

基底温度对直流磁控溅射制备掺铝氧化锌薄膜性能的影响

杨昌虎^{1,2} 马忠权¹ 袁剑辉²

(¹上海大学物理系索朗光伏材料与器件联合实验室, 上海 200444)
(²长沙理工大学物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410114)

摘要 采用直流磁控溅射工艺,使用掺铝氧化锌(AZO)陶瓷靶,在玻璃基底上制备出具有 *c* 轴择优取向的 AZO 透明导电薄膜。运用共焦显微拉曼光谱仪对 AZO 陶瓷靶的微结构进行了表征,对在不同基底温度下沉积出来的薄膜运用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、紫外-可见分光光度计和四探针测试仪等分别进行了结构和光电特性的表征。结果表明,随着基底温度的升高,AZO 薄膜的晶粒逐渐增大,*c* 轴择优取向加强,结晶状况变好;AZO 薄膜的吸收边发生蓝移,折射率降低,而薄膜厚度则有所增加,光学禁带宽度增大;AZO 薄膜的电阻率降低,但在基底温度达到 350 °C 后电阻率就趋于稳定。

关键词 薄膜;AZO 薄膜;直流磁控溅射;结构;光电性能

中图分类号 TN204 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0531001

Influence of Substrate Temperature on Properties of Aluminum-Doped Zinc Oxide Films Prepared by DC Magnetron Sputtering

Yang Changhu^{1,2} Ma Zhongquan¹ Yuan Jianhui²

(¹Shu-Solare R & D Joint Laboratory, Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)
(²School of Physics and Electronic Science, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract Transparent and conductive *c*-axis oriented aluminum-doped zinc oxide (AZO) films have been prepared on glass substrate by DC magnetron sputtering processing. For this purpose, a sintered ceramic disc of ZnO mixed with Al₂O₃ is used as the target. The microstructure of AZO ceramic target is characterized by micro-Raman spectroscopy. The structural, optical and electrical properties of the films are characterized by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), UV-visible spectrophotometer and four-probe tester respectively. As the substrate temperature increases, the results show that grain size of the AZO films gradually increases, the films have a strong *c*-axis orientation and the crystallization of films becomes better. The absorption edge has a blue shift with increasing deposition temperature. The refractive index of the films decreases but films thickness and optical band gap increase with increasing deposition temperature. Resistivity of AZO films decreases with increasing deposition temperature but resistivity approaches stable after substrate temperature reaches 350 °C.

Key words thin films; AZO thin films; direct current magnetron sputtering; structure; optical and electrical properties

OCIS codes 310.0310; 220.4241; 310.6188; 310.6860; 310.6870

收稿日期: 2010-05-31; 收到修改稿日期: 2011-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(60876045),上海市重点学科建设项目(S30105),上海市教委创新基金(08YZ12),SHU-SOEN's PV 联合实验室基金(SS-E0700601)和上海市基础研究重点项目(09JC1405900)资助课题。

作者简介: 杨昌虎(1964—),男,博士研究生,高级实验师,主要从事光伏薄膜方面的研究。E-mail: ych.zrwq@163.com

导师简介: 马忠权(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事光伏方面的研究。E-mail: zqma@mail.shu.edu.cn

1 引 言

透明导电薄膜是一种既能导电又在可见光范围内具有高透射率的一种薄膜材料,现已成为薄膜材料领域的研究热点,广泛应用于太阳能电池、液晶显示器、热辐射反射镜等^[1~3]。透明导电薄膜的种类很多,其中,金属氧化物构成的透明导电材料(TCO)占据主导地位,而且近年来的应用领域及需求量不断地扩大。目前商业使用的 TCO 薄膜材料基本上是氧化铟锡(ITO),但是 ITO 材料存在价格高以及铟有一定毒性等缺点,这就限制了 ITO 薄膜的应用^[4]。因此,有必要寻找其它更好的材料,其中由于掺铝氧化锌(AZO)透明导电薄膜与 ITO 薄膜材料比较,具有价格相对低、不含有毒性和在氢等离子体中很稳定等优点,是最有望取代 ITO 薄膜的材料^[5~7]。

