

The Effects of DC Magnetron Sputtering Power on Electrical and Optical Properties of ITO Thin Films

Zhiting Geng*, Qing He

School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing
Email: [*qhgzt@126.com](mailto:qhgzt@126.com)

Received: Jun. 27th, 2014; revised: Jul. 18th, 2014; accepted: Jul. 22nd, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The experiment of ITO thin film samples was deposited on glass substrates by DC reactive magnetron sputtering. The effects of sputtering power on optical properties of ITO thin films were investigated. The results of several tests show that within the scope of the set of power, the increase of sputtering power leads to the increase of the thickness of the films, but the decrease of the resistivity and visible light transmittance of ITO thin films.

Keywords

ITO Thin films, DC Reactive Magnetron Sputtering, Electrical and Optical Properties

直流磁控溅射功率对ITO 薄膜光电学性能的影响

耿志挺*, 何 青

华北电力大学能源与动力学院, 北京
Email: [*qhgzt@126.com](mailto:qhgzt@126.com)

收稿日期: 2014年6月27日; 修回日期: 2014年7月18日; 录用日期: 2014年7月22日

*通讯作者。

摘要

本实验的ITO薄膜样品是利用直流磁控溅射技术在玻璃基片上沉积而成的。通过改变溅射功率，研究不同溅射功率对ITO薄膜光电学性能的影响。经实验测试后发现：在实验给定的功率区间内，ITO薄膜的厚度随着溅射功率的增加而增加，而其电阻率及可见光透过率则随之降低。

关键词

ITO薄膜，直流磁控溅射，光电学性能

1. 引言

锡掺杂氧化铟(Tin-doped indium oxide, 简称 ITO)是一种体心立方铁锰矿结构的 N 型半导体材料, 具有带隙宽(3.5~4.3 eV)、载流子浓度高(10^{21} cm^{-3})、电子迁移率大($15\sim 450 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和电阻率低(接近 $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 量级)等特点[1]。在可见光波段透过率高, 可达 85% 以上; 对紫外线吸收率高, 可达 85% 以上; 对红外线反射率高, 大于 80%; 膜层硬度高, 耐磨, 耐化学腐蚀; 膜层具有很好的酸刻、光刻性能, 便于细微加工[2]。锡掺杂氧化铟是一种用途广泛的透明导电材料, 已经成熟的应用在液晶显示器、太阳能电池等领域。

ITO 薄膜的制备方法很多, 常见的有喷

涂法、真空蒸发、磁控溅射、溶胶-凝胶法、脉冲激光沉积等, 在这些方法中, 磁控溅射镀膜可以准确地控制工艺参数, 可在大面积衬底上均匀成膜, 重复性好, 可以获得光电性能优异的 ITO 薄膜[3]。因此, 电子电器、信息等多个领域大量使用 ITO 薄膜。

在已知的直流磁控溅射制备 ITO 薄膜的研究结果中, 对 ITO 薄膜质量的影响因素有很多, 如溅射气压、氧分压、溅射功率、基片温度、靶材质量等。本文研究溅射功率对 ITO 薄膜质量的影响。

2. 实验

实验使用的是中科院沈阳科学仪器股份有限公司生产的 JGP-450B 型磁控溅射沉积系统, 通过直流磁控溅射技术在玻璃基片上沉积获得 ITO 薄膜样品。靶材是 In_2O_3 和 SnO_2 质量分数比为 9:1 的陶瓷靶。实验本底真空度为 $3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 工作真空为 0.5 Pa, 氩气气氛, 溅射功率 65~160 W, 溅射时间为 20 min, 实验条件(见表 1)。

采用日本产日本电子 JSM-7001F 热场发射扫描电子显微镜测试样品的表面形貌和颗粒大小; 采用日本产岛津 XRF-1800 型 X 射线荧光光谱仪测试样品的膜厚和成分组成; 采用北京普析检测科技研究院生产的 TU-1901 型紫外可见分光光度计测试样品的透过率曲线, 波长范围: 200~900 nm。

3. 结果与讨论

3.1. 成分与膜厚

利用 XRF, 测得 ITO 薄膜的成分及膜厚, 见表 2。从表 2 可以看出, 随着功率的增加, ITO 薄膜的成分变化不大, 而膜厚呈线性增加。膜厚跟溅射功率基本呈正比, 其原因解释如下, 到达基片的溅射物质总量 Q :

$$Q \propto \frac{\mu}{eN_A} I_t Y t$$

Table 1. Experimental condition of the ITO thin films by DC reactive magnetron sputtering**表 1.** 直流磁控溅射沉积 ITO 薄膜的实验条件

