材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.011

真空干燥参数对 TFT 栅极光刻性能的影响

刘 丹[1,2]，黄 晟[1]，黄中浩[1]，刘 毅[1,3]，陈启超[1]，吴 旭[1]，
吴良东[1]，闵泰烨[1]，王 灿[1]，樊 超[1]，张淑芳[4,5]，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；3. 中国科学院大学 重庆学院，重庆 400714；4. 重庆大学 计算机学院，重庆 400044；5. 重庆电子工程职业学院，重庆 401331）

摘 要： 液晶显示器薄膜晶体管(TFT)的栅极需经光刻工艺制得。在光刻工艺中，除曝光与显影环节外，光刻胶显影后的关键尺寸(DICD)和锥角(Taper)还受到真空干燥参数的影响。为此，文章以干燥制程的慢抽时间、保压时间和底压为自变量，DICD 和 Taper 为因变量，采用全因子实验，研究了真空干燥制程对光刻胶 DICD 和 Taper 的影响。结果表明：慢抽时间和底压产生的影响较小，保压时间则是关键参数：随着保压时间增加，DICD 增加、Taper 降低。这是因为随着保压时间增加，光刻胶中的溶剂挥发总量增加，光刻胶更致密，显影速度下降，导致 DICD 增加；同时，光刻胶顶部溶剂挥发量增加，顶部感光剂浓度增加，导致顶部侧向显影程度增加，最终造成光刻胶 Taper 下降。此外，建立了 DICD 和 Taper 与保压时间的回归方程，可以预测光刻效果，或者由预期的光刻效果反推出所需的保压时间。此工作可为薄膜晶体管光刻产线的参数优化和产品良率提升提供参考。

关键词： 薄膜晶体管；栅极光刻；减压真空干燥；全因子实验；关键尺寸；坡度角

中图分类号： TN321.5 **文章编号：** 1001－5868(2021)04－0504－07

Effect of Vacuum Drying Parameters on Gate Photolithography Performance of TFT

LIU Dan[1,2], HUANG Sheng[1], HUANG Zhonghao[1], LIU Yi[1,3], CHEN Qichao[1], WU Xu[1], WU Liangdong[1], MIN Taiye[1], WANG Can[1], FAN Chao[1], ZHANG Shufang[4,5], FANG Liang[2]

(1. Chongqing BOE Optoelectronics Technology Co. Ltd., Chongqing 400700, CHN;
2. College of Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, CHN;
3. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology of the Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, CHN;
4. College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, CHN;
5. Chongqing College of Electronic Engin., Chongqing 401331, CHN)

Abstract: The gate of thin film transistor (TFT) in liquid crystal display is fabricated by photolithography process. It is found that in addition to the exposure and development process, the development inspection critical dimension (DICD) and the profile angle (Taper) are also affected by the vacuum drying parameters. In this paper, the influence of vacuum drying process on DICD and Taper of photoresist (PR) was studied by a full factor experiment, in which the slow pumping time, holding time and bottom pressure were taken as independent variables and DICD and Taper were set as the dependent variables. The results show that: in the vacuum drying process, slow pumping time and bottom pressure has little effect on DICD and Taper, and holding time is the key parameter. With the increase of holding time, DICD increases but Taper

收稿日期：2021－04－10.

基金项目：重庆市自然科学基金项目(cstc2019jcyj-msxmX0566)；发光学及应用国家重点实验室开放课题项目(SKLA-2020-10)；重庆大学大型仪器设备开放基金项目(202103150005，202103150026).

* **通信作者：**方 亮

decreases. This can be explained as follows: with the increase of holding time, the total amount of solvent volatilization in the PR increases, the PR becomes denser, then the development speed decreases, so the DICD enlarges; meanwhile the amount of solvent volatilization at the top of the PR increases, and the concentration of photosensitizer at the top increases, resulting in the increase of lateral development at the top, and finally the Taper reduces. Furthermore, the regression equation of the DICD and Taper with the holding time was established, through which the DICD and Taper could be predicted or the required holding time corresponding to the expected lithography effect could be deduced. This work provides a reference for the parameter optimization and product yield improvement of TFT lithography production line.