目前制备 AZO 薄膜的方法主要有:磁控溅射^[8]、脉冲激光沉积^[9]、溶胶-凝胶^[10]、真空蒸发^[11]和化学气相沉积^[12]等。在这些制备方法中,磁控溅射法具有易控制薄膜组分、成膜速率快以及便于大面积制备等优点而成为一种有效的制备 AZO 薄膜的方法。对 AZO 薄膜的研究重点之一在于如何降低其电阻率,同时提高其在可见光区的透射率,而溅射过程的工艺因素,如基底温度会对沉积薄膜的结构和光电学性质产生重要的影响。虽然针对基底温度对沉积薄膜的结构和光电性质的影响,前人已经做了大量的研究工作,但在这些研究中,主要是局限在射频磁控溅射制备的 AZO 薄膜^[13~16],对直流磁控溅射陶瓷靶制备 AZO 薄膜的研究还很缺乏。Yeon-Keon Moon 等^[17]和余志明等^[18]分别研究了在氩气、氧气和氙气的混合气体环境下,用直流磁控溅射陶瓷靶制备 AZO 薄膜的性能,他们都认为晶粒尺寸、电阻率和光能隙的变化趋势在基底温度为 300 °C 附近时出现明显的转换,这与研究结果不一致。因此,基底温度对直流磁控溅射陶瓷靶制备 AZO 薄膜性能影响的研究还很不完善,有必要对其进行全面、系统的研究。为此,本文首先用直流磁控溅射工艺,使用 AZO 陶瓷为靶材,在其它工艺参数不变的情况下,在 150~450 °C 温度范围的玻璃基底上制备出 AZO 透明导电薄膜,并在相对应的温度范围内高真空退火 10 min。运用共焦显微拉曼光谱仪对 AZO 陶瓷靶的微结构进行了表征,对在不同基底温度下沉积出来的薄膜运用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、紫外-可见分光光度计和四探针测试仪等分别进行了结构和光电特性的

表征,系统地研究了基底温度对直流磁控溅射 AZO 薄膜的晶粒大小、晶相、薄膜厚度、折射率、吸收带边、光学带隙和电阻率等性能参数的影响,为直流磁控溅射制备 AZO 薄膜时基底温度的选择提供了理论和实验依据。

2 实验部分

2.1 AZO 薄膜的制备

采用 JGP450 型双室超高真空多功能磁控溅射设备(沈阳科学仪器研制中心有限公司),以普通玻璃为基底制备 AZO 薄膜,玻璃基底在溅射前经过丙酮、无水乙醇和去离子水超声清洗,靶材是由上海高展金属材料有限公司提供的 AZO 陶瓷靶材[ZnO 和 Al₂O₃ 的质量分数分别为 98% 和 2%],纯度达到 99.99%。靶材尺寸为 $\Phi 60$ mm \times 4 mm,靶基距为 70 mm,以高纯氩气为工作气体,通过改变基底温度,利用直流磁控溅射的方法在普通玻璃基底上制备了 AZO 薄膜。在正式溅射前,先用氩气对玻璃基底表面清洗 1 min,然后再预溅射 1 min,以达到清除靶表面的杂质和污染物,提高膜的纯度的目的。在其它工艺参数不变的情况下,在 150~450 °C 温度范围的玻璃基底上制备出 AZO 透明导电薄膜,并在相对应的温度范围内高真空退火 10 min,退火是为了改善 AZO 透明导电薄膜的性能^[19]。其他工艺参数经过前期摸索如表 1 所示。

表 1 磁控溅射沉积 AZO 薄膜所用的工艺参数

Table 1 Parameters used in AZO thin films by magnetron sputtering deposition

Parameter	Value
Substrate temperature / °C	150~450
Base pressure / Pa	2.4×10^{-4}
Working pressure / Pa	1.5
Argon gas flow rate / (mol/min)	1.34×10^{-3}
Sputtering power / W	90
Sputtering time / min	22

2.2 AZO 薄膜的测试

使用 Uv-Vis Raman System 1000 型共焦显微拉曼光谱仪(英国, Renishaw 公司),表征 AZO 陶瓷靶的微观结构;使用 JSM-6700F 型高分辨 SEM(日本, JEOL 公司)表征 AZO 薄膜的表面形貌;薄膜结构用 D_{max}-2550 型 XRD(日本,理学公司)进行检测,采用 Cu K α 射线($\lambda = 0.15048$ nm);使用 TU1901 型 UV-VIS 分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司),测试了样品的透射光谱;使用

D41-11D/ZM 型微控四探针测试仪 (SevenStar 公司) 测量薄膜的方块电阻, 使用 XP-2 型台阶仪 (AMBIOS 公司) 测量膜厚。

3 结果与讨论

3.1 AZO 靶材的微结构

因为所用 AZO 陶瓷靶材的质量直接影响着其制备的薄膜质量, 在进行制备 AZO 薄膜之前, 在室温下对 AZO 靶材进行了拉曼光谱测试, 以表征其微结构。仪器参数如下: 入射激光波长 785 nm; 用 50 倍显微物镜聚焦到样品表面; 拉曼谱的分辨力小于 1 cm^{-1} , 光谱重复性好于 0.2 cm^{-1} , 光谱的空间分辨小于 $1 \mu\text{m}$; 观测的范围在 $100 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$, 测试结果如图 1 所示。

