

高透明低发射率 ITO 薄膜的制备 及其光电性能研究

李晓晖, 宋凯强, 丛大龙, 张敏, 孙彩云, 吴护林, 李忠盛

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研究磁控溅射工艺对 ITO 薄膜光电性能的影响, 为制备高性能 ITO 薄膜提供数据和理论支撑。**方法** 采用磁控溅射在 PET 基材上制备 ITO 薄膜, 利用扫描电镜、X 射线衍射仪、分光光度计、四探针、红外发射率测定仪、Hall 效应测试系统等, 分析工艺参数对 ITO 薄膜光电性能的影响。**结果** 随着氧气流量的增加, ITO 薄膜在可见光区的透率先增加, 然后变缓, 薄膜方块电阻先降低后升高; 随着工作气压的增加, ITO 薄膜的可见光透过率增加, 薄膜方块电阻先下降后上升, 电阻率先变小再增大, 载流子浓度先增大后减小, 红外发射率先减小后增大, 晶体结构逐渐由晶态转变为非晶态; 随着氩氧比的降低, 薄膜红外发射率先降低, 然后缓慢升高; 随溅射时间的增加, 薄膜的厚度逐渐增大, 方块电阻、红外发射率和可见光透过率迅速下降, 晶体结构逐渐由非晶结构转变为晶体结构。综合对比研究发现, 当氧气流量为 0.6 mL/min、工作气压为 0.4 Pa、氩氧比为 19.8 : 0.2、溅射时间为 80 min 时, 可获得综合性能优异的 ITO 薄膜, 其可见光透过率大于 80%, 在 8~14 μm 红外波段的辐射率小于 0.2。**结论** 磁控溅射工艺参数是决定薄膜综合质量的重要因素, 通过严格控制工艺参数, 可获得透明性高、发射率低的 ITO 薄膜。

关键词: 磁控溅射; ITO 薄膜; 透过率; 方块电阻; 辐射率

中图分类号: O484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)07-0126-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.07.016

Preparation and Photoelectric Properties of ITO Thin Films with High Transparency and Low Emissivity

LI Xiao-hui, SONG Kai-qiang, CONG Da-long, ZHANG Min, SUN Cai-yun, WU Hu-lin, LI Zhong-sheng

(Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of magnetron sputtering technology on the photoelectric properties of ITO thin films, so as to provide data and theoretical support for the preparation of high-performance ITO thin films. The ITO thin film was prepared by magnetron sputtering on PET substrate, and the effects of process parameters on the photoelectric properties of ITO thin film were analyzed by scanning electron microscope, X-ray diffractometer, spectrophotometer, four-

收稿日期: 2020-02-26; 修订日期: 2020-07-02

Received: 2020-02-26; Revised: 2020-07-02

作者简介: 李晓晖 (1971—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为特种功能复合材料及表面工程。

Biography: LI Xiao-hui (1971—), Female, Senior engineer, Research focus: special functional composite materials and surface engineering.

通讯作者: 李忠盛 (1980—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为特种功能复合材料及表面工程。邮箱: zhongshli@163.com

Corresponding author: LI Zhong-sheng (1980—), Male, Doctor, Professorate senior engineer, Research focus: special functional composite materials and surface engineering. E-mail: zhongshli@163.com

引文格式: 李晓晖, 宋凯强, 丛大龙, 等. 高透明低发射率 ITO 薄膜的制备及其光电性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 126-132.

LI Xiao-hui, SONG Kai-qiang, CONG Da-long, et al. Preparation and photoelectric properties of ITO thin films with high transparency and low emissivity[J]. Surface technology, 2020, 49(7): 126-132.

probe, infrared emittance meter, Hall effect test system, etc. With the increase of oxygen flow, the transmittance of ITO thin film firstly increased and then slowed down in visible light region, and the block resistance of the thin film firstly decreased and then increased. With the increase of working pressure, the visible light transmittance of ITO thin film increased, the block resistance firstly decreased and then increased, the resistance firstly decreased and then increased, the carrier concentration firstly increased and then decreased, the infrared emissivity firstly decreased and then increased, and the crystal structure gradually changed from crystal state to amorphous state. With the decrease of the argon-oxygen ratio, the infrared emissivity of the thin film decreased firstly and then increased slowly. With the increase of sputtering time, the thickness of the thin film increased gradually, the block resistance, infrared emissivity and visible light transmittance decreased rapidly, and the crystal structure gradually changed from amorphous structure to crystal structure. From the comprehensive comparative study, when the oxygen flow rate was 0.6 mL/min, the working pressure was 0.4 Pa, the argon-oxygen ratio was 19.8 : 0.2, and the sputtering time was 80 min, the ITO thin film with excellent comprehensive performance could be obtained, with the visible light transmittance greater than 80% and the emissivity less than 0.2 in the infrared band of 8~14 μm . Magnetron sputtering process parameters are important factors to determine the comprehensive quality of thin films. By strictly controlling the process parameters, ITO thin films with high transparency and low emissivity can be obtained.

