

文章编号:1007-2780(2019)04-0386-09

热处理对磁控溅射法制备 p-ITO(40 nm) 薄膜特性的影响

王效坤*, 朴祥秀, 孟 雷, 房伟华, 刘 飞

(合肥京东方光电科技有限公司, 安徽合肥 230012)

摘要:为改善在实际生产中, p-ITO 在膜厚较薄时所表现出的多种不良, 如退火后膜质存在花斑不良、膜层易被刻蚀液腐蚀等, 进行退火对 p-ITO 薄膜特性影响的研究。本实验利用磁控溅射法在玻璃基板上制备出 40 nm 厚度的 p-ITO 膜, 并在氮气环境中对膜层进行不同温度和时间退火处理。分别采用 XRD、AFM 和 SEM 对 p-ITO 的结晶度和微观结构进行表征, 并使用四探针(4-point probe, 4P)和自动光学测试设备分别测试其方块电阻和光透射率。测试结果表明: p-ITO 结晶温度相对于 α -ITO 存在严重滞后性; α -ITO(40 nm) 230 °C 已结晶充分, 而 p-ITO 在 230 °C 才开始结晶; p-ITO 在 230~250 °C 时结晶程度及均一性较差, 导致多种特性的不稳定, 比如膜质花斑状颜色差异(花斑不良), 方块电阻、膜层厚度均一性差, 膜层易受腐蚀等; 退火温度提高到 260~270 °C 时结晶基本完全, 对薄膜的各种特性改善效果显著, 如方块电阻降低、光透射率增加、花斑和腐蚀改善等。测试数据还反映出玻璃中部位置相对于边缘位置结晶程度差, 可能因为退火设备实际生产时玻璃中间位置热风阻力较边缘位置大, 受热不充分导致。适当提高退火温度和时间, 对 p-ITO 实际生产中遇到的多种不良有显著改善效果。

关键词:花斑不良; 磁控溅射; 方块电阻; 透过率; 薄膜晶体管

中图分类号: TB31; TB34; TB43 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193404.0386

Effect of annealing treatment on the performances of 40 nm thick p-ITO films prepared by DC magnetron sputtering

WANG Xiao-kun*, PIAO Xiang-xiu, MENG Lei, FANG Wei-hua, LIU Fei

(Hefei BOE Optoelectronics Technology Co., LTD., Hefei 230012, China)

Abstract: The effect of annealing on the properties of p-ITO thin films was studied in order to improve many imperfections of p-ITO thin films in mass production, such as bad spots on the film after annealing and corrosion of the film by etching solvent. In this work, p-ITO of 40 nm thin films were deposited at room temperature by utilizing magnetron sputtering with DC power supply, and annealed in N₂ atmosphere under various annealing time and temperature. The crystallinity and microstructures of thin films were analyzed by XRD, AFM and SEM, and the square resistance and light transmittance were measured by four-point probe and automatic optics measuring system respectively. The results show that there is a serious hysteresis in the crystallization temperature of p-ITO compared with α -ITO. The crystallization temperature of p-ITO film is 230 °C, at which α -ITO film has fully crystal-

收稿日期: 2018-12-01; 修订日期: 2019-01-07.

* 通信联系人, E-mail: wangxiaokun@boe.com.cn

lized. It appears poor crystallinity and homogeneity of p-ITO at 230—250 °C, resulting in instability of many characteristics, such as bad spots in film color, poor homogeneity of square resistance, easily to be corroded, *etc.* When annealing temperature is raised to 260—270 °C, the crystallization is almost complete. It has a good effect on p-ITO films, such as the square resistance is lower, the transmittance is higher, and the bad spots of p-ITO thin films disappear. Research also shows that the crystallinity of the middle position of glass is worse than that of the edge at the same temperature, probably because the flow resistance of hot air is higher in the middle position and the heat is insufficient. The raising of the annealing temperature and time properly has a significant effect on the various defects encountered in the mass production of p-ITO.

Key words: bad spots; magnetron sputtering; square resistance; light transmittance; thin film transistor

1 引言

氧化铟锡(ITO,重掺杂 Sn 的 In_2O_3)膜是一种 n 型半导体陶瓷薄膜,以其高的可见光透射率、高的电导率,坚固、耐碱、耐高温及好的酸刻、光刻性能等优良特性^[1-3],被广泛应用于电子工业、屏蔽防护、光电子器件、液晶显示器件及太阳电池等行业^[4-5]。在液晶显示领域,随着显示器件的超清、超薄、窄边框和低能耗等高性能需求的发展,在高透光率、低电阻率和大面积均匀性等光电性能上对 ITO 薄膜提出了更高的要求^[6],尤其对 ITO 成膜过程中的 particle(pt)要求越来越苛刻。p-ITO 材料因其在成膜过程中产生较少的 pt,设备维护周期长,较好的刻蚀性(刻蚀后 ITO 残留少)等优点,得到越来越广泛的应用。但是,在实际生产过程中,p-ITO 膜层较薄时,也表现出一定的劣势。比如,退火后的方块电阻(Square resistance, R_s)较 α -ITO 高,膜质易出现花斑状不良,光透射率低等;在对应 ADS 产品的 1st ITO(多为 40 nm)生产时,相对于 α -ITO, p-ITO 薄膜中 In 更易被后续工艺中还原性气体还原导致 In 析出;以及 1st ITO 层在退火后更易受到腐蚀等。针对这些实际生产中遇到的问题,如何改善是亟待解决的问题。

