

Zn 靶与掺铝 ZnO 靶共溅射制备 ZnO:Al 薄膜及其性能

赵联波, 刘芳洋, 邹 忠, 张治安, 欧阳紫璇, 赖延清, 李 劼, 刘业翔

(中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 采用 Zn 靶和 ZnO(掺 2% Al₂O₃(质量分数))陶瓷靶在玻璃衬底上共溅射沉积 Al 掺杂 ZnO 薄膜, 即 ZnO:Al 透明导电薄膜, 研究 Zn 靶溅射功率(0~90 W)和衬底温度(室温、100 °C 和 200 °C)对薄膜结构、形貌、光学和电学性能的影响。结果表明: 按双靶共溅射工艺制备的 ZnO:Al 薄膜的晶体结构均为六角纤锌矿结构, 且随着 Zn 靶溅射功率的增加, 薄膜的结晶质量呈现出先改善后变差的规律, 薄膜中的载流子浓度逐渐升高, 电阻率逐渐降低, 而薄膜的光学性能受其影响不大; 随着衬底温度的升高, 薄膜的结晶性能得到改善, 薄膜的可见光透过率增强, 电阻率降低。

关键词: ZnO:Al 薄膜; 磁控溅射; Zn 靶功率; 衬底温度; 光电性能

中图分类号: O 782

文献标志码: A

Properties of ZnO:Al thin films deposited by co-sputtering with Zn target and Al-doped ZnO target

ZHAO Lian-bo, LIU Fang-yang, ZOU Zhong, ZHANG Zhi-an, OUYANG Zi-dian, LAI Yan-qing, LI Jie, LIU Ye-xiang

(School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The Al-doped ZnO (AZO) transparent conductive thin films were deposited on glass substrates by co-sputtering with Zn target and ZnO ceramic target. The effects of sputtering power (0–90 W) of Zn target and substrate temperature on structure, surface, optical and electrical properties were investigated. The results indicate that all ZnO:Al thin films obtained by co-sputtering show hexagonal structure. And with the increase of Zn target sputtering power, the film crystallization quality is improved earlier and then deteriorated gradually, the carrier concentration also increases, and the resistivity of films lower accordingly. But the effect is not obvious for Zn target power on optical properties of films. While with the rise of substrate temperature, the crystallization of thin films is improved, the optical transmittance is enhanced and the resistivity is reduced.

Key words: ZnO:Al thin films; magnetron sputtering; power on Zn target; substrate temperature; optical and electrical properties

透明导电氧化物(TCO)薄膜因其优异的透光性和导电性而被广泛应用于平面显示^[1], 节能视窗, 太阳能电池透明电极^[2]等领域。作为 TCO 的一种, ZnO:Al 薄膜的光电性能现可与主流透明导电氧化物薄膜材料 ITO 相媲美, 且 ZnO:Al 薄膜具有原料来源更广泛、成本更为低廉、沉积温度相对更低、在还原性气氛中更

加稳定等优点, 是迄今为止最有希望替代 ITO 薄膜成为薄膜太阳能电池中的透明导电薄膜电极材料。目前, 磁控溅射技术由于设备相对简单, 可在低温条件下大面积沉积, 溅射参数可控性好, 以及制备的薄膜性能优异, 被广泛用于薄膜材料的生产研究。

前人的研究表明^[3-5], 磁控溅射法沉积的高质量

ZnO:Al 薄膜多是在较高的衬底温度下获得的,这是因为较高的衬底温度有利于薄膜中氧原子的解离,使得薄膜中氧空位增多,有利于提高载流子浓度,降低薄膜电阻率。而在 ZnO:Al 薄膜的某些应用中,要求薄膜在较低的沉积温度下制备,例如 CIGS 薄膜太阳能电池^[6-7]和柔性太阳能电池中^[8],作为窗口层材料的 ZnO:Al 薄膜沉积温度不能超过 300 °C。另外,ZnO:Al 薄膜的低温沉积也可以有效降低能耗以及设备与工艺的成本。ZnO:Al 薄膜中载流子的来源主要有两个方面:一方面来自掺杂元素 Al³⁺对 Zn²⁺的替代而提供的一个电子,孙超等^[9]报道 ZnO:Al 薄膜中掺杂元素 Al 的最佳含量一般为 2%~3%(质量分数);另一方面来自于薄膜的本征缺陷,即氧空位或者 Zn 填隙。目前对于导致 i-ZnO 薄膜出现导电性能的本征缺陷到底是氧空位还是 Zn 填隙尚未达成共识,而争论的焦点是哪一种缺陷起主导作用^[10]。从离子扩散和缺陷大小角度来考虑,Zn 填隙是 ZnO:Al 薄膜中主导的本征缺陷,而 KWAK 等^[11]的研究发现,采用 Zn:Al 合金靶反应溅射制备 ZnO:Al 薄膜的晶面间距随溅射功率的增加而增大,这很有可能是 Zn 填隙浓度的改变而引起的薄膜晶格参数的变化。相对于增加氧空位浓度需要较高的衬底温度,在低温沉积条件下,提高 ZnO:Al 薄膜中 Zn 填隙原子的浓度亦能提高薄膜的载流子浓度。

