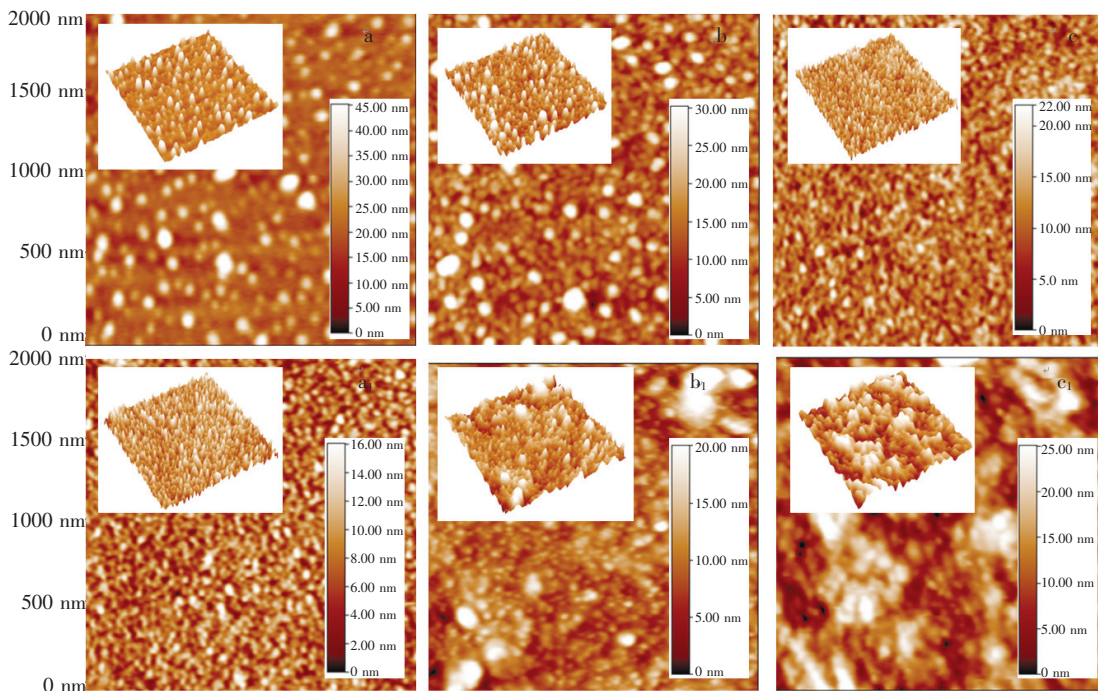


图 2 玻璃衬底与 PI 衬底上两组 AZO/Ag(14 nm)/AZO 薄膜的 AFM 表面形貌图

Fig.2 AFM micrographs of AZO/Ag(14 nm)/AZO films deposited on glass and PI substrates

表 1 薄膜的粒度分析

Table 1 Summaries of the grain size within different films

| AZO/Ag/AZO 薄膜     | 玻璃衬底上     |           | PI 衬底上  |         |
|-------------------|-----------|-----------|---------|---------|
|                   | 均方根粗糙度/nm | 均方根粗糙度/nm | 平均直径/nm | 平均直径/nm |
| 20 nm/14 nm/20 nm | 6.32      | 2.6       | 214.6   | 66.3    |
| 30 nm/14 nm/30 nm | 4.21      | 3.44      | 157.5   | 79.59   |
| 65 nm/14 nm/65 nm | 3.18      | 4.93      | 119.7   | 119     |

较低,对 PI 衬底上的薄膜生长影响不大。随着 AZO 层厚度的增加,PI 衬底的多层膜表面不再平整,结晶变差,晶界不清晰,团聚现象加重,表面粗糙度增大。这是由于随着 AZO 薄膜厚度的增加,高能粒子溅射时间延长,PI 衬底的温度会升高,进而改变 PI 膜的结构,使其有膨胀的趋势,将有