需要说明的是,p-ITO 的“p”是晶相(Phase)的意思。ITO 中 Sn 有 2 种晶相, α -ITO 的第 2 种晶相的面积占比较小,第 2 种晶相的电阻比第一种晶相的电阻率要高很多;而 p-ITO 在靶材制作

过程中通过特定的手法,控制让第 2 种晶相分布较多,面积较大,即所谓的富 Sn 相(Sn-rich phase)。p-ITO 的第 2 种晶相的电阻和第一种晶相的电阻率相差并不大,平均电阻也变得相对较低。

本实验中,用直流磁控溅射沉积法在玻璃基板表面沉积 p-ITO 40 nm 的薄膜,在 N_2 环境下对薄膜进行退火处理,通过阵列宏微观缺陷检查机(Macro/Micro,MM)设备分析薄膜微观形貌,使用 AFM 和 SEM 设备分析膜面的表面形貌特征,利用 XRD 设备研究其结晶情况,并采用四探针设备(4-point probe,4P)测试其方块电阻 R_s ,K-MAC(Korea Materials & Analysis Corp.)的光学测试设备测试其膜厚(THK)和光透射率,分析探讨 p-ITO 薄膜在退火过程中的变化机理,并进一步探究了 p-ITO 在 TFT 元器件工业化生产方面遇到问题的改善方向。本文涉及的 p-ITO 和 α -ITO 数据无特别说明外,均指厚度为 40 nm p-ITO 和 α -ITO 的数据。

2 实验

本文采用 ULVAC 的 SMD-1800V 型立式磁控溅射镀膜机在玻璃基板表面沉积 p-ITO 膜,p-ITO 靶材购买自 Samsung。本底真空度小于 5.0×10^{-4} Pa,氩气纯度为 99.9999%,购买自 Air Liquid。玻璃基板购买自彩虹光电科技股份有限公司,其尺寸为 1 850 mm $\times$ 1 500 mm,厚度为 0.5 mm。成膜工艺如表 1 所示。

表 1 p-ITO 样品制备条件

Tab.1 Deposition process parameters for p-ITO samples

温度/℃	功率/kW	Ar 流量/ (mL · min ⁻¹)	压力/Pa	时间/s	H ₂ O 流量/ (mL · min ⁻¹)	O ₂ 流量/ (mL · min ⁻¹)
25	6.5/5.5	1200	0.42	23	0	0

采用 KOYO CCBS-2-1480 型退火设备对样品进行退火处理,各样品退火条件如表 2 所示。

表 2 不同退火工艺条件

Tab.2 List of anneal process parameters

工艺参数 样品序号	温度/℃	气氛	时间/min
S1	180	N ₂	32
S2	200	N ₂	32
S3	220	N ₂	32
S4	230	N ₂	32
S5	230	N ₂	60
S6	230	N ₂	120
S7	250	N ₂	32
S8	250	N ₂	60
S9	250	N ₂	90
S10	260	N ₂	32
S11	270	N ₂	32
S12	280	N ₂	32

本文所采用的阵列宏微观缺陷检查机(MM)是 DE & T 的 MM1850A 型;场发射扫描电镜(FE-SEM)为 Hitachi 的 S-4800 型;原子力显微镜 AFM 为 South Korea XE-150 型;使用的四探针测试仪是 NAPSON 的 RS-1300 型;光学测试设备为 K-MAC ST8000 型。X 射线衍射仪(XRD)为 D/MAX-2500V 型,2θ 扫描范围20°~80°。

3 实验结果与讨论

3.1 MM 微观检测结果分析

在不同退火工艺参数条件下的 p-ITO 膜层,采用 MM 设备进行膜层光学检测,测试结果显示随着退火温度的增加,p-ITO 膜质开始出现花斑状

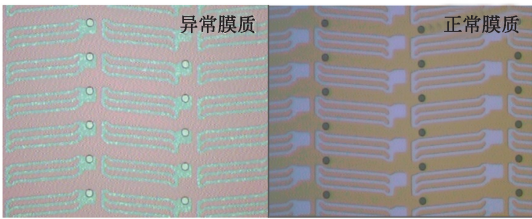


图 1 膜质花斑状颜色异常图(a)和正常膜质图(b)

Fig.1 Spots defect picture(a) compared with normal picture(b)