基于以上认识,本文作者立足于采用 ZnO:Al 陶瓷靶和 Zn 金属靶两靶共溅射沉积 ZnO:Al 薄膜,研究薄膜中 Zn 含量的改变以及在 200 °C 范围内衬底温度的改变对 ZnO:Al 薄膜结构、形貌、光学和电学性能的影响,在高质量 ZnO:Al 薄膜的低温沉积方面进行研究。

1 实验

采用掺 2% Al₂O₃(质量分数,纯度为 99.99%)的 ZnO(纯度 99.99%)陶瓷靶和 Zn(纯度 99.99%)金属靶,在 JGP450 型超高真空系统上共溅射制备 ZnO:Al 薄膜。采用普通钠钙玻璃片作为衬底,在沉积前依次用稀盐酸、甲醇、丙酮、无水乙醇超声清洗 15 min,然后放入真空干燥箱烘干。溅射前将溅射室的真空度抽至 1.0×10^{-4} Pa 以下,溅射气体为 Ar 气,ZnO:Al 靶采用直流磁控溅射,功率为 120 W,溅射气压、距离、时间等参数均不变,分别为 0.5 Pa、8 cm、40 min,制备两种条件对比膜厚为 500 nm 左右的薄膜样品:1) 固定衬底温度为 200 °C,Zn 靶采用射频磁控溅射,功率分别为 0、10、30、50、70、90 W;2) 固定 Zn 靶

功率为 30 W,衬底温度分别为室温、100 °C 和 200 °C。

采用台阶仪(Alpha Step IQ Surface Profilers)测量 ZnO:Al 薄膜厚度;采用日本理学 X 射线衍射仪(XRD, Rigaku D/MAX-2000)检测薄膜的物相结构;采用原子力显微镜(AFM, Veeco, Dimension V)分析薄膜的表面形貌和粗糙度;采用美国 EDAX 公司的 X 射线能谱分析仪(EDS, EDX-GENESIS 60S)检测薄膜的化学计量组成;采用日本岛津紫外-可见分光光度计(Shimadzu UV-2450)在 300~900 nm 范围内测量薄膜的光学透过性能;薄膜的电学性能数据则由霍尔测试系统(HMS 3000)测量获得。

2 结果与讨论

2.1 Zn 靶功率对 ZnO:Al 薄膜结构与性能的影响

2.1.1 成分、结构和表面形貌

表 1 所示为两靶共溅射工艺中不同 Zn 靶溅射功率下沉积的 ZnO:Al 薄膜 EDS 成分检测结果中 Zn 和 Al 的摩尔比。从表 1 中可以发现,随着 Zn 靶溅射功率的不断增加,薄膜中 Zn 的相对含量呈上升的趋势,这是因为溅射功率越大,同一时间到达基底表面的 Zn 原子数越多,从而导致薄膜中 Zn 的相对含量增加。

表 1 ZnO:Al 薄膜中 Zn 和 Al 的摩尔比

Table 1 Mole ratio of Zn and Al in ZnO:Al thin films

| Power on Zn target/W | $n(\text{Zn})/n(\text{Al})$ |
|----------------------|-----------------------------|
| 0 | 16.37 |
| 10 | 16.68 |
| 30 | 17.84 |
| 50 | 17.22 |
| 70 | 18.61 |
| 90 | 19.38 |

图 1 所示为两靶共溅射工艺中不同 Zn 靶功率下沉积的 ZnO:Al 薄膜的 XRD 谱。所有薄膜样品的衍射图谱均在 34°附近出现强烈的衍射峰,具有(002)面择优取向生长特性,且没有明显的其他相衍射峰,表明制备的 ZnO:Al 薄膜为六角纤锌矿结构。从图 1 还可得知,随着 Zn 靶功率的升高,ZnO:Al 薄膜衍射峰强度呈现出先增强后减弱的趋势,Zn 靶功率为 50 W 时,沉积的 ZnO:Al 薄膜衍射峰强度最大,c 轴取向最好。可能的原因是当 Zn 靶功率在 0~50 W 范围内增加

时, 同一时间内到达衬底表面的 Zn 原子数量增多, 而常温下 ZnO 最稳定的晶体结构是(002)面择优取向的纤锌矿结构, 所以, Zn 原子被捕获进入晶格的几率增大, 导致 ZnO:Al 薄膜取向性增强; 当 Zn 靶功率在 50~90 W 范围内进一步增大时, 则同一时间内到达衬底表面的 Zn 原子数量也会进一步增多, 衬底表面过多的 Zn 原子使得 ZnO:Al 薄膜中其他取向晶格形成的几率增加^[12]。