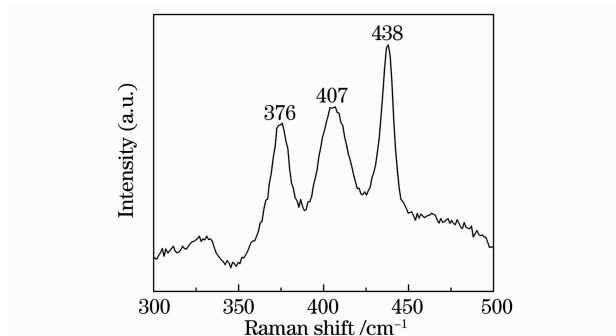


图 1 AZO 陶瓷靶的拉曼谱

Fig. 1 Raman spectra of AZO ceramic target

由图 1 可见, 在 $376, 407$ 和 438 cm^{-1} 处观察到 3 个明显的拉曼特征峰。已知纤锌矿结构的 ZnO

属于 C_{6v}^4 空间群, 其原胞中包含两个化学式的原子, 在适当的散射配制下, 可观察到 6 个拉曼活性光学模, 其表达式为^[18]

$$\Gamma_{\text{opt}} = A_1(\text{TO}) + A_1(\text{LO}) + E_1(\text{TO}) + E_1(\text{LO}) + 2E_2, \quad (1)$$

式中 TO 表示横光学模, LO 表示纵向光学模。 376 cm^{-1} 处的拉曼峰对应 $A_1(\text{TO})$ 模式, 407 cm^{-1} 处的拉曼峰对应 $E_1(\text{TO})$ 模式, 438 cm^{-1} 处的拉曼峰对应 E_2 的高频模式^[20]。可以看出, AZO 靶材拉曼峰与标准 ZnO 晶体拉曼峰位置非常接近, 说明 Al_2O_3 的掺杂没有破坏 ZnO 晶体的六方纤锌矿结构。并且未见 Al_2O_3 的拉曼峰出现, 这说明高温烧结过程中 Al_2O_3 与 ZnO 已形成了固溶体, 其拉曼峰相对于标准 ZnO 晶体的峰位微小偏移, 是由于 Al^{3+} (半径为 0.053 nm) 对 Zn^{2+} (半径为 0.075 nm) 有效替位, 使 ZnO 的点阵结构产生了一定程度的应变, 这个附加的应变势对声子的散射特性形成干扰, 使相应的拉曼散射峰发生一定程度的偏移, 但偏移量很小 (如 E_2 模式峰相对于标准的 437 cm^{-1} 的峰位偏移量仅为 1 cm^{-1}), 说明用该陶瓷靶材能制备出高质量的 AZO 薄膜样品。

3.2 基底温度对薄膜结构的影响

由于薄膜的微观形貌及晶相结构与其光电性能密切相关, 因此, 为了表征所制备的 AZO 薄膜样品的表面微观形貌和其晶相结构, 对样品分别进行了电镜扫描和 XRD 分析。图 2 为不同基底温度下薄