颜色异常;花斑状颜色异常不良对比如图 1 所示。

随着退火温度和时间的进一步增加,花斑状颜色异常不良逐渐改善并消失。花斑不良出现/消失的退火温度和时间结果如图 2、图 3 所示。

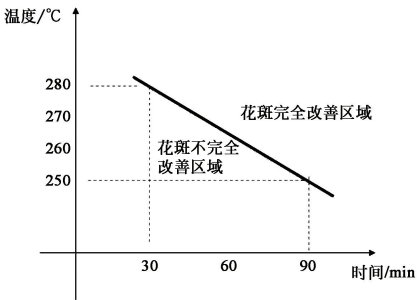


图 2 花斑状不良的退火温度和退火时间发生区域图

Fig.2 Diagram of spots defect formation versus annealing temperature and time

位置		32 min	60 min	90 min
中间	180 °C	无	/	/
	200 °C	无	/	/
	220 °C	无	/	/
	230 °C	无	轻微	严重
	250 °C	轻微	严重	无
	260 °C	严重	/	/
	270 °C	轻微	/	/
	280 °C	无	/	/
边缘	180 °C	无	/	/
	200 °C	无	/	/
	220 °C	轻微	/	/
	230 °C	严重	严重	轻微
	250 °C	严重	轻微	无
	260 °C	/	/	/
	270 °C	无	/	/
	280 °C	无	/	/

图 3 花斑状不良随退火温度和时间发生图

Fig.3 Trend diagram of spots defect formation versus annealing temperature and time

从测试结果看,退火温度对花斑不良的影响效果大于退火时间,温度和时间对花斑不良的出现和消失均有影响。

对比图3中间和边缘位置的测试结果,可见样品中间位置相对于边缘位置,花斑状不良的出现和消失温度均有滞后性。推测原因为样品进行

退火时,玻璃逐层放置在烘箱内,玻璃层与层间距较小,中间位置热风流动阻力大于边缘位置,和热风接触不充分,导致玻璃中间和边缘位置产生差异性。设备实际生产时,要全面消除 p-ITO 花斑状不良,可以以中间位置测试结果为标准,优先选择适量提高退火温度,其次考虑增加退火时间。

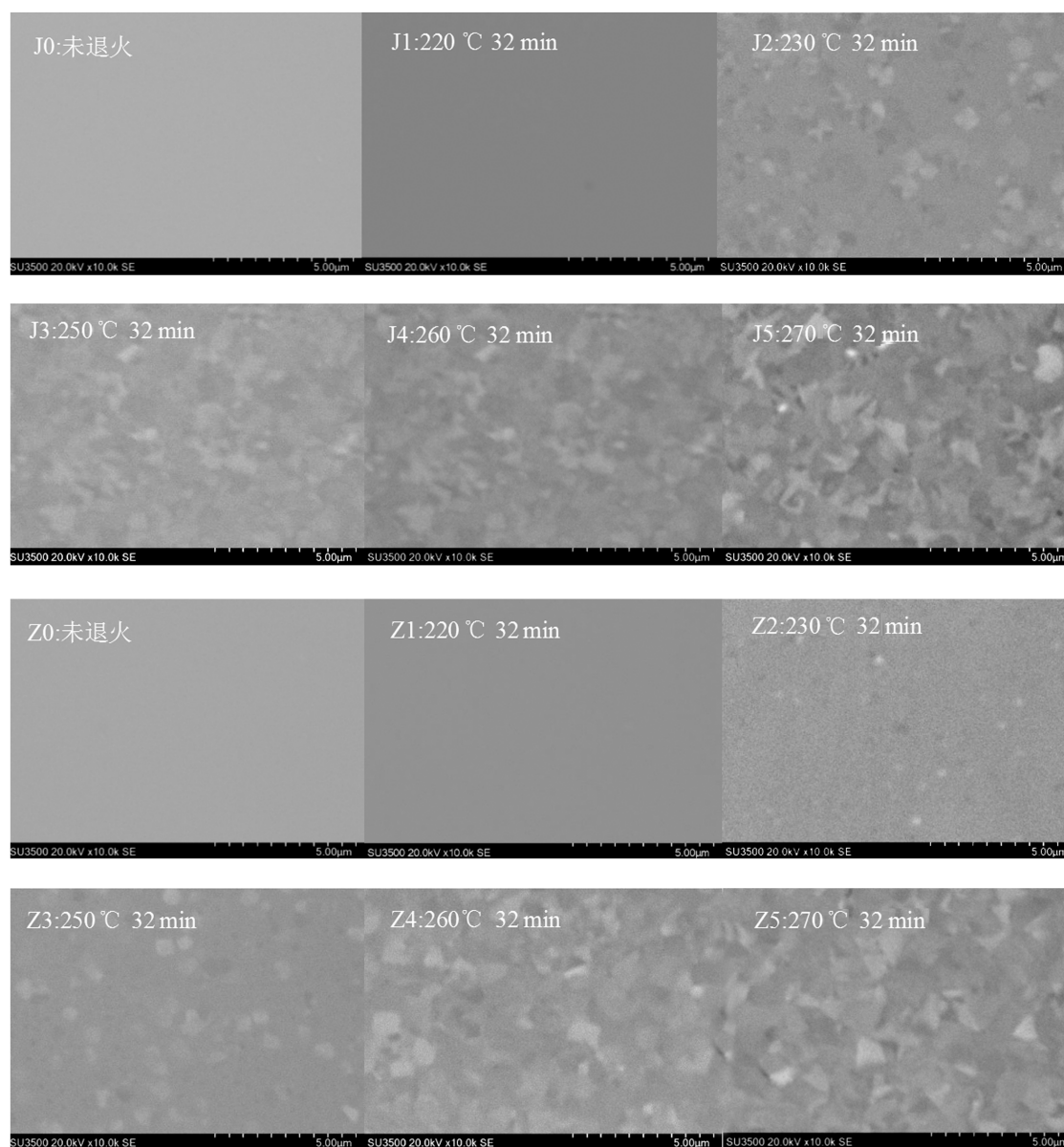


图4 不同退火条件的 p-ITO SEM 图(J:角部位置,Z:中间位置)

