

文章编号:1007-2780(2019)02-0146-09

光刻制程参数对光刻胶 D1CD 和锥角的影响

刘 丹^{1*}, 陈启超¹, 黄 晟¹, 秦 刚¹, 高朋朋¹, 陈 昊¹,蔡晓锐¹, 王百强¹, 冯家海¹, 方 亮²

(1.重庆京东方光电科技有限公司, 重庆 400700)

(2.重庆大学 物理学院, 重庆 400044)

摘要:光刻胶经过曝光、显影后的锥角(Taper)和关键尺寸(Develop Inspection Critical Dimension, D1CD)是光刻工艺的重要参数。明确影响锥角和 D1CD 的工艺参数,进而控制锥角和 D1CD,这对工艺制程至关重要。本文结合光刻制程,探究了光刻胶厚度、曝光剂量、Z 值、显影时间对锥角和 D1CD 的影响,并结合蒙特卡罗算法对显影制程进行评估。实验结果表明:光刻胶厚度每增加 1 μm , D1CD 增加约 2.6 μm 。同时,厚度增加会导致光刻胶顶部的锥角逐渐由锐角向钝角演变。曝光剂量每增加 10 mJ/s, D1CD 则减小约 0.8 μm , 锥角则呈阈值跳跃式上升趋势。基板在最佳焦平面曝光, D1CD 和锥角均一性最好。显影时间每增加 10 s, D1CD 下降约 0.3 μm , 锥角则增加约 1.7°。最终, D1CD 和锥角呈负相关关系,可以通过调节光刻工艺参数对锥角和 D1CD 进行控制。

关键词:光刻胶 锥角 显影后关键尺寸 光刻工艺 蒙特卡罗计算

中图分类号: TN141.9; TP394.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193402.0146

Influence of lithography process parameter on D1CD and taper of photoresist

LIU Dan^{1*}, CHEN Qi-chao¹, HUANG Sheng¹, QIN Gang¹, GAO Peng-peng¹,CHEN Hao¹, CAI Xiao-rui¹, WANG Bai-qiang¹, FENG Jia-hai¹, FANG Liang²

(1. Photo-Etch Engineering Department, Chongqing BOE Optoelectronics Technology CO., LTD, Chongqing 400700, China;

2. College of Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The Taper and D1CD (Develop inspection critical dimension) after exposure and development are important parameters in lithography process, which determine the TFT pattern and TFT characteristic. Therefore, it is necessary to identify the process parameters affecting Taper and D1CD in mass production, aiming at making Taper and D1CD under control, which would improve production yield. In this paper, the effects of photo resist thickness, dose and Z value in exposure, development time were comprehensively studied. What's more, Monte Carlo algorithm was used to evaluate the development process. The experimental results show that photo resist thickness increases by about 1 μm , D1CD will increase by about 2.6 μm . At the same time, the increase in photo-resist thickness

收稿日期: 2018-08-13; 修订日期: 2018-11-14.

* 通信联系人, E-mail: liudan_cq@boe.com.cn

causes the taper on the top of photoresist gradually to evolve from an acute angle to an obtuse angle. For every 10 mJ/s increase in exposure dose, DICD is reduced by about $0.8\ \mu\text{m}$, and taper rise in a threshold. The uniformity of DICD and taper is the best when the substrate is exposed at the best focal plane. For every 10 s increase in development time, the DICD decreases by about $0.3\ \mu\text{m}$ and the Taper increase by about 1.7° . In the end, DICD and Taper are negatively correlated, it is possible to make profile and CD Bias under control by adjusting the process parameters.

Key words: photo resist; taper; DICD; lithography process; Monte Carlo algorithm

1 引 言

经过近 10 年的发展,薄膜晶体管-液晶显示 (Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display, TFT-LCD) 已成为目前平板显示的主流技术,广泛应用于计算机、家电、医疗、交通等领域^[1]。随着 TFT-LCD 分辨率(单位面积的像素数量)的提高,TFT 器件的线宽与线间距趋于越来越小,即 TFT 器件的最终关键尺寸(Final Inspection Critical Dimension, FICD)越来越小。在刻蚀工艺条件不变的情况下,经光刻工艺制程后光刻胶的关键尺寸(Develop Inspection Critical Dimension, DICD)对 FICD 产生决定性影响^[2]。

光刻制程是一个图形转移的过程:曝光光源经过掩模板(Mask)、透镜,将掩模板图形成像于玻璃基板上,经过显影后,玻璃基板上的光刻胶形成与掩模板一样的电路图案^[3-4]。以正性光刻胶为例,形成图案的光刻胶宽度被称作 DICD;同时,形成图案的光刻胶在截面方向形成锥角或坡度角,此锥角在 TFT 行业被称作 Taper^[5]。光刻胶的 DICD 和锥角是光刻制程的重要工艺指标。光刻制程复杂,包括基板清洗、光刻胶涂覆与干燥、烘烤、曝光、显影等阶段。制程中各阶段对 DICD 及其均一性、锥角会产生影响^[9]。

