

氧化铟锡 (ITO) 薄膜溅射生长及光电性能调控

雷沛^{1,2}, 束小文³, 刘培元³, 罗俊杰^{1,2}, 李佳明^{1,2},
郝常山^{1,2}, 纪建超^{1,2}, 张旋^{1,2}

(1.北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100095; 2.北京市先进运载系统结构透明件工程技术研究中心, 北京 100095; 3.陆军装备部驻北京地区航空军事代表室, 北京 100039)

摘要: 目的 选取影响氧化铟锡 (ITO) 薄膜生长关键的 3 种参数, 即薄膜生长的氧气流量、薄膜厚度和热处理退火, 系统研究其对 ITO 薄膜光学和电学性能的影响规律。方法 采用直流溅射法, 在氩气和氧气混合气氛中溅射陶瓷靶材制备 ITO 薄膜样品。利用真空热处理技术对所制备的 ITO 薄膜进行真空退火处理。通过表面轮廓仪测试厚度、X-射线衍射仪 (XRD) 表征结构、X-射线光电子能谱仪 (XPS) 分析元素含量、分光光度计测试透过率和四探针测试薄膜方块电阻, 分别评价薄膜厚度、光学性能和电学性能, 并对比研究热处理对薄膜结构和光电性能的影响规律。结果 电阻率随氧气流量的增加呈现出先缓慢后急剧升高的规律, 在氩气和氧气流量比为 150 : 8 时, 可得到 400 nm 厚、电阻率为 $8.0 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的 ITO 薄膜。厚度增加可降低薄膜电阻率, 氧气流量的增加可明显改善薄膜透光性。通过真空热处理可提高室温沉积 ITO 薄膜的结晶性能, 较大程度地降低电阻率。在真空热处理条件下增大薄膜厚度可降低薄膜电阻率, 氧气流量增加不利于 ITO 薄膜电阻率的降低。在氩气和氧气流量为 150 : 6 条件下制备的 ITO 薄膜, 经 500 °C 真空热处理后电阻率可达到最低值 ($2.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$)。结论 通过调控氧气流量和厚度来优化 ITO 薄膜的结构和氧空位含量, 低温下利用磁控溅射法可制备光电性能优异的 ITO 薄膜; 真空热处理可提高薄膜结晶性能, 通过氧气流量、厚度和热处理温度 3 种参数调控可获得最低电阻率的晶态 ITO 薄膜 ($2.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$), 满足科技和工程领域的需求。

关键词: 氧化铟锡薄膜; 磁控溅射法; 薄膜结构; 热处理; 光电性能

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)08-0100-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.08.008

Growth and the Tunable Optical and Electrical of Sputtered ITO Films

LEI Pei^{1,2}, SHU Xiao-wen³, LIU Pei-yuan³, LUO Jun-jie^{1,2}, LI Jia-ming^{1,2},
HAO Chang-shan^{1,2}, JI Jian-chao^{1,2}, ZHANG Xuan^{1,2}

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials Co., Ltd., Beijing 100095, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Advanced Structure Transparencies for the Modern Traffic System, Beijing 100095, China; 3. Aviation Military Representatives Office, Army Equipment Department in Beijing, Beijing 100039, China)

ABSTRACT: Sn-doped indium oxide (ITO) film, due to the both distinctively transparent and conductive properties, is one of

收稿日期: 2022-05-29; 修订日期: 2022-08-15

Received: 2022-05-29; Revised: 2022-08-15

作者简介: 雷沛 (1986—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光电功能薄膜。

Biography: LEI Pei (1986—), Male, Doctor, Research focus: functionally optical and electrical thin film.

引文格式: 雷沛, 束小文, 刘培元, 等. 氧化铟锡 (ITO) 薄膜溅射生长及光电性能调控[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 100-106.

LEI Pei, SHU Xiao-wen, LIU Pei-yuan, et al. Growth and the Tunable Optical and Electrical of Sputtered ITO Films[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 100-106.

the most widely used transparent and conductive films, which has also been universally employed in various kinds of advanced opt-electron devices. In view of the advantages including facile preparation processes, superior performance and scalability, sputtering technique has been regarded as the optimal method for ITO film fabrication. The three critical parameters, namely oxygen flow rate, thickness and annealing process, were chosen to study the effects on the structure and optical-electrical properties of ITO films. In this work, ITO films were prepared by direct-current (DC) sputtering technology with argon (Ar) and oxygen (O_2) mixed gases and ceramic ITO target. ITO films were also annealed under vacuum condition. The thickness was measured by contact profilometry (Taylor-Hobson Talystep). The film structure was detected by X-ray diffraction (XRD, Philips X'Pert). The element content was characterized by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The UV/visible spectra were obtained using a spectrophotometer (Cary 5000, Varian, USA) with a wavelength from 800 nm to 300 nm. The sheet resistance of the ITO film was measured with a four-point co-linear probe method at room temperature. Afterwards, the comparable studies of ITO films obtained in the presence and absence of annealing process were also conducted, particularly the effects on the optical and electrical properties of ITO films. The electric resistivity of as-deposited ITO film slightly increases with the rise of oxygen flow rate, and increases dramatically with continuously increased oxygen flow rate. The resistivity of ITO film with 400 nm thickness reaches $8.0 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ with the ratio of Ar : O_2 at 150 : 8. The increase of thickness promotes to the low resistivity. Larger oxygen flow rate could directly promote the transparency of the ITO films. The annealing process under vacuum condition could increase the crystallinity of ITO film deposited at room temperature, giving rise to the low resistivity. Similarly, the annealed ITO film with large thickness obtains the low resistivity, and higher oxygen flow rate could also increase the resistivity. The ITO film shows the minimum resistivity of $2.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ when the ratio of Ar : O_2 is 150 : 6 and annealing temperature fixes at 500 $^{\circ}\text{C}$ under the vacuum condition. By tuning the ways of oxygen content and thickness to optimize the structure and oxygen vacancy content of ITO film, the sputtered ITO films with superior optical and electrical properties could be obtained at room temperature. The annealing process could improve the crystallinity of ITO film. The ITO film with the minimum resistivity of $2.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ can be obtained through adjusting the three critical parameters, the crystalline ITO film with the lowest resistivity can meet the requirements from the scientific and engineering areas.

