

Ag 缓冲层对 ZnO:Al 薄膜结构与光电性能的改善

程静云 康朝阳 宗海涛 曹国华 李明

Structural and photoelectrical properties of AZO thin films improved by Ag buffer layers

Cheng Jing-Yun Kang Chao-Yang Zong Hai-Tao Cao Guo-Hua Li Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 027702 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.027702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.027702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

控制纳米结构以调控氧化锌的发光、磁性和细胞毒性

Tuning the photoluminescence, magnetism and cytotoxicity of ZnO by tailoring the nanostructures

物理学报.2015, 64(9): 097702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097702>

氧化锌纳米颗粒薄膜的近紫外电致发光特性研究

Near ultraviolet luminescence characteristics of ZnO nanoparticle film

物理学报.2014, 63(15): 157702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.157702>

水热合成 ZnO: Cd 纳米棒的微结构及光致发光特性

Microstructure and photoluminescence of ZnO: Cd nanorods synthesized by hydrothermal method

物理学报.2014, 63(15): 157701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.157701>

基于传递函数的频率选择表面集总参数研究

Study on the lumped parameters of FSS in terms of the transfer function

物理学报.2014, 63(13): 137301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.137301>

Ag缓冲层对ZnO:Al薄膜结构与光电性能的改善*

程静云 康朝阳[†] 宗海涛 曹国华 李明[‡]

(河南理工大学物理与电子信息学院, 焦作 454000)

(2016年6月26日收到; 2016年9月19日收到修改稿)

在室温条件下, 采用射频磁控溅射法在玻璃基底上制备出了一系列高质量的AZO薄膜和不同Ag缓冲层厚度的AZO/Ag/AZO复合薄膜. 利用X射线衍射和原子力显微镜分别对薄膜的物相和表面形貌进行了表征; 利用霍尔效应测试仪和紫外-可见分光光度计等实验技术对薄膜的光电性能进行了研究. 实验结果表明, Ag缓冲层厚度对AZO薄膜的晶体结构和光电性能影响较大. 当Ag层厚度为10 nm时, AZO(30 nm)/Ag(10 nm)/AZO(30 nm)薄膜拥有最优品质因子, 为 $1.59 \times 10^{-1} \Omega^{-1}$, 方块电阻为 $0.75 \Omega/\square$, 可见光区平均透过率为84.2%. 另外, 薄膜电阻随温度的变化趋势呈现金属电阻随温度的变化特性, 光电热稳定性较好.

关键词: 射频磁控溅射, AZO/Ag/AZO, 光电性能

PACS: 77.55.hf, 73.40.Vz, 73.61.-r, 78.20.-e

DOI: 10.7498/aps.66.027702

1 引言

近年来, 由于人们对光电子器件的要求越来越高, 使得低电阻率、高透明性的薄膜受到特别的关注. 透明导电氧化物 (transparent conducting oxide, TCO) 薄膜是液晶显示器 (LED) 和有机发光二极管 (OLED) 的重要组成部分, 在平板显示和薄膜太阳能电池领域具有广泛的应用^[1-5]. Sn掺杂的 In_2O_3 (tin-doped indium oxide, ITO) 薄膜是一种传统的TCO薄膜, 然而, 铟资源的稀缺和ITO薄膜成本较高等因素限制了其在更多领域的应用^[6,7]. 目前, 铝掺杂氧化锌 (Al-doped ZnO, AZO) 由于储量丰富、无毒等优点可作为ITO的替代品引起了研究者的关注^[8,9]. 然而, 与ITO薄膜相比, AZO薄膜仍具有较高的电阻率, 限制了其作为TCO薄膜的发展. 为了解决这个问题, 人们将金属薄膜与金属氧化物薄膜相结合得到了多层复合薄膜结

构^[10,11]. 在金属薄膜材料中, Ag由于其较低的电阻率 (接近 $2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) 常被作为复合薄膜结构中的金属层材料.

目前有一些研究报道了AZO/Ag/AZO薄膜的可见光透过率和电阻率. Sahu等^[12-14]制备出了低电阻率、高透过率的AZO/Ag/AZO三层薄膜, 并将其运用于透明导电电极上. Li等^[11]研究发现AZO/Ag/AZO多层薄膜在OLED应用中具有很大潜力. Crupi等^[15]利用射频磁控溅射法制备了AZO/Ag/AZO薄膜, 并对其结构进行了优化. Wu等^[16]研究了Ag层厚度对AZO/Ag/AZO薄膜光电性能的影响. Miao等^[17-19]在有机和玻璃基底上制备了AZO/Ag/AZO薄膜, 研究了其在红外的透光性并比较了Ag, AZO/Ag, Ag/AZO和AZO/Ag/AZO薄膜的光电性能. 但是, 在目前的研究中, 表征AZO薄膜性能的品质因子还比较低, 且对如何优化AZO/Ag/AZO薄膜的光电性能

* 国家自然科学基金 (批准号: 11140064, 11304081, 51301062) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: kangcy@hpu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: mingli4587@aliyun.com