本文结合京东方 15.6HADS 产品的栅极光刻制程,采用控制变量原则,以单因素试验为基础探究了光刻胶涂覆厚度、曝光工艺参数、显影工艺参数对 DICD 和锥角的影响,并采用 Crystal Ball 软件以蒙特卡罗算法评估量产条件下 DICD 与锥角的分布区间以及概率。最终明确了光刻制程对 DICD 和锥角的影响因素和相关关系,为调控 DICD 和锥角探索出了可行的技术路线。

2 实 验

2.1 实验流程

实验在京东方 8.5 代线的 15.6HADS 产品栅极(Gate 电极)光刻制程进行,其流程如图 1 所示:成膜后的玻璃基板经过纯 H_2O 清洗,然后进行光刻胶涂覆,通过涂覆过程参数的调节可以控制光刻胶的厚度;光刻胶主要由树脂、溶剂、感光剂和添加剂组成,树脂是光刻胶主体,溶剂确保光刻胶完整涂覆于基板上,感光剂在曝光阶段发生光化学反应;光刻胶涂覆完成后,基板进行减压真空干燥(Vacuum Dry, VCD),在此阶段通过抽气减压获得真空状态,使得光刻胶中的溶剂沸点下降,进而导致溶剂在此阶段大量挥发;VCD 完成后,基板进入烘烤阶段,此阶段通过加热的空气进行烘烤,使溶剂进一步挥发并增加光刻胶与基板的粘附力;完成烘烤后,基板进入曝光阶段,此阶段中,被光照射的光刻胶会发生光化学反应,此反应使得该处的光刻胶显酸性,其显影速度增加;曝光剂量、Z 值将影响 DICD 和锥角;完成曝光后,基板进入显影阶段,显影液呈碱性,故被光照射的光刻胶被显影液侵蚀而未被光照的光刻胶则被保留。经历光刻制程后,光刻胶在截面方向形成锥角,如图 2 所示。

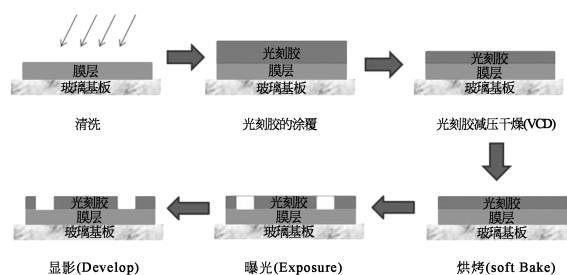


图 1 光刻工艺制程

Fig.1 Process flow of lithography

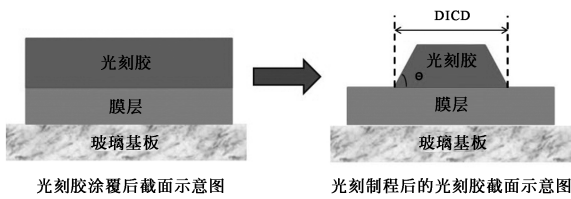


图 2 光刻制程光刻胶锥角示意图

Fig.2 Schematic of taper for PR in lithography process

2.2 实验样品

采用控制变量法,在光刻制程中采用单因素试验,每项试验中仅变更一项工艺参数,而其余工艺参数则与量产条件持平。如表 1 中的试验区块一,该项试验中,仅光刻胶厚度进行变化,其余条件均与 15.6HADS 产品量产条件一致,完成此项试验后,玻璃基板在 TFT 产线的 HTCD 设备进行 D1CD 测试。HTCD 设备采用非接触的成像加像素分析的技术手段,以非接触的方式测量 D1CD,每张玻璃基板测试 54 个点位,获得 54 个 D1CD 数据,通过 54 个数据的平均值和 3 倍标准差反应 D1CD 情况。D1CD 测试完成后,采用扫描电子显微镜 SEM 进行光刻胶微观形貌测试,对截面照片进行分析,测量锥角。试验区块二、区块三的情况与区块一类似,详细的试验条件如表 1 所示。

表 1 光刻制程实验条件

Tab.1 Experiment split of lithography process

实验区块	探究区域	样品编号
区块一	光刻胶厚度的影响	S1~S5
区块二	曝光剂量的影响	S6~S11
	Z 值的影响	S12~S18
区块三	显影时间的影响	S19~S24
	量产显影条件的蒙特卡罗计算	---