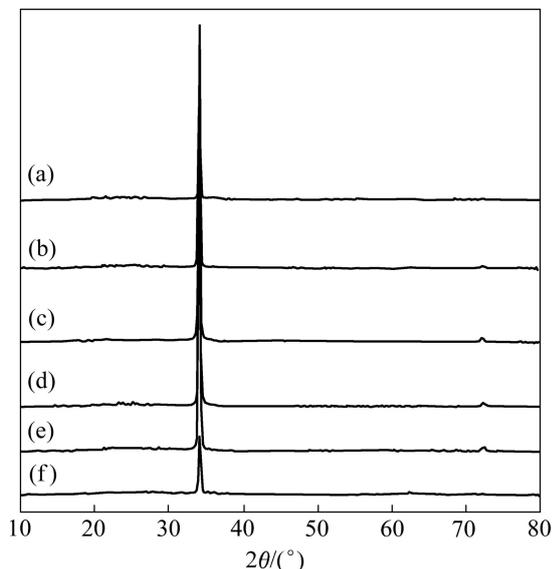


图1 不同 Zn 靶功率条件下沉积的 ZnO:Al 薄膜的 XRD 谱
Fig. 1 XRD patterns of ZnO:Al films deposited at various powers on Zn target: (a) 0 W; (b) 10 W; (c) 30 W; (d) 50 W; (e) 70 W; (f) 90 W

ZnO 薄膜晶体在 2θ 角为 34.45° 时具有最强的衍射峰^[13], 由表 2 可知, 随着 Zn 靶溅射功率的增加, ZnO:Al 薄膜(002)面衍射峰 2θ 值呈下降趋势, 即 ZnO:Al 薄膜(002)面晶面间距呈增大趋势。这是由于 Zn 靶溅射出来的 Zn 原子可能主要以 Zn 填隙进入 ZnO:Al 薄膜晶体结构中, 使得相邻原子之间距离增加, 导致晶面间距增加, 而且随着 Zn 靶功率的增加, Zn 填隙的浓度会增加, 从而进一步增大晶面间距。根据 ZnO:Al 薄膜的衍射峰(002)面的半高宽(FWHM)值, 由 Scherrer^[14]公式可以计算晶粒尺寸的大小, 对应 Zn 靶功率从小到大分别为 33.67、32.30、31.53、32.07、26.76、28.07 nm, 总体上呈现晶粒尺寸随 Zn 靶功率增加而减小的趋势。这可以解释为 Zn 靶溅射功率的增加使得同一时间从 Zn 靶表面溅射出去到达衬底表面的 Zn 原子数量增多, 因而在薄膜的生长初期形核速率加快, 形核时间变短, 形核密度增加, 致使晶粒变小。

表 2 不同 Zn 靶功率下制备的 ZnO:Al 薄膜的 XRD 参数

Table 2 XRD parameters of ZnO:Al films deposited at various powers on Zn target

| Power/W | $2\theta/^\circ$ | d/nm | FWHM/ $^\circ$ |
|---------|------------------|---------------|----------------|
| 0 | 34.460 | 0.260 05 | 0.236 |
| 10 | 34.401 | 0.260 48 | 0.246 |
| 30 | 34.421 | 0.260 34 | 0.252 |
| 50 | 34.399 | 0.260 49 | 0.243 |
| 70 | 34.340 | 0.260 93 | 0.297 |
| 90 | 34.279 | 0.261 38 | 0.283 |

图 2 所示为两靶共溅射条件下 Zn 靶功率为 0、10、30、50、90 W 条件下沉积的 ZnO:Al 薄膜原子力显微镜(AFM)图像, 图像尺寸均采用 $2\ 000\ \text{nm} \times 2\ 000\ \text{nm}$ 。从图 2(a)中可以看出, 单靶 ZnO:Al 溅射时制备的 ZnO:Al 薄膜表面颗粒比较粗大, 且不均匀, 表面粗糙度(RMS)达到 33.9 nm; 当加入 Zn 靶共溅射, Zn 靶功率较小(10 W 和 30 W)时, 沉积的 ZnO:Al 薄膜表面颗粒细小, 更加均匀平整, 表面粗糙度分别为 18.6 nm 和 18.2 nm; 而当 Zn 靶功率继续增大(50 W 和 90 W)时, 沉积的 ZnO:Al 薄膜表面颗粒尺寸开始增大, 逐渐变得不均匀, 表面粗糙度增大了很多, 分别为 20.5 nm 和 36 nm。造成这种现象的原因可以归结为当 Zn 靶功率较低时, 单一相形核均匀, 薄膜晶体中晶粒尺寸较小, 使得薄膜表面粗糙度很小; 而当 Zn 靶溅射功率过大时, 虽然从 XRD 结果来看, 薄膜中 ZnO:Al 相晶粒尺寸仍在变小, 但是图像表面出现大颗粒和小颗粒夹杂并存的不均匀状态, 表明过量 Zn 形成的金属相或其他含 Zn 化合物相和 ZnO:Al 相的间杂造成了表面起伏不平。