研究也不充分. 另外, TCO 薄膜除了要具备低的电阻率和高透射率, 作为电极材料, 由于其应用环境复杂, 例如要承受低温和高温环境, 热退火处理和器件长时间的运作等, 这就要求 TCO 薄膜具有一定的热稳定性. Dimopoulos 等^[20] 研究了 AZO/Au/AZO 和 AZO/Cu/AZO 作为电极材料比单层 AZO 膜具有较好的热稳定性. Zhou 等^[21] 研究发现, 与 AZO/Ag/AZO 相比, 通过在 AZO 和 Ag 层之间引入 Al 层, AZO/Al/Ag/Al/AZO 的热稳定性明显提高了. 然而, 很少有人研究 Ag 层厚度对 AZO/Ag/AZO 薄膜热稳定性的影响.

基于对以上问题的考虑, 本文利用射频磁控溅射法在室温条件下制备出了不同 Ag 缓冲层厚度的 AZO/Ag/AZO 薄膜, 得到了品质因数更高的 TCO 薄膜. 并且对 Ag 层厚度对 AZO/Ag/AZO 薄膜的电学热稳定性做出了详细的考证.

2 实 验

在室温下, 利用射频磁控溅射设备在玻璃 (BF33) 基底上制备 AZO/Ag/AZO 多层复合薄膜. 实验用的靶材分别为 99.99% 的高纯 Ag 靶和 99.99% 的高纯 AZO (95 wt.% ZnO, 5 wt.% Al₂O₃) 靶材. 玻璃基底经丙酮溶液, 酒精依次超声清洗去脂, 然后用去离子水反复冲洗, 最后用高纯氮气吹干. 在沉积开始前将真空腔室内本底真空抽至 2.0×10^{-3} Pa. 基底无需加热, 在沉积 AZO 膜时, 采用高纯氩气为溅射气体, 溅射气压为 1 Pa, 射频功率为 150 W, 在沉积 Ag 膜时, 除了溅射功率为 50 W, 其他制备条件与 AZO 膜保持一致. 为了提高薄膜的均匀性, 基片转速设定在 18 r/min. AZO 层厚度固定不变为 30 nm, Ag 层厚度分别为 5, 10, 20 和 30 nm. 薄膜厚度通过台阶仪 (DektakXT, Bruker) 校正并利用沉积时间控制. 在玻璃基底上制备出了五种样品, 包括 AZO (30 nm), AZO(30 nm)/Ag(5 nm)/AZO (30 nm), AZO(30 nm)/Ag(10 nm)/AZO (30 nm), AZO (30 nm)/Ag(20 nm)/AZO(30 nm), AZO(30 nm)/Ag (30 nm)/AZO (30 nm), 样品分别记为 S₁, S₂, S₃, S₄ 和 S₅. 另外, 为了研究中间层的表面特性, 制备了五种不同的双层薄膜分别为 AZO(30 nm)/Ag(5 nm), AZO(30 nm)/Ag(10 nm), AZO (30 nm)/ Ag (20 nm), AZO (30 nm)/Ag

(30 nm), 样品分别标记为 S₆, S₇, S₈ 和 S₉.

利用高分辨率的 X 射线衍射仪 (XRD) 表征多层薄膜的晶体结构, 以 Cu 靶 K α 射线作为衍射源, X 光波长为 0.15406 nm; 利用紫外-可见光分光光度计 (UV-3600, Shimadzu) 测试薄膜在 250—800 nm 波长范围内的透过率; 利用霍尔效应测试仪 (HMS-5300, Ecopia) 测试薄膜的方块电阻、载流子浓度与载流子迁移率等电学性能, 并考察薄膜在 80—500 K 温度下的电学性能随温度变化特性. 采用原子力显微镜 (AFM) 探测 AZO/Ag 双层膜的表面形貌.

3 结果与讨论

图 1 是样品 S₁—S₅ 的 XRD 图谱. 由图可以看出, 样品 S₁—S₅ 在 $2\theta = 34.2^\circ$ 均出现了 ZnO 的 (002) 衍射峰, 表明我们在室温条件下制备出了具有较高晶体质量的 ZnO 薄膜. 样品 S₁ 和 S₂ 具有相似的 XRD 图谱, 未出现 Ag 的衍射峰, 说明 5 nm 的 Ag 层未形成稳定的薄膜结构. 当 Ag 中间层的厚度增加到 10 nm 时, 样品 S₃ 在 $2\theta = 38.1^\circ$ 出现了微弱的衍射峰, 此峰对应 Ag(111) 的衍射峰. 此后, 随着 Ag 中间层厚度进一步的增加, Ag(111) 的峰强度逐渐增强并逐步形成了相对稳定的结构, 同时, ZnO(002) 峰强度逐渐减弱而半高宽相应增大. 上述结果表明, 当 Ag 层厚度大于 10 nm 时, Ag 层具有较好的结晶质量. 同时, Ag 层的存在使 AZO 的结晶能力略微下降. 这一结果与之前文献报道相符合^[17–19].