Key words: thin film transistor; gate lithography; vacuum drying; full factor experiments; DICD; Taper

0　引言

经过多年的发展，薄膜晶体管液晶显示器(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display，TFT-LCD)技术已日趋成熟，在多个领域得到了广泛应用[1]。TFT-LCD 的显示屏幕由阵列基板(Array)、液晶、彩膜基板(Colour Filter，CF)三明治结构组成。阵列基板和彩膜基板的制备均需光刻工艺制程[2-7]，典型的光刻工艺流程依次是：基板清洗、光刻胶涂覆、真空干燥、烘烤、曝光、显影。理论上，显影后，光刻胶的宽度在垂直方向上是完全相同的，但在实际生产中，光刻胶在截面方向上经常为梯形，即上部窄下部宽，梯形的底部宽度是显影后的关键尺寸(Development Inspection Crystal Dimension，DICD)，梯形底部的锥角被称作 Taper。DICD 和 Taper 是反映 TFT 光刻制程水平的重要参数[8]，要求 DICD 接近设计的目标值，且波动小，同时需要尽量减小 Taper，Taper 偏大会造成光刻胶重心上移，有导致光刻胶坍塌的风险。光刻胶涂覆、烘烤、曝光、显影等阶段的工艺参数对光刻胶 DICD 和 Taper 的影响已有较多报道，可以据此调整参数，优化光刻效果[8-13]。然而，真空干燥制程参数对光刻胶 DICD 和 Taper 的影响却未见报道。明确真空干燥制程参数对 DICD 和 Taper 的影响，并以此选择合适的参数组合，获得符合量产需求的 DICD 和 Taper，对光刻产线的良率提升至关重要。

为此，本文结合重庆京东方光电科技有限公司 8.5 代 TFT 产线，聚焦 15.6HADS 型产品栅极(Gate)光刻制程，在保持其余工艺参数不变的情况下，仅调节真空干燥参数，探究真空干燥工艺对 DICD 和 Taper 的影响。本文基于全因子实验，以真空干燥参数为自变量，以 DICD 和 Taper 为因变量，确定关键的影响因子，建立 DICD 和 Taper 与工艺参数的回归方程，为优化光刻效果、提升产品良率提供了参考依据和指导。

1　实验过程

1.1　真空干燥过程

HADS 型产品的 TFT 器件结构如图 1 所示。首先进行 Gate 电极的制备：在玻璃基板上经过磁控溅射沉积 Cu 膜层，然后经过光刻将光刻胶涂覆于 Cu 膜层上并进行图案化，紧接着通过刻蚀将光刻胶图案转移到 Cu 膜层。完成 Gate 电极制备后再进行其余部分的制备。光刻制程包含光刻胶涂覆、真空干燥、烘烤、曝光和显影。真空干燥(Vaccum Dry，VCD)过程中，涂覆光刻胶的基板置于密闭腔室内，腔室通过排气管与抽气泵相连接，抽气泵开启，腔室内的气压逐渐下降，导致光刻胶中的溶剂沸点下降，可以在常温下沸腾并随排气被抽走，光刻胶由此得以干燥。在抽气过程中，抽气速率由泵的转速控制，整个过程可分为图 2 所示的五个阶段：慢抽、快抽、保压、底压、恢复大气压。图 2 中，纵坐标代表腔室内气压，横坐标代表时间，*O*-*A* 阶段代表慢抽，泵开始抽气，气压逐渐下降；*A*-*B* 阶段代表快

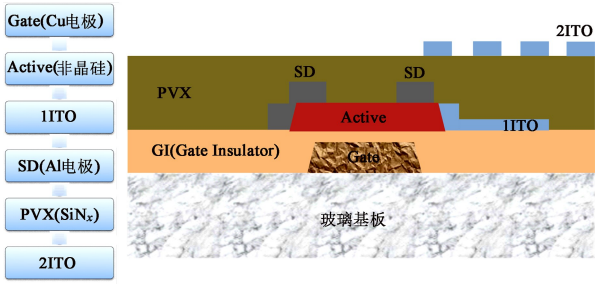

图 1　HADS 型 TFT 器件结构示意图

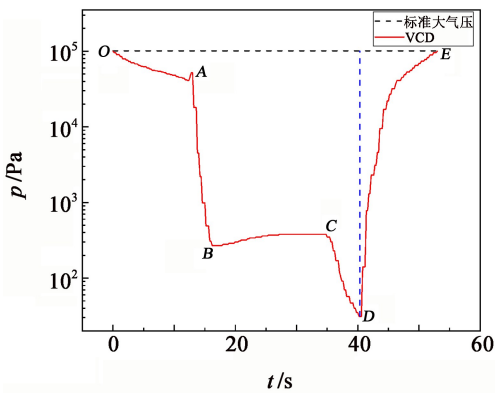

图 2 真空干燥(VCD)制程气压曲线

抽,泵的转速加快,抽气速度加快;*B*-*C* 阶段代表保压,此阶段泵保持抽气,使得腔室内气压恒定;*C*-*D* 阶段代表底压,泵的转速进一步加快,气压下降,此阶段用最低压强进行表征;*D*-*E* 阶段,泵的转速下降直至停止,腔室内气压逐渐恢复,干燥过程结束。