Fig.4 SEM images of p-ITO thin film under various annealing temperature and time(J:corner position;Z:center position)

3.2 SEM 表面形貌和 XRD 图谱分析

在不同退火工艺参数条件下的 p-ITO 薄膜,所制样品采用 SEM 进行表面形貌表征,结果如

图4所示。图中“J”表示样品的角部(边缘)位置,“Z”代表样品的中间位置。从 J0~J5 及 Z0~Z5 测试结果可以看出,当温度较低时,未见晶粒结

构;随着温度的升高,p-ITO 由非晶逐渐向多晶转变;温度达到 230 °C 时开始出现晶粒结构,260~270 °C 时晶粒结构趋于稳定。

对比 J2 和 Z2,可见 J2 晶粒结构明显多于

Z2;分别对比其它测试条件结果,也均为边缘位置结晶程度优于中间位置。说明边缘位置的实际受热程度优于中间位置,和图 3 MM 测试花斑不良的发生情况一致。

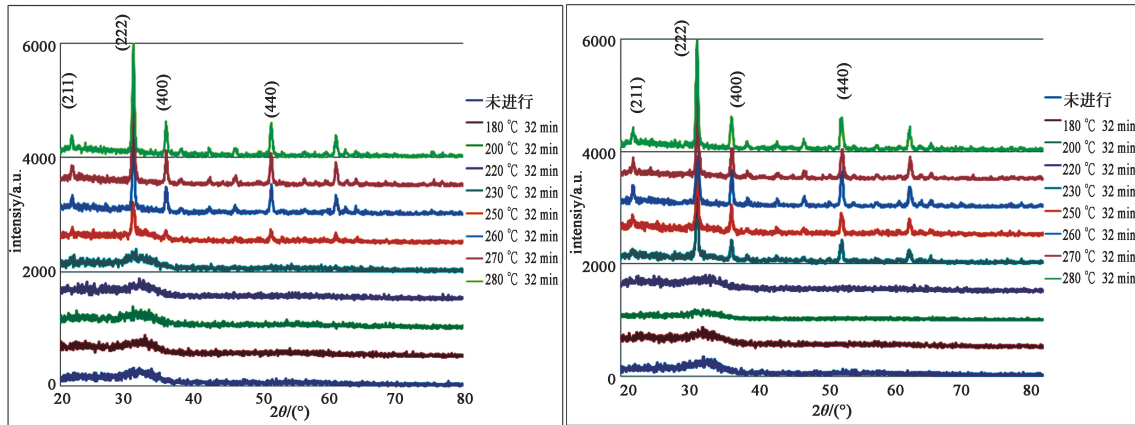


图 5 不同退火条件的 p-ITO XRD 图谱。(a)中间位置;(b)角部位置。

Fig.5 XRD spectra of p-ITO thin film under various annealing temperature and time(a)Center position;(b) Corner position.

图 5 为不同退火条件的测试样品的 XRD 图谱。从中可以看出,230 °C 以下退火温度制备的样品,和未退火的样品一样,均为平滑的曲线,为典型的非晶结构^[7]。这是由于退火温度较低,溅射到基片表面的粒子没有足够的能量进行迁移,导致薄膜的结晶性较差^[8]。随着退火温度的升高,达到 230 °C 以上时,开始出现多个尖锐明显的特征峰,说明样品已转变为以(222)为主要晶向的多晶结构^[9]。综合对比 XRD 测试图谱,p-ITO 230 °C 开始出现结晶现象;当温度达到 260~270 °C 时,结晶基本完全。通过对比相同退火温度条件下中间位置和角部位置测试样品的衍射峰的强度可知,中间位置的结晶性较边缘位置差。比较显著的是,230 °C 样品边缘(角部)位置可见明显特征衍射峰,而中间位置未见明显特征衍射峰。再次印证了因热对流型退火设备局限性原因,边缘位置较中间位置加热更充分,这也和图 4 的 SEM 测试数据及图 3 的 MM 检测的花斑不良数据结论一致。

3.3 R_s 、THK 和 TR 测试结果分析

图 6 是 R_s 随退火温度变化趋势图。从图中可以看出, R_s 值随退火温度增加逐渐降低,当温度达到 260 °C 时趋于稳定。随着退火温度增高,ITO 薄膜的结晶性增强,晶界对载流子的散