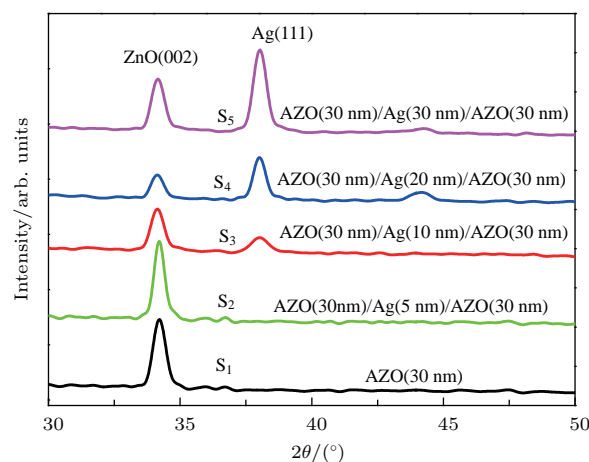


图 1 AZO 和不同 Ag 层厚度的 AZO/Ag/AZO 膜的 XRD 图谱

Fig. 1. The XRD patterns of AZO and AZO/Ag/AZO films with various thickness of Ag layer.

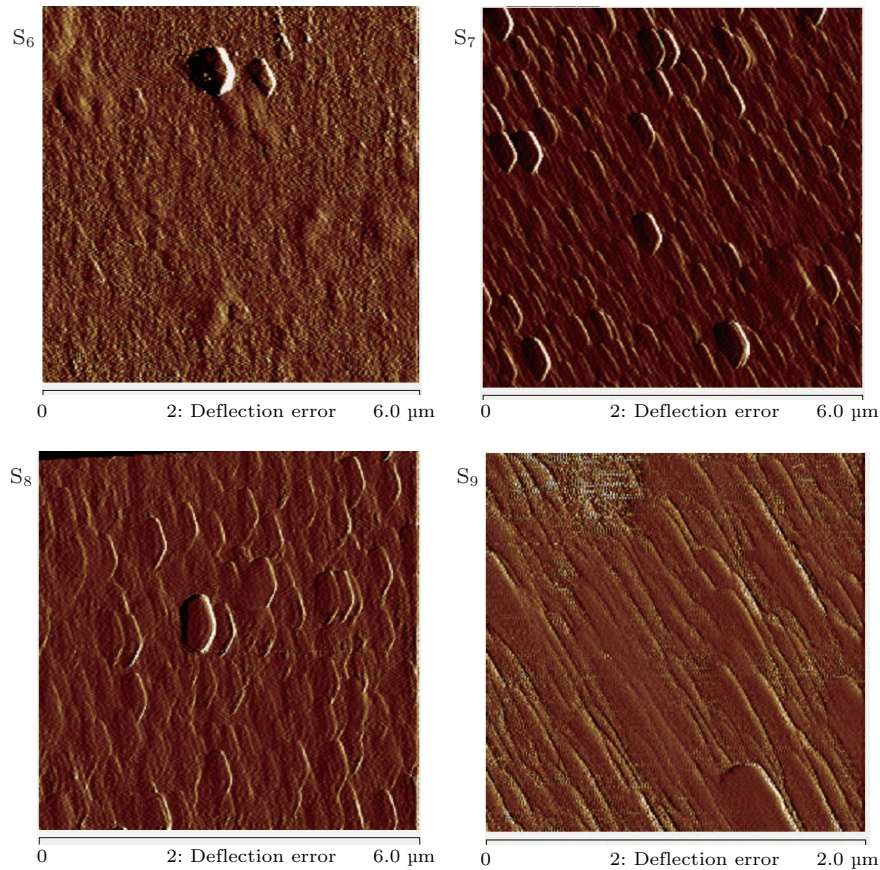


图2 不同Ag层厚度下的AZO/Ag薄膜的原子力显微镜图像 (S_6) AZO(30 nm)/Ag(5 nm), (S_7) AZO(30 nm)/Ag(10 nm), (S_8) AZO(30 nm)/Ag(20 nm), (S_9) AZO(30 nm)/Ag(30 nm)

Fig. 2. The AFM morphological images of AZO/Ag films with respect to various thickness of Ag layer. (S_6) AZO(30 nm)/Ag(5 nm), (S_7) AZO(30 nm)/Ag(10 nm), (S_8) AZO(30 nm)/Ag(20 nm), (S_9) AZO(30 nm)/Ag(30 nm).