3 实验结果及分析

3.1 光刻胶厚度对 D1CD 和锥角的影响

在光刻工艺条件不变的情况下,光刻胶厚度对 D1CD 的影响如图 3 所示。光刻胶厚度增加,D1CD 呈线性增加趋势,且光刻胶厚度每增加 1 μm ,D1CD 增加约 2.6 μm ;且光刻胶厚度在 2.0 μm 时,D1CD 均一性最好,其 3 倍标准差约 0.222。不同光刻胶厚度下 D1CD 的分布如图 4

所示,所有厚度的 D1CD 均服从正态分布,光刻胶厚度为 2.0 μm 时,D1CD 在 6.4 μm 附近分布最集中。

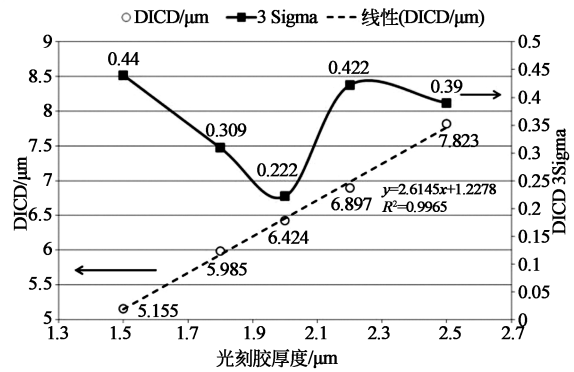


图 3 不同光刻胶厚度下的 D1CD 趋势

Fig.3 D1CD trend in different photo resist thickness

在曝光阶段,光照射到光刻胶上表面,光刻胶上表面对光进行吸收,光刻胶发生变性。沿着光刻胶厚度方向,光透过光刻胶上表面向下传输,光强逐渐衰减。最终形成光刻胶上表面受辐射最强,下部光刻胶所受辐射最弱,中部光刻胶所受辐射逐渐递减的态势。其详细情况如图 5 所示:光刻胶浅色部分代表吸收辐射强度大,深色部分表示吸收辐射强度较小,沿着光刻胶厚度方向,吸收的辐射强度逐渐减弱。吸收辐射的强度与光化学程度呈正相关关系,吸收辐射强度大,光化学反应越强烈,显影速度越快,正性光刻胶的 D1CD 也就越小。光刻胶膜厚增加,其底部的显影速度慢,最终导致显影后的 D1CD 增加。

光刻胶厚度与锥角的关系如图 6 所示,随着

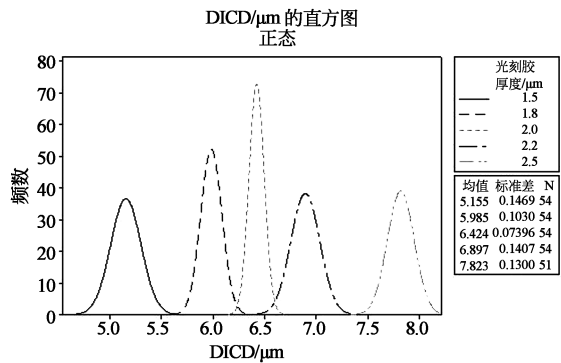


图 4 不同光刻胶厚度下的 D1CD 分布

Fig.4 D1CD distribution of different photo resist thickness

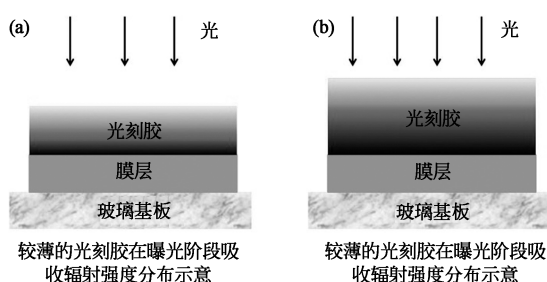


图 5 光照强度沿厚度方向衰减示意

Fig.5 Attenuation of light intensity along photoresist thickness direction

光刻胶厚度的增加,光刻胶底部一直保持锥角形貌,光刻胶顶部逐渐由锐角向直角过渡并最终形成钝角。光刻胶顶部形成直角或者钝角,这会导致光刻胶的重心升高,有光刻胶塌陷的风险^[6]。

曝光阶段,在沿光刻胶厚度方向存在辐射梯度,引发光化学反应强度的梯度,上部的光刻胶显影速度快,而下部光刻胶显影速度慢,最终形成了上部光刻胶锥角大而下部光刻胶锥角小的截面。同时,在 VCD 阶段,光刻胶中的溶剂通过光刻胶上表面逐渐挥发,顶部光刻胶处的溶剂挥发最快,故顶部光刻胶最致密。在显影阶段,致密的光刻胶显影速度慢,这也会导致顶部光刻胶的锥角偏大。当光刻胶厚度增加,沿光刻胶厚度方向接收辐射剂量和致密度差异增加,故光刻胶顶部最终形成了图 6 中的直角或钝角。