样品序号	溅射功率/W	溅射时间/min	氩气流速/sccm
1	65	20	15
2	80	20	15
3	120	20	15
4	140	20	15
5	160	20	15

Table 2. The compositions and film thickness of the ITO thin films**表 2.** ITO 薄膜样品成分及膜厚

样品序号	In ₂ O ₃ 含量/at. %	SnO ₂ 含量/at. %	膜厚/nm
1	91.9	8.1	300.91
2	91.8	8.2	357.76
3	90.6	9.4	536.28
4	90.0	10.0	680.24
5	89.1	10.9	804.58

式中 μ 为溅射物质的相对原子质量, e 为电子电量, N_A 为阿伏伽德罗常数, I_t 为靶离子电流, Y 为溅射产额(定义为: 相应于每个入射离子所放出的样品原子数), t 为溅射时间[4]。做粗略近似, 用溅射时的放电电流 I_s 代替 I_t , 同时设溅射产额正比于放电电压 U_s , 则由上式导出靶上溅射物质的厚度 $d \propto U_s \cdot I_s \cdot t$, 而溅射功率 $P = U_s \cdot I_s$ 。所以当溅射时间 t 一定时, 薄膜厚度 d 正比于溅射功率 P 。

3.2. 表面分析

图 1 是在不同溅射功率沉积的 ITO 薄膜的 SEM 扫描电镜照片。从图 1 可以看出, 在沉积 ITO 薄膜的过程中, 不同溅射功率的 ITO 薄膜样品, 其表面形貌和晶粒大小均有所不同。在 65 W 的溅射功率下, ITO 薄膜的局部形貌如图 1(a), 可以看出, 晶粒大小不均, 一个晶粒的尺寸约为 30 nm。在 80 W 的溅射功率下, 图 1(b)中的晶粒变大, 晶界宽度变大, 晶粒大小约为 40 nm 左右。当功率升高到 120 W 时, 图 1(c)中晶粒变得更加明显且致密, 可以看出小晶粒的团簇形成了大的晶粒, 晶粒的尺寸约为 60 nm 左右。在 140 W 的溅射功率下, 晶粒变得更为致密。溅射功率继续增加到 160 W, 其团簇现象更加明显, 晶粒尺寸更大(大约 100 nm)的同时更加均匀。实验表明: 随着溅射功率的增大, 晶粒尺寸更大和更均匀的同时, 小晶粒也会成长为大晶粒。

3.3. 电学性能

随着膜厚的增加, 方阻值会减小。这是因为方阻等于电阻率除以膜厚, 在给定材料时, 电阻率应不变, 膜厚增加, 方阻值减小。这在我们的实验结果中也反映出来了, 见图 2(a)。利用方阻数据和膜厚数据, 分别计算五个样品的电阻率, 并研究电阻率随溅射功率的变化规律, 见图 2(b)。我们发现, 随着溅射功率的提高, 样品电阻率基本呈下降趋势, 最低电阻率为 $1.77 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

这可以用样品的微观组织结构加以解释: 由前面的 SEM 分析可知, 随着溅射功率的提高, 晶粒尺寸越大(特别是对于前三组样品尤为明显), 从而晶界所占的比例就小, 这就意味着电子漂移的弛豫时间 τ 有所增加从而电阻率下降(电阻率 $\rho \propto \tau^{-1}$)。简单而言, 就是晶界减少导致电子被“散射”的几率减小了,