为了研究Ag中间层的生长状况与表面形貌,特制备了不同Ag中间层厚度的AZO/Ag双层薄膜.图2给出了不同Ag层厚度下的AZO/Ag薄膜的原子力显微镜图像.从图中可以看出,样品 S_6 的晶粒较少且表面粗糙,随着Ag层厚度的增加,样品 S_7 表面晶粒增多,晶粒尺寸变大,薄膜表面开始变得致密.与样品 S_7 相比, S_8 样品晶粒尺寸较大且表面平整.随着Ag层厚度进一步增加,样品 S_9 的晶粒尺寸进一步增大且表面更加平整.Ag膜的形成长经历了Ag粒子的成核、长大和成膜的过程.根据双层膜的表面情况,可以推测AZO/Ag/AZO薄膜的生长情况:当Ag层厚度较小时,Ag膜呈现了不连续的生长方式并形成了岛状结构,致使Ag膜表面变得粗糙,进而影响了上层AZO膜的晶体质量;随着Ag层厚度的增加,Ag膜开始变得连续、致密使得上层AZO膜变得平整,晶粒尺寸变大;然而,Ag层厚度进一步增加导致溅射的Ag原子在连续

的Ag层上又开始以核生长的方式形成小岛,导致AZO膜的生长状况变差.

膜的层数和膜层厚度是影响薄膜光透过率的关键因素.图3给出了单层AZO薄膜和AZO/Ag/AZO薄膜随Ag层厚度变化的透射光谱.由图中数据可以计算出样品 S_1 , S_2 , S_3 , S_4 和 S_5 在可见光400—760 nm的透过率分别为93.05%, 83.54%, 84.2%, 49.39%和25.42%.AZO薄膜在可见光区的平均透过率在90%以上,大于多层薄膜的可见光透过率,表明Ag中间层的引入降低了AZO薄膜的透过率.Ag层厚度从5 nm增加到10 nm时,AZO/Ag/AZO薄膜的透过率略微升高,之后随着Ag层厚度的增加,多层膜的光透过率迅速下降.这可能是因为当Ag层厚度为5 nm时,Ag膜生长不连续,表面出现岛状结构致使Ag膜表面较粗糙,对入射光的漫反射较严重,影响了多层膜的透过率.随着Ag层厚度增加到10 nm,Ag膜开始变得致密

平整,此时上层AZO膜起到了减反射的作用,因此多层膜透过率略微上升.然而,随着Ag膜厚度进一步增加,复合薄膜中的Ag膜对入射光的反射和吸收都增强,多层膜的透过率迅速下降.

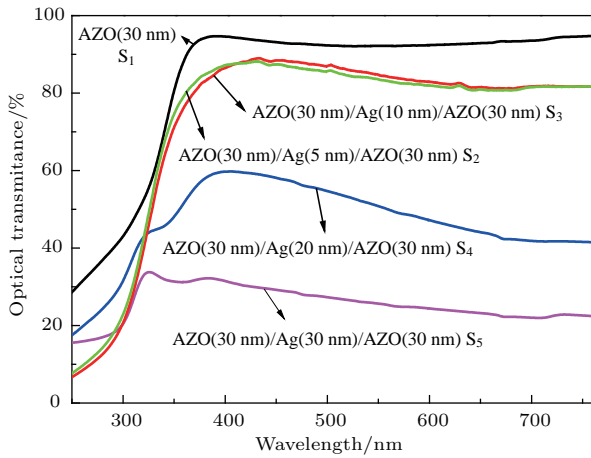


图3 (网刊彩色) AZO和AZO/Ag/AZO薄膜的透射光谱
Fig. 3. (color online) The optical transmittance spectra of the AZO and AZO/Ag/AZO films.

图4为常温下AZO薄膜与不同Ag层厚度的AZO/Ag/AZO薄膜的方块电阻曲线.由图中可以看出,单层AZO薄膜的方块电阻值为 $1.1 \times 10^3 \Omega/\square$.当添加一层厚度为5 nm的Ag中间层后,方块电阻降为 $850 \Omega/\square$;当Ag层厚度由5 nm增加到10 nm时,方块电阻值急剧下降为 $0.75 \Omega/\square$,这可能是因为Ag层厚度的增加提供了更多的导电电子,同时,薄膜表面由粗糙变得平整、致密从而使方块电阻值大幅度降低.当Ag膜从10 nm增加到30 nm时,方块电阻变化不大,表明继续增加Ag膜厚度对AZO/Ag/AZO薄膜的导电率影响不大.

研究者常常利用品质因子去定量评定透明导电薄膜光电性能的优劣,品质因子可由方程(1)计算得出,

$$FOM = \frac{T^{10}}{R}, \quad (1)$$

其中FOM为薄膜的品质因子, T 为薄膜在550 nm处的透光率, R 为薄膜的方块电阻.图5给出了AZO/Ag/AZO薄膜品质因子随Ag层厚度的变化情况.由图可以看出,单层AZO薄膜的品质因子为 $2.9 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$, Ag中间层厚度为5, 10, 20和30 nm的品质因子分别为 5.0×10^{-4} , 1.59×10^{-1} , 1.68×10^{-3} 和 $1.07 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$.这一结果也说明了Ag层的加入提高了AZO薄膜的光电性能且

最优品质因子在Ag层厚度为10 nm时取得,为 $1.59 \times 10^{-1} \Omega^{-1}$.