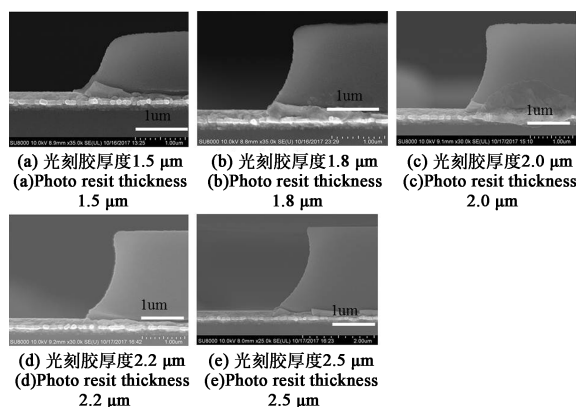


图 6 不同光刻胶厚度下的锥角形貌

Fig. 6 Taper appearance of different photoresist thickness

综合上述,光刻胶厚度增加,会导致 DICD 增加,顶部光刻胶的锥角会逐渐由锐减演变为钝角。当光刻胶厚度增加,需增加曝光剂量,才能确保获

得生产所需的 DICD 和锥角。

3.2 曝光剂量对 DICD 和锥角的影响

在曝光阶段,主要通过调节曝光剂量(Dose)和曝光时间控制效果。曝光剂量乘以曝光时间便是实际的曝光能量。从图 7 中可以看出,曝光剂量增加,DICD 呈线性下降,每增加 1 个曝光剂量,DICD 下降约 0.08。曝光剂量与锥角的关系如图 8 所示,曝光剂量在一定范围内,锥角保持稳定;但曝光剂量增加,锥角会在某一个曝光剂量形成突变形式的增加。如图所示,曝光剂量在 37~38 范围,锥角突然增加 3,曝光剂量 37~38 可作为锥角变化的阈值。

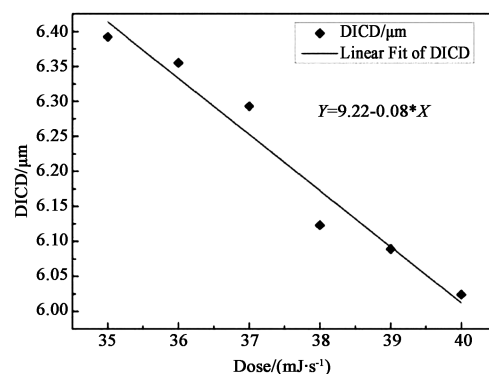


图 7 不同曝光剂量条件下的 DICD 趋势

Fig.7 DICD trend in different exposure dose

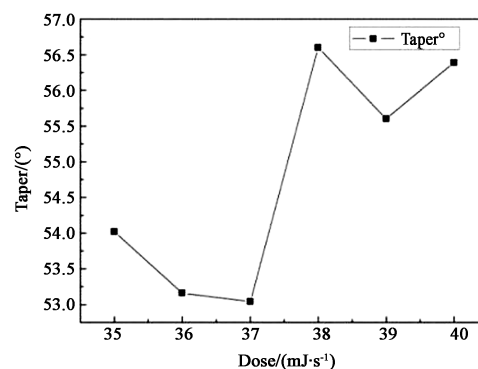


图 8 不同曝光剂量下的锥角趋势

Fig.8 Taper trend in different exposure dose

曝光剂量增加,光刻胶接收的辐射量增加,光化学反应越充分,显影时显影速率越快,故曝光剂量增加,DICD 下降。如图 9 所示,曝光剂量增加,虽然在厚度方向存在光照强度衰减,但底部的光刻胶接受的辐射强度会增加,光化底部学反应增强,底部显影速度增加,故锥角增加。

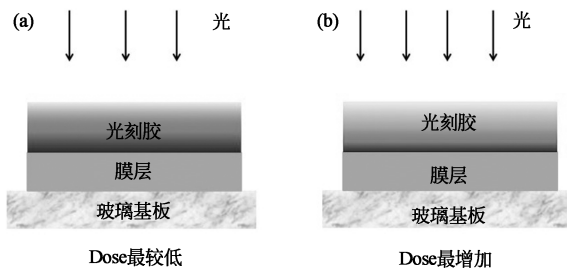


图 9 不同曝光剂量下光刻胶吸收光强示意图

Fig.9 Schematic diagram of absorption intensity of photo-resist under different exposure dose

综上,对于正性光刻胶,增加曝光剂量,DICD减小,锥角呈上升趋势。在实际生产中,可以结合产品设计的 DICD 和 DICD 关于曝光剂量的回归方程,推算出合适的曝光剂量。