2.1.2 电学性能

表 3 所列为不同 Zn 靶功率条件下沉积的 ZnO:Al 薄膜的电学性能参数。由于 ZnO 陶瓷靶掺有 2% Al_2O_3 (质量分数), 沉积的薄膜具有较高的载流子浓度, 达到 $10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ 数量级, 随着 Zn 靶功率的增大, 薄膜中的载流子浓度由 $2.115 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ 上升到 $8.817 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$, 这可能是因为随着 Zn 靶溅射功率的增加, 薄膜中 Zn 填隙原子浓度增加, 晶格畸变也增多, 从而导致薄膜中载流子浓度上升。在 0~70 W 范围内, 薄膜的载流子迁移率也呈现出随 Zn 靶溅射功率的增加而上升的趋势, 而当 Zn 靶上溅射功率为 90 W 时, 迁移率下降, 这可能是 ZnO:Al 薄膜中过多的 Zn 形成了金属相或其他含 Zn 化合物相, 使得载流子在迁移过程中被散射的几率增大, 造成迁移率降

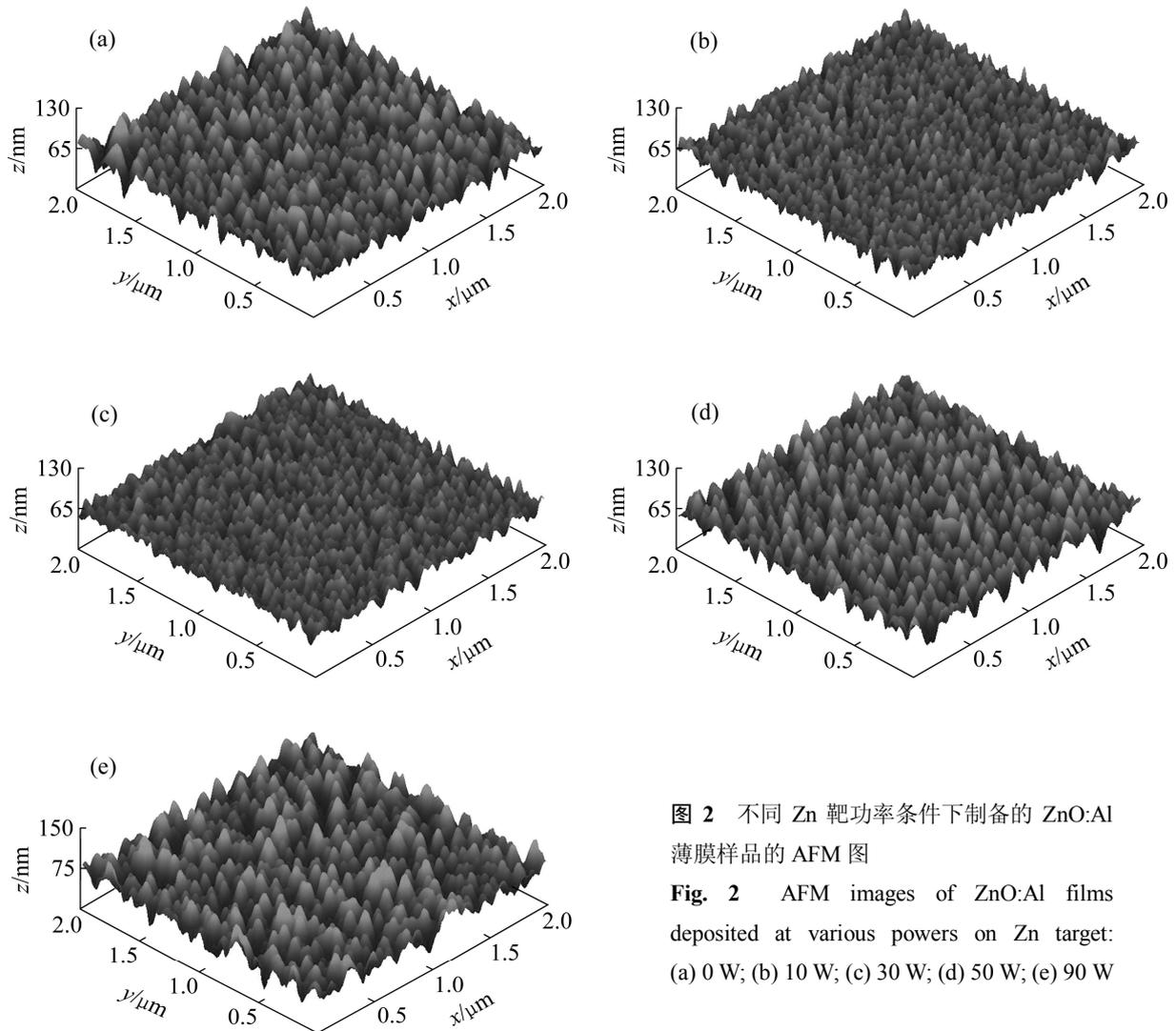


图2 不同 Zn 靶功率条件下制备的 ZnO:Al 薄膜样品的 AFM 图

Fig. 2 AFM images of ZnO:Al films deposited at various powers on Zn target: (a) 0 W; (b) 10 W; (c) 30 W; (d) 50 W; (e) 90 W