机元素释放出来,影响薄膜的质量,使薄膜表面的颗粒团聚,团聚状的晶粒相互合并,使薄膜表面晶粒大小不匀,晶界不清,粗糙度增大。

### 3.3 光学性能

图 3(a)是玻璃衬底和 PI 衬底上单层 AZO 薄膜的透光率曲线,图 3(b)是 3 层 AZO/Ag(14 nm)/

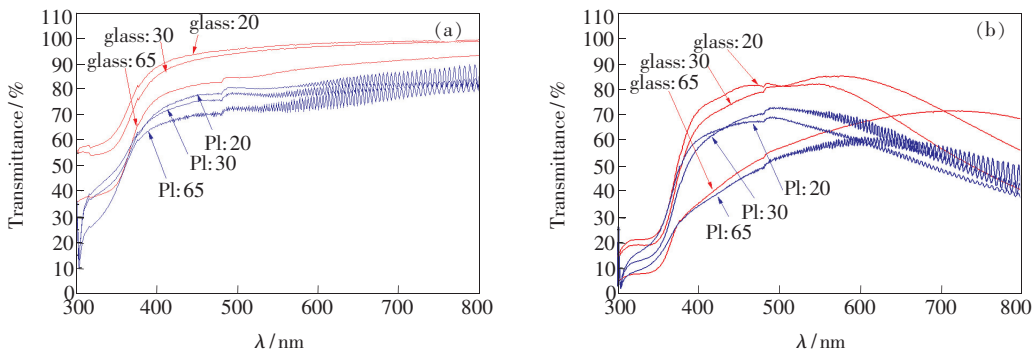


图 3 玻璃和 PI 衬底上 AZO (a) 和 AZO/Ag/AZO(b) 薄膜的透光率曲线

Fig.3 Transmittance spectra of AZO films (a) and AZO/Ag/AZO films (b) deposited on glass and PI substrates

AZO 薄膜的透光率曲线, AZO 厚度分别为 20, 30, 65 nm。

由图 3(a) 可见, 随着 AZO 厚度的增加, 薄膜的透光率在相应地减小。AZO 薄膜厚度为 20 nm 时的透光率最高, 玻璃和 PI 衬底上在 550 nm 处的透光率分别为 97% 和 91%。

由图 3(b) 可见, 当 Ag 层厚度固定不变时, 随着 AZO 层厚度的增加, 玻璃和 PI 衬底上的两组 3 层薄膜的透光率变化趋势相同, 先增后减, 透射峰的位置向长波方向移动, 透射范围变宽。由于在玻璃和 PI 衬底上, 对应相同 AZO 层厚度和相同 Ag 层厚度的减反效果相同, 所以透光率的变化趋势相同。呈现先增后减的原因是, AZO 层的厚度在入射光波长的  $1/4$  范围内, 起到减反增透作用, 减少反射只能使某个特定波长的光尽量减少反射, 对于相近波长的其他反射光有不同程度的减弱, 所以 AZO/Ag/AZO 透光率有个最大值, 达到最大值后, 透光率随 AZO 层厚度的增加而逐渐下降。随着 AZO 层厚度的增加, 透射峰的位置向长波方向移动, 透射范围增宽。当两侧 AZO 厚度为 65 nm 时, 快要离开入射光中波长的  $\lambda/4$  范围, 起到减反增透作用很小, 所以透光率低。以玻璃和 PI 为衬底制备的两组 AZO(30 nm)/Ag(14 nm)/AZO(30 nm) 薄膜的透光率最高, 在 550 nm 处分别为 85% 和 70%。

玻璃衬底上的单层膜、3 层膜的透光率都明

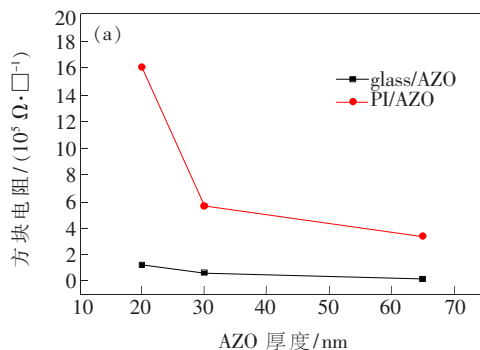


图 4 玻璃和 PI 衬底上 AZO(a) 和 AZO/Ag/AZO(b) 薄膜的方块电阻随 AZO 薄膜厚度的变化

Fig. 4 Sheet resistance vs. AZO thickness of AZO (a) and AZO/Ag/AZO (b) films deposited on glass and PI substrates