KEY WORDS: ITO film; magnetron sputtering; film microstructure; annealing process; optical and electrical properties

透明导电薄膜因具有透明和导电特性, 广泛应用于各种显示器、发光二极管、触摸屏面板、太阳能电池、电磁干扰屏蔽与红外隐身功能挡风玻璃以及建筑用低辐射率幕墙玻璃等领域^[1-4]。随着科技的发展, 对透明导电薄膜的要求越来越高, 并出现各类新型透明导电氧化物研究热潮。透明导电氧化物主要包含极薄金属层、多元氧化物、化合物/金属/化合物、碳材料以及有机透明导电材料等体系^[5-9]。其中, ITO 薄膜具备电阻率低 ($10^{-4} \Omega/\text{cm}$)、可见光透过率高 (85%@550 nm)、化学稳定性好、硬度高等优点, 成为透明导电材料中综合性能最佳、应用最广泛的薄膜材料^[10-14]。

ITO 是一种重掺杂、高简并的 N 型 Sn 掺杂 In_2O_3 半导体材料, 主要成分是 In_2O_3 (图 1a), 结构为体心立方锰铁矿结构 (也称 C 型稀土氧化物结构), 空间点群 $Ia-3(206)$, 标准晶格常数为 1.011 7 nm, 如图 1b 所示。 In_2O_3 完整的晶胞中含有 80 个原子, 其中 32 个 In^{3+} 位于 2 种非等效六配位位点上, 48 个氧原子则排布在 In^{3+} 周围的八面体中。一个 In^{3+} 与 6 个 O^{2-} 相连, O^{2-} 有 2 种排布方式: 第 1 种配位形式为 In^{3+} 位于 b 位, 周围由 6 个 O^{2-} 包围, 体对角线上排布 2 个氧空位; 第 2 种是 In^{3+} 位于 d 位, 同样是由 6 个 O^{2-} 包围, 但面对角线上排布 2 个氧空位, 如图 1c 所示^[15-16]。在 ITO 薄膜制备过程中, 半径较小的 Sn 离子 (0.071 nm)

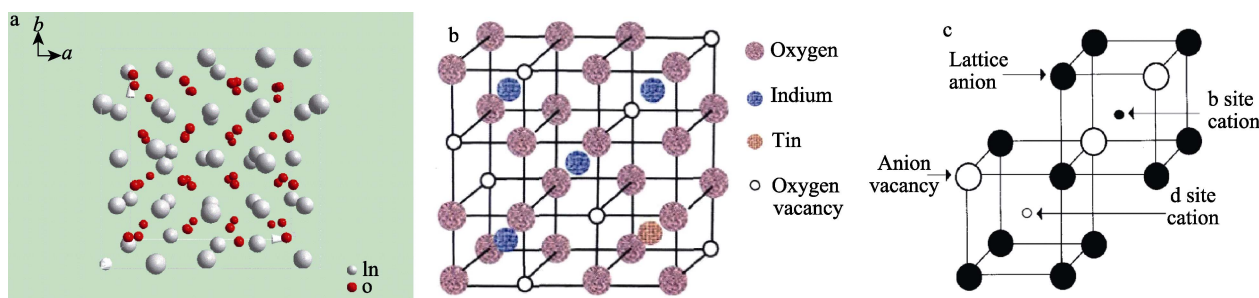


图 1 In_2O_3 晶体结构 (a), ITO 晶体 (b), 氧原子 2 种配位构型 (c)

Fig.1 Crystal structure of In_2O_3 (a); crystal structure of ITO (b); two sites of oxygen atom in ITO structure (c)

较容易替换半径较大的 In 离子 (0.081 nm) 而形成替位掺杂。Sn 对 In 原子的替位掺杂不会改变 ITO 晶体结构, 掺杂过程中 Sn^{4+} 替代 In^{3+} , 形成施主能级, 贡献 1 个电子, 同时氧空位也提供 2 个电子, 这 2 种缺陷态使得薄膜具有较高的载流子浓度, 具备半导体属性, 同时引发光学能隙变化而改变光学特性^[17]。因此, ITO 薄膜中引入缺陷的数量和种类决定了 ITO 薄膜的结构和性能。