在此过程中,慢抽时间、保压时间、底压三个参数是关键,所以,本文拟重点研究这三个参数对 DICD 和 Taper 的影响。

1.2 样品的制备与检测

实验在重庆京东方光电科技有限公司 8.5 代产线的栅极光刻工艺制程中进行。采用康宁公司的玻璃作为衬底,以磁控溅射(ULVAC 公司,SMD-240D 型号)的方式进行栅极成膜,成膜完成后进行栅极光刻制程。显影后,光刻胶会形成图案且在截面方向形成锥角[8],如图 3 所示。测量梯形图案的底部,长大得到 DICD 尺寸,梯形底部的锥角即为 Taper。

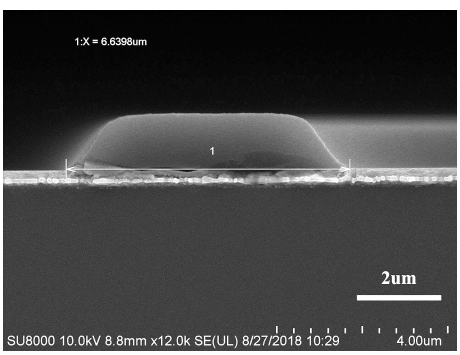

图 3 显影后光刻胶的微观形貌

DICD 由 HTCD 设备(韩国 SNU 公司,ARRAY CDHT-8504 型号)进行测试。HTCD 设备采用像素分析技术,以非接触的方式进行 DICD 测量,每张玻璃基板测试 54 个点位,获得 54 个 DICD 数据,54 个数据的平均值作为 DICD 值。完成 DICD 测试后,采用扫描电子显微镜(SEM,日立公司,SU8000 型号)进行光刻胶微观形貌测试,对截面照片进行分析,测量 Taper。实验时,仅调整减压真空干燥 VCD 参数,其余制程参数保持不变。

1.3 全因子实验设计

采用全因子实验设计,以慢抽时间、保压时间和底压作为自变量,DICD 和 Taper 作为因变量。全因子实验设计的方案如表 1 所示,采用 3 因子 2 水平,共 2^3 组实验,再加上 3 个中心点,一共 11 组实验。慢抽时间为 15~25 s,保压时间为 8~18 s,底压为 40~260 Pa。表 1 中,标准序代表实验设计方案中的标准顺序,为了消除偶然误差,实际实验中故意打乱顺序进行,按表中的运行序开展。在表 1 中的中心点一列,"1"对应着参数的高水平或低水平,"0"对应着参数的中心点,此方案安排了 3 次中心点实验,所有实验均一次完成。

表 1 VCD 制程全因子实验方案及结果

标准序	运行序	中心点	慢抽时间/s	保压时间/s	底压/Pa	DICD/μm	Taper/(°)
3	1	1	15	18	40	6.589	52.68
1	2	1	15	8	40	6.48	56.69
9	3	0	20	13	150	6.587	50.56
10	4	0	20	13	150	6.64	49.33
5	5	1	15	8	260	6.479	58.33
4	6	1	25	18	40	6.606	49.69
11	7	0	20	13	150	6.594	51.19
2	8	1	25	8	40	6.522	54.5
7	9	1	15	18	260	6.609	48.69
6	10	1	25	8	260	6.553	55.26
8	11	1	25	18	260	6.612	48.41

根据全因子实验结果,可以获得影响 VCD 参数的重要性顺序,并建立光刻胶 DICD 和 Taper 与 VCD 参数的函数关系。

由于每次实验均有一条如图 2 所示的 VCD 气压曲线,其中,*OABCD* 曲线与标准大气压曲线 *OE* 围成的面积与 VCD 过程中溶剂的挥发量相关,因此,还可得出光刻胶 DICD,Taper 与溶剂挥发量(曲线围成面积)之间的变化关系。

2 结果与讨论

按照表 1 中第 4~6 列参数开展 VCD 实验,对获得的 DICD 和 Taper 数据结果进行汇总,整理后列于表 1 后两列。相应的实验数据用 Minitab 软件进行分析。