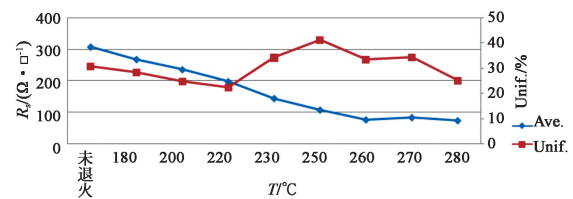
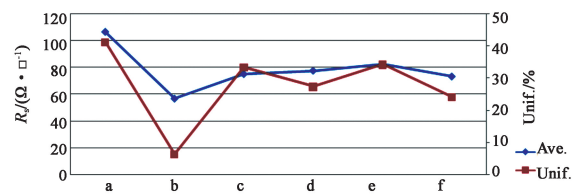


图 6 R_s 随退火温度变化趋势图(32 min)

Fig.6 Trend diagram of square resistance versus annealing temperature(32 min)



a:250 °C, 32 min; b:250 °C, 90 min; c:260 °C, 32 min; d:260 °C, 60 min; e:270 °C, 32 min; f:270 °C, 45 min

图 7 R_s 随退火温度和时间变化趋势图

Fig.7 Trend diagram of square resistance versus annealing temperature and time

射降低,提高了载流子的迁移率;且高温退火使残留在薄膜中的氧原子、表面吸附的氧原子和其他杂质粒子释放到退火环境中,提高载流子浓度^[8]。当温度升高到 230~250 °C 时, R_s 均匀

性值增高,并在 250 °C 时达到最高,后随温度升高均匀性再次降低。因为 230~250 °C 为膜层结晶初始阶段,结晶均匀性差,晶体结构和晶界散射差异性大等导致 R_s 均匀性差。当温度高于 250 °C 时,结晶程度及差别得到优化。图 7 是 R_s 随退火温度和时间变化趋势图。从图中可以看出,温度高于 250 °C,退火时间增加使 R_s 均匀性均有降低,增加退火时间可以进一步优化晶粒。当温度高于 260 °C 时, R_s 均匀性值降低并不明显,结晶整体已趋于稳定。图 8 是 α -ITO 随退火温度趋势图,从图可知, α -ITO 在 230 °C 时 R_s 已稳定,趋于结晶完全。对比图 6~8 可知, p-ITO 相对于 α -ITO 的结晶温度要高,结晶温度存在严重滞后性。

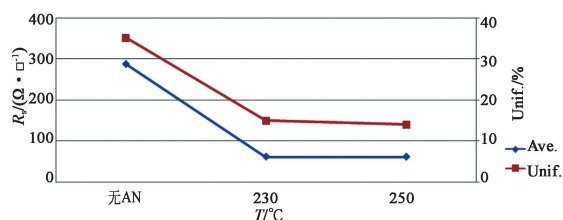


图 8 α -ITO R_s 随退火温度变化趋势图(32 min)

Fig.8 Trend diagram of α -ITO square resistance versus annealing temperature(32 min)

图 9 是膜厚随退火温度变化趋势图。从图中可以看出,低于 230 °C 时,膜厚随温度增加有降低趋势;此温度下膜层为非晶状态,随着温度增加,原子获得能量进行迁移,微观结构优化排列所致。当温度高于 230 °C 时,随温度增加膜厚有增加趋势,当温度达到 260 °C 时基本趋于稳定;此时膜层开始结晶,膜厚略微增加应和晶像生长相关。均匀性同样在温度为 250 °C 时达到最大值,和此温度下结晶不充分,结晶差别较大相关。图 10 是膜厚随退火温度和时间变化趋势图。从图中可以看出,在 250 °C 时,膜厚随时间增加仍有轻微增

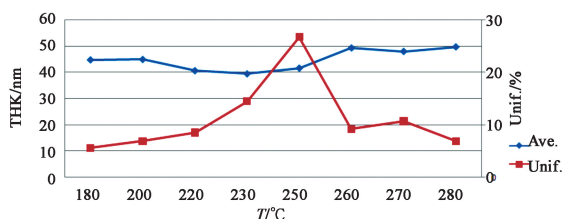
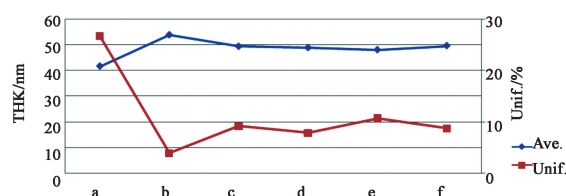


图 9 膜厚随退火温度变化趋势图(32 min)

Fig.9 Trend diagram of thickness versus annealing temperature(32 min)

加;当温度达到 260 °C 及以上时,膜厚无明显变化趋于稳定。增加退火时间,均匀性均有轻微降低,说明晶向在进一步优化,膜层厚度趋向均匀。图 11 是 α -ITO 膜厚随退火温度变化趋势图,由图可知, α -ITO 在 230 °C 时膜厚已趋于稳定。膜厚随退火变化规律的分析原因和 R_s 随退火变化规律的分析原因是一致的。



a: 250 °C, 32 min; b: 250 °C, 90 min; c: 260 °C, 32 min; d: 260 °C, 60 min; e: 270 °C, 32 min; f: 270 °C, 45 min