低^[15]。薄膜的电阻率则随着 Zn 靶溅射功率的增加而从 $6.643 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 迅速减小至 $1.445 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ，这主要是得益于薄膜中载流子浓度的增加。

2.1.3 光学性能

图3所示为不同 Zn 靶功率条件下沉积的 ZnO:Al 薄膜在波长为 300~900 nm 范围内的透射光谱。从图3中可以看出,在可见光范围内,当 Zn 靶功率小于 90 W 时,沉积的薄膜具有较高的透过性能,平均透过率均超过 90%,且所有样品的透射曲线几乎重合,表现出很好的一致性;当 Zn 靶溅射功率为 90 W 时,薄膜透过率很低,且薄膜表面呈黑色,这很有可能是过量 Zn 形成的金属相或其他含 Zn 化合物相能强烈地吸收或反射可见光,从而造成薄膜的透过率很低。根据薄膜的吸收边,通过 Tauc 公式^[16]计算得到的 ZnO:Al 薄膜的禁带宽度,如图 3(b)所示,在 3.5 eV 左右。由此说

明在较低功率下, Zn 靶功率对 ZnO:Al 薄膜光学性能影响不大。

表3 不同 Zn 靶功率下制备的 ZnO:Al 薄膜的电学性能参数
Table 3 Electrical property parameters of ZnO:Al films deposited at various powers on Zn target

| Power on Zn targets/W | Carrier concentration/ (10^{20} cm^{-3}) | Electronic mobility/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) | Resistivity/ ($10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$) |
|-----------------------|---|---|--|
| 0 | -2.104 | 4.606 | 6.442 |
| 10 | -2.762 | 4.626 | 4.885 |
| 30 | -2.789 | 8.849 | 2.529 |
| 50 | -2.962 | 5.886 | 3.580 |
| 70 | -4.338 | 6.567 | 2.191 |
| 90 | -8.817 | 4.867 | 1.445 |

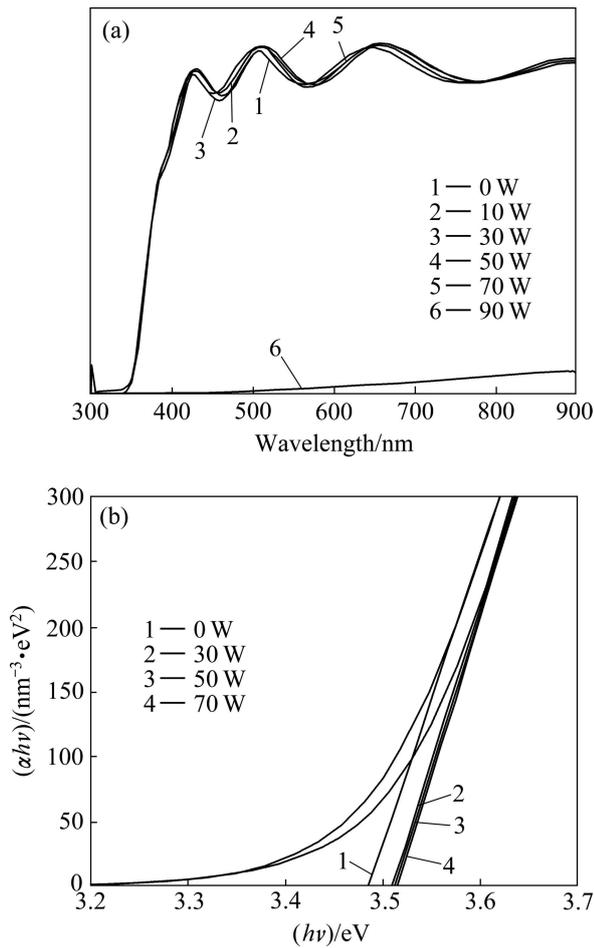


图 3 不同 Zn 靶溅射功率条件下制备的 ZnO:Al 薄膜透射谱
Fig. 3 Optical transmittance spectra of ZnO:Al films deposited at various powers on Zn target