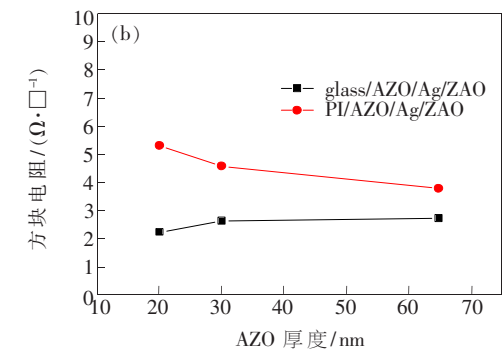
由图 4(a) 可见, 玻璃和 PI 两种不同衬底上的单层 AZO 薄膜的方块电阻随着 AZO 厚度的增加而减小, 表明薄膜的导电性随着厚度的增加而变好。玻璃衬底上单层 AZO 薄膜的方块电阻低于 PI 衬底, 表明玻璃衬底单层 AZO 薄膜比 PI 衬底单层 AZO 薄膜的导电性好。对于玻璃和 PI 两

种不同衬底, 单层 AZO 厚度为 30 nm 时, 方块电阻分别为  $6.6 \times 10^4 \Omega/\square$  和  $5.66 \times 10^5 \Omega/\square$ 。

显高于 PI 衬底, 原因是 PI 衬底制备的薄膜表面质量不如玻璃衬底, 表面粗糙度大, 结晶状况不好, 增加了光的散射, 降低了光的透射。玻璃和 PI 衬底上的单层膜的透光率都高于相对应的 3 层膜, 而且单层膜与 3 层膜的透光曲线形状不同。这是由于中间 Ag 层对光的吸收和反射很强, Ag 层透光率很低。即便 AZO 层厚度为光程差  $\Delta = (2m + 1)\lambda/4$  时, AZO 层对 Ag 层起到很大的减反增透作用, 也只能是在这一段波长范围的增透。超过这个波长范围, 由于受 Ag 层对光吸收和反射的影响, 3 层膜的透光率会快速下降, 使其透光曲线成为下抛物线状, 这也是 3 层膜平均透光率不高的缘故。

### 3.4 电学性能

由于 3 层 AZO/Ag/AZO 薄膜的平均透光率不高, 所以需要对各层膜的厚度进一步优化。在保证电学性能的前提下, Ag 层厚度为刚刚连续膜时透光率最好, 此时厚度在 10 ~ 12 nm 之间。本实验 Ag 层厚度为 14 nm, 超出透光最佳厚度范围, 所以还需要减薄。对于 AZO 层, 除了厚度需要优化, 使其满足与入射光光程差  $\Delta = (2m + 1)\lambda/4$  相匹配, 还要调整  $Al_2O_3$  的掺杂量, 提高 AZO 层折射率。



种不同衬底, 单层 AZO 厚度为 30 nm 时, 方块电阻分别为  $6.6 \times 10^4 \Omega/\square$  和  $5.66 \times 10^5 \Omega/\square$ 。

由图 4(b) 可见, 对于玻璃和 PI 两种不同衬底 3 层 AZO/Ag(14 nm)/AZO 薄膜, 随着 AZO 层厚度的增加, 其方块电阻变化不大。3 层膜的方阻可以近似地认为是各层薄膜方阻并联而成<sup>[25]</sup>,

由于室温下制备的 AZO 膜的方块电阻远大于 Ag 膜, 所以 AZO/Ag/AZO 多层膜的方块电阻主要取决于中间 Ag 膜。Ag 层厚度不变, AZO/Ag/AZO 薄膜的电学性能变化不大。但随着 AZO 厚度的增加, 薄膜的电学性能在比较小的数值范围内还是有变动。原因是当 AZO 的厚度与 Ag 电子的平均自由程(40 nm)相近时, 电子受到薄膜的表面和晶界的非弹性散射作用。电子与表面、晶界的碰撞, 使薄膜电学性能略微变化, 这与薄膜表面的粗糙度有关。在相同的制备条件下, PI 衬底上多层膜的电学性能要低于玻璃衬底。由 XRD 图谱可知, PI 衬底上多层膜的结晶性较玻璃衬底差, 晶粒较小, 所以电学性能差; 另外, 柔性衬底 PI 对氧气、水汽等的吸附性比玻璃强, 也会影响薄膜的电学性能<sup>[26]</sup>。所制备的玻璃和 PI 衬底的 AZO(30 nm)/Ag(14 nm)/AZO(30 nm) 3 层薄膜的方