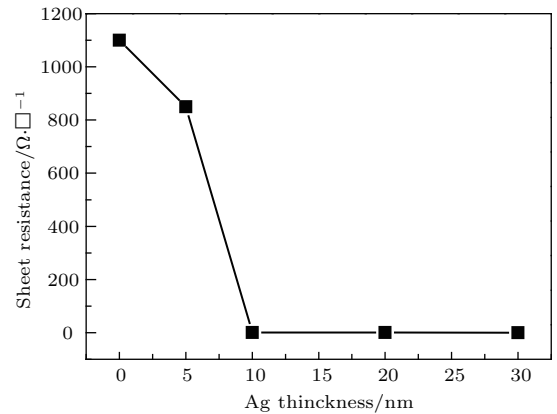


图4 常温下AZO薄膜与不同Ag层厚度的AZO/Ag/AZO薄膜的电阻
Fig. 4. The Sheet Resistance of AZO and AZO/Ag/AZO films with different thickness of Ag layer at room temperature.

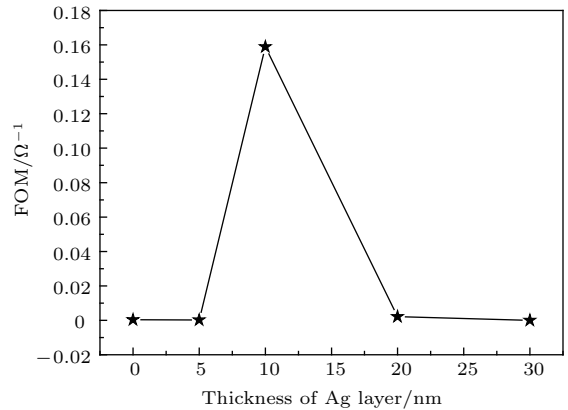


图5 AZO/Ag/AZO薄膜的品质因子随着Ag层厚度的变化趋势
Fig. 5. Figure of merit of AZO/Ag/AZO film with respect to the thickness of Ag layer.

为了考察所制备样品的电学热稳定性,利用霍尔测试仪测试了样品在不同温度条件下的电学性能.图6给出了AZO薄膜与不同Ag层厚度的AZO/Ag/AZO薄膜的方块电阻随温度变化曲线(120—450 K).从图中可以看出,单层AZO薄膜的方块电阻值随温度的升高而降低,呈现出典型的半导体电阻随温度的变化特性.当添加一层厚度为5 nm的Ag中间层时,方块电阻值在120—225 K与300—380 K时随温度的升高而降低,在225—300 K与380—450 K时随温度的升高而升高.这可能是因为低温下Ag层提供的导电电子移动速度较低且自由电子数目有限,从而呈现出了半导体电阻随温度的变化特性;在高温下电子获得了较大的移

动速度从而呈现出了金属电阻随温度的变化特性。而其中的曲线振荡可能是由 Ag 层较薄呈岛状生长使得中间层不够致密导致的。当 Ag 层厚度增加到 10 nm 时, 方块电阻值随温度的升高线性升高, 呈现出典型的金属电阻随温度的变化特性, 这说明 Ag 中间层的引入极大地提高了薄膜的电学性能。

同时, 从图上也可以看出, 方块电阻随温度变化幅度较小, 表明 AZO/Ag/AZO 薄膜电学热稳定性较好。当 Ag 层厚度继续增加到 30 nm 时, 方块电阻值除了降低外, 随温度的变化趋势与 10 nm 样品保持一致, 表明继续增加 Ag 膜厚度对 AZO/Ag/AZO 薄膜的导电率已经影响不大。