KEY WORDS: magnetron sputtering; ITO thin film; transmittance; square resistance; emissivity

掺锡氧化铟（Indium Tin Oxide, ITO）薄膜是一种典型的透明导电氧化物材料，其在可见光区的透过率可达 85%以上，红外反射率可达 80%以上，同时具有硬度高、耐磨性好、理化性能稳定、环境适应性优异等特点，在光电器件、太阳能电池、平板液晶显示、透明电磁屏蔽、火车飞机玻璃等方面具有广泛应用^[1-4]。ITO 薄膜的制备工艺较多，包括磁控溅射法^[5-6]、脉冲激光沉积法^[7]、真空蒸发沉积法^[8]、喷雾热解法^[9]、化学气相沉积法^[10]、溶胶-凝胶法^[11]等。相比之下，磁控溅射法制备的 ITO 薄膜厚度均匀、致密度高、纯度高、结合力牢，并且该工艺沉积速率高，重复性好，可在大面积衬底上均匀成膜，是目前技术成熟度最高、应用最广泛的 ITO 薄膜制备方法^[12-14]。但是，采用磁控溅射制备 ITO 薄膜时，其工艺参数较多，要想获得综合性能优异的 ITO 薄膜，需要严格控制各工艺参数，其技术难度大，有待进一步研究。

本文重点针对特种装备观察窗口的透明玻璃对高透明、低发射率功能薄膜的迫切需求，采用磁控溅射工艺在聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）基材表面制备 ITO 薄膜，拟通过优化氧气流量、工作气压、氩氧比以及溅射时间等工艺参数，获得具有高透明、低发射率的 ITO 薄膜。

1 试验

1.1 样品制备

采用 JPD 型多靶磁控溅射设备在 PET 基材表面制备 ITO 薄膜。为提高薄膜的结合力，在溅射前对 PET 基材进行前处理。将 PET 基材浸渍于乙醇溶液中 2 h，去除 PET 表面的污渍和油污，然后取出用酒精棉擦拭干净，随后分别置于丙酮溶液、乙醇溶液、

去离子水中超声清洗 30 min，超声结束后取出吹干。此外，为进一步确保 ITO 薄膜与 PET 之间的结合力，在溅射前将基材用考夫曼离子枪轰击 30 min，以去除 PET 表面油垢等一些细小颗粒，并抽真空至 6×10^{-4} Pa，以达到磁控溅射制备 ITO 的工作环境。为实现 ITO 薄膜的均匀沉积，并降低制备过程中的溅射温度，本文采用对靶进行薄膜沉积，其中对靶间距为 12 cm。在溅射过程中，通过调节氧气流量、工作气压、氩氧比以及溅射时间等参数来优化 ITO 薄膜的性能。

1.2 样品表征与测试

采用 U-4100 型分光光度计测试薄膜的透过率，采用 Zeta-20 型光学表面轮廓仪测试薄膜的厚度，采用 SZ-82 型四探针测试薄膜的方块电阻，采用红外发射率测试仪测试薄膜的红外发射率，采用 D8 DISCOVER 型 XRD 检测薄膜的结晶状态，采用 Nanometric HL5500PC 型 Hall 效应测试系统测试薄膜的电阻率和载流子浓度，采用 Quant400 型 SEM 观察薄膜的显微组织。

2 结果与分析

2.1 氧气流量对 ITO 薄膜光电特性的影响

通过调节不同的氧气流量研究 ITO 薄膜的光电性能。制备过程中具体试验参数设定为：工作气压 0.4 Pa，靶基距 5 cm，溅射时间 50 min，溅射功率 200 W，Ar 流量 20 mL/min，O₂ 流量如表 1 所示。

表 1 溅射氧气流量
Tab.1 Oxygen flow for magnetron sputtering

Number of samples	1#	2#	3#	4#	5#
O ₂ /(mL·min ⁻¹)	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7

图1所示为不同氧气流量下制备的ITO薄膜的光学性能。结果表明,随着氧气流量的增加,ITO薄膜在可见光区的透过率增加,但当氧气流量为0.6 mL/min时,ITO薄膜透过率增加量相对趋缓。分析原因,是由于随着氧气流量的增加,部分氧气参与磁控溅射反应过程中,阻止了Sn还原反应的发生,同时,单位时间内薄膜的沉积速率降低,厚度减小,使得可见光透过率增加^[15]。