目前制备 ITO 薄膜的方法主要有激光脉冲法、磁控溅射法等物理气相沉积方法和溶胶-凝胶法、喷雾热解法等化学气相沉积方法^[18-22]。相比其他 ITO 薄膜制备方法, 磁控溅射法具有明显的优势。磁控溅射法制备的薄膜具有致密度高、纯度高、均匀性好、沉积温度低、成膜速率快、薄膜性能优异以及可实现大面积沉积等优点, 因此在 ITO 大规模产业化过程中, 广泛采用溅射法制备 ITO 薄膜。

ITO 薄膜的光学和电学是最重要的性能, 其优劣直接影响工程应用。为此, 学者对如何获得高品质 ITO 薄膜进行了广泛研究, 得到了一些制备优良 ITO 薄膜的策略和手段^[23-26]。ITO 薄膜的微观结构和性能由制备方法以及工艺参数决定。目前文献报道了氧含量、热处理温度、功率等对电阻率和透光率的影响规律^[10,24,27-29], 调控氧含量可获得较低薄膜电阻率, 根据热处理气氛可升高或者降低薄膜电阻率。研究者大多关注单因素的影响, 且报道结果因试验方法、设备和工艺等因素不同呈现出多样性, 结果离散性较大, 且关键因素的协同影响规律以及如何多种因素叠加获得极限性能的 ITO 薄膜有待进一步探讨。通常地, 磁控溅射法制备的 ITO 薄膜受反应气体比例、膜层厚度、热处理温度等因素的影响, 各因素间既有协同又相互掣肘, 为了获得优异的 ITO 薄膜, 即较低的薄膜电阻率和较高的可见光透过率, 通过优化多种关键工艺参数并协同作用来探索实现性能最优值的途径是本文的立足点。为此, 本文选取了磁控溅射法制备 ITO 过程中 3 种关键参数, 在 K9 玻璃上不同氧气流量下制备了不同厚度的 ITO 薄膜, 研究其对低温生长 ITO 膜光电性能的影响规律, 以及后续热处理对 ITO 薄膜光电性能的调控规律。

1 试验

1.1 ITO 薄膜制备

采用直流磁控溅射技术在 K9 玻璃上制备 ITO 透明导电膜, 靶材为 ITO 陶瓷靶 (尺寸 $\phi 96 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$), In_2O_3 和 SnO_2 比例为 9:1。镀膜前, 样品分别在酒精和去离子水中超声清洗 10 min, 以除去表面油污, 而后用高压氮气吹干样品并放在样品架上。采用高纯氩气和氧气进行溅射镀膜, 氩气流量固定为 150 mL/min, 氧气流量从 6 mL/min 逐渐增加到 14 mL/min。其他

工艺参数固定不变, 靶基距为 100 mm, 功率为 150 W。根据镀膜时间来调控所需要的薄膜厚度, 薄膜厚度控制在 300~600 nm。热处理选择真空管式热处理炉进行退火处理, 炉内真空度为 $2 \times 10^{-2} \text{ Pa}$, 热处理温度为 500 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 结构表征和性能测试

ITO 薄膜的厚度采用表面轮廓仪 (KLA Tencor D 120) 进行测量。薄膜结构采用 X-射线衍射仪 (Bruker D8) 进行表征, 使用 Cu-K α 射线源, 波长为 0.154 06 nm, 电压为 40 kV, 电流为 40 mA, 扫描角度为 20° ~ 80° 。利用 X-射线光电子能谱仪 (Thermal ESCALAB 250) 进行元素含量分析, Al α 源分辨率为 0.1 eV, 本底真空为 $2 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 。薄膜透射谱采用 Agilent Carry 5000 紫外-可见光-红外分光光度计测量, 平均透过率采用上海仪电物光有限公司生产的透光/雾度仪 (WGT-S) 进行测试。薄膜方块电阻采用四探针 (德国 NAGY SD-610 型) 测试仪测试。

2 结果及分析

2.1 不同氧气流量和厚度对 ITO 薄膜电学和光学的影响

氧气流量对于制备 ITO 薄膜至关重要, 其大小决定了薄膜中氧空位的含量, 从而影响 ITO 薄膜的光学和电学性能。图 2 为 3 种不同厚度的 ITO 薄膜 (350、550、600 nm) 随着氧气流量变化对方块电阻的影响规律。从图 2 可以看出, 3 种厚度的 ITO 薄膜均呈现出相一致的规律。氧气流量较低 (6 mL/min) 时, ITO 薄膜的方块电阻较低, 随着氧气流量的增加, 方块电阻呈现出上升的趋势。对于 ITO 薄膜, 其电阻率与载流子浓度和载流子迁移率成反比, 载流子浓度由氧空位决定, 载流子迁移率则主要受结晶程度的影响^[23]。在溅射过程中, 从靶材溅射出来的粒子流在真空传输到基片过程中氧离子缺失, 通入的氧气参与反应补充了缺失的氧空位, 随着氧气含量的增加, 氧原子填充到了 In_2O_3 晶格中, 氧空位浓度逐渐变少。当氧气含量增加到 30 mL/min 时, 方块电阻达到 40 800 Ω/\square (图 2 中未列出), 氧空位位点几乎被氧原子占据, 氧空位所提供的载流子浓度急剧减小, 趋近于绝缘体。同样地, 薄膜电阻率随着氧气流量的增加, 呈现出逐渐增加的趋势^[30]。对不同氧气流量下制备的 ITO 薄膜样品表面元素百分含量利用 XPS 进行测试表征, 结果见表 1, 元素窄谱扫描图未放在文中。从表 1 中可以看出, 随着氧气流量的增加, 薄膜中氧含量逐渐增加, 而 In 和 Sn 含量逐渐减小, 氧原子填充氧空位导致氧空位浓度降低, 同时氧气流量增加导致 Sn 原子替位掺杂浓度的降低, 这 2 种因素决定了薄膜载流子浓度随着氧气流量的增加而减小。另外, 迁移率主