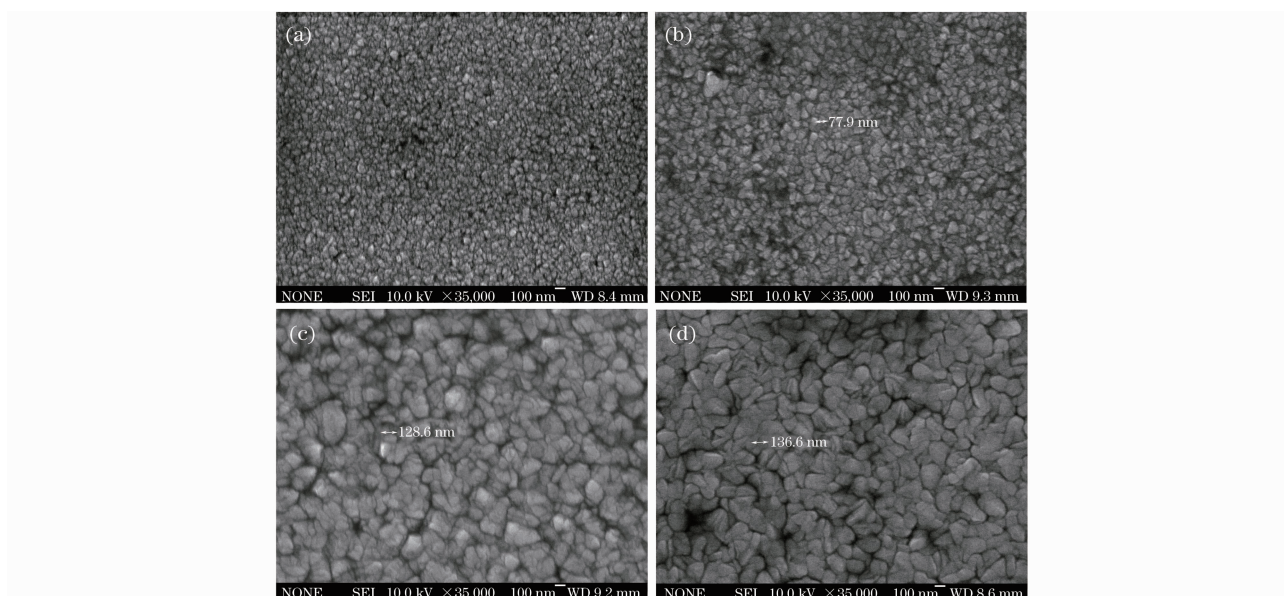


图 2 扫描电镜观察不同基底温度下薄膜样品的表面形貌。(a) $150 \text{ }^\circ\text{C}$, (b) $250 \text{ }^\circ\text{C}$, (c) $350 \text{ }^\circ\text{C}$, (d) $450 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 2 Morphological surface of thin films at different substrate temperatures by scanning electron microscope (SEM).

(a) $150 \text{ }^\circ\text{C}$, (b) $250 \text{ }^\circ\text{C}$, (c) $350 \text{ }^\circ\text{C}$, (d) $450 \text{ }^\circ\text{C}$

膜样品的 SEM 图,从图 2 中可以看出,薄膜的结晶度良好,晶粒尺寸比较均匀,薄膜表面均匀致密,表面光滑平整,无异常大的颗粒,说明利用该方法能够制备出高质量的 AZO 薄膜,并且随着基底温度的升高,薄膜的晶体平均粒径明显增大,其晶粒尺寸大小如表 2 所示。实际上,晶粒平均直径与温度的关系为^[21]

$$D = C \exp(-Q_m/RT), \quad (2)$$

式中 Q_m 为晶界移动激活能, D 为平均晶粒直径, R 为气体常数, C 为比例系数。因此,伴随着基底温度的升高,AZO 薄膜样品的晶粒也随之长大。从图 2 中还可以看出,随着基底温度的升高,晶粒变大的同时也变得越完整,这主要是由于温度升高,使 AZO 薄膜的晶界和晶体缺陷减少,从而提高了晶体的完整性。

表 2 不同基底温度下 AZO 薄膜样品晶粒尺寸、衍射峰位和半峰全宽

Table 2 Grain size, diffraction-peak position and FWHM of AZO thin films prepared at different substrate temperatures

Substrate temperature / °C	Grain size (SEM) / nm	2θ / (°)	FWHM / (°)
150	50.0	33.74	1.24
250	77.9	34.10	0.94
350	128.6	34.22	0.86
450	136.6	34.22	0.68

图 3 为不同基底温度下样品的 XRD 谱,扫描角度为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。在图 3 中可以看到样品只有一个 (002) 衍射峰,这表明制备出来的 AZO 薄膜具有六角纤锌矿结构且呈 c 轴择优取向。随着基底温度的升高,(002) 峰向高角度方向移动,由表 2 所示的数据可以看出,(002) 峰的衍射角由 150°C 时的 33.74° 增大到 450°C 时的 34.22° ,越来越接近标准 ZnO 晶体的 34.45° ,这是因为 Al^{3+} 比 Zn^{2+} 的原子尺寸小, Al^{3+} 取代 Zn^{2+} 将导致 c 轴缩短,使其在薄膜中 c 轴方向存在压应力,而沉积粒子能量随基底温度升高而增大,导致成膜时粒子更容易达到平衡位置,从而使形成的晶粒内部的应力得到更好地被释放,使得 (002) 峰向大角度移动,这与文献[22]的结果是一致的。同时,随着基底温度的升高,溅射出来的原子、原子团更容易形成小岛,或更进一步产生小岛并联,从而增强了 c 轴的择优取向。并且随着基底温度升高,(002) 峰的半峰全宽从 150°C 时的 1.24° 减小到 450°C 时的 0.68° , (002) 峰的强度也逐渐增加,说明结晶质量越来越好,这也可以从图 2 的 SEM 照片

