

文章编号:1007-2780(2018)08-0653-08

光刻胶段差对光刻图形的影响与改善

张玉虎*, 李亚文, 刘小波, 马小辉, 张 旭

(合肥京东方光电科技有限公司, 安徽 合肥 230012)

摘要: TFT 光刻制程中, 光刻胶段差使光胶在同一个光刻平面上, 各区域的光刻程度不同, 严重影响着光刻图形的质量。文章从光刻胶段差对光刻图形影响的原因进行分析, 根据光强在投影光刻机光刻系统中焦点附近与光刻胶内部的变化特点, 推导并计算出光刻胶段差区域内光强变化量为零时, 光刻系统中光刻平面所应处于的位置, 同时结合当前光刻系统焦平面的位置, 计算出光刻平面的调整量, 并以该调整量对当前光刻平面进行调整。结果表明: 对于极限分辨率为 $2.41\ \mu\text{m}$ 的投影光刻机, 要使厚 $0.52\ \mu\text{m}$ 的光刻胶段差内光强变化量为零, 光刻平面调整量为 $9.434\ 42\ \mu\text{m}$, 且对光刻平面调整后 $10\ \mu\text{m}$ 后, 在 DICD(Develop Inspection Critical Dimension)变化量较小的情况下, 可显著改善沟道长为 $2.5\ \mu\text{m}$ 的 GOA(gate drive on array)区域的光刻胶残留。

关 键 词: 段差; 光刻胶; 光刻; 光刻面; 光强

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183308.0653

Effect of segment difference of photoresist on lithography pattern and improvement

ZHANG Yu-hu*, LI Ya-wen, LIU Xiao-bo, MA Xiao-hui, ZHANG Xu

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

Abstract: In the TFT lithography process, the segment difference of the photoresist make the lithography level of the each region of the photoresist be different on the same lithography plane, which seriously affect the quality of the lithography pattern. In this paper, the reason for the effect of the segment difference of photoresist on the lithography pattern is analyzed. Based on the characteristics of the light intensity change near the focal point of the lithography system of the projection lithography machine and the internal of the photoresist, the position of the lithography plane in the lithography system is calculated when the light intensity change is zero in the area of the segment difference of the photoresist. Combining with the position of the current focal plane in the lithography system, the adjustment amount of the lithography plane is calculated, and the current lithography plane is adjusted by the adjustment amount. The results show, for the projection lithography machine of the $2.41\ \mu\text{m}$ limit resolution, if the light intensity change of the $0.52\ \mu\text{m}$ segment difference of the photoresist is zero, the lithography plane need to adjust $9.434\ 42\ \mu\text{m}$. By adjusting $10\ \mu\text{m}$ for the lithography plane, the change amount of the DICD(Develop Inspection Critical Dimension) is little, but for the GOA

收稿日期: 2018-05-07; 修订日期: 2018-06-06.

* 通信联系人, E-mail: zhangyuhu@boe.com.cn

(gate drive on array) channel which length is $2.5\ \mu\text{m}$, the improvement of the photoresist remain is significant.

Key words: segment difference; photoresist; lithography; lithography plane; light intensity

1 引言

薄膜晶体管-液晶显示器(TFT-LCD)是当前主要使用的液晶显示器,随着 TFT-LCD 的迅速发展,对其分辨率、视角、响应速度、开口率等要求也越来越高^[1-2],从而引起薄膜晶体管(Thin Film Transistor, 以下简称 TFT)器件的线宽和间距也趋于更细、更窄,光刻工艺后形成的光刻胶(photoresist, PR)图形(pattern)及线宽宽度(Develop Inspection Critical Dimension, 以下简称 DICD)的工艺容限也越来越小^[3-5],因此提升光刻工艺容限在目前 TFT 生产中的重要性也越来越高。