要受薄膜中缺陷态的影响, 增加的氧气流量减小缺陷态密度从而增加迁移率。因此, 在氧气流量较低时薄膜电阻率较低, 随着氧气流量的增大, 电阻率快速增大。此规律与文献[30]报道相一致。

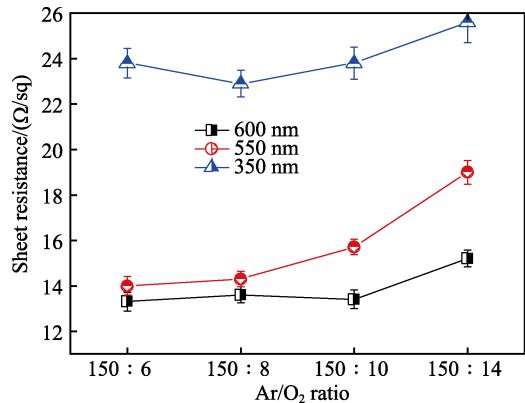


图 2 不同厚度下氧气含量对方块电阻的影响
Fig.2 The effects of different oxygen flow rates on the sheet resistance of ITO films with different thicknesses

表 1 不同氧气流量下制备 ITO 薄膜的元素百分含量
Tab.1 The element content of ITO films at different oxygen flow rates

Ar : O ₂	C 1s	O 1s	In 3d	Sn 2p
150 : 6	4.79	45.63	45.99	3.59
150 : 8	4.90	47.92	43.36	3.43
150 : 10	5.77	49.35	41.56	3.32
150 : 14	5.87	53.60	32.56	2.66

当固定氧气流量时, 不同的薄膜厚度对应于不同的薄膜电阻率, 如图 3 所示。这是由于在不同厚度下生长时, ITO 薄膜的晶体结构发生了变化, 厚度较薄时, 薄膜结晶较差, 存在较多的散射中心, 载流子迁移率较低, 导致较高的电阻率。当厚度增大时, 薄膜结晶性能得到提升^[31-33], 使得电阻率降低。厚度为 400 nm 时, 所制备 ITO 薄膜的电阻率达到 $8.0 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

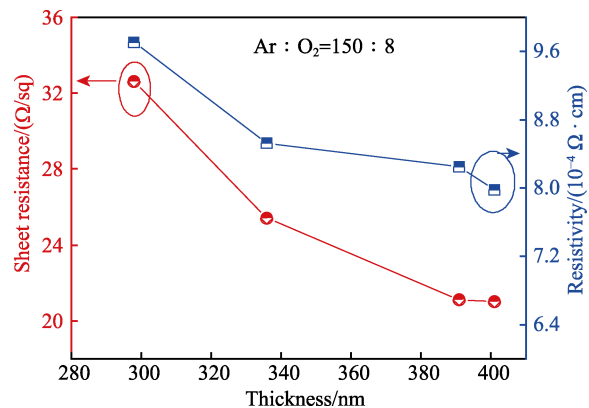


图 3 不同厚度对薄膜电阻和电阻率的影响
Fig.3 The effect of different thicknesses on the resistance and resistivity of ITO films

图 4 为氧气流量对 ITO 薄膜光学性能的影响。从图 4a 可以看出, 600 nm 厚的 ITO 薄膜的透光光谱曲线呈现出包络线特征, 随着氧气流量的增加, 透过率逐渐增加。图 4b 描述了厚度为 550~600 nm 的 ITO 薄膜在可见光波段的平均透过率, 可知厚度为 550、600 nm 的 ITO 薄膜均呈现出透过率随着氧气流量的增加逐渐升高的规律。这与金属离子的氧化程度相关。随着氧气流量的增加, 氧气分压升高, 增大了溅射出来的 In 和 Sn 粒子与氧气粒子碰撞的几率, 薄膜氧化程度较高, 缺陷减少, 透过率提高。当氧气流量为 14 mL/min 时, 厚度为 550 nm 的 ITO 薄膜的平均透光率为 80.5%。当充入氧气较少时, 低价态的钢锡氧化物不能被完全氧化, 呈棕色或黑色^[24], 透过率偏低。