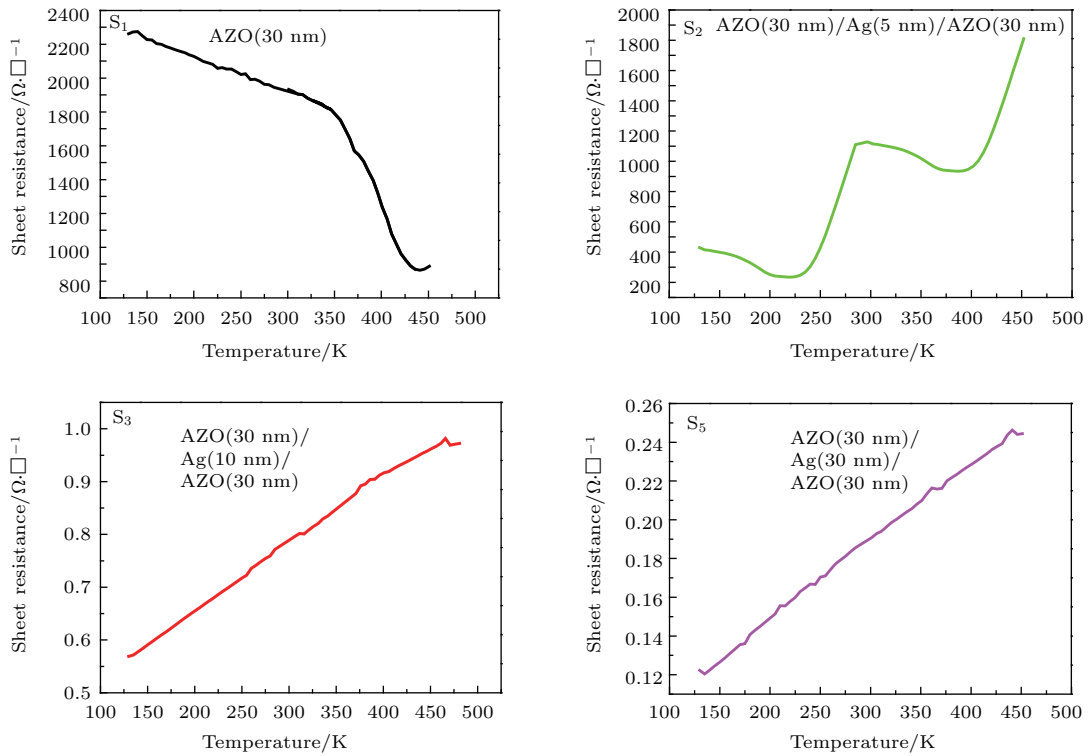


图 6 AZO 薄膜与不同 Ag 层厚度的 AZO/Ag/AZO 薄膜的方块电阻随温度变化曲线

Fig. 6. The changing curves of Sheet Resistance with temperature of AZO and AZO/Ag/AZO films with different thickness of Ag layer.

图 7(a) 和图 7(b) 分别给出了 AZO 薄膜与不同 Ag 层厚度的 AZO/Ag/AZO 薄膜的载流子浓度与迁移率随温度变化曲线 (120—450 K)。从图 7(a) 中可以看出, 单层 AZO 薄膜的载流子浓度的大小随温度的变化振荡比较剧烈, 其数量级大约在 10^{13} cm^{-3} ; 当添加一层厚度为 5 nm 的 Ag 中间层时, 载流子浓度的大小随温度的变化比较平缓, 其数量级仍维持在 10^{13} cm^{-3} ; 当 Ag 层厚度增加到 10 nm 时, 温度对载流子浓度的变化影响不大, 但其数量级提高到 10^{18} cm^{-3} , 这可能是由于 Ag 中间层的加入使得扩散到 AZO 表面的自由电子数目增多; 当 Ag 层厚度增加到 30 nm 时, 载流子浓度随温度的变化又有了一定程度的震荡, 其数量级仍为 10^{18} cm^{-3} , 这说明继续增加 Ag 层厚度对载流子浓度的大小已经影响不大, 但是其电学热稳定性会降

低。从图 7(b) 中可以看出, Ag 中间层的加入没有使得载流子迁移率的大小得到很大改变, 但是当在 AZO 薄膜中加入 5 与 10 nm 的 Ag 后, 其载流子迁移率随温度的变化相比于单层 AZO 薄膜变得比较平缓, 而更厚的 Ag 层厚度 (30 nm) 又使得电学热稳定性降低了。以上结果都表明合适的 Ag 中间层厚度会提高 AZO 薄膜的电学热稳定性。

众所周知, 薄膜的光电特性与热稳定性主要受薄膜的晶化程度、晶粒粒径和粗糙度影响。当 Ag 层厚度小于 10 nm 时, 随着 Ag 中间层厚度的增加, 金属薄膜由岛状生长方式转变成连续生长方式 [22], AZO/Ag 双层膜表面开始变得均匀致密, 粗糙度逐渐减小。当 Ag 层厚度进一步增加到 30 nm 时, AZO/Ag/AZO 多层薄膜样品中 ZnO 的结晶质量得到改善, 晶粒增大, 导致表面粗糙度升高。由

于Ag层和AZO层接触时会产生能带弯曲,使得半导体表面载流子浓度增加,在半导体表面形成了电子积累,从而大量的载流子通过连续的Ag层注入到AZO层,使得多层膜的载流子浓度提高,电阻率降低[23].当Ag层厚度小于10 nm时,复合薄膜的透过率由于顶层AZO的减反射作用及多层膜界面散射作用降低,使得透光率略有上升.然而,随着Ag层厚度进一步增加,此时Ag膜对入射光的吸收和反射作用均大幅增强[24],使得AZO/Ag/AZO薄膜可见光透过率急剧下降.另一方面,薄膜的致密性、生长方式和缺陷对其电子迁移率影响较大,导致复合薄膜的电阻随温度变化出现振荡,严重影响薄膜的电学热稳定性,从而限制了其在薄膜太阳能电池、液晶显示、光电子器件等领域的应用.因此,合适的Ag层厚度对改善AZO/Ag/AZO多层膜的光电性能和电学热稳定性起着极其重要的作用.