在 TFT 光刻制程中,由于 PR 底部受到基板上镀膜层段差的影响,使得 PR 涂覆后,在 PR 底部也会存在相同量的反向段差,相比于无段差的 PR,有底部反向段差的 PR,在同一个光刻平面进行光刻时,会出现不同段差区域 PR 光刻程度不同的差异,从而引起不同区域光刻 pattern 的差异,因此光刻工艺容限更加狭窄。目前提升光刻工艺容限主要是通过改变涂胶、光刻、显影、前烘、后烘的条件及光刻机的调焦调平等方法^[6],但這些方法在实际生产中由于长期进行着不断的循环改善工作,使得改善空间有限,为应对 TFT 器件更细、更窄的线宽和间距,提升有段差的 PR 光刻工艺容限,已成为必要。

TFT 光刻工艺中,光刻机光刻系统具有:在垂直于光刻焦平面方向上,焦点附近区域,单点光强沿靠近焦点方向逐渐变大,远离焦点方向逐渐减小;而在 PR 内,光强是逐渐减弱的,因此,对于有段差的 PR 光刻时,为使得不同段差区域的 PR 在同一个光刻平面上,各区域的光刻程度一样,可通过调整光刻平面位置,使得段差区域内光强增量为零,即使段差区域内光刻系统的单点光强增加量与 PR 内的光强减少量相同,从而可达到消除段差区域对光刻程度的影响的目的,本文以此为依据,通过调整 PR 光刻平面位置,改善了不同段差区域 PR 光刻程度的

差异性,对于接近投影光刻机分辨率的线宽图形,能有效改善光刻胶残留不良,从而提升了有段差 PR 的光刻工艺容限。

2 PR 段差对光刻图形影响的原因及改善原理

2.1 投影扫描光刻机工作原理

本文采用 6G 佳能投影扫描光刻机(E732 系列,曝光使用 i、j、h 线,极限分辨率为 $2.41\ \mu\text{m}$),图 1 投影扫描光刻机工作示意图,曝光时,UV 光经过掩模板机台(mask stage)上的掩模板(mask)后形成各级衍射光进入投影物镜成像系统,投影物镜对入射的衍射光起汇聚作用,汇聚后的衍射光照射在 TFT 基板上的光刻胶上,为保证能够形成清晰的图像,光刻机会进行调焦调平工作,使得 PR 位于投影物镜焦点上,同时 mask stage 与 plate stage 同时同方向进行 scan 运动,从而达到 Mask 整个图像清晰的复制在 TFT 基板上。

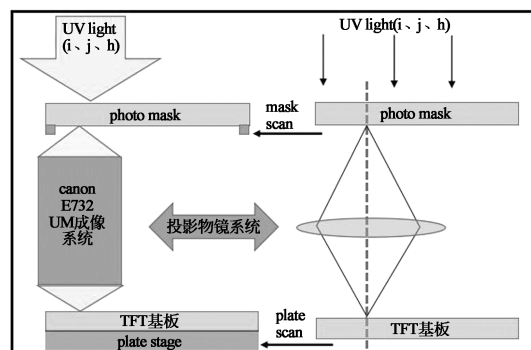


图 1 投影光刻机工作原理

Fig. 1 Working principle of the projection lithography machine

2.2 PR 段差对光刻图形影响的原因

TFT 光刻制程需要进行多次光刻工艺才能完成^[7],每次光刻工艺均要在当前层的镀膜基板上涂覆 PR。由于 PR 具有流动性^[8],使 PR 涂覆后 PR 顶部能够处于同一平面;但 PR 底部的平坦度会受到镀膜层影响,当镀膜层存在段差时,PR 底部会形成反向段差(图 2、3)。