图 10 膜厚随退火温度和时间变化趋势图

Fig.10 Trend diagram of thickness versus annealing temperature and time

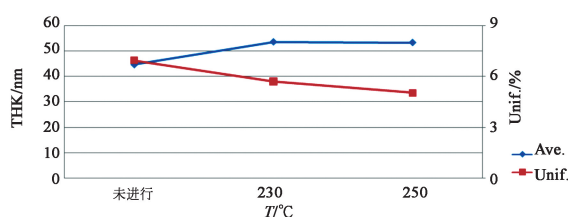


图 11 α -ITO 膜厚随退火温度变化趋势图(32 min)

Fig.11 Trend diagram of α -ITO thickness versus annealing temperature(32 min)

图 12 是光透射率随退火温度变化趋势图(数据为 ITO 膜连同玻璃基板的光透射率数据)。从图中可以看出,光透射率随退火温度增加而增加,并在 260 °C 左右趋于稳定。图 13 是光透射率随退火温度和时间变化趋势图。从图中可以看出,当温度达到 260 °C 及以上时,增加退火时间,光透射率已趋于稳定。肖和平等人的研究认为, ITO 退火后薄膜层结构更加密实、均匀,更利于

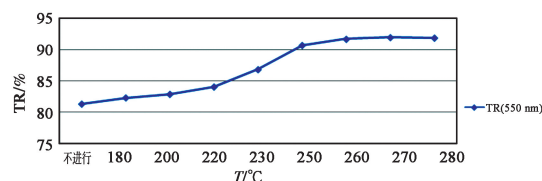
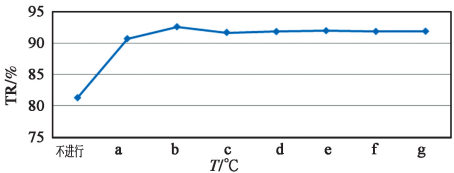


图 12 光透射率随退火温度变化趋势图(550 nm)

Fig.12 Trend diagram of light transmittance versus annealing temperature(550 nm)

光的透过^[10]。图 14 是 α -ITO 薄膜光透射率随退火温度变化趋势图,从图可知, α -ITO 在 230 $^{\circ}\text{C}$ 时光透射率已稳定。由图 12 和图 14 对比可知,p-ITO 相对于 α -ITO,最优光透射率的退火温度有滞后性。



a:250 $^{\circ}\text{C}$,32 min; b:250 $^{\circ}\text{C}$,90 min; c:260 $^{\circ}\text{C}$,32 min; d:260 $^{\circ}\text{C}$,60 min; e:270 $^{\circ}\text{C}$,32 min; f:270 $^{\circ}\text{C}$,45 min; g:280 $^{\circ}\text{C}$,32 min

图 13 光透射率随退火温度和时间变化趋势图(550 nm)

Fig.13 Trend diagram of light transmittance versus annealing temperature and time(550 nm)

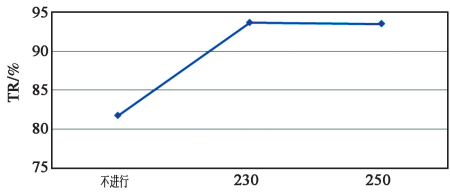


图 14 α -ITO 光透射率随退火温度变化趋势图(32 min,550 nm)

Fig.14 Trend diagram of α -ITO light transmittance versus annealing temperature (32 min, 550 nm)

3.4 AFM 测试结果分析

图 15 为不同退火温度条件制备的 p-ITO 薄膜样品测试的 AFM 图。从测试结果看,未退火时,薄膜表面结构微粒细小但较酥松。对比 A0~A3 可知,随着退火温度的增加,薄膜表面粗糙程度逐渐增大但致密性增加。对比 A4~A5,当温