块电阻分别为 2.6  $\Omega/\square$  和 4.6  $\Omega/\square$ 。与常用厚度达 300 ~ 500 nm 的 ITO 薄膜相比, 这种具有 Ag 夹层的超薄透明导电多层薄膜的可挠曲性、抗弯曲开裂能力更强, 更适用于在柔性基体上制备曲面电子器件。

## 4 结 论

用粉末靶射频磁控溅射法在玻璃和 PI 衬底上制备出性能优良的 AZO/Ag/AZO 透明导电膜, 在 550 nm 处的透光率分别达到了 85% 和 70%, 方块电阻分别为 2.6  $\Omega/\square$  和 4.6  $\Omega/\square$ 。当 Ag 层厚度不变时, 随着 AZO 层厚度的增加, 薄膜的透光率先增大后减小, 透射峰呈现红移和宽化。由于 AZO/Ag/AZO 透明导电膜的导电性主要取决于 Ag 层, 所以 AZO 层厚度的变化对其电学性能影响不大。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Zhang F, Tao J, Dong X. Development and preparation of flexible transparent conductive film [J]. *Mater. Rev.* (材料导报), 2007, 21(3):119-122 (in Chinese).
- [ 2 ] Zhuang T J, Su Z S, Liu Y D, *et al.* Enhanced performance of small molecular weight organic solar cells by incorporating Ag nanoparticles [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(12):1266-1270 (in Chinese).
- [ 3 ] Li R R, Zhao J J, Si H Y, *et al.* Development of flexible thin film solar cells [J]. *J. Chin. Ceram. Soc.* (硅酸盐学报), 2014, 42(7):878-883 (in Chinese).
- [ 4 ] He W F, Zhao Y T, Li S M, *et al.* Preparation methods and development prospect of flexible transparent conductive films [J]. *Mater. Rev.* (材料导报), 2005, 19(3):32-36 (in Chinese).
- [ 5 ] Guo L, Zhao D X, Zhang Z Z, *et al.* Optoelectronic properties of ZnO/Ag/ZnO multiple films [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(9):920-923 (in Chinese).
- [ 6 ] 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).
- [ 7 ] Zuo J, Guo X Y, Liu X Y.  $V_2O_5/Ag/V_2O_5$  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).
- [ 8 ] Cai X, Wang Z G. Progress and trend in study on the transparent conducting films [J]. *J. Funct. Mater.* (功能材料), 2004, 35(S1):76-81 (in Chinese).
- [ 9 ] Fang R C. *Solid State Spectroscopy* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001:26 (in Chinese).
- [10] Zhou Y W, Kelly P J, Sun Q B. The characteristics of the plasma in a powder sputtering rig [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(12):4030-4035.
- [11] 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.
- [12] Zhou Y W, Liu Y, Wu F Y, *et al.* The characteristics of  $Cd_xSn_{1-x}O$  films prepared by RF magnetron sputtering from powder targets [J]. *Surf. Coatings Technol.*, 2013, 228(S1):S150-S154.
- [13] 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.

- [14] 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(4):33-39.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Qin X Y. Thermal expansion behavior of nanocrystalline of Ag at high temperatures [J]. *Acta Phys. Sinica* (物理学报), 1995, 44(2):244-250 (in Chinese).
- [19] Li X K, Li Q S, Liang D C, *et al.* Effect of Ag growth temperature on the Ag/ZnO schottky contact characteristics [J]. *Sci. China Ser. E: Tech.* (中国科学 E 辑:技术科学), 2009, 39(7):1269-1274 (in Chinese).
- [20] 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).
- [21] 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).
- [22] Jiang X, Sun C, Rui H J, *et al.* *Transparent Conductive Oxide Films* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008:5-6 (in Chinese).
- [23] Lu J J, Liu W G. *Optical Thin Film Technology* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005:16-27 (in Chinese).
- [24] 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).
- [25] Bender M, Seelig W, Daube C, *et al.* Dependence of film composition and thicknesses on optical and electrical properties of ITO-metal-ITO multilayers [J]. *Thin Solid Films*, 1998, 326(1-2):67-71.
- [26] Zhang H, Shen H L, Lu L F, *et al.* Effect of working pressure on properties of flexible AZO thin films deposited by room temperature sputtering [J]. *J. Funct. Mater.* (功能材料), 2010, 41(7):1154-1157 (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