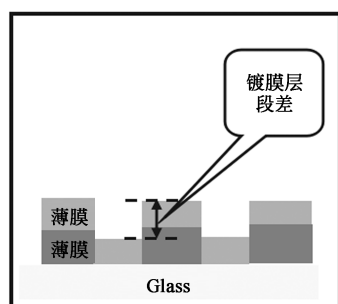


图 2 镀膜层段差

Fig.2 Segment difference of film

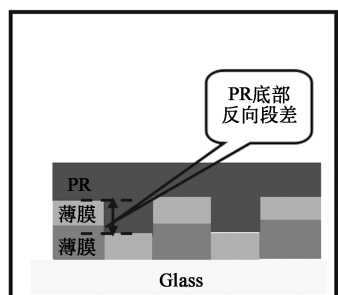


图 3 PR 底部反向段差

Fig.3 Reverse segment difference of PR bottom

光刻机进行光刻时,首先会测量 PR 顶部表面与光刻系统焦平面的距离,并在光刻时将 $Z_{\text{顶}}$ 移动至光刻系统焦平面位置(图 4),即光刻机会将系统焦平面位置作为光刻平面位置,所以光刻平面位置是唯一的。对于有底部段差的 PR, $Z_{\text{顶}}$ 同处于一个平面,故 $Z_{\text{顶}}$ 各区域接收到的光强($I_{\text{顶部}}$)处处相同(图 5),但 PR 底部由于段差的存在,会引起 $Z_{\text{底上}}$ 与 $Z_{\text{底下}}$ 面不能同时位于同一个光刻平面位置,从而引起 $Z_{\text{底上}}$ 与 $Z_{\text{底下}}$ 面的光强($I_{\text{底上}}$ 与 $I_{\text{底下}}$)存在差异(图 6)。 $I_{\text{顶部}}$ 相同, $I_{\text{底上}}$ 与 $I_{\text{底下}}$ 不同,必然会导致两段差面上 PR 光刻程度的差异,最终影响着光刻图形的质量。

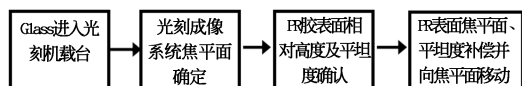


图 4 光刻系统调焦调平流程

Fig.4 Process of lithography system for focusing and leveling

2.3 改善原理

由上述分析知,要改善 PR 段差对光刻图形的影响,就必须消除 PR 两段差面的光强差异,可通过保证光强在两段差面间($Z_{\text{底上}}$ 至 $Z_{\text{底下}}$ 区间)的

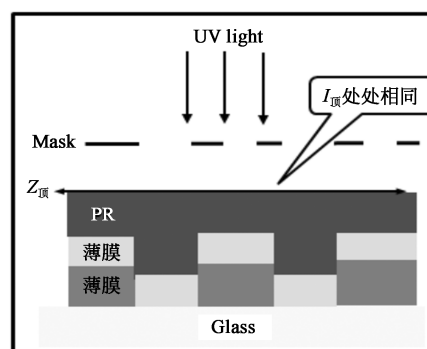


图 5 PR 顶部

Fig.5 PR top

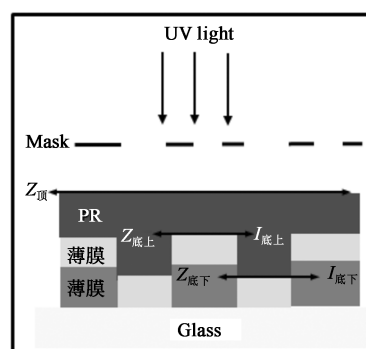


图 6 PR 底部

Fig.6 PR bottom

增加量为零来实现。

TFT 光刻时,对于光刻机光刻系统而言,在垂直于光刻焦平面方向上,焦点附近区域,单点光强变化具有向焦点方向移动时逐渐变大,向远离焦点方向移动时,逐渐减小(图 7)。对于 PR 而言,由于光与感光剂(photoactive compound, PAC)发生反应,光强在 PR 内随 PR 深度增加逐

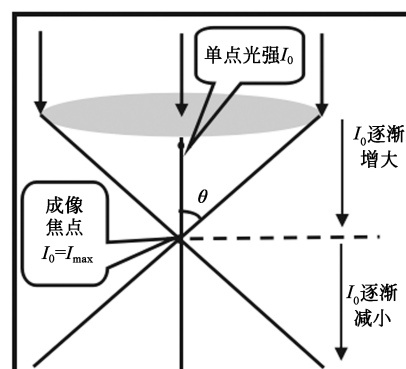


图 7 光刻系统内光强变化

Fig.7 Change of light intensity for lithography system

渐减弱(图 8)。根据光强在光刻系统中焦点附近区域与 PR 内的变化规律,PR 光刻时必然可以找到一个位置,在此位置处 PR 开始进行光刻时,从 PR 光刻开始位置到光刻结束位置间的光强变化量为零。