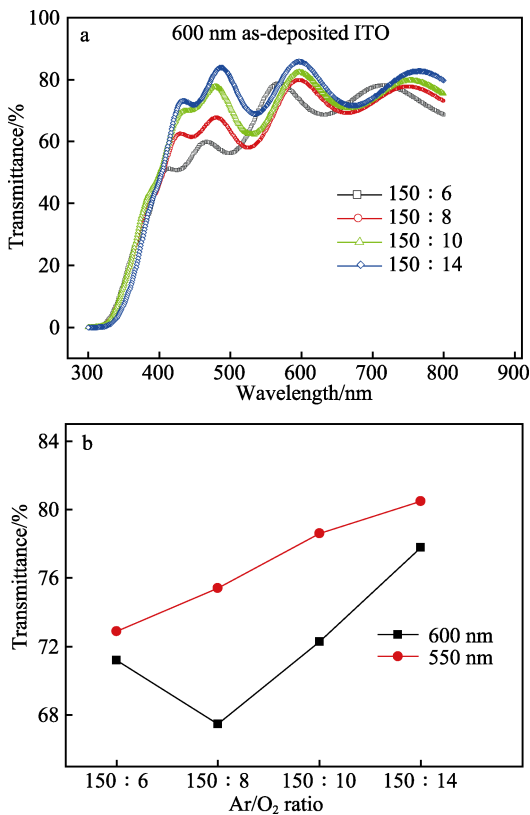


图 4 600 nm 厚的 ITO 薄膜在不同氧气流量下的透射光谱及厚度为 550、600 nm 的 ITO 薄膜在不同氧气流量下可见光平均透过率
Fig.4 The transmittance spectra of ITO film with the thickness of 600 nm at different oxygen flow rates; the average transmittance in the visible region of ITO films with the thickness of 550 nm and 600 nm at different oxygen flow rates

2.2 热处理对 ITO 薄膜结构和光电性能的影响

图 5 为不同热处理温度下 ITO 薄膜 (Ar 和 O₂ 流量比 150 : 8) 的 XRD 图谱, 与标准卡片 (PDF#65-3170) 对比, ITO 薄膜的衍射峰均为 In₂O₃ 晶体结构的衍射峰, 并无其他杂质峰, 说明 Sn 元素已经完全

融入 In_2O_3 晶格中形成了固溶体。当 ITO 在室温下生长时, 结晶性较弱, 出现了 (222) 和 (400) 衍射峰, 薄膜原子沿着 (400) 方向择优生长, 与文献[25]报道一致。随着退火温度的升高, 衍射峰强度逐渐增强, 择优结晶方向由 (400) 晶面转为 (222) 晶面。当退火温度为 500 °C 时, 沿 (222) 晶面择优生长十分明显, (400)、(622)、(440)、(211) 衍射峰也明显增强, 说明 500 °C 退火可显著增强 ITO 的结晶性, 且与未加热 ITO 相比, 晶体择优取向由 (400) 转为 (222)。这是由于加热过程中, 薄膜原子获得了更多的能量, 原子重新排列再结晶, 原子移动到能量更低的位置, 结构更加规整化, 结晶度较高且择优取向发生改变^[34-36]。

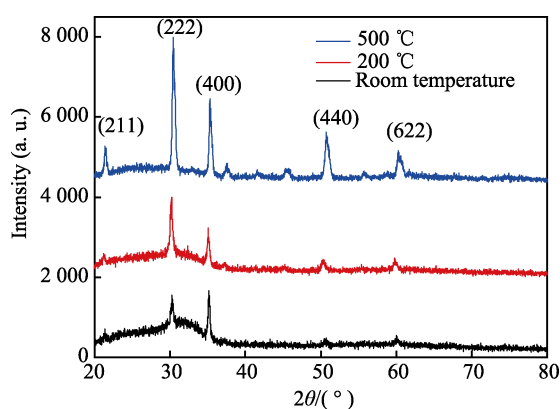


图5 ITO 薄膜不同热处理温度下的 XRD 图谱
Fig.5 XRD patterns of ITO films annealed at different temperatures

图 6 为在 515~583 nm 厚度内 ITO 薄膜的光学透过图谱, 波长为 300~800 nm。由于薄膜较厚, 光波经上下表面反射形成了明显的包络线。随着厚度的增加, 包络线波峰向长波方向移动, 这是由于厚度增加使波峰移向长波方向。厚度为 552 nm 的 ITO 薄膜的透过率达到 79.0%@550 nm。500 °C 热处理后, 薄膜

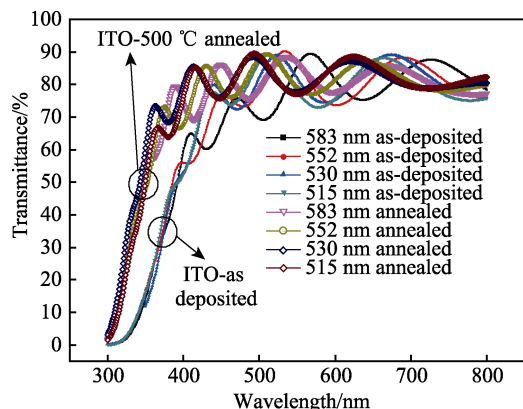


图6 热处理对不同厚度 ITO 薄膜透射曲线的影响

Fig.6 The effects of annealing process on the transparencies of ITO films with different thicknesses

的短波截止限蓝移, 光学带隙增大, 同时第 1 级和第 2 级波峰透过率明显提高, 后面几级的波峰透过率相差不大。厚度为 552 nm 的 ITO 薄膜的透过率达到 87.0%@550 nm, 相比热处理前提高了 8%, 薄膜平均透过率达到 80.6%。这是由于高温使得薄膜原子具有更高的动能, 缺陷减少, 减小了光的吸收, 提高了透光率。