中得到验证,根据 Scherrer 公式估算出的样品晶粒尺寸大小的变化趋势也是和 SEM 照片的结果相一致。

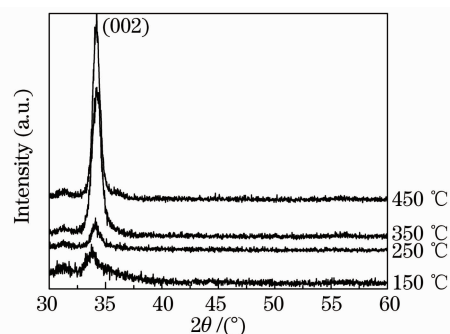


图 3 不同基底温度下薄膜样品的 XRD 图

Fig. 3 XRD diagrams of thin films prepared at different substrate temperatures

3.3 基底温度对薄膜光学性能的影响

图 4 为不同温度下 AZO 薄膜的透射谱,采样间隔为 1 nm ,在 $300 \sim 900 \text{ nm}$ 范围内扫描。可以看出每个样品在可见光范围内的平均透射率在 85% 以上,并且有明显的干涉现象和陡峭的截止吸收限。随着基底温度的升高,吸收边发生蓝移,产生这种蓝移现象的原因是基于载流子浓度的增加。由于 Al 掺杂使 ZnO 晶体由非简并态转变为简并态,费米能级进入导带,要把价电子激发为自由载流子,必须要把它们激发到费米能级以上,使禁带宽度加宽,从而使薄膜的吸收边蓝移,即 Burstein 移动。Moss 给出 Burstein 移动引起的带隙的增加量与载流子浓度的关系为^[23]

$$\Delta E_g = \frac{h^2}{2m^*} (3\pi^2 n)^{2/3} = \left[\frac{h^2}{8m^*} \right] \left[\frac{3\eta}{\pi} \right]^{2/3}, \quad (3)$$

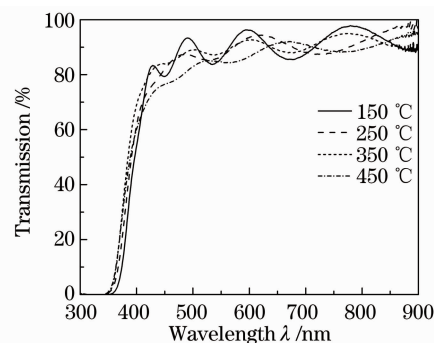


图 4 不同基底温度下薄膜样品的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of thin films prepared at different substrate temperatures

式中 m^* 是导带中电子的有效质量, h 是普朗克常量, η 是载流子浓度。根据(3)式可以得出,载流子浓度越高,吸收限移动量 ΔE_g (AZO 薄膜的能隙与纯

ZnO 的能隙之差)越大,也就越向短波方向移动,这与实验结果相符。

ZnO 是直接跃迁半导体,薄膜的光学禁带宽度 E_g 可由如下关系式确定^[16]:

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2}, \quad (4)$$

式中 $\alpha = \frac{\ln T}{d}$ 为薄膜的吸收系数,薄膜厚度 d 通过台阶仪测得, $h\nu$ 为吸收的光子能量, A 为一常数,于是可以通过延长 $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ 直线外推至 x 轴来确定 E_g 。图 5 为求 AZO 薄膜的能隙图。从图 5 中可求看出,基底温度为 150~450 °C 时,AZO 薄膜的光学禁带宽度分别为 3.38,3.40,3.48 和 3.51 eV,大于本征 ZnO 的禁带宽度(3.37 eV)^[24],说明导带中的电子已经发生简并,这一能量的增加是由于铝掺杂和缺陷引起薄膜中自由电子浓度增加而导致的。基底温度升高,AZO 薄膜的光学禁带宽度越大,AZO 薄膜的能隙与纯 ZnO 的能隙之差就越大,因而薄膜中自由电子浓度也越大,这与上面讨论的 Moss-Burstein 效应是一致的。