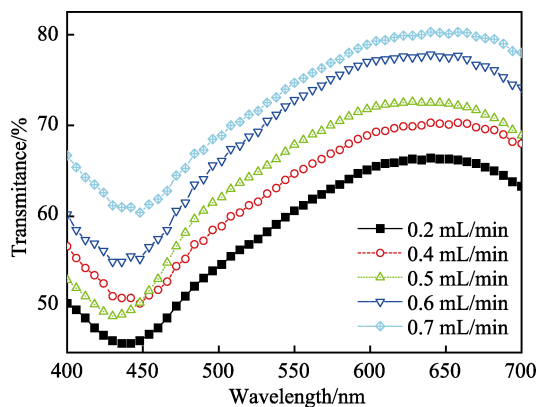


图1 ITO薄膜可见光透过率随氧气流量的变化

Fig.1 ITO thin film visible light transparency vs. oxygen flow

表2所示为ITO薄膜样品的方块电阻和红外发射率。结果表明,随氧气流量的增加,薄膜方块电阻先降低,氧气流量增至0.6 mL/min时,制备的ITO薄膜方块电阻最小;随着氧气流量的继续增加,ITO薄膜的方块电阻变大。造成这种现象的主要原因是,随氧气流量的增加,薄膜内部氧空位浓度降低,杂质散射现象得到有效抑制,薄膜电阻减小,红外辐射率变小;随氧气流量的继续增加,薄膜中氧空位急剧减少,导致薄膜中的自由电子减少,方块电阻变大,红外辐射率增大^[16-17]。经过研究氧气流量对ITO薄膜光电性能的影响,综合考虑,初步确定氧气流量为0.6 mL/min。

表2 方块电阻和红外发射率随氧气流量的变化

Tab.2 Block resistance and emissivity vs. oxygen flow

Oxygen flow/(mL·min ⁻¹)	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7
Square resistance/($\Omega \cdot \square^{-1}$)	35	25	20	15	28
Emissivity (8~14 μm)	0.35	0.29	0.28	0.25	0.3

2.2 工作气压对ITO薄膜光电特性的影响

在ITO溅射过程中,如果工作气压压强不够,会导致离子体浓度较低,使溅射效率低下,成膜速度较慢;但工作气压过高,又会导致工作气体浓度过高,电场产生的氩离子会相互碰撞,对于靶材表面的轰击效率反而变得较低,同时溅射出来的靶材原子也会因为与氩离子发生碰撞,导致动能降低,使成膜质量变差^[18]。

综上,设定主要工艺参数:1)氩气、氧气流量分别为20 mL/min和0.6 mL/min;2)靶基距为5 cm;

3)溅射时间为50 min;4)溅射功率为200 W。通过调整工作气压(见表3)研究ITO薄膜的光电性能。

表3 试验工艺参数

Tab.3 Experimental process parameters

Number of samples	1#	2#	3#	4#	5#
Working air pressure/Pa	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7

ITO薄膜在可见光区的透光率随工作气压的变化如图2所示。结果显示,随工作气压的增加,ITO薄膜的可见光透明性增加。主要是由于在溅射过程中,氩离子的散射作用和对溅射原子的阻碍作用所致。氩离子与靶材原子发生碰撞,致使单位时间内沉积到基材上的ITO原子减少,薄膜厚度减小,透过率增加。

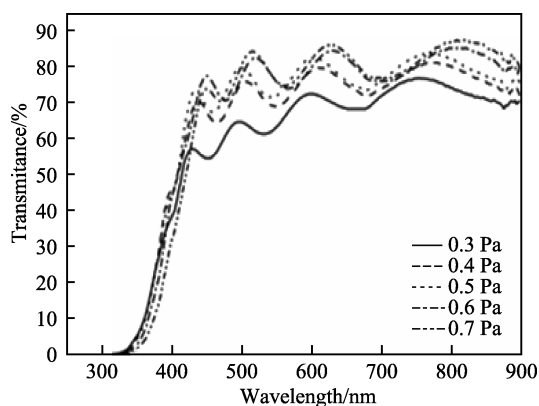


图2 工作气压对ITO薄膜透光率的影响

Fig.2 Influence of magnetron sputtering pressure on ITO thin film transparency

方块电阻检测结果(表4)显示,随着工作气压的升高,薄膜方块电阻先下降后上升。可以推测,工作气压对于薄膜导电性能存在一个临界值。当气压小于临界值时,体系中等离子浓度不足,影响溅射效率,ITO电阻较大;气压大于临界值时,体系中等离子体浓度较大,造成离子间相互碰撞严重,导致薄膜内部缺陷增多,电阻变大。