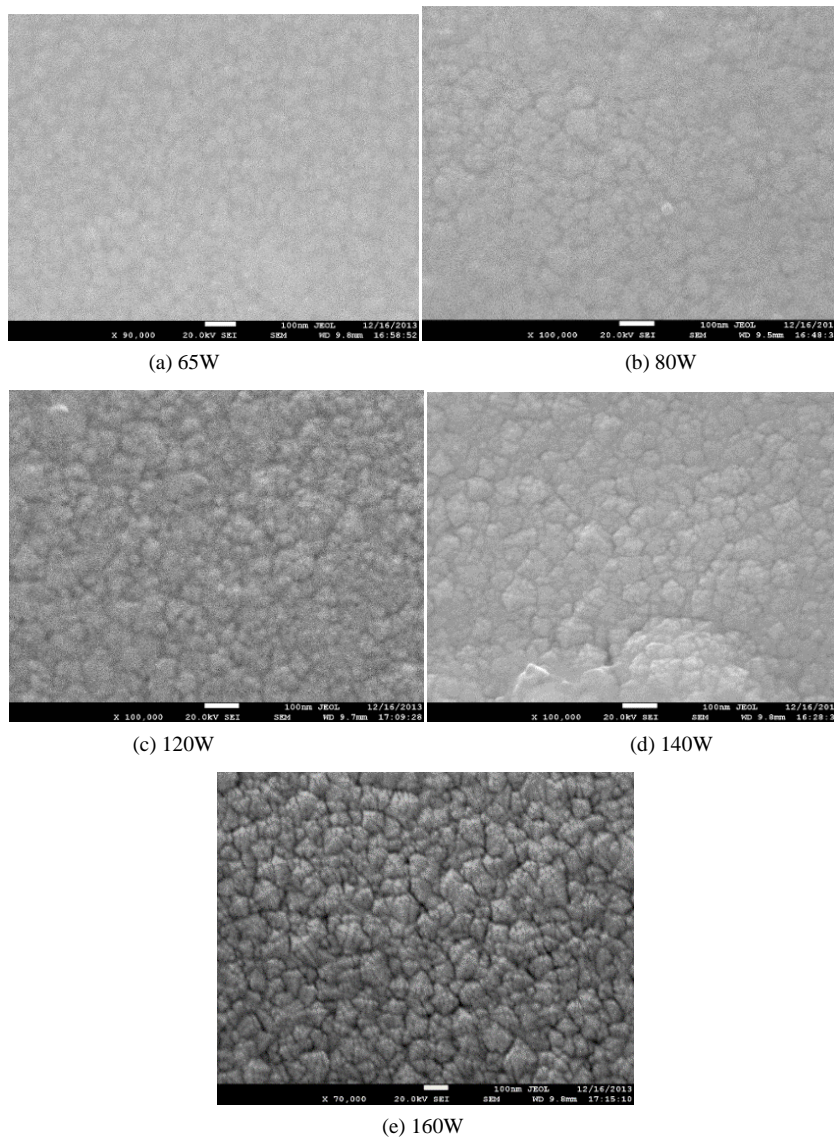


Figure 1. SEM micrographs of the ITO thin films

图 1. ITO 薄膜表面形貌 SEM

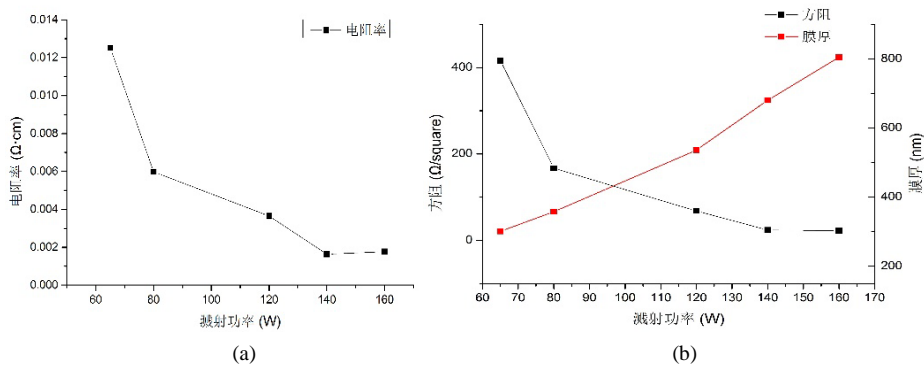


Figure 2. Electrical properties of ITO thin films: (a) The relation of sheet resistance and film thickness with sputtering power; (b) The relation of resistivity with sputtering power

图 2. ITO 薄膜的电学性能: (a)方阻膜厚和溅射功率关系; (b)电阻率和溅射功率关系

材料对电子的“阻碍”作用减小了,从而电阻率下降。此外,由前面 XRD 结果分析可知,功率增加,ITO 薄膜的结晶程度增加,更加完整的晶体结构也有利减小材料对电子的散射,降低电阻率。