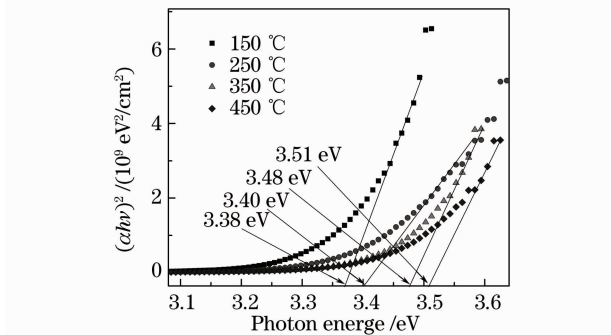


图 5 求 AZO 薄膜在不同基底温度时的带隙图

Fig. 5 Calculation of the band gap of AZO thin films prepared at different substrate temperatures

通过对 AZO 膜的紫外-可见透射率光谱进行分析,可以估算 AZO 膜的折射率 n ,这可通过下面的公式来估算^[25]:

$$n = [N + (N^2 - n_s^2)^{1/2}]^{1/2}, \quad (5)$$

$$N = \frac{1 + n_s^2}{2} + 2n_s \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} T_{\min}}, \quad (6)$$

式中 n_s 为载玻片的折射率,为 1.52; T_{\max} , T_{\min} 为某一样品透射谱相邻的最大和最小的透射率。考虑到在可见光范围内,薄膜的折射率随波长变化不大,故本文不考虑折射率与波长的变化关系。其计算结果如表 3 所示,即折射率随基底温度的升高而有所下降,这主要是因为薄膜晶粒增大的同时晶粒的间隔也增大,使得孔隙率也相应增大(图 2),从而导致其折射率下降^[26]。但折射率的下降幅度并不大,这是

因为薄膜的晶相没有发生变化,在可见光范围内薄膜的平均透射率变化不大所致。AZO 薄膜的厚度则随基底温度的升高而增加(表 3),这是因为在磁控溅射中,沉积时原子能量很大,有可能在基底表面引起一定的化学键断裂而重组的过程,在基底温度逐渐增大的过程中,使化学吸附反应过程加快,从而使沉积速率增大^[27]。

表 3 AZO 薄膜样品的折射率、厚度、方块电阻和电阻率
Table 3 Refractive index, thickness, sheet resistance and resistivity of AZO thin films

Substrate temperature / °C	Film thickness / nm	Refractive index n	Sheet resistance / Ω	Resistivity $\rho / (10^{-3} \Omega \cdot \text{cm})$
150	300	1.85	180.48	5.4
250	350	1.75	92.80	3.2
350	400	1.69	56.72	2.3
450	420	1.66	54.76	2.3

3.4 基底温度对薄膜电学性能的影响

在 AZO 薄膜的溅射沉积过程中,基底温度会直接影响到薄膜的微观结构而对薄膜的导电性产生显著的影响。图 6 给出了 AZO 薄膜的电阻率随基底温度的变化曲线。从导电机制上分析,AZO 材料是 N 型半导体材料,影响材料电阻率的因素主要是自由电子浓度和自由电子的迁移率,其关系式为^[28]

$$\rho = \frac{1}{\eta q \mu}, \quad (7)$$

式中 ρ 为电阻率, η 为电子浓度, q 为电子电量, μ 为电子迁移率。电阻率取决于电子浓度和电子迁移率,两者均与掺杂浓度和温度有关。

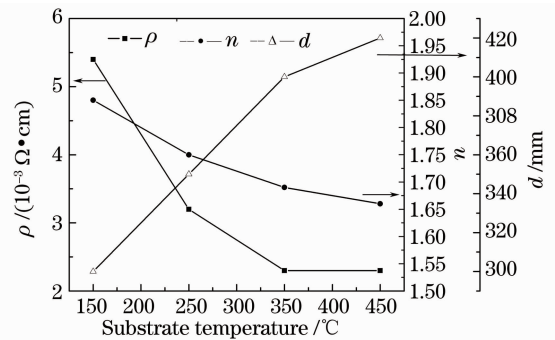


图 6 不同基底温度下薄膜样品的电阻率、折射率和厚度
Fig. 6 Resistivity, refractive index and thickness of AZO thin films prepared at different substrate temperatures

由图 6 可见,AZO 薄膜的电阻率随基底温度的升高而显著降低,从基底温度为 150 °C 时的 $5.4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 降至基底温度为 350 °C 时的 $2.3 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$,随后随温度的升高而不变。随着基底