表4 工作气压对薄膜方块电阻和发射率的影响

Tab.4 Sputtering pressure vs. block resistance and emissivity

Working air pressure/Pa	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Square resistance/($\Omega \cdot \square^{-1}$)	18	15	20	26	38
Emissivity (8~14 μm)	0.27	0.25	0.28	0.29	0.36

ITO薄膜的结晶状态如图3所示。结果表明,随着工作气压的增加,ITO薄膜由晶态转变为非晶结构,进一步说明了随工作气压升高,溅射粒子由于体系等离子的阻碍,动能减小,到达基材的原子数量减少,导致ITO薄膜材料的结晶度下降。

不同工作气压制备的ITO薄膜在8~14 μm 的红外发射率如图4所示。结果表明,工作气压对ITO薄膜的红外发射率影响较大,随着工作气压的增加,薄

膜发射率先减小后增大。当工作气压为 0.4 Pa 时, 发射率为 0.25, 达到最小值; 当工作气压大于 0.5 Pa 时, 薄膜的红外发射率上升幅度变大; 当工作气压为 0.7 Pa 时, 薄膜的发射率达到 0.36。此外, ITO 薄膜的红外发射率与薄膜方块电阻的关联性也较强, 随着方块电阻增大, 薄膜的红外发射率也升高。

为了解薄膜发射率的变化规律, 研究了不同工作气压下 ITO 薄膜的 Hall 效应, 结果如图 5 所示。ITO

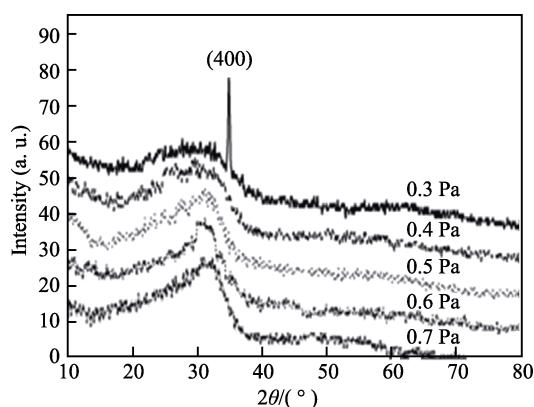


图 3 不同工作气压下的薄膜 XRD 检测结果

Fig.3 XRD test result of thin film under different sputtering pressure

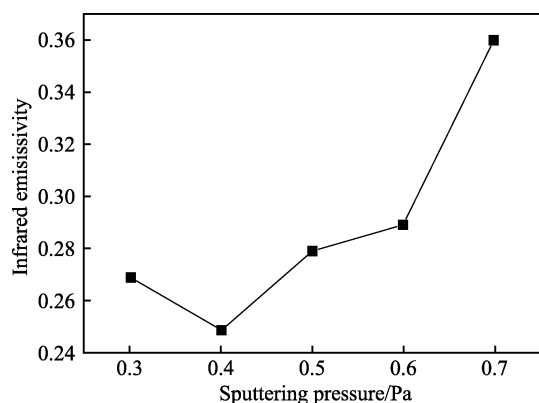


图 4 工作气压对薄膜红外发射率的影响

Fig.4 Influence of sputtering pressure on IR emissivity

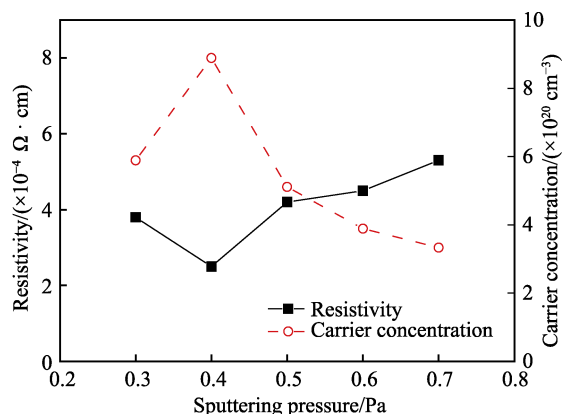


图 5 工作气压对 ITO 薄膜导电性能的影响

Fig.5 Influence of sputtering pressure on conductivity of ITO thin film

薄膜电阻率、载流子浓度检测结果显示, 随着工作气压的升高, 薄膜电阻率先变小再增大, 载流子浓度先增大后减小。当工作气压为 0.4 Pa 时, ITO 薄膜的电阻率和载流子浓度分别达到最小值和最大值。检测结果充分说明, 薄膜导电性能与红外发射率具有密切关系。