从上述分析可知,功率增加时,ITO 薄膜的电阻率下降,同时,膜厚增加,这就使得 ITO 薄膜的方阻值随功率的增加而降低。

3.4. 光学性能

众所周知,利用朗伯-比尔定律可以将实验测得试样吸光度 A 转换成透过率 T ,该定律的数学表达式为:

$$A = \lg (1/T)$$

其中, A 为吸光度, T 为透射率,是透射光强度比上入射光强度。

由此可以得到 ITO 薄膜样品透过率随波长变化曲线,见图 3。从图 3 中可以发现,ITO 薄膜的透过率在可见光区具有较高的数值,其中 1~3 样品的平均透过率在 80% 左右,最高透过率为 2 号样品的 88%。同时,随着 ITO 膜厚度的增加,对光的透过率呈下降的趋势。造成这一现象可能是因为 ITO 薄膜厚度的增加,可见光被吸收和散射的程度增加。图 3 中的透过率曲线,在可见光波段,呈现明显的波峰波谷,这是薄膜干涉的结果,同时也表明薄膜具有光滑的表面[5]。溅射功率增加,薄膜的紫外吸收边明显向长波方向移动,利用公式:

$$E_g = 1.24/\lambda$$

其中 λ 为短波截止波长(单位为 \AA), E_g 为半导体材料的禁带宽度(单位为 eV)。由上式可以得到不同溅射功率下,薄膜的禁带宽度,见表 3。由表 3 可以看出,ITO 薄膜的禁带宽度在 3.59~3.79 eV 之间。

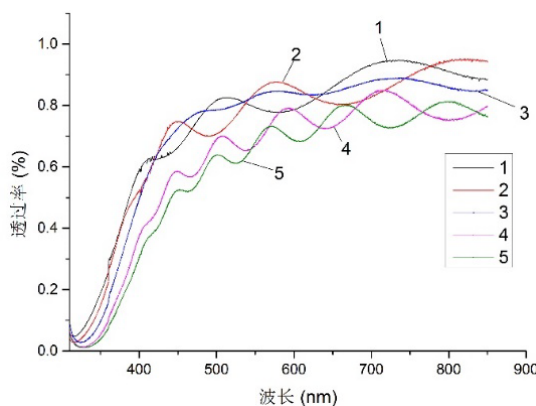


Figure 3. The ultraviolet visible transmission spectroscopy of ITO thin films

图 3. ITO 薄膜紫外-可见光透射光谱

Table 3. The energy gaps of the ITO thin films

表 3. ITO 薄膜样品的禁带宽度

样品序号	溅射功率/W	短波截止波长/nm	禁带宽度/eV
1	65	327.6	3.79
2	80	328.8	3.77
3	120	340.6	3.64
4	140	344.2	3.60
5	160	345.3	3.59

4. 结论

实验利用 In_2O_3 和 SnO_2 质量分数比为 9:1 的陶瓷靶，采用直流磁控溅射，选择溅射功率作为研究参数，沉积得到的 ITO 薄膜具有优良的光电学特性，其透过率(可见光波段)最高可达 88%。实验结果表明，随着溅射功率的增加：

- (1) ITO 薄膜膜厚增加，晶粒尺寸增大，结晶程度提高。
- (2) 随着 ITO 薄膜膜厚增加，其方阻值降低，电阻率下降。
- (3) 透过率降低，吸收峰向长波方向移动。

基金项目

北京市教育委员会共建项目专项资助。

参考文献 (References)

- [1] 吴晓飞, 郝雨林 (2013) ITO 薄膜性能应用及其磁控溅射制备技术的研究. *热加工工艺*, **2**, 88-90.
- [2] 成立顺, 孙本双, 钟景明, 等 (2008) ITO 透明导电薄膜的研究进展. *稀有金属快报*, **3**, 10-16.
- [3] 夏冬林, 杨晟, 王树林, 等 (2006) 直流磁控溅射陶瓷靶制备 ITO 薄膜及性能研究. *人工晶体学报*, **2**, 272-275.
- [4] 田民波, 李正操 (2011) 薄膜技术与薄膜材料. 清华大学出版社, 北京.
- [5] 苏伟涛, 余志明, 刘昕, 等 (2004) 压强对射频溅射氧化锌薄膜结构和性能的影响. *湖南有色金属*, **2**, 24-27.