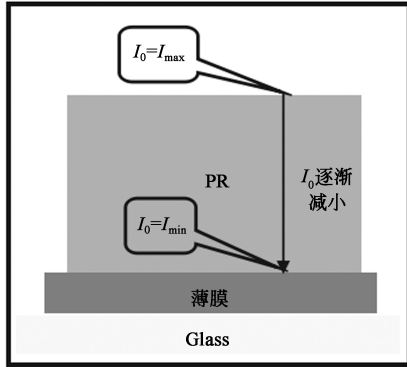


图 8 PR 胶内光强变化

Fig.8 Change of light intensity in PR

2.3.1 光刻系统内光强变化量计算

一定分辨率的光刻机光刻系统的数值孔径角(θ ,图 9)是定值,为进行计算推导,假设(图 9):

(1)光刻系统的焦点定为系统垂直方向的 0 点位置,

(2)光刻系统中光通量(Φ)无损失;

(3)垂直于焦平面的平面圆 Z_1 、 Z_2 距光刻系统焦点的垂直距离分别为 R_1 、 R_2 ;且 $R_1 > R_2 > 0$;

(4)光通量在面 Z_1 、 Z_2 内均匀分布。

则 P_1 到 P_2 的光强变化量 ΔI_1 可由以下推导得到:

Z_1 的面积为:

$$S_1 = \pi (R_1 \tan \theta)^2. \quad (1)$$

Z_2 的面积为:

$$S_2 = \pi (R_2 \tan \theta)^2. \quad (2)$$

P_1 点光通量为:

$$\Phi_1 = \frac{\Phi}{S_1}. \quad (3)$$

P_2 点光通量为:

$$\Phi_2 = \frac{\Phi}{S_2}. \quad (4)$$

光强计算公式^[9]为:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}, \quad (5)$$

其中 $d\Omega$ 为立体角元:

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2}, \quad (6)$$

其中: dS 为球面微圆面积, r 为球面半径。

将 P_1 、 P_2 两点作为两个无限小的闭合曲面体时, $\Omega = 4\pi$, 则 P_1 、 P_2 点光强为:

$$I_{P_1} = \frac{\Phi_1}{4\pi} = \frac{\Phi}{4\pi S_1} = \frac{\Phi}{4(\pi R_1 \tan \theta)^2}, \quad (7)$$

$$I_{P_2} = \frac{\Phi_2}{4\pi} = \frac{\Phi}{4\pi S_2} = \frac{\Phi}{4(\pi R_2 \tan \theta)^2}, \quad (8)$$

则 P_1 到 P_2 的光强变化量 ΔI_1 为:

$$\Delta I_1 = I_{P_2} - I_{P_1} = \frac{\Phi}{4(\pi R_2 \tan \theta)^2} - \frac{\Phi}{4(\pi R_1 \tan \theta)^2}. \quad (9)$$

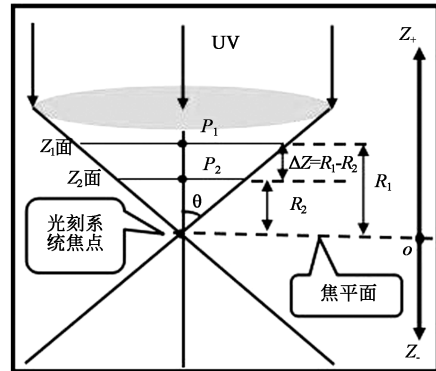


图 9 光刻系统光强计算

Fig.9 Calculation of light intensity in lithography system

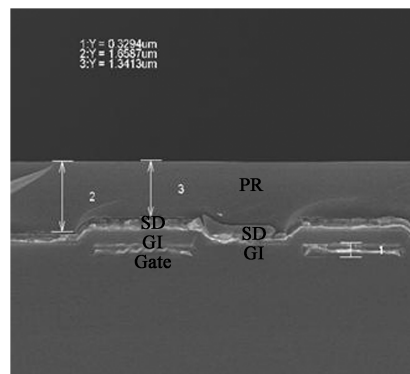


图 10 光刻前 PR 胶 SEM 照片

Fig.10 SEM picture of PR before lithography

2.3.2 PR 内光强变化量计算

光强在 PR 内部衰减时,在不考虑反射和散射前提下,PR 内光强衰减量 ΔI_2 可基于 DILL 模型^[10](式 10)进行计算得到(式 11):