综合考虑 ITO 薄膜的可见光透过率和在 8~14 μm 红外波段的发射率, 确定薄膜的工作气压为 0.4 Pa。

2.3 氩氧比对 ITO 薄膜光电特性的影响

对比研究了薄膜发射率与氩氧比的关系, 如图 6 所示。结果显示, 随着氩氧比的降低, 薄膜红外发射率先降低, 然后缓慢升高。该变化趋势与方块电阻的变化相近似。对于 ITO 薄膜而言, 低红外发射率意味着红外高反射。在近红外谱区, 根据 Drude 理论^[19], 较高的载流子浓度对应有较强的红外吸收, 当入射电磁波的角频率接近材料等离子振荡频率 ω_p 时, 入射光子与自由载流子将发生共振, 产生吸收峰, 反射率将发生突变, 趋于零。当入射光的波长 (可见光) 小于 λ_p , 即频率大于 ω_p 时, 由于电场变化太快, 等离子振荡跟不上相应电场的变化, 因此 ITO 薄膜在可见光波段内出现了高透射现象; 当入射波长 (红外光) 大于 λ_p , 即频率小于 ω_p 时, 由于相应的电场变化较慢, 等离子振荡对其电场具有一定的响应, 从而使得 ITO 薄膜在红外区出现了高反射现象。

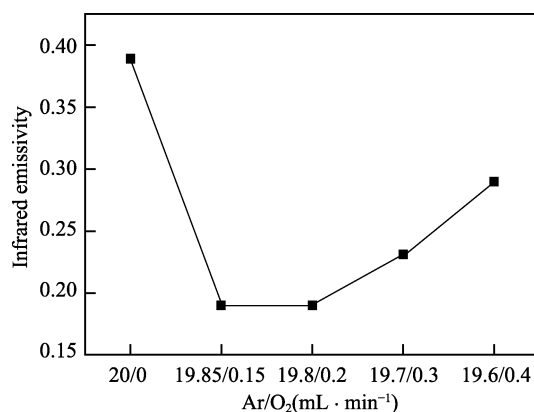


图 6 氩氧比对薄膜红外发射率的影响

Fig.6 Influence of argon oxygen ratio on IR emissivity of thin film

综合考虑薄膜的可见光透光率、方块电阻、电阻率、载流子浓度以及薄膜红外发射率等因素, 在固定其他溅射工艺参数, 仅改变氩氧比的条件下, 得到的最佳溅射氩氧比为 19.8 : 0.2 (mL/min)。

2.4 溅射时间对 ITO 薄膜光电特性的影响

溅射时间主要决定薄膜的沉积厚度, 薄膜厚度对其可见光透过率和导电性能有直接影响^[20], 因此有必要研究溅射时间对薄膜光电特性的影响。

设定主要工艺参数: 1) 氩气、氧气流量分别为 20 mL/min 和 0.6 mL/min; 2) 靶基距 5 cm; 3) 工作气压 0.4 Pa; 4) 溅射功率 200 W。通过调整溅射时间(表 5)研究 ITO 薄膜的光电性能。

表 5 实验工艺参数
Tab.5 Experimental process parameters

Number of samples	1#	2#	3#	4#	5#
Sputtering time/min	30	50	70	80	90

随溅射时间的延长,沉积到基材上的 ITO 原子越来越多,薄膜会越来越厚,如图 7 所示。同时,随溅射时间增加,ITO 薄膜的组织结构更加完整、密集,表面连续性较好,载流子浓度和迁移率也随之增高,方块电阻迅速下降^[21],如表 6 所示。

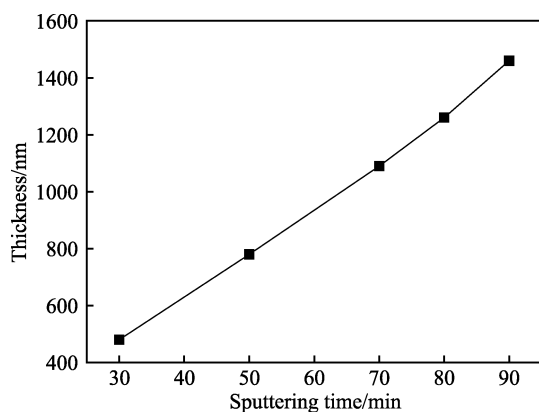


图 7 溅射时间对薄膜厚度的影响
Fig.7 Sputtering time vs. film thickness

表 6 薄膜方块电阻、发射率随溅射时间的变化
Tab.6 Change of square resistance and IR emissivity with sputtering time

Sputtering time/min	30	50	70	80	90
Square resistance/ $(\Omega \cdot \square^{-1})$	28.4	15	10	9.5	9
Emissivity (8~14 μm)	0.3	0.25	0.2	0.19	0.18