2.2 衬底温度对 ZnO:Al 薄膜结构与性能的影响

2.2.1 结构性能

图 4 所示为两靶共溅射工艺中不同衬底温度下沉积的 ZnO:Al 薄膜的 XRD 谱, 薄膜的生长温度分别为室温、100 °C 和 200 °C。从图 4(a)中可以发现, 所有薄膜样品的衍射图谱均在 34°附近出现强烈的衍射峰, 具有(002)面择优取向生长特性, 且没有明显的其他相衍射峰, 表明制备的 ZnO:Al 薄膜为六角纤锌矿结构。随着衬底温度从室温升高到 200 °C, 沉积的 ZnO:Al 薄膜的衍射峰强度明显增强, 这表明较高的衬底温度下沉积的 ZnO:Al 薄膜晶体内部原子点阵排列比低温下沉积的 ZnO:Al 薄膜更有规律, 更有利于薄膜的 c 轴取向生长。造成这种现象的原因是不同衬底温度造成的衬底表面原子迁移速率的差异, 较高的衬底温度有利于溅射粒子在衬底表面的横向扩散, 这将有助于薄膜的成核和生长, 有利于薄膜的结晶和择优

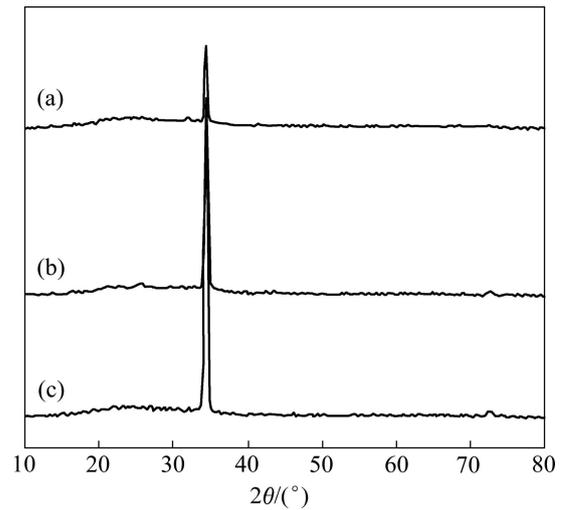


图 4 不同衬底温度下制备的 ZnO:Al 薄膜的 XRD 谱
Fig. 4 XRD patterns of ZnO:Al films deposited at different substrate temperatures: (a) RT; (b) 100 °C; (c) 200 °C

取向^[17-18]; 而当衬底温度很低时, 衬底表面的溅射粒子的迁移速率很低, 表面原子还来不及迁移到晶格生长的最佳位置便被束缚住, 从而导致薄膜结晶质量下降。

表 4 所列不同衬底温度下沉积的 ZnO:Al 薄膜的衍射角(2θ)、晶面间距(d)和半高宽(FWHM)。标准的 ZnO 薄膜衍射峰 2θ 值是 34.45°, 室温、100 °C 和 200 °C 时沉积的薄膜衍射峰的位置分别为 34.282°、34.341° 和 34.360°, 这表明衬底温度越高, 沉积的 ZnO:Al 薄膜衍射峰位置越接近 34.45°, 晶格缺陷越少。根据不同衬底温度下沉积的薄膜的衍射峰半高宽值, 由 Scherrer 公式计算薄膜的晶粒尺寸分别为 29.21、30.10、32.70 nm。可以发现, 较高的衬底温度下沉积的薄膜晶粒尺寸更大, 这是因为在薄膜生长过程中, 较高的衬底温度能有效地提高原子迁移率、消除晶界, 有助于晶粒长大。

表 4 不同衬底温度条件下制备的 ZnO:Al 薄膜 XRD 参数
Table 4 XRD parameters of ZnO:Al films deposited at different substrate temperatures

| Substrate temperature/°C | 2θ/(°) | d/nm | FWHM/(°) |
|--------------------------|--------|----------|----------|
| Room temperature | 34.282 | 0.261 36 | 0.272 |
| 100 | 34.341 | 0.260 92 | 0.264 |
| 200 | 34.360 | 0.260 78 | 0.243 |

2.2.2 电学性能

表5所列双靶共溅射工艺中衬底温度分别为室温、100℃、200℃时沉积的ZnO:Al薄膜的电学性能参数。从表中可以看出,不同衬底温度下沉积的ZnO:Al薄膜载流子浓度均比较高且变化不大,处于 $-2.8 \times 10^{20} \sim -2.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 区间,这说明200℃以下,衬底温度并不是影响载流子浓度的主要因素。ZnO:Al薄膜载流子迁移率受衬底温度的影响则较为明显,随着衬底温度从室温升高到200℃,薄膜载流子迁移率明显升高。造成这种差异的原因可能是当衬底温度较高时,沉积的薄膜晶粒尺寸比较大,结晶质量比较好,这使得薄膜中晶界密度较低,载流子在迁移过程中受到晶界的散射作用比较小,从而导致载流子迁移率的提高。而随着衬底温度的升高,ZnO:Al薄膜电阻率也出现明显的降低,由电阻率 ρ 的计算公式 $1/\rho = neu(n$ 为载流子浓度, u 为载流子迁移率)可知,薄膜电阻率的下降主要得益于薄膜载流子迁移率的增大。