3.3 曝光 Z 值对 DICD 和锥角的影响

在曝光阶段,高压汞灯作为光源发光,光透过掩膜板上的空隙到达透镜,再由透镜投射到玻璃基板,玻璃基板与透镜的保持合适的距离,曝光光路示意图 10。

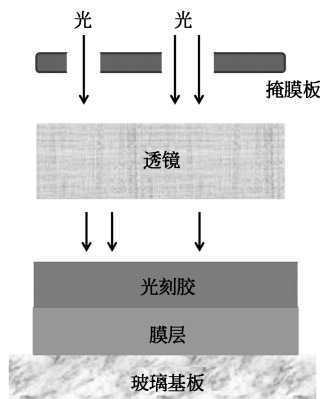


图 10 曝光光路图

Fig.10 Light path diagram in exposure

曝光机所能达到的最小尺寸被称作分辨率,曝光机能分辨的尺寸越小,性能越优异。分辨率如公式(1)所示, K_1 是常数, NA 是数值孔径, λ 代表光源所发光的波长,由此可见:增加数值孔径、降低光的波长可以有效改善分辨率。在曝光阶段,玻璃基板上方的透镜(TFT行业称之为UM)起到聚光、聚焦的作用,这使得玻璃基板必须与透镜保持合适的距离才能正常曝光;否则光线聚焦异常,最终得到异常的图形;在此,合适的距离范围则被称作焦深(DOF)。焦深如公式(2)

所示, K_2 代表常数, NA 是数值孔径, λ 代表光源所发光的波长。由焦深公式可以看出,增加 NA 、降低 λ 会导致焦深减小。实际的曝光工艺制程中,设备或环境均会产生震动,玻璃基板移动的位置亦会有误差,承载玻璃基板的曝光机台也会有微小的高低起伏,如果焦深过小,上述因素会导致基板上部分区域脱离焦深范围,最终形成异常图形。将公式(2)带入公式(1)中,得到公式(3)。通过调整光源波长 λ 和数值孔径 NA 来改善分辨率,但是这样的技术手段同时导致焦深 DOF 变窄,故波长和数值孔径参数的优化须在分辨率和焦深两个方面权衡^[7,10-11]。

$$R = K_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

$$DOF = K_2 \frac{\lambda}{(NA)^2}, \quad (2)$$

$$R = K_1 * \sqrt{\frac{\lambda}{K_2}} * \sqrt{DOF}. \quad (3)$$

在实际曝光阶段,玻璃基板可以在竖直方向上细微移动,但移动位置必须在焦深范围以内。TFT行业以高度常量 Z 值反应焦深。焦深的示意如图 11 所示,光线经过透镜后汇聚,并在 $Z=0$ 处形成最佳焦平面,此处光的能量最大;最佳焦平面上方记作“+”方向,由最佳焦平面往正方向移动,光的强度逐渐减弱;在最佳焦平面下方,记作“-”方向,由最佳焦平面方向往负方向移动,光照强度也逐渐减弱^[8]。

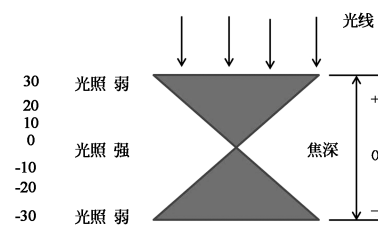


图 11 曝光焦深示意图

Fig.11 Depth of focus in exposure

Z 值在 $-30 \sim 30 \mu\text{m}$ 范围变化,DICD与 Z 值的关系如图 12 所示,DICD 差异不超过 $0.2 \mu\text{m}$,可以忽略,故 Z 值对 DICD 的大小无影响; Z 等于 0 时,DICD 的 3 倍标准差(3 Sigma)最小,即最佳焦平面处 DICD 的均一性最好。 Z 值与锥角的关系如图 13 所示,采用区间图表示,即某 Z 值对应的最小锥角和最大锥角用线段连接而形成区

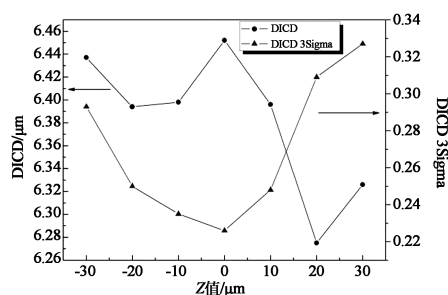


图12 不同Z值下的DICD趋势

Fig.12 DICD trend of different Z value

间。从图13中可以看到,最佳焦平面 $Z=0$ 处,锥角均一性最好; Z 值由0运动至 $-30\mu\text{m}$,锥角呈下降趋势; Z 值在 $0\sim30\mu\text{m}$ 范围,锥角呈波动状态。