研究了不同溅射时间制备的 ITO 薄膜的可见光区透过性,如图 8 所示。可以看到,随着溅射时间的增加,由于可见光和界面散射增强作用,薄膜的可见光透过率明显下降。当溅射时间为 30 min 时,透光率约为 85%左右;当溅射时间为 90 min 时,样品平均透光率仅有 76%左右。这主要是由于随溅射时间的延长,ITO 薄膜有效厚度增加,使得可见光透过率降低^[22-23]。

为研究 ITO 薄膜导电性能的变化原理,检测了不同溅射时间下制备的 ITO 薄膜的晶型结构以及微观形貌,如图 9 和图 10 所示。通过 XRD 图(图 9)可

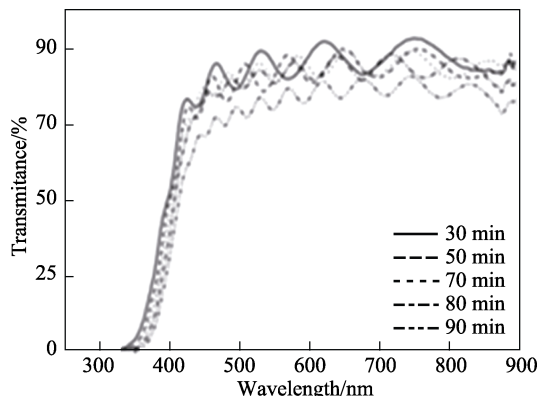


图 8 不同溅射时间下 ITO 薄膜的透光率
Fig.8 ITO thin film transparency for different sputtering time

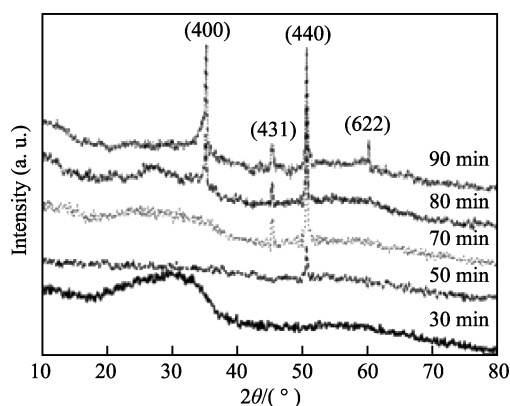


图 9 不同溅射时间下 ITO 薄膜的 XRD 图谱
Fig.9 XRD image of ITO thin film for different sputtering time

以看到,随着溅射时间的增加,ITO 薄膜逐渐从非晶结构转变为晶体结构,薄膜的结晶度变好,晶粒取向发生变化,即原子的有序排列发生变化,导致薄膜对光的散射发生改变,即在可见光区的透过率发生变化。同时,随溅射时间增加,杂质散射现象大幅减少,故而载流子迁移率升高,导电性能提高,红外发射率降低。微观形貌检测结果(图 10)表明,随着溅射时间的增加,薄膜晶粒依次呈现增大的趋势,较大的晶粒带来较少的晶界散射,有效提高了 ITO 薄膜材料的导电性能^[24-25]。

红外发射率检测结果(图 11)表明,在 8~14 μm 波段内,随着溅射时间的增加,ITO 薄膜载流子浓度增加,结晶度提高,晶粒取向更加规则,杂质散射现象减少,致使薄膜的方块电阻变小,导电性能提高,红外发射率降低。特别地,当溅射时间大于 70 min 时,红外发射率小于 0.2。