4 结 论

室温下,利用射频磁控溅射法在玻璃基底上制备了AZO/Ag/AZO透明导电薄膜.研究了Ag层厚度对薄膜光电性能的影响.XRD结果发现,随着Ag层厚度的增加,Ag(111)的衍射峰逐渐增强,ZnO(002)衍射峰逐渐减弱,ZnO(002)晶面的择优取向减弱.AFM测试表明,Ag层厚度的变化对上层AZO薄膜表面生长方式影响很大.Ag层厚度小于5 nm时,AZO薄膜表面粗糙,晶粒尺寸较小;当Ag层厚度大于10 nm时,多层膜的表面开始变得连续,晶粒尺寸较大,直接影响了薄膜的光电性能.霍尔测试和透射率的测试显示,随着Ag层厚度的增加,AZO/Ag/AZO多层膜的透过率逐渐降低,方块电阻逐渐下降.当Ag层厚度为10 nm时,多层膜的综合性能达到最佳,此时薄膜的最佳品质因子为 $1.59 \times 10^{-1} \Omega^{-1}$.这个数值比单层AZO的品质因子($2.9 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$)高很多,同时方块电阻、载流子浓度、载流子迁移率随温度变化幅度较小.这些都表明Ag层的加入改善了AZO/Ag/AZO多层膜的光电性能.

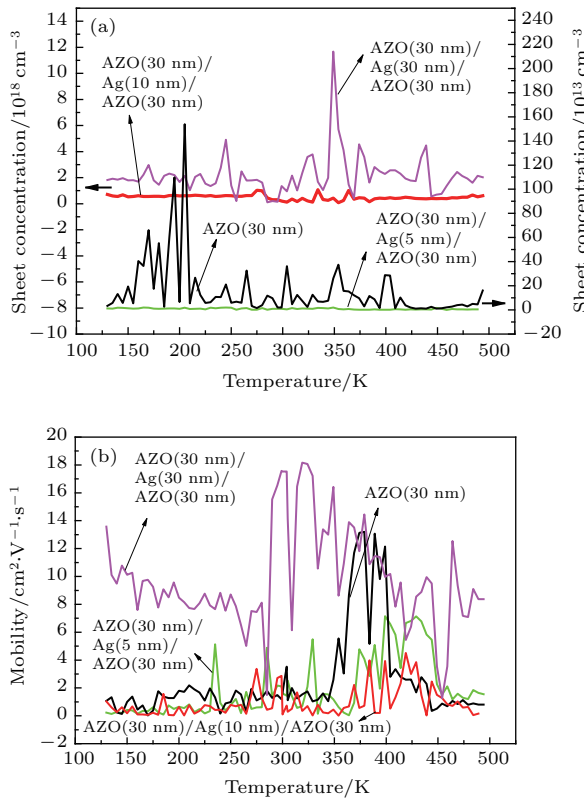


图7 (a) AZO薄膜与不同Ag层厚度的AZO/Ag/AZO薄膜的载流子浓度的大小随温度的变化;(b) AZO薄膜与不同Ag层厚度的AZO/Ag/AZO薄膜的载流子迁移率随温度的变化

Fig. 7. (a) The changing curves of values of the Sheet concentration with temperature of AZO and AZO/Ag/AZO films with different thickness of Ag layer; (b) the changing curves of mobility with temperature of AZO and AZO/Ag/AZO films with different thickness of Ag layer.

参考文献

- [1] Nomura K, Ohta H, Takagi A, Kamiya T, Hirano M, Hosono H 2004 *Nature* **432** 488
- [2] Nomura K, Takagi A, Kamiya T, Ohta H, Hirano M, Hosono H 2006 *J. Appl. Phys.* **45** 4303
- [3] Park S H K, Hwang C S, Ryu M, Yang S, Byun C, Shin J, Lee J I, Lee K, Oh M S, Im S 2009 *Adv. Mater.* **21** 678
- [4] Chen Z Q, Liu H M, Liu Y P, Chen W, Luo Z Q, Hu X W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4260 (in Chinese) [陈兆权, 刘海明, 刘玉萍, 陈伟, 罗志清, 胡希伟 2009 物理学报 **58** 4260]
- [5] Chen M, Zhou X Y, Mao X J, Shao J J, Yang G L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 098103 (in Chinese) [陈明, 周细应, 毛秀娟, 邵佳佳, 杨国良 2014 物理学报 **63** 098103]
- [6] Le Q T, Nuesch F, Rothberg L J, Forsythe E W, Gao Y 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 1357
- [7] Lee C G, Kim S J, Kim H H, Lee W W 2007 *J. Korean. Phys. Soc.* **50** 596
- [8] Fernandes G E, Lee D J, Kim J H, Kim K B, Xu J 2013 *J. Mater. Sci.* **48** 2536
- [9] Thanka R S, Subramanian B, Nanda K A K, Jayachandran M, Ramachandra R M S 2014 *J. Alloys Compd.* **584** 611
- [10] Wang F, Wu M Z, Wang Y Y, Yu Y M, Wu X M, Zhuge L J 2013 *Vacuum* **89** 127