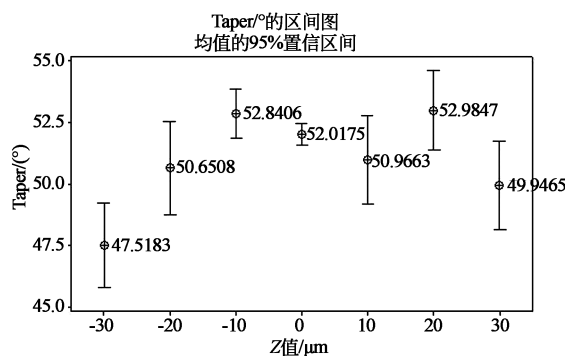


图13 不同Z值下的锥角趋势

Fig.13 Taper trend of different Z value

Z 值在 $0\sim-30\mu\text{m}$ 范围内,因物镜的聚焦作用,光刻胶顶部的光照强度比底部强;同时,由于光刻胶的吸收作用,光照强度在厚度方向上逐渐衰减;上述两个效应叠加,顶部光刻胶接受到的光照强度更强,光化学反应更剧烈;基板由最佳焦平面向负方向运动时,整体的光照强度减弱,但底部光刻胶接收的光照强度下降得更多,顶部和底部接收的光照强度差异扩大;故在显影阶段,顶部光刻胶的显影速度更快,侧向显影速度也随之增加,故锥角呈下降趋势。 Z 值在 $0\sim30\mu\text{m}$ 范围内,光刻胶顶部的光照强度比底部弱;同时,考虑光刻胶的吸收,沿着厚度向下,光照强度将逐渐减弱;在这样的情况下,透镜的聚光作用和光刻胶吸收光照强度的效应相互抵触,照成 Z 值 $0\sim30\mu\text{m}$ 范围内对应的锥角出现波动。

综合上述,在曝光阶段, Z 值不会影响DICD大小,但 $Z=0$ 时,DICD和锥角的均一性最好。当 Z 逐步向负方向移动时,PR锥角逐渐减小。

对于TFT制程的硅岛刻蚀或者沟道刻蚀工艺制程,较小的锥角有利于刻蚀;故在硅岛或沟道的曝光阶段,可适当将 Z 值往负方向调节,进而获得较小的锥角。

3.4 显影时间对DICD和锥角的影响

显影同曝光密切相关,通常曝光剂量增加,显影时间则缩短;而曝光剂量减小,则显影时间增加。

显影时间在 $60\sim110\text{ s}$ 范围变化,DICD与锥角的趋势如图14所示:显影时间延长,DICD逐渐减小,DICD的均一性在显影90 s以后区域稳定,锥角则呈上升趋势。如图15所示,显影时间每增加10 s,DICD下降约 $0.3\mu\text{m}$,锥角则增加约 1.7° 。结合上述趋势,可以推测,显影时间增加,锥角尖端的光刻胶逐步被显影液侵蚀,造成DICD减小、锥角增加。

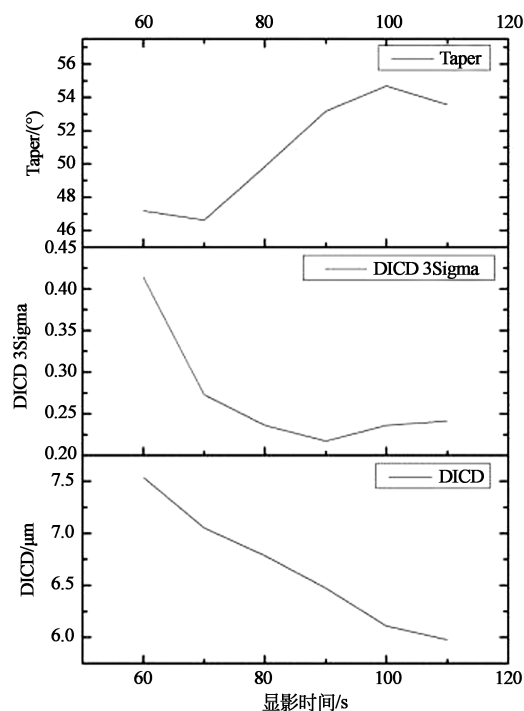


图14 显影时间与DICD、锥角的关系。

Fig.14 Relationship between development time and DICD, taper.