图 7 为不同氧气流量下 500 °C 热处理 ITO 薄膜的方块电阻、电阻率和方块电阻下降率的变化关系。从图 7a 中可以看出, 随着氧气流量的增加, 500 °C 热处理后, 薄膜的方块电阻逐渐增加, 厚度为 334~380 nm 和 490~552 nm 时, 呈现出相同的规律, 随氧气流量的增加, 方块电阻逐渐增加。热处理后, ITO

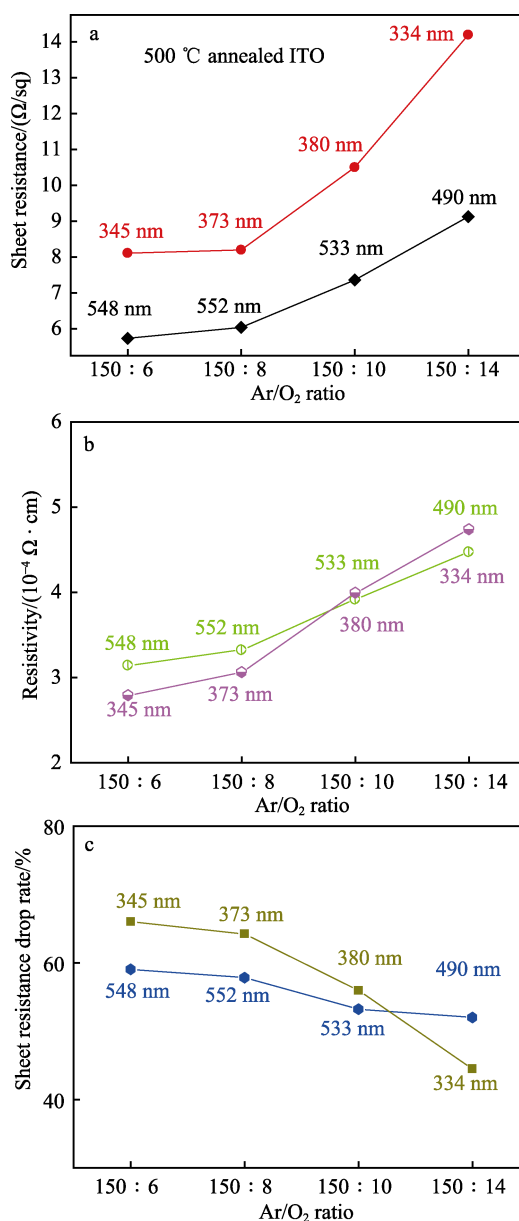


图7 不同氧气流量下制备 ITO 薄膜 500 °C 热处理后的方块电阻、电阻率、方块电阻下降率
Fig.7 Sheet resistance, resistivity, sheet resistance drop rate of ITO films with different oxygen flow rates

薄膜的方块电阻有了较大程度的下降, 电阻率在流量比为 150 : 6 时达到 $2.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ (345 nm) 和 $3.1 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ (548 nm), 对应于电阻下降率分别为 66% 和 59%。这是由于热处理后薄膜晶体尺寸增加, 晶界减少, 晶界散射对于迁移率影响减弱, 降低了电阻率^[26]。随着氧气流量的增加, 等量厚度下 ITO 薄膜的电阻率升高且电阻下降率逐渐下降, 这是由于氧空位减小导致载流子浓度降低。与此同时, 不同厚度呈现出不同的热处理特性, 厚度对 ITO 电阻率的影响与氧含量有关。氧气流量小于 10 mL/min 时, 较厚的 ITO 薄膜热处理后具有较高的电阻率, 电阻下降率也较低。在富氧阶段, 较薄的 ITO 膜则呈现出较高的电阻率和较低的下降率。这是由于结晶度和氧空位的变化导致。

图 8 为固定氧气流量下, 不同厚度 ITO 薄膜热处理后方块电阻、电阻率以及方块电阻下降率的关系。可以看出, 随着厚度的增加, 热处理后 ITO 薄膜的方块电阻逐渐减小; 同时, 电阻率也呈现一致的规律。厚度较小时, ITO 薄膜热处理后的电阻下降率较低, 随着厚度的增加, 方块电阻下降率逐渐增大。这是由于厚度增大, 导致薄膜单位氧空位浓度增多, 使得薄膜具有更高的电阻下降率和更低的电阻率。

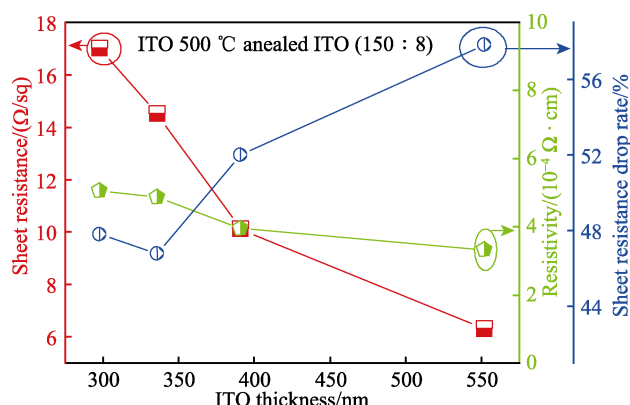


图 8 不同 ITO 薄膜厚度在 500 °C 热处理后电阻、电阻率和方块电阻下降率的影响

Fig.8 The effect of ITO thickness on sheet resistance, resistivity and sheet resistance drop rate of ITO films annealed at 500 °C