温度的上升, AZO 薄膜的结晶有序化程度提高, 晶粒长大, 内部晶体缺陷减少, 使载流子迁移率提高; 同时温度升高使溅射粒子获得足够高的迁移能量而加大了 Al^{3+} 对 Zn^{2+} 的替位效应, 增加施主态, 提高载流子浓度, 因此电阻率减小。但是随着基底温度升高到一定的程度后, AZO 薄膜的自由电子浓度和迁移率会达到一定程度的饱和, 因而使得电阻率在基底温度达到 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后的变化就趋于稳定。这与文献[17]和[18]中认为的最大晶粒尺寸和最低的电阻率出现在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$, 之后晶粒尺寸和电阻率随温度升高分别略有变小和增大的结论不一致。我们认为, 这可能是其它溅射工艺参数的选择与我们不一致所导致的, 因此要得到最佳性能的 AZO 薄膜, 必须要综合考虑各方面的溅射条件。

4 结 论

采用直流磁控溅射技术, 在优化的工艺条件下, 研究了基底温度对用 AZO 陶瓷靶制备 AZO 透明导电薄膜性能的影响。研究结果表明: 随着基底温度的升高, AZO 薄膜的晶粒逐渐增大, 晶粒变大的同时也变得越完整, 制备出来的 AZO 薄膜具有六角纤锌矿结构且呈 c 轴择优取向, 温度越高, c 轴择优取向越强, 越来越接近标准 ZnO 晶体的 34.45° ; AZO 薄膜的吸收边随基底温度升高而发生蓝移, 折射率下降, 而薄膜厚度则随温度的升高而增加, AZO 薄膜的光学禁带宽度随基底温度的升高而增大, 均大于本征 ZnO 的禁带宽度; AZO 薄膜的电阻率随基底温度的升高而降低, 但在基底温度达到 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后电阻率就趋于稳定。

参 考 文 献

- 1 N. R. Armstrong, P. A. Veneman, E. Ratcliff *et al.*. Oxide contacts in organic photovoltaics: characterization and control of near-surface composition in indium-tin oxide (ITO) electrodes [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2009, **42**(11): 1748~1757
- 2 Y. Wang, T. Brezesinski, M. Antonietti *et al.*. Ordered mesoporous Sb-, Nb-, and Ta-doped SnO_2 thin films with adjustable doping levels and high electrical conductivity[J]. *Acc Nano*, 2009, **3**(6): 1373~1378
- 3 Sun Zhaoqi, Cao Chunbin, Song Xueping *et al.*. Study on ellipsometric spectra of ITO film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 403~408
孙兆奇, 曹春斌, 宋学萍等. 氧化铜锡薄膜的椭偏光谱研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 403~408
- 4 N. M. Torkaman, Y. Ganjkanlou, M. Kazemzad *et al.*. Crystallographic parameters and electro-optical constants in ITO thin films[J]. *Mater. Charact.*, 2010, **61**(3): 362~370
- 5 Ye Zhizhen, Lü Jianguo, Zhang Yinzhu *et al.*. ZnO: Doping and Application[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009. 55~70
叶志镇, 吕建国, 张银珠等. 氧化锌半导体材料掺杂技术与应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009. 55~70
- 6 Zhang Fuchun, Zhang Zhiyong, Zhang Weihu *et al.*. First-principles calculation of electronic structure and optical properties of AZO (ZnO: Al) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1025~1031
张富春, 张志勇, 张威武等. ZO(ZnO:Al)电子结构与光学性质的第一性原理计算[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1025~1031
- 7 Z. T. Yao, X. R. Sun, H. J. Xu *et al.*. Preparation, structural and electrical properties of zinc oxide grown on silicon nanoporous pillar array[J]. *Chin. Phys. B*, 2007, **16**(10): 3108~3113
- 8 W. F. Liu, G. T. Du, Y. F. Sun *et al.*. Al-doped ZnO thin films deposited by reactive frequency magnetron sputtering; H_2 -induced property changes[J]. *Thin Solid Films*, 2007, **515**(5): 3057~3060
- 9 H. Agura, H. Okinaka, S. Hoki *et al.*. Low-resistive and transparent AZO films prepared by PLD in magnetic field[J]. *Electr. Engng. Jpn.*, 2005, **151**(2): 40~45
- 10 K. E. Lee, M. Wang, E. J. Kim *et al.*. Structural, electrical and optical properties of sol-gel AZO thin films[J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2009, **9**(3): 683~687
- 11 C. Dridi, R. B. Chaabane, J. Davenas *et al.*. Nanostructural, optical and electrical properties of vacuum evaporated films of an azo-calix[4] arene derivative [J]. *Vacuum*, 2009, **83**(5): 883~888
- 12 Shao Bilin, Jiang Fengyi, Dai Jiangnan *et al.*. Property of ZnO thin films grown on Ag-Si (111) templates by atmosphere-pressure metal organic chemical vapor deposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1115~1118
邵碧琳, 江风益, 戴江南等. 常压化学气相沉积法在 Ag/Si (111)模板上生长 ZnO 薄膜及其性能研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1115~1118
- 13 Sun Chengwei, Liu Zhiwen, Qin Fuwen *et al.*. Influences of growth temperature on the crystalline characteristics and optical properties for ZnO films deposited by reactive magnetron sputtering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3): 1390~1397
孙成伟, 刘志文, 秦福文等. 生长温度对磁控溅射 ZnO 薄膜的结晶特性和光学性能的影响[J]. *物理学报*, 2006, **55**(3): 1390~1397
- 14 J. G. Lu, Z. Z. Ye, Y. J. Zeng *et al.*. Structural, optical, and electrical properties of (Zn, Al)O films over a wide range of compositions [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(7): 073714~073724
- 15 Y. H. Kim, K. S. Lee, T. S. Lee *et al.*. Effects of substrate temperature and Zn addition on the properties of Al-doped ZnO films prepared by magnetron sputtering[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**(16): 7251~7256
- 16 J. H. Park, J. M. Shin, S. Y. Cha *et al.*. Deposition-temperature effects on AZO thin films prepared by RF magnetron sputtering and their physical properties[J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2006, **49**(12): 584~588
- 17 Y. K. Moon, S. H. Kim, J. W. Park. The influence of substrate temperature on the properties of aluminum-doped zinc oxide thin films deposited by DC magnetron sputtering[J]. *J. Mater Sci-Mater El.*, 2006, **17**(12): 973~977
- 18 Yu Zhiming, Wu Shuiping, Wei Qiuping *et al.*. Effects of substrate temperature and oxygen partial pressure on ZAO film by DC magnetron sputtering[J]. *Vacuum*, 2006, **43**(6): 11~14
余志明, 伍水平, 魏秋平等. 基底温度和氧分压对直流磁控溅射制备的 ZnO: Al 薄膜性能的影响[J]. *真空*, 2006, **43**(6): 11~14
- 19 Zhang Liwei, Wang Zijian, Lu Jingxiao *et al.*. Study on AZO thin films annealed in vacuum[J]. *Vacuum*, 2006, **43**(5): 11~15
张丽伟, 王子健, 卢景霄等. 真空退火法对 AZO 薄膜的研究[J]. *真空*, 2006, **43**(5): 11~15