图15给出了DICD和锥角关于显影时间的回归方程, X 代表显影时间, Y 分别代表DICD和锥角。在量产显影条件中,玻璃基板置于显影区间的传动轴上,区间内的喷头喷出显影液,传动轴则将基板朝前方传输。传动轴的转速决定了基板在显影区间传输时间,也决定了基板的显影时间。

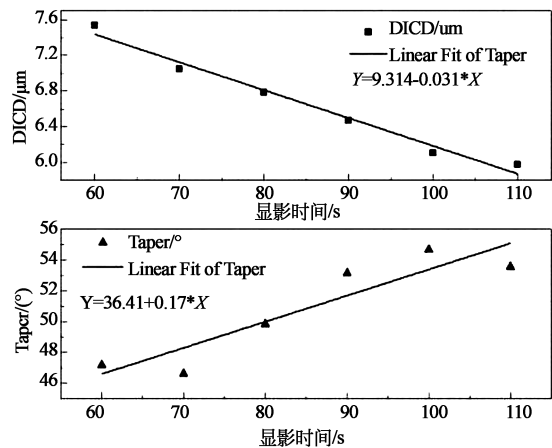


图 15 DICD、锥角关于显影时间的回归方程。
Fig.15 Regression equation for development time.

在量产条件下,通过设定传动轴的转速来控制显影时间;但是因误差、打滑等原因,实际显影时间与设定的显影时间存在差异。对量产显影时间进行统计分析,其结果如图所示,设定显影时间为 89 s,统计 3 700 张基板的显影时间,显影时间服从正态分布且均值为 90.19 s。在明确显影时间统计分布、确定显影时间与 DICD、锥角的回归方程后,通过水晶球软件进行蒙特卡罗计算,评估量产显影时间下 DICD、锥角的分布概率。蒙特卡罗计算步骤如图 16 所示,计算次数设定为 2 000 次。图 17 反应了蒙特卡罗计算结果,可以看到,在量产显影时间下,DICD 分布在 6.4~6.6 μm 范围的概率是 96.5%;锥角分布在 51~52°的概率是 88.32%。

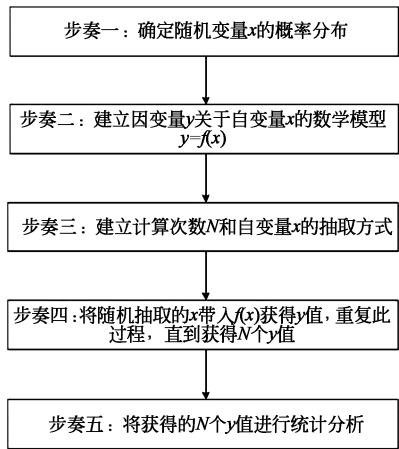


图 16 蒙特卡罗计算步骤
Fig.16 Monte Carlo calculation steps

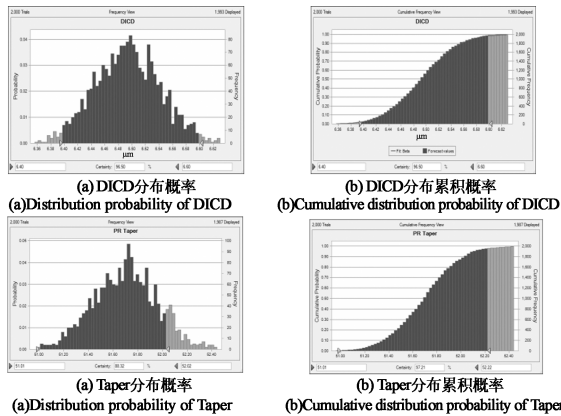


图 17 显影制程蒙特卡罗计算结果
Fig.17 Result of Monte Carlo calculation for development process

综上所述,显影时间增加,DICD 呈线性减小,而锥角呈线性增加。在实际生产过程中,按照产品要求的锥角和 DICD,结合显影时间的回归方程,可以反推出所需的显影时间。

3.5 光刻制程锥角形成模型推测

在光刻制程的显影阶段,显影液沿光刻胶厚度方向逐渐侵蚀,侵蚀方向各项同性。但是,在侵蚀效果方面,顶部的侵蚀速率会逐步降低,这样最终导致显影后的锥角逐渐增加。增加曝光剂量、Z 值逐步由负方向靠近最佳焦平面、增加显影时间会使这样的趋势更加明显。图 18 为显影过程中锥角形成过程推测。

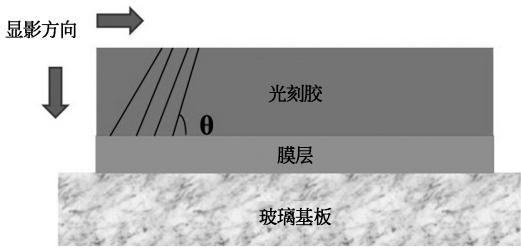


图 18 显影过程中锥角形成过程推测
Fig.18 Predicting formation process of taper during development