表5 不同衬底温度条件下制备的ZnO:Al薄膜的电学性能参数

Table 5 Electrical properties of ZnO:Al films deposited at different substrate temperatures

| Substrate temperature/°C | Carrier concentration/ (10^{20} cm^{-3}) | Electronic mobility/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$) | Resistivity/ ($10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$) |
|--------------------------|---|---|--|
| Room temperature | -2.494 | 3.756 | 6.664 |
| 100 | -2.360 | 8.508 | 3.109 |
| 200 | -2.789 | 8.849 | 2.529 |

2.2.3 光学性能

图5所示为两靶共溅射工艺中不同衬底温度条件下沉积的ZnO:Al薄膜在波长为300~900 nm范围内的透射光谱。由图5可以看出,两靶共溅射工艺中衬底温度对ZnO:Al薄膜在可见光区光透过性能有非常重要的影响。在可见光范围内,当衬底温度为室温、100℃和200℃沉积的ZnO:Al薄膜平均透过率分别为58.82%、82.16%、93.20%。造成这种现象的原因是较高的衬底温度沉积的ZnO:Al薄膜晶粒尺寸较大,结晶质量更好,晶界密度较低,对光子的散射作用减小,具有良好的透过性能;反之,衬底温度为室温时沉积的ZnO:Al薄膜晶粒尺寸较小,晶界密度较高,薄膜中也存在其他杂相,这些都增强对光子的散射作用,导致透过性能变差^[19]。

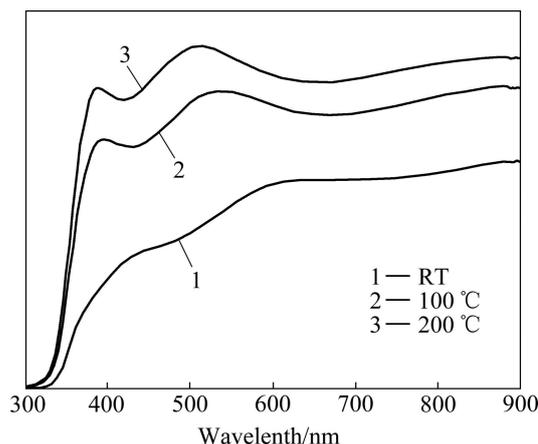


图5 不同衬底温度条件下制备的ZnO:Al薄膜透射谱

Fig. 5 Optical transmittance spectra of ZnO:Al films deposited at different substrate temperatures

3 结论

1) ZnO:Al薄膜中,Zn含量随着Zn靶溅射功率在0~90 W范围内的增加而升高,而薄膜结晶质量在其间呈现出先改善后变差的规律;ZnO:Al薄膜中载流子浓度随着Zn靶功率的增加稳步增加,载流子迁移率受其影响不大,薄膜电阻率随之减小。

2) 当Zn靶溅射功率在0~70 W范围内变化时,沉积的ZnO:Al薄膜在300~900 nm范围内的光透过曲线几乎重合,可见光平均透过率达到90%以上;而当Zn靶溅射功率为90 W时,薄膜的透过率非常低,这可能是过多的Zn原子形成的Zn金属颗粒相造成的。

3) 衬底温度对ZnO:Al薄膜的性能也有很大影响,两靶共溅射条件下,较高衬底温度下的沉积能获得结晶性能更好、电阻率更低、可见光透过率更高的薄膜。

REFERENCES

- [1] MAJOR C, NEMETH A, RADNOCZI, RADNOCZI G, CZIGANY Z, FRIED M, LABADI Z BARSONY I. Optical and electrical characterization of aluminum doped ZnO layers[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(21): 8907-8912.
- [2] JEONG W J, KIM S K, PARK G C. Preparation and characteristic of ZnO thin film with high and low resistivity for an application of solar cell[J]. Thin Solid Films, 2006, 506/507: 180-183.
- [3] XU Y N, CHING W Y. Electronic, optical, and structural properties of some wurtzite crystals[J]. Physical Review B, 1993,