$$\frac{\partial I}{\partial Z} = -I(AM + B), \quad (10)$$

$$\Delta I_2 = -I(AM + B)\Delta Z, \quad (11)$$

其中: I 为光在PR内开始发生光化学反应时的光强,例如,如果PR从图9的 p_1 开始发生光化学反应,那么 I 值与 I_{P_1} (式7)相等;

A、B为DILL参数;

ΔZ 为光在PR内发生光化学反应的PR的距离,针对于本文的改善推导要求,对于有底部段差的PR, ΔZ 取PR底部段差值的绝对值(图9, $\Delta Z = R_1 - R_2$),同时由图10可以看出 ΔZ 大小也是当前镀膜层的段差值。

M 为光化学反应时PAC所剩相对浓度,可以由式(12)近似计算得到。

$$M = \frac{m_z}{m_0} \approx \frac{h_{\text{剩}}}{h_{\text{总}}}. \quad (12)$$

m_0 与 m_z 分别为PR中PAC的初始浓度与开始发生光化学反应时的浓度; $h_{\text{剩}}$ 与 $h_{\text{总}}$ 分别为未发生光化学反应的PR厚度与PR总的厚度。

2.3.3 PR段差面接收相同光强条件计算

针对改善要求,设定光刻胶底部段差面 $Z_{\text{底下}}$ 位于光刻系统的 Z_1 面, $Z_{\text{底下}}$ 位于光刻系统的 Z_2 面,由上述分析知,要使得光刻过程中 $I_{\text{底上}} = I_{\text{底下}}$,必须要满足式(13)条件:

$$I_1 + I_2 = 0, \quad (13)$$

将式(9)和式(11)及 $R_1 - R_2 = \Delta Z$ 带入式(13)可得:

$$R_2 = \frac{\Delta Z}{-1 - [1 + (AM + B) \cdot \Delta Z]^{\frac{1}{2}}}, \quad (14)$$

或

$$R_2 = \frac{\Delta Z}{-1 + [1 + (AM + B) \cdot \Delta Z]^{\frac{1}{2}}}, \quad (15)$$

当 R_2 取式(13)值时,则由 $0 > R_2 = R_1 - \Delta Z > -\Delta Z/2$,可得 $\Delta Z > R_1 > \Delta Z/2 > 0$,这与 $R_1 > R_2 > 0$ 的推导假设相矛盾,故 R_2 取式(15),为调整光刻平面后PR底部($Z_{\text{底下}}$)在光刻系统中距离焦点的位置。

2.3.4 光刻平面调整量计算

由上述知,光刻机光刻时会把PR的顶部表面($Z_{\text{顶}}$)移动至光刻系统焦平面处,即光刻平面未调整前, $Z_{\text{顶}}$ 面与光刻系统焦平面重合。设光刻系统焦平面位置为 $Z_{\text{焦}}$,PR膜厚为 Z_{PR} ,则改善后光刻平面调整量 $Z_{\text{调}}$ 为:

$$Z_{\text{调}} = R_2 + Z + Z_{\text{PR}} - Z_{\text{焦}}. \quad (16)$$

3 改善流程

要改善PR段差对光刻图形的影响,首先要确认光刻时PR类型、膜厚及当前镀膜层段差等相关参数,并结合当前光刻机焦平面位置,计算出当前光刻平面调整量 $Z_{\text{调}}$,然后以该调整量对光刻机进行相关调整,最后通过产品确认调整情况,改善流程示意图如图11。