3 结论

1) 磁控溅射法制备的 ITO 薄膜的性能高度依赖于氧气流量、厚度和热处理这 3 种工艺参数, 电阻率随着氧气含量的增加先缓慢增加后急剧升高; 厚度增加, 薄膜电阻率降低。在氩氧流量比为 150 : 8 时, 可得到 400 nm 厚、电阻率为 $8.0 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的 ITO 薄膜。

2) 氧气流量的增加对于低温下制备 ITO 薄膜透光度的提高具有直接促进作用。

3) 真空热处理退火可提高低温沉积 ITO 薄膜的结晶性能, 较大程度地降低电阻率。热处理退火条件

下, 厚度对电阻率的影响规律与氧含量相关。氧气含量增加不利于 ITO 薄膜电阻率降低, 当氩氧流量比为 150 : 6 时, 500 °C 退火热处理, ITO 薄膜的电阻率达到最低值 ($2.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$), 平均透光率为 80%, 满足科学和工业领域对透明导电膜光电性能的要求。

参考文献:

- [1] ZHU Hua, ZHANG Hai, ZHANG Tian-hao, et al. Optical and Electrical Properties of ITO Film on Flexible Fluorophlogopite Substrate[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(12): 16980-16985.
- [2] 丁景兵, 蔡长龙, 邵雨. ITO 透明导电薄膜的射频磁控溅射制备[J]. *西安工业大学学报*, 2018, 38(3): 226-231. DING Jing-bing, CAI Chang-long, SHAO Yu. Preparation of ITO Transparent Conductive Films by Radio Frequency Magnetron Sputtering[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2018, 38(3): 226-231.
- [3] 张勇, 彭继, 赵松, 等. ITO 薄膜方块电阻值在低温下随温度的变化关系[J]. *光电子技术*, 2017, 37(3): 186-190, 199. ZHANG Yong, PENG Ji, ZHAO Song, et al. The Relationship between the ITO Film Square Resistance and Temperature at Low Temperature Circumstances[J]. *Optoelectronic Technology*, 2017, 37(3): 186-190, 199.
- [4] HACINI A, ALI A H, ADNAN N N. Optimization of ITO Thin Film Properties as a Function of Deposition Time Using the Swanepoel Method[J]. *Optical Materials*, 2021, 120: 111411.
- [5] 王慧, 刘静. 透明导电薄膜概述[J]. *陶瓷*, 2007(12): 12-13, 17. WANG Hui, LIU Jing. Introduction of the Transparent Conductive Oxide Film[J]. *Ceramics*, 2007(12): 12-13, 17.
- [6] LEE D, PAENG D, PARK H K, et al. Vacuum-Free, Maskless Patterning of Ni Electrodes by Laser Reductive Sintering of NiO Nanoparticle Ink and Its Application to Transparent Conductors[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(10): 9807-9814.
- [7] YIN Zhi-qin, LIU Qing-quan, CUI Zhuang-zhuang, et al. High-Performance Transparent Conductive Film by Using Ultra-Thin Metal Grids[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2022, 37(3): 035016.
- [8] LI Hui, GAO Ying-jie, YUAN Shuo-huang, et al. Improvement in the Figure of Merit of ITO-Metal-ITO Sandwiched Films on Poly Substrate by High-Power Impulse Magnetron Sputtering[J]. *Coatings*, 2021, 11(2): 144.
- [9] LI D, LAI W Y, ZHANG Y Z, et al. Printable Transparent Conductive Films for Flexible Electronics[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(10): 2183.
- [10] ZHANG Hai, ZHU Hua, ZHANG Tian-hao, et al. Effect of Sputtering Pressure on the Optical and Electrical Properties of ITO Film on Fluorophlogopite Substrate[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 559: 149968.
- [11] MINAMI T. Present Status of Transparent Conducting Oxide Thin-Film Development for Indium-Tin-Oxide (ITO) Substitutes[J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(17): 5822-