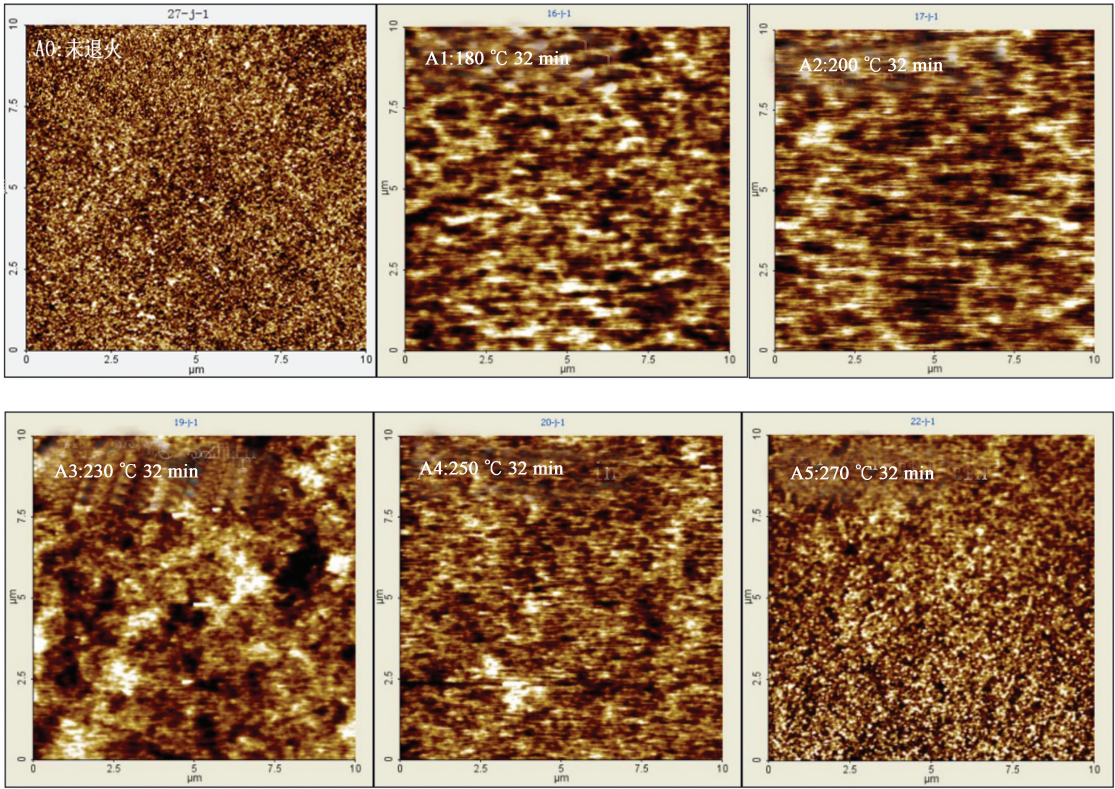


图 15 p-ITO 不同退火温度条件 AFM 图

Fig.15 AFM images of p-ITO thin film at different annealing temperature

度达到 250 $^{\circ}\text{C}$ 及以上时,表面结构又逐渐细化。未退火时,薄膜主要为沉积时的原子结构,表面精细但结构酥松;退火温度增加时,原子获得能量在

热效应下迁移运动排列生长,原子聚集导致微粒增大但致密性增强;当退火温度高于 230 $^{\circ}\text{C}$ 时开始结晶,表现出品粒状态;温度进一步增高,薄膜

沿晶向优化生长,晶粒又逐渐细化,薄膜表面又表现出细微但稍显致密的结构。

3.5 腐蚀验证

表3为不同退火温度条件及退火次数对 p-ITO 膜层在 SD 层的 decap 腐蚀实验。实验结果可知,正常生产条件下(250 °C, 32 min)发生腐蚀。第二次追加退火(增加退火次数,增加退火时

间,提高退火温度)对 p-ITO 膜层的腐蚀有改善效果。图16为腐蚀测试的图片和发生位置。从腐蚀发生位置看,腐蚀多发生于玻璃中间位置,为结晶较差区域,和 SEM 和 XRD 等的测试结论一致。从腐蚀图片看,腐蚀原因为 p-ITO 膜层结晶不充分,推测为晶粒间缝隙大,刻蚀液进入导致腐蚀。

表3 不同退火条件下的 p-ITO 腐蚀测试

Tab.3 p-ITO corrosion tests in different annealing conditions

实验编号	1 st Anneal	2 nd Anneal	腐蚀结果
F1	250 °C 32 min	不进行	腐蚀
F2	250 °C 32 min	250 °C 32 min	无
F3	250 °C 32 min	250 °C 60 min	无
F4	250 °C 32 min	280 °C 32 min	无

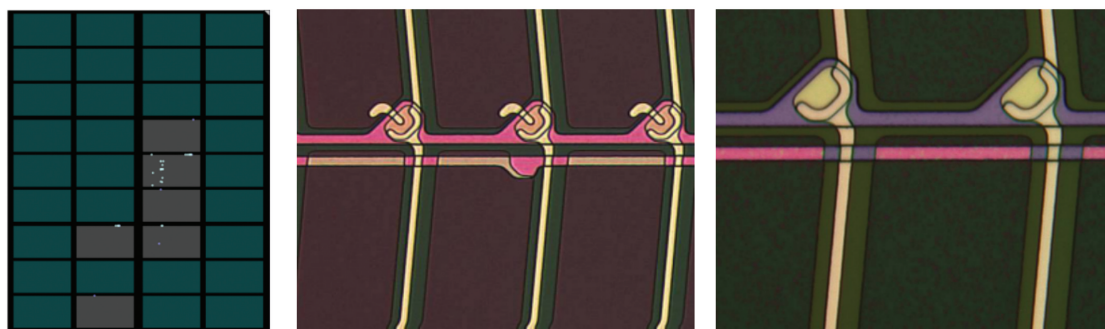


图16 腐蚀测试图。(a) 腐蚀位置,(b) 正常图片;(c) 腐蚀图片。

Fig.16 Corrosion test image.(a) Corrosion map; (b) Normal image; (c) Corrosion image.