4 结 论

实验结果表明,光刻胶的 DICD 和锥角受到膜层厚度、曝光剂量、Z 值、显影时间的影响。可以通过光刻工艺调节来控制 DICD 和锥角,也可

在确定的回归方程基础上,结合产品设计的 D1CD、锥角值反推所需的工艺参数:

光刻胶厚度增加会导致 D1CD 增加,且造成光刻胶顶部锥角增大,在曝光阶段通过增加曝光剂量可以获得设计所需的 D1CD 和锥角。

曝光剂量的增加导致 D1CD 呈线性减小,锥角呈上升趋势。结合曝光剂量和 D1CD 的回归方程,可以在实际生产中,根据产品设计的 D1CD 值反推曝光剂量。

焦深范围内,D1CD 均值无变化,但基板在最佳焦平面($Z=0$)曝光,D1CD 和锥角的均一性最佳。 Z 值朝负方向移动,锥角呈减小趋势,此种情况适用于需求较小锥角的硅岛或沟道光刻制程。

显影时间增加,D1CD 呈线性减小,锥角呈线性增加。以产品设计的 D1CD、锥角值为基准,结合显影时间的回归方程,可以反推所需的显影时间。

参 考 文 献:

- [1] 马亮.薄膜晶体管液晶显示器四次光刻工艺研究[D].天津:天津大学,2010.
MA L. Research of TFT-LCD four mask process [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [2] 刘丹,秦刚,蔡卫超,等.Mo/Al/Mo 结构电极的坡度角和关键尺寸差研究[J].液晶与显示,2017,32(11):877-885.
LIU D, QIN G, CAI W C, *et al.* Profile and critical dimension bias of Mo/Al/Mo electrode [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(11): 877-885. (in Chinese)
- [3] 王军.光刻工艺中聚酰亚胺层光阻减量和线宽均匀性研究[D].天津:天津大学,2011.
WANG J. Litho polyimide layer resist reduction and CD uniformity research [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [4] 江波.通过调整曝光镜头改善产品线宽均匀度的研究[D].成都:电子科技大学,2014.
JIANG B. A research for improve CD uniformity by lens adjustment [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [5] 张玉虎,岳浩,王军帽.TFT 光刻 D1CD 均一性改善优化[J].液晶与显示,2016,31(10):929-935.
ZHANG Y H, YUE H, WANG J M. Improvement of uniformity of TFT lithography D1CD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(10): 929-935. (in Chinese)
- [6] 于明岩,施云波,赵士瑞,等.应用微波技术抑制光刻胶图形的坍塌与黏连[J].光学 精密工程,2015,23(1):149-156.
YU M Y, SHI Y B, ZHAO S R, *et al.* Suppression of collapse and adhesion of photoresist based on microwave heating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 149-156. (in Chinese)
- [7] 金晓刚.光刻工艺中的焦距异常发生原因分析及解决办法 [D].上海:复旦大学,2009.
Jin X G. Cause analysis and solution of focal length anomaly in lithography process [D]. Shanghai: Fudan University, 2009. (in Chinese)
- [8] 姜立娟,李响.光刻线宽精度控制的研究[J].微处理机,2005(2):12-13.
JIANG L J, LI X. The rearch of photolithography line wiclth precision control [J]. *Microprocessors*, 2005(2): 12-13. (in Chinese)
- [9] 章磊,周畅.先进封装步进投影光刻机焦深研究[J].电子工业专用设备,2013,42(S1):21-24,54.
ZHANG L, ZHOU C. DOF analysis of advanced package stepper exposure tool [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2013, 42(S1): 21-24, 54. (in Chinese)
- [10] 毛岸坤.IC 制造中硅片边缘上光刻工艺的波动问题研究[D].上海:复旦大学,2011.
MAO A K. Research on the fluctuation of lithography process on the edge of silicon wafer in IC manufacturing [D]. Shanghai: Fudan University, 2011. (in Chinese)
- [11] 陈安.曝光光学系统性能对光刻性能影响的研究[D].成都:中国科学院光电技术研究所,2013.
CHEN A. Impact of exposure optical system performance on the performance of lithography [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

作者简介:



刘 丹(1988—),男,重庆忠县人,硕士,高级工程师,美国项目管理协会PMP,工信部可靠性工程师,2014年于四川大学取得硕士学位,主要从事光刻、刻蚀等方面工作。E-mail: liudan_cq@boe.com.cn



方 亮(1968—),男,四川乐山人,教授,博士生导师,教育部新世纪优秀人才,重庆市表面工程学会副理事长,重庆市材料学会常务理事,主要研究方向为光电薄膜材料与器件、纳米储能新材料、耐磨耐蚀表面处理技术、半导体照明。E-mail: lfang@cqu.edu.cn