综合考虑 ITO 薄膜的可见光透过性、红外波段低辐射性以及材料制备的经济性,确定薄膜溅射时间为 80 min。

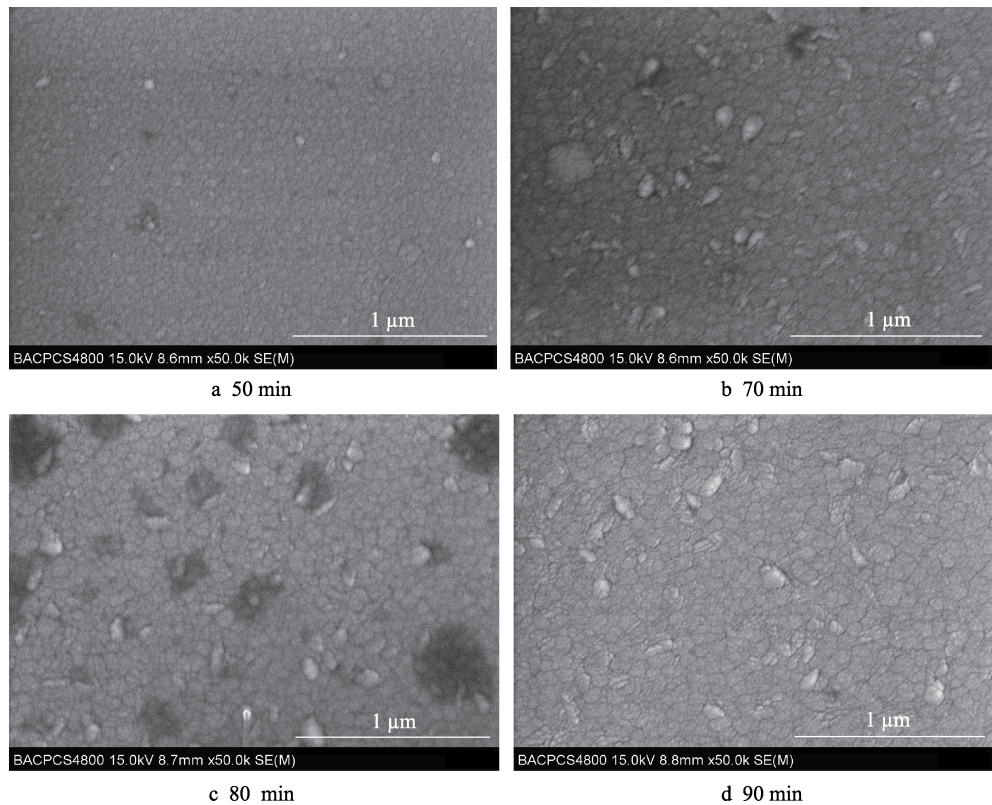


图 10 不同溅射时间下薄膜的 SEM 图
Fig.10 SEM image of thin film for different sputtering time

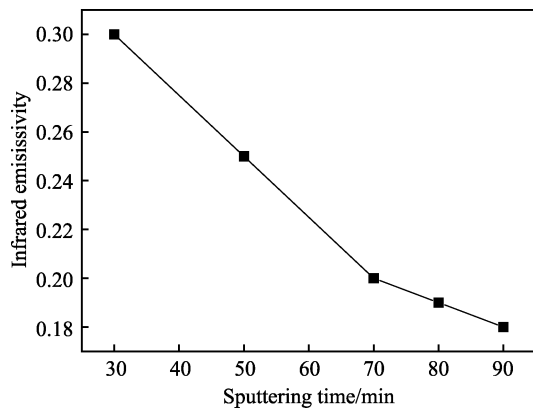


图 11 溅射时间对薄膜红外发射率的影响
Fig.11 Influence of sputtering time on IR emissivity of thin film

3 结论

- 1) 采用磁控溅射工艺，在 PET 有机玻璃上制备出了透明度高、发射率低、导电性优异的 ITO 薄膜。
- 2) 磁控溅射工艺中的氧气流量、工作气压、氩氧比、溅射时间等参数对 ITO 薄膜可见光透过率、红外发射率、电阻等光电性能影响较大，严格控制工艺参数是制备高质量 ITO 薄膜的关键。
- 3) 研究获得了较好的磁控溅射 ITO 薄膜工艺参数，其中，当氧气流量为 0.6 mL/min、工作气压为 0.4 Pa、氩氧比为 19.8:0.2、溅射时间为 80 min 时，

薄膜可见光透过率大于 80%，在 8~14 μm 红外波段的辐射率小于 0.2。

参考文献：

- [1] GRANQVIST C G, HULTKER A. Transparent and conducting ITO films: New developments and applications [J]. Thin solid films, 2002, 411(1): 1-5.
- [2] KUMAR K J, RAJU N R C, SUBRAHMANYAM A. Thickness dependent physical and photocatalytic properties of ITO thin films prepared by reactive DC magnetron sputtering[J]. Appl surf sci, 2011, 257(7): 3075-3080.
- [3] PARK S K, HAN J I, KIM W K, et al. Deposition of indium-tin-oxide films on polymer substrates for application in plastic-based flatpanel displays[J]. Thin solid films, 2001, 397: 49-55.
- [4] HERRERO J, GUILLEN C. Transparent films on polymers for photovoltaic applications[J]. Vacuum, 2002, 67: 611-616.
- [5] MICHAEL Boehme, CHRISTOPH Chartoil. Properties of ITO on PET film in dependence on the coating conditions and thermal processing[J]. Surface & coatings technology, 2005, 200: 932-935.
- [6] JUNG T D, SONG P K. Mechanical and structural