- 20 C. Bundesmann, N. Ashkenov, M. Schubert *et al.*. Raman scattering in ZnO thin films doped with Fe, Sb, Al, Ga, and Li [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(10): 1974~1976
- 21 Xu Zuyao, Li Pengxing. Introduction to Material Science[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishing House, 1986. 476~480
徐祖耀, 李鹏兴. 材料科学导论[M]. 上海: 上海科技出版社, 1986. 476~480
- 22 K. H. Kim, K. C. Park, D. Y. Ma. Structural, electrical and optical properties of aluminum doped zinc oxide films prepared by radio frequency magnetron sputtering [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **81**(12): 7764~7772
- 23 T. S. Moss. The interpretation of the properties of indium antimonide[J]. *Proc. Roy. Soc. London Ser. B*, 1954, **67**(10): 775~782
- 24 Ü. Özgür, Y. I. Alivov, C. Liu *et al.*. A comprehensive review of ZnO materials and devices[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(4): 041301~041403
- 25 L. J. Meng, M. Andritschky, M. P. dos Santos. The effect of substrate temperature on the properties of d. c. reactive magnetron sputtered titanium oxide films[J]. *Thin Solid Films*, 1993, **223**(2): 242~247
- 26 Zhang Min, Lin Guoqiang, Dong Chuang *et al.*. Mechanical and optical properties of titanium dioxide films prepared by pulsed bias arc ion plating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(12): 7300~7308
张敏, 林国强, 董闯等. 脉冲偏压电弧离子镀 TiO₂ 薄膜的力学与光学性能[J]. 物理学报, 2007, **56**(12): 7300~7308
- 27 Zeng Weiqiang, Yao Jianke, He Hongbo *et al.*. Influence of substrate temperature on the properties of Tin-doped indium oxide thin films prepared by direct current magnetron sputtering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 2031~2035
曾维强, 姚建可, 贺洪波等. 基底温度对直流磁控溅射 ITO 透明导电薄膜性能的影响 [J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 2031~2035
- 28 Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng. Semiconductor Physics (7th edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 123~125
刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学(第七版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 123~125