- 5828.
- [12] 杨坤, 胡志强, 王海权, 等. 不同基底的ITO薄膜制备及其光电性能[J]. 大连工业大学学报, 2014, 33(2): 135-138.
YANG Kun, HU Zhi-qiang, WANG Hai-quan, et al. Preparation and Photoelectric Properties of ITO Thin Films Deposited on Different Substrates[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2014, 33(2): 135-138.
- [13] 韩钰杰, 吴云龙, 郭世昌, 等. 低温生长 ITO 薄膜的厚度与电阻和透光度的关系研究[J]. 硅酸盐学报, 2017(3): 260-262.
HAN Yu-jie, WU Yun-long, GUO Shi-chang, et al. Study on the Relationship between Thickness and Resistance or Light Transmittance of Low Temperature Growth ITO Thin Films[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017(3): 260-262.
- [14] 肖和平, 王宇, 郭冠军. 制备工艺对 ITO 薄膜的光电特性影响研究[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(5): 85-90.
XIAO He-ping, WANG Yu, GUO Guan-jun. Optical and Electrical Properties of ITO Films by Process[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2017, 15(5): 85-90.
- [15] GONZÁLEZ G B, COHEN J B, HWANG J H, et al. Neutron Diffraction Study on the Defect Structure of Indium-Tin-Oxide[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(5): 2550-2555.
- [16] MAREZIO M. Refinement of the Crystal Structure of In_2O_3 at Two Wavelengths[J]. Acta Crystallographica, 1966, 20(6): 723-728.
- [17] COUTAL C, AZÉMA A, ROUSTAN J C. Fabrication and Characterization of ITO Thin Films Deposited by Excimer Laser Evaporation[J]. Thin Solid Films, 1996, 288(1-2): 248-253.
- [18] HOLMELUND E, THESTRUP B, SCHOU J, et al. Deposition and Characterization of ITO Films Produced by Laser Ablation at 355 nm[J]. Applied Physics A, 2002, 74(2): 147-152.
- [19] CHIANG J L, LI Shui-wen, YADLAPALLI B K, et al. Deposition of High-Transmittance ITO Thin Films on Polycarbonate Substrates for Capacitive-Touch Applications[J]. Vacuum, 2021, 186: 110046.
- [20] KIM H T, JUNG S K, LEE S Y. Properties of ITO Films Deposited on Paper Sheets Using a Low-Frequency (60 Hz) DC-Pulsed Magnetron Sputtering Method[J]. Vacuum, 2021, 187: 110056.
- [21] KÖRÖSI L, PAPP S, BEKE S, et al. Highly Transparent ITO Thin Films on Photosensitive Glass: Sol-Gel Synthesis, Structure, Morphology and Optical Properties[J]. Applied Physics A, 2012, 107(2): 385-392.
- [22] ROZATI S M, GANJ T. Transparent Conductive Sn-Doped Indium Oxide Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis Technique[J]. Renewable Energy, 2004, 29(10): 1671-1676.
- [23] BUCHANAN M, WEBB J B, WILLIAMS D F. Preparation of Conducting and Transparent Thin Films of Tin-Doped Indium Oxide by Magnetron Sputtering[J]. Applied Physics Letters, 1980, 37(2): 213-215.
- [24] HU Ya-lan, DIAO Xun-gang, WANG Cong, et al. Effects of Heat Treatment on Properties of ITO Films Prepared by Rf Magnetron Sputtering[J]. Vacuum, 2004, 75(2): 183-188.
- [25] 王昆仑, 辛艳青. 脉冲偏压对磁控溅射制备 ITO 薄膜性能的影响[J]. 真空, 2018, 55(2): 30-33.
WANG Kun-lun, XIN Yan-qing. Effects of Pulsed Bias on ITO Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering[J]. Vacuum, 2018, 55(2): 30-33.
- [26] 吕博凡, 武永梅. 中红外透明导电 ITO 薄膜的制备[J]. 物联网技术, 2017, 7(1): 48-51.
LYU Bo-fan, WU Yong-mei. Preparation of Mid-Infrared Transparent Conductive ITO Film[J]. Internet of Things Technologies, 2017, 7(1): 48-51.
- [27] MIENTUS R, ELLMER K. Reactive Magnetron Sputtering of Tin-Doped Indium Oxide (ITO): Influence of Argon Pressure and Plasma Excitation Mode[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 142-144: 748-754.
- [28] WU Wen-fa, CHIOU B S, HSIEH S T. Effect of Sputtering Power on the Structural and Optical Properties of RF Magnetron Sputtered ITO Films[J]. Semiconductor Science and Technology, 1994, 9(6): 1242-1249.
- [29] AMALATHAS A P, ALKAISI M M. Effects of Film Thickness and Sputtering Power on Properties of ITO Thin Films Deposited by RF Magnetron Sputtering without Oxygen[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2016, 27(10): 11064-11071.
- [30] LEI Pei, CHEN Xiao-ting, YAN Yue, et al. Transparent and Conductive IZO Films: Oxygen and Discharge Voltage Controlled Sputtering Growth and Properties[J]. Vacuum, 2022, 195: 110645.
- [31] KIM H, HORWITZ J S, KUSHTO G, et al. Effect of Film Thickness on the Properties of Indium Tin Oxide Thin Films[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88(10): 6021-6025.
- [32] SADAOKA Y, JONES T A, GÖPEL W, et al. Effect of NO_2 in Air on the Electrical Conductance of In_2O_3 Films with and without Added ZnO Prepared by R.F.[J]. Journal of Materials Science, 1990, 25(5): 2632-2636.
- [33] BERTRAN E, MORENZA J L, ESTEVE J, et al. Indium Thin Films on Metal-Coated Substrates[J]. Thin Solid Films, 1985, 129(1-2): 103-109.
- [34] GONÇALVES G, ELANGOVA E, BARQUINHA P, et al. Influence of Post-Annealing Temperature on the Properties Exhibited by ITO, IZO and GZO Thin Films[J]. Thin Solid Films, 2007, 515(24): 8562-8566.
- [35] KERKACHE L, LAYADI A, DOGHECHE E, et al. Physical Properties of RF Sputtered ITO Thin Films and Annealing Effect[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(1): 184-189.
- [36] PHAM D P, PHAN B T, HOANG V D, et al. Control of Preferred (222) Crystalline Orientation of Sputtered Indium Tin Oxide Thin Films[J]. Thin Solid Films, 2014, 570: 16-19.

责任编辑：万长清