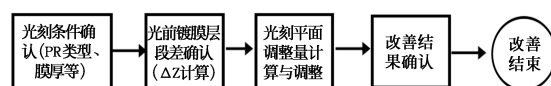


图11 改善流程示意图

Fig.11 Diagram of improvement process

实验选取某型号产品的像素(pixel)、GOA (gate drive on array,沟道长:2.5 μm)区域线宽分别大于和小于光刻机的分辨率,以便于更加明显看出产品调整后的结果。表1为该型号产品源漏极(source drain layer,SD)层光刻前相关参数,其中栅极(Gate)、半导体层(ACT)镀膜膜厚分别

表1 光刻条件

Tab.1 Lithography conditions

正性光刻胶 膜厚 (μm)	正性光刻胶 膜类型	显影 时间 (s)	烘烤温度 ($^{\circ}\text{C}$)	光刻胶 DILL A (μm^{-1})	光刻胶 DILL B (μm^{-1})	镀膜层段差 ΔZ (μm)
1.5	AZ	60	前烘:110 后烘:135	0.575 3	0.056 8	0.52

表 2 光刻平面调整量
Tab.2 Adjustment of Lithography plane

$h_{\text{剩}} = \Delta Z (\mu\text{m})$	$h_{\text{总}} (1.5 + Z_{\text{剩}}, \mu\text{m})$	$M (\frac{h_{\text{剩}}}{h_{\text{总}}})$	R_z 值 (μm)	光刻机 焦平面 (μm)	光刻机 焦深 (μm)	光刻平面 调整量 $Z_{\text{调}} (\mu\text{m})$
0.52	2.02	0.257 426	10,014 42	2.6	±24	9.434 42

为 340 nm、180 nm,SD 镀膜层段差为 Gate 与 ACT 膜厚引起,可得 ΔZ 为 0.52 μm ;表 2 为 SD 光刻时光刻平面调整量相关参数及计算结果。

4 结果与分析

4.1 实验结果

根据上述计算的光刻机光刻平面调整量,对光刻平面调整了 +10 μm ,并与光刻平面不调整(normal)时,该产品 SD 层的 GOA 与 pixel 区域的 pattern 进行了比较(图 12、13、14、15)。由图可见,在光刻平面未调整前,该产品 GOA 区域的光刻工艺容限较小,normal 条件下(图 12、13):pixel 的 pattern 在段差区域内(①、②区域存在段差)PR 均正常完成光刻,而 GOA 的 pattern 在段差区域内(③、④区域存在段差)已出现了 PR 残留(remain);光刻平面调整 +10 μm 条件下(图 14、15):pixel 和 GOA 的 pattern 在段差区域内(⑤、⑥区域存在段差,⑦、⑧区域存在段差)均无 PR remain,因此光刻平面调整 +10 μm 比 normal 条件更优。

表 3 为光刻平面调整量分别为 normal、+10 μm 、+20 μm 条件下,SD GOA pattern 的 PR remain 情况,可见,一方面:光刻平面在 2.6 μm 与 22.6 μm 位置时出现了 PR remain,那么最佳的光