- 48(7): 4335-4351.
- [4] AZULAY D, MILLO O, BALBERG I, SCHOCK H W, IRIS V F, DAVID C. Current routes in polycrystalline CuInSe₂ and Cu(In,Ga)Se₂ films[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, 91(1): 85-90.
- [5] LI Wei, SUN Yun, WANG Ya-xin, CAI Hong-kun, LIU Fang-fang, HE Qing. Effects of substrate temperature on the properties of facing-target sputtered Al-doped ZnO films[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, 91(8): 659-663.
- [6] PLATZER B C, LU J, KESSLER J, STOLT L. Interface study of CuInSe₂/ZnO and Cu(In,Ga)Se₂/Zn devices using ALD ZnO buffer layer[J]. *Thin Solid Films*, 2003, 431/432: 321-324.
- [7] DELAHOY A E, CHEN Liang-fan, AKHTAR M, SANG Bao-sheng, GUO She-yu. New technology for CIGS photovoltaics[J]. *Solar Energy*, 2004, 77(6): 785-793.
- [8] 杨田林, 张德恒, 李滋然, 马洪磊, 马瑾. 射频磁控溅射制备柔性衬底 ZnO:Al 透明导电薄膜的研究[J]. *太阳能学报*, 1999, 20(2): 200-203.
- YANG Tian-lin, ZHANG De-heng, LI Zi-ran, MA Hong-lei, MA Jin. Study of transparent conducting ZnO:Al films deposited on organic substrate by RF magnetron sputtering[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1999, 20(2): 200-203.
- [9] 孙超, 陈猛, 裴志亮, 曹鸿涛, 黄荣芳, 闻立时. 透明导电 ZnO:Al(AZO)的组织结构与特性[J]. *材料研究学报*, 2002, 2(16): 113-120.
- SUN Chao, CHEN Meng, PEI Zhi-liang, CAO Hong-tao, HUANG Rong-fang, WEN Li-shi. Microstructure and properties of transparent conductive oxide ZnO:Al(ZAO) thin films[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2002, 2(16): 113-120.
- [10] ELLMER K. Resistivity of polycrystalline zinc oxide films: Current status and physical limit[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, 34: 3097-3108.
- [11] KWAK D J, PARK M W, SUNG Y M. Discharge power dependence of structure and electrical properties of Al-doped ZnO conducting film by magnetron sputtering (for PDP)[J]. *Vacuum*, 2008, 83(1): 113-118.
- [12] ZHANG Zhi-yun, BAO Chong-gao, YAO Wen-jing, MA Sheng-qiang, ZHANG Li-li, HOU Shu-zeng. Influence of deposition temperature on the crystallinity of Al-doped ZnO thin films at glass substrates prepared by RF magnetron sputtering method[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2011, 49(6): 644-653.
- [13] LI Xue-yong, LI Hong-jian, WANG Zhi-jun, XIA Hui, XIONG Zhi-yong, WANG Jun-xi, YANG Bing-chu. Effect of substrate temperature on the structural and optical properties of ZnO and Al-doped ZnO thin films prepared by DC magnetron sputtering[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(2): 247-252.
- [14] GEETA S, RAJ R, ABHAI M. Growth and characterization of tin oxide films prepared by chemical vapour deposition[J]. *Thin Solid Films*, 1989, 190(2): 287-301.
- [15] 辛荣生, 林钰, 贾晓林. 柔性衬底 ZAO 薄膜制备及光电特性的研究[C]//第十二届全国固体薄膜学术会议. 南宁: 广西大学出版社, 2010: 230-234.
- XIN Rong-sheng, LIN Yu, JIA Xiao-lin. Preparation of ZAO thin films on flexible substrates and study of optical and electrical properties[C]//12th National Conference on Thin Solid Films. Nanning: Guangxi Normal University Press, 2010: 230-234.
- [16] LI Qing-hua, ZHU De-liang, LIU Wen-jun, LIU Yi, MA Xiao-cui. Optical properties of Al-doped ZnO thin films by ellipsometry[J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(10): 2922-2926.
- [17] 欧阳紫璇, 刘芳洋, 张治安, 赖延清, 李劫, 刘业翔. 生长温度和退火气氛对 ZnO:Al 薄膜结构与性能的影响[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2011, 16(3): 18-25.
- OUYANG Zi-dian, LIU Fang-yang, ZHANG Zhi-an, LAI Yan-qing, LI Jie, LIU Ye-xiang. Effects of growth temperature and annealing atmosphere on structure and properties of ZnO:Al thin films[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2011, 16(3): 448-454.
- [18] 刘江, 庄大明, 张弓, 李春雷, 段宇波. 中频交流磁控溅射制备氧化锌铝(ZAO)薄膜的研究[J]. *中国表面工程*, 2010, 23(1): 15-23.
- LIU Jiang, ZHUANG Da-ming, ZHANG Gong, LI Chun-lei, DUAN Yu-bo. Al-doped ZnO (ZAO) films prepared by middle-frequency alternative magnetron sputtering[J]. *China Surface Engineering*, 2010, 23(1): 15-23.
- [19] 郝晓涛, 马瑾, 马洪磊, 田茂华, 曹宝成, 叶丽娜. 低温磁控溅射有机衬底和玻璃衬底 ZnO:Al 透明导电膜的结构及特性[J]. *中国科学(A 辑)*, 2001, 31(9): 835-840.
- HAO Xiao-tao, MA Jin, MA Hong-lei, TIAN Mao-hua, CAO Bao-cheng, YE Li-na. Structure and properties of ZnO:Al transparent conductive films deposited on organic and glass substrates by magnetron sputtering at low temperature[J]. *Science in China (Series A)*, 2001, 31(9): 835-840.

(编辑 李艳红)