- [11] Li F S, Zhang Y Z, Wu C X, Lin Z X, Zhang B B, Guo T L 2012 *Vacuum* **86** 1895
- [12] Sahu D R, Lin S Y, Huang J L 2007 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **91** 851
- [13] Sahu D R, Lin S Y, Huang J L 2007 *Appl. Surf. Sci.* **253** 4886
- [14] Sahu D R, Lin S Y, Huang J L 2008 *Thin Solid Films* **516** 4728
- [15] Crupi I, Boscarino S, Strano V, Mirabella S, Simone F, Terrasi A 2012 *Thin Solid Films* **520** 4432
- [16] Wu H W, Yang R Y, Hsiung C M, Chu C H 2012 *Thin Solid Films* **520** 7147
- [17] Miao D G, Jiang S X, Shang S M, Chen Z M 2014 *Vacuum* **106** 1
- [18] Miao D G, Jiang S X, Shang S M, Chen Z M 2014 *Ceramic. Int.* **40** 12847
- [19] Miao D G, Jiang S X, Zhao H M, Shang S M, Chen Z M 2014 *J. Alloys Compd.* **616** 26
- [20] Dimopoulos T, Radnoczi G, Horvth Z, Brckl H 2012 *Thin Solid Films* **520** 5222
- [21] Zhou L, Chen X H, Zhu F, Sun X X, Sun Z 2012 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45** 505103
- [22] Gong L, Lu J G, Ye Z Z 2011 *Thin Solid Films* **519** 3870
- [23] Sivaramakrishnan K, Alforda T L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 052104
- [24] Sahu D R, Huang J L 2006 *Appl. Surf. Sci.* **253** 915

Structural and photoelectrical properties of AZO thin films improved by Ag buffer layers*

Cheng Jing-Yun Kang Chao-Yang[†] Zong Hai-Tao Cao Guo-Hua Li Ming[‡]

(School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

(Received 26 June 2016; revised manuscript received 19 September 2016)

Abstract

In order to obtain more excellent photoelectric properties of transparent conductive film, a series of high-quality AZO thin films and AZO/Ag/AZO thin films with various thickness values of Ag buffer layers are prepared on glass substrates by the radio frequency magnetron sputtering method at room temperature. The phase and surface morphologies of films are characterized by X-ray diffraction (XRD) and atomic force microscopy (AFM) respectively. The technology of Hall effect measurement and ultraviolet, visible spectrophotometer are employed to investigate the photoelectric properties of films. The electrical properties (including sheet resistance, sheet concentration and mobility) of films are also determined by using non isothermal technique to explore their thermal stability performances. The results indicate that the thickness values of Ag buffer layers have a large influence on the crystalline structures and photoelectric properties of AZO thin films. The XRD results show that with the increase of the thickness of Ag, the diffraction peak of Ag (111) is gradually enhanced, the ZnO (002) diffraction peak is gradually weakened, and the preferred orientation of ZnO (002) crystal plane is weakened. AFM test indicates that the change of Ag layer thickness has a great influence on the surface growth mode of the upper layer AZO thin film. When the Ag layer thickness is less than 5 nm, AZO thin film surface is rough and the grain size is smaller. When the Ag layer thickness is larger than 10 nm, the continuous surfaces of multilayer films begin to be shaped, directly affect the photoelectric properties of the films. Hall effect measurement and transmittance test show that with the increase of Ag layer thickness, the transmission of AZO/Ag/AZO multilayer film gradually decreases, and also the resistance gradually decreases. When the thickness of Ag layer is 10 nm, AZO(30 nm)/Ag(10 nm)/AZO(30 nm) thin film gains a best figure of merit of $1.59 \times 10^{-1} \Omega^{-1}$ an average transmittance of 84.2% and a sheet resistance of $0.75 \Omega/\text{sq}$. Hall effect measurement versus temperature indicates that AZO film without an Ag layer proves to be subject to the regular change of semiconductor resistance with temperature. When adding an Ag layer, the trend of the relationship of resistance with temperature presents the characteristic of that metal resistance relating to temperature. Moreover, the sheet concentration of AZO with Ag layer is higher than that of AZO. The highest sheet concentration and the excellent thermal stability are obtained on AZO/Ag (10 nm)/AZO. The changes of the mobility of AZO under different temperatures turn out to be poorly stable. However, when adding an Ag layer, the better stability of AZO/Ag/AZO can be obtained. In conclusion, the photoelectric properties of films own excellent thermal stabilities with optimum thickness of Ag layer.

Keywords: radio frequency magnetron sputtering, AZO/Ag/AZO, photoelectric properties

PACS: 77.55.hf, 73.40.Vz, 73.61.-r, 78.20.-e

DOI: 10.7498/aps.66.027702

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11140064, 11304081, 51301062).

[†] Corresponding author. E-mail: kangcy@hpu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: mingli4587@aliyun.com