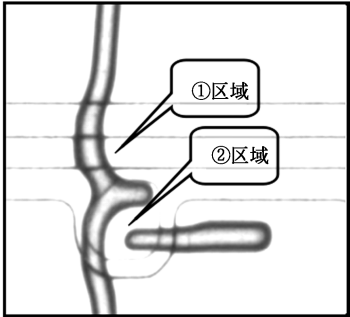


图 12 Normal 条件像素区图形
Fig.12 Pixel pattern of normal condition

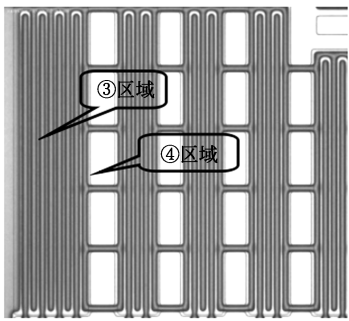


图 13 Normal 条件 GOA 区域图形
Fig.13 GOA pattern of normal condition

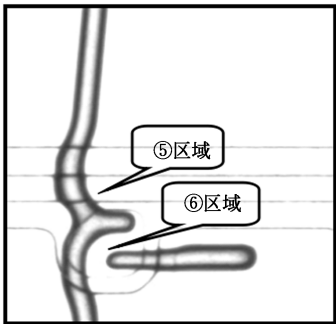


图 14 调整量+10 μm 像素区图形
Fig.14 Pixel pattern of adjustment plus 10 μm



图 15 调整量+10 μm GOA 区图形
Fig.15 GOA pattern of adjustment plus 10 μm

刻平面必然在 2.6~22.6 μm 之间,可近似取中间位置处(12.6 μm)作为最佳的光刻平面位置;另一方面:光刻平面调整量为 0 时,光刻平面位置在 2.6 μm 处,所以可计算出该产品在 normal 条件下,光刻平面移动至最佳光刻平面的调整量约为 +10 μm ,这与表 2 中计算的调整量(9.434 42 μm)相近,进一步说明了本文改善方案的可靠性。

表 3 不同光刻平面调整量下 pattern 情况

Tab.3 Pattern situation of different adjustment for Li-

thography plane			
光刻平面 调整量(μm)	光刻机焦平面 位置(μm)	光刻平面 位置(μm)	SD GOA PR remain
0		2.6	有
10	2.6	12.6	无
20		22.6	有

图 16 为不同光刻平面调整量时, pixel 区域的 SD 层 DICD(测试位置为线宽;管控值: $5.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$)结果,可以看出: normal 条件下, DICD 最小, DICD 均一性最好;随调整量的增加, DICD 逐渐变大, DICD 均一性逐渐变差;调整量对 DICD 影响较小。这是因为: normal 条件下, 光刻平面即为光刻系统焦平面, 且 pixel 区域线宽大于光刻机分辨率, 故 normal 条件下, pixel 区域的 pattern 边界最清晰, DICD 均一性最好;光刻平面经调整后, 不再处于光刻系统焦平面, 所以光刻时 PR 顶部表面接收的单点光强随调整量增加而减小, DICD 逐渐变大;光刻平面调整量均在光刻机焦深(DOF)范围内($\pm 24 \mu\text{m}$), 故 DICD 随调整量变化较小。

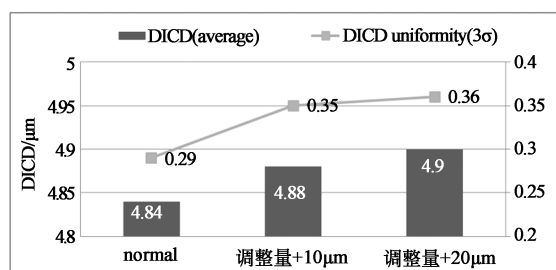


图 16 不同调整量下 DICD

Fig.16 DICD of different adjustment

4.2 GOA 区域 pattern 改善原因分析

式 15 的表达的意义是:要使得光刻时光强在 PR 厚度为 ΔZ 内的变化量为零时, 需要将 ΔZ 内的 PR 底部($Z_{\text{底下}}$)移至距离焦平面 R_2 处;通过对 R_2 的计算并调整光刻平面后, 保证了图 13 的④区域 pattern 在段差区域内(ΔZ 内)光强变化为零, 但这个区域线宽远大于试验用光刻机分辨率, 故改善效果不明显;对于图 13 的③区域而言, ④区域 PR 底部距离焦平面 $R_2 = 10.014 42 \mu\text{m}$ 时, 相当于③区域的 PR 底部距离焦平面: $R = R_2 + \Delta Z$, 即 $R = 10.534 42 \mu\text{m}$, 以 R 值代入式(15)的 R_2 , 可反向计算出 $\Delta Z = 0.355 26 \mu\text{m}$, 即可保证图 13 的③区域 PR 底部厚度为 $0.355 26 \mu\text{m}$ 的 PR 光刻时光强变化量为零, 从而使得③区域的 GOA remain 得到改善(图 15 的⑦区域)。这也是本文改善的意义, 即通过消除 PR 段差的方法, 解决当产品接近光刻机分辨率时产品的 PR remain 不良, 从而扩大光刻工艺容限。