- properties of high temperature a-ITO: Sm films deposited on polyimide substrate by DC magnetron sputtering[J]. *Curr appl phys*, 2011, 11(3): S314-S319.
- [7] KIM H, HORWITZ J S, PIQUE A, et al. Electrical and optical properties of indium tin oxide thin films grown by pulsed laser deposition[J]. *Applied physics A: Materials science & processing*, 1999, 69: S447-S450.
- [8] YAO J L, HAO S, WILKINSON J S, et al. Indium tin oxide films by sequential evaporation[J]. *Thin solid films*, 1990, 18(9): 227-233.
- [9] MARIKKANNU S, KASHIF M, SETHUPATHY N, et al. Effect of substrate temperature on indium tin oxide (ITO) thin films deposited by jet nebulizer spray pyrolysis and solar cell application[J]. *Mater sci semicond process*, 2014, 27: 562-568.
- [10] OYAMA T, HASHIMOTO N, SHIMIZU J, et al. Low resistance indium tin oxide films on large scale glass substrate[J]. *J vac sci technol A*, 1992, 10(4): 1683-1684.
- [11] ALAM M J, CAMERON D C. Optical and electrical properties of transparent conductive ITO thin films deposited by sol-gel process[J]. *Thin solid films*, 2000, 377-378: 455-459.
- [12] LEWIS B G, PAINE D C. Applications and processing of transparent conducting oxides[J]. *MRS bulletin*, 2000, 25: 22-26.
- [13] GUILLEN C, HERRERO J. Comparison study of ITO thin films deposited by sputtering at room temperature onto polymer and glass substrates[J]. *Thin solid films*, 2005, 480-481: 129-132.
- [14] KIM Y S. Influence of O₂ admixture and sputtering pressure on the properties of ITO thin films deposited on PET substrate using RF reactive magnetron sputtering[J]. *Surface and coatings technology*, 2003, 173: 299-308.
- [15] 田民波, 李正操. 薄膜技术与薄膜材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 227-278.
- TIAN Min-bo, LI Zheng-cai. *Thin film technology and thin film materials*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 227-278.
- [16] KIM Y J, JIN S B, KIM S I, et al. Effect of oxygen flow rate on ITO thin films deposited by facing targets sputtering[J]. *Thin solid films*, 2010, 518: 6241-6244.
- [17] MA H, CHO J S, PARK C H. A study of indium tin oxide thin film deposited at low temperature using facing target sputtering system[J]. *Surface and coatings technology*, 2002, 153: 131-137.
- [18] 任丙彦, 刘晓平, 李彦林, 等. 工作气压对磁控溅射 ITO 薄膜性能的影响[J]. *人工晶体学报*, 2007(4): 798-801.
- REN Bing-yan, LIU Xiao-ping, LI Yan-lin, et al. Effect of working pressure on the properties of indium tin oxide[J]. *Journal of synthetic crystals*, 2007(4): 798-801.
- [19] KADI M, SMAALI A, OUEZZABET R. Analysis of optical and related properties of tin oxide thin films determined by Drude-Lorentz model[J]. *Surface & coatings technology*, 2012, 211: 45-49.
- [20] 黄成亮, 李永波, 张勇, 等. 溅射时间对室温沉积 ITO 薄膜光电性能的影响[J]. *人工晶体学报*, 2015, 44(4): 1051-1055.
- HUANG Cheng-liang, LI Yong-bo, ZHANG Yong, et al. Influence of sputtering time on the photoelectric properties of ITO thin films deposited at room temperature[J]. *Journal of synthetic crystals*, 2015, 44(4): 1051-1055.
- [21] MOHSEN A, MOHD F A, SOLLETTI G, et al. Effects of deposition time on properties of CaCu₃Ti₄O₁₂ thin film deposited on ITO substrate by RF magnetron sputtering at ambient temperature[J]. *Ceramics international*, 2018, 45 (15): 18817-18820.
- [22] KIM J H, SEONG T Y, AHN K J, et al. The effects of film thickness on the electrical, optical, and structural properties of cylindrical, rotating, magnetron-sputtered ITO films[J]. *Applied surface science*, 2018, 440: 1211-1218.
- [23] SHEN Yi, FENG Zhao-chang, ZHANG Han-yan. Study of indium tin oxide films deposited on colorless polyimide film by magnetron sputtering[J]. *Materials & design*, 2020, 193: 108809.
- [24] GURLO A. Electrochromic and transparent conducting oxide nanorods[J]. *Thin solid films*, 1997, 307(5): 288-293.
- [25] JOHN K A, PHILIP R R, SAJAN P, et al. In situ crystallization of highly conducting and transparent ITO thin films deposited by RF magnetron sputtering[J]. *Vacuum*, 2016, 132: 91-94.