4 结 论

本实验通过增加退火温度和时间,分析了退火工艺对 p-ITO 形貌结构和光电性能的影响,并探讨比较了 p-ITO 和 α -ITO 的差异性。相对于 α -ITO, p-ITO 的结晶温度存在滞后性。对于 p-ITO,保持实际量产时的退火时间 32 min 不变,230 °C 开始结晶,260~270 °C 左右基本结晶完全。在 230~250 °C 时结晶不完全,差异性

较大,对多种特性均有影响,比如膜质出现花斑状不良, R_s 、膜厚等均匀性较差,膜层易受刻蚀液腐蚀等。

实际生产中,不改变生产能力的情况下(退火时间 32 min 不变),对于 p-ITO 适当提高退火温度至 270 °C 左右,对于方块电阻、光透射率、膜质颜色异常和膜层腐蚀等,均有明显改善效果。这对 p-ITO 实际生产使用过程中各种不良的解决,有着重要的现实和指导意义:可以指导生产,减少工艺事故发生,提升良率,降低损失等。

参 考 文 献:

- [1] 仲飞,刘彭义,段光凤.退火处理对 ITO 表面特性及有机发光器件性能的影响[J].液晶与显示,2005,20(6):

- 498-502.
- ZHONG F, LIU P Y, DUAN G F. Influence of annealing treatment on ITO surface and OLED performances [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, 20(6): 498-502. (in Chinese)
- [2] 江锡顺, 万东升, 宋学萍, 等. 退火温度对 ITO 薄膜微结构和光电特性的影响[J]. *人工晶体学报*, 2011, 40(6): 1536-1540, 1556.
- JIANG X S, WAN D S, SONG X P, *et al.* Effect of annealing temperature on the microstructure and photoelectrical properties of ITO films [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2011, 40(6): 1536-1540, 1556. (in Chinese)
- [3] 曹国华, 蔡红新, 张宝庆, 等. 氧气气氛下退火处理对 ITO 薄膜性能的影响[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(5): 671-674.
- CAO G H, CAI H X, ZHANG B Q, *et al.* Influence of annealing treatment in O₂ atmosphere on properties of ITO thin film [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2014, 33(5): 671-674. (in Chinese)
- [4] 黄步雨, 史月艳. 退火对溅射沉积 ITO 膜电学性能的影响[J]. *真空科学与技术*, 1994, 14(5): 379-382.
- HUANG B Y, SHI Y Y. Annealing effect on electronic properties of ITO film [J]. *Vacuum Science and Technology*, 1994, 14(5): 379-382. (in Chinese)
- [5] 黄士勇, 王德苗, 任高潮, 等. 真空和大气退火对 ITO 膜特性的影响[J]. *浙江大学学报: 自然科学版*, 1997, 31(4): 533-538.
- HUANG S Y, WANG D M, REN G C, *et al.* The effect of air or vacuum annealing on ITO film characteristics [J]. *Journal of Zhejiang University (Natural Science)*, 1997, 31(4): 533-538. (in Chinese)
- [6] 赵杨, 吴东起, 高雪松. P-ITO 膜成膜过程中 O₂ 分压对 ITO 膜质的影响[J]. *现代显示*, 2012, 23(4): 42-44.
- ZHAO Y, WU D Q, GAO X S. The impact of partial O₂ pressure in ITO deposition process [J]. *Advanced Display*, 2012, 23(4): 42-44. (in Chinese)
- [7] 许旻, 邱家稳, 贺德衍. 退火对反应磁控溅射制备 ITO 薄膜性能影响[J]. *真空科学与技术*, 2003, 23(3): 161-164.
- XU M, QIU J W, HE D Y. Study of annealed indium tin oxide films prepared by reactive magnetron sputtering [J]. *Vacuum Science and Technology*, 2003, 23(3): 161-164. (in Chinese)
- [8] 彭寿, 蒋继文, 李刚, 等. 直流磁控溅射工艺对 ITO 薄膜光电性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(7): 987-994.
- PENG S, JIANG J W, LI G, *et al.* Effect of DC magnetron sputtering process on optical and electrical properties of ITO thin films [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 44(7): 987-994. (in Chinese)
- [9] 郭守月, 曹春斌, 孙兆奇. 掺银 ITO 薄膜退火前后的性能比较[J]. *吉林大学学报: 理学版*, 2010, 48(2): 291-294
- GUO S Y, CAO C B, SUN Z Q. Properties contrast of ITO films by Ag doping and annealing [J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 2010, 48(2): 291-294. (in Chinese)
- [10] 肖和平, 郭冠军, 马祥柱, 等. 热退火处理对氧化铟锡薄膜光电特性的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 013102.
- XIAO H P, GUO G J, MA X Z, *et al.* Influence of thermal annealing on photoelectrical properties of indium-tin oxide thin films [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 013102. (in Chinese)

作者简介:



王效坤(1988—),男,安徽亳州人,学士,高级工程师,2010年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事薄膜制备工艺及 TFT 器件性能的研究。E-mail: wangxiaokun@boe.com.cn