5 结 论

光刻机光刻系统中, 在垂直于光刻焦平面向上, 焦点附近区域, 单点光强变化具有向焦点方向传播时, 逐渐变大, 远离焦点方向传播时, 逐渐减小的特点;对于 PR 而言, 在沿垂直与 PR 表面上, 光强在 PR 内随 PR 深度增加逐渐减弱。本文以此为基础, 在进行有底部段差的 PR 光刻时, 将 PR 底部的两个段差面分别作为光刻机的光刻开始和结束面, 并计算出当光刻开始和结束面间的光强变化总量为零时, 光刻平面所在的位置, 通过结合光刻机焦平面的位置计算出光刻机光刻平面的调整量, 并对光刻平面进行调整。结果表明:该方法计算出的光刻平面调整量与实验结果相符合;通过消除 PR 段差的方法, 可解决当产品接近光刻机分辨率时产品的 PR remain 不良, 从而扩大光刻工艺容限, 同时产品 DICD 的有少量增加, 可通过调整光刻剂量使 DICD 满足工艺要求。

参 考 文 献:

- [1] 肖文俊. 薄膜晶体管液晶显示器的串扰研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
XIAO W J. A research on crosstalk in TFT-LCDs [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)

- [2] 王玉如.液晶显示技术的最新进展[J].现代电子技术,2004,27(22):85-87.
WANG Y R. The new development of TFT-LCD [J]. *Modern Electronics Technique*, 2004, 27(22): 85-87. (in Chinese)
- [3] 韦亚一,栗雅娟,刘艳松.先导光刻中的光学邻近效应修正[J].微纳电子技术,2014,51(3):186-193.
WEI Y Y, SU Y J, LIU Y S. Optical proximity correction in the advanced photolithography [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2014, 51(3): 186-193. (in Chinese)
- [4] 冯伯儒,张锦,侯德胜,等.相移掩模和光学邻近效应校正光刻技术[J].光电工程,2001,28(1):1-5.
FENG B R, ZHANG J, HOU D S, *et al.* Optical microlithography with phase-shifting mask and optical proximity effect correction [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, 28(1): 1-5. (in Chinese)
- [5] 张玉虎,岳浩,王军帽,等.TFT 光刻 DICD 均一性改善优化[J].液晶与显示,2016,31(10):930-935.
ZHANG Y H, YUE H, WANG J M, *et al.* Improvement of uniformity of TFT lithography DICD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(10): 930-935. (in Chinese)
- [6] 缪小运.先进光刻系统中焦平面测量与控制的研究[D].上海:复旦大学,2006.
MIU X Y. The study on the advanced lithography system of the focal plane measurement and control [D]. Shanghai: Fudan University, 2006. (in Chinese)
- [7] 辛玉洁,于春崎.TFT 5 次光刻背沟道刻蚀型与保护型工艺[J].半导体技术,2008,33(12):1080-1083.
XIN Y J, YU C Q. Process of TFT 5PEP of back-channel-etching and back-channel protection [J]. *Semiconductor Technology*, 2008, 33(12): 1080-1083. (in Chinese)
- [8] 苏雷.光刻胶黏附力对 MEMS 工艺影响的研究[D].天津:天津大学,2011.
SU L. Research on photoresist adhesion influence on MEMS [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [9] 赵凯华.光学[M].北京:高等教育出版社,2004.
ZHAO K H. *Optics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)
- [10] 冯明,黄庆安,李伟华,等.SU-8 胶深紫外光刻模拟[J].半导体学报,2007,28(9):1465-1470.
FENG M, HUANG Q A, LI W H, *et al.* Simulation of SU-8 photoresist profile in deep UV lithography [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(9): 1465-1470. (in Chinese)

作者简介:张玉虎(1983—),男,安徽霍邱人,硕士,资深高级工程师,2010 年于合肥工业大学获得硕士学位,主要从事光刻设备维护及工艺改善工作。E-mail: zhangyuhu@boe.com.cn