2.1　VCD 参数对光刻胶 Taper 的影响

以慢抽时间、保压时间和底压分别作为自变量 X_1，X_2，X_3，Taper 作为因变量 Y_1，可建立 Taper 与 VCD 参数之间的线性回归方程 $Y_1 = a \times X_1 + b \times X_2 + c \times X_3 + d \times X_1 \times X_2 + e \times X_1 \times X_3 + f \times X_2 \times X_3$，式中，$a$，$b$，$c$，$d$，$e$，$f$ 为回归方程的系数，其中 d，e，f 对应交互项的系数。

利于 Minitab 软件，对全因子实验数据的线性模型进行了验证，检验结果如表 2 所示：线性模型对应的 P 值为 0.012，符合统计学显著性的判据（$P \leqslant 0.05$），由此看出，线性回归方程显著。其次，检查各项系数对应的 P 值，发现保压时间对应的 P 值最小（0.004），小于 0.05，而慢抽时间和底压对应的 P 值均大于 0.05，说明在线性回归模型中，仅保压时间对 Taper 有显著影响，其余因素的影响可以忽略。最后对 Taper 的残差进行弯曲检验，发现残差弯曲项对应的 P 值为 0.034，该值小于 0.05，说明回归方程中自变量的阶数应该增加，即线性模型虽然显著但不是最佳模型，应该考虑抛物线模型[14]。

表 2　Taper 线性模型检验

检验项	自由度	Adj SS	Adj MF	F 值	P 值
线性	3	90.199	30.066 4	26.52	0.012
慢抽时间	1	9.095	0.095 1	8.02	0.066
保压时间	1	80.075	80.074 5	70.64	0.004
底压	1	1.03	1.029 6	0.91	0.411
慢抽时间×保压时间	1	0.495	0.495 0	0.44	0.556
慢抽时间×底压	1	0.419	0.418 6	0.37	0.586
保压时间×底压	1	7.354	7.353 6	6.49	0.084
弯曲	1	15.569	15.568 5	13.73	0.034

鉴于 Taper 的检验情况，可在全因子实验的基础上补充数据，进行响应曲面实验，或直接对全因子实验数据采用曲线回归进行拟合。在此，我们选择后一种方案，将回归方程处理成二阶方程。仅保留保压时间这个自变量，Taper 作为因变量，得到的图形如图 4 所示的抛物线回归方程曲线，可见，随着保压时间的增加，Taper 逐渐减小并最终趋于平缓。

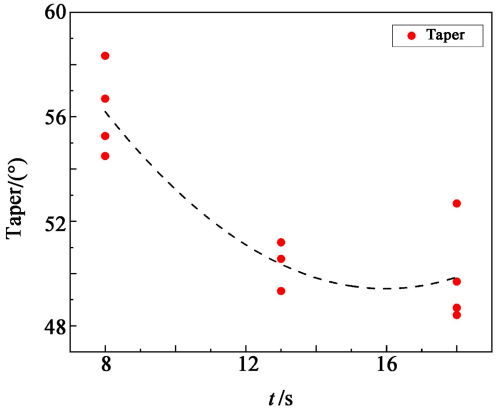

图 4　Taper 随保压时间的变化趋势

2.2　VCD 参数对光刻胶 DICD 的影响

与 Taper 数据的处理类似，建立 DICD 与 VCD 参数（慢抽时间、保压时间、底压）之间的三元线性回归方程，对线性回归模型的检验情况如表 3 所示。可见：线性模型对应的 P 值为 0.04，故线性回归模型显著；保压时间对应的 P 值为 0.013，说明其对 DICD 影响显著；弯曲检验中，P 值为 0.059，弯曲不显著，采用线性模型。

表 3　DICD 线性模型第一次检验

检验项	自由度	Adj SS	Adj MF	F 值	P 值
线性	3	0.020 944	0.006 981	10.89	0.040
慢抽时间	1	0.002 312	0.002 312	3.61	0.154
保压时间	1	0.018 240	0.018 240	28.46	0.013
底压	1	0.000 392	0.000 392	0.61	0.491
慢抽时间×保压时间	1	0.001 152	0.001 152	1.80	0.272
慢抽时间×底压	1	0.000 041	0.000 041	0.06	0.818
保压时间×底压	1	0.000 002	0.000 002	0.00	0.959
弯曲	1	0.005 619	0.005 619	8.77	0.059

仅保留保压时间这一个自变量，进行第二次线性回归模型检验，情况如表 4 所示。线性模型对应的 P 值为 0.001，小于 0.05，故线性回归模型可以接受；但是在弯曲检验中，P 值为 0.024，小于 0.05，这说明应该增加自变量的阶数，将模型处理为抛物线。

表 4　DICD 线性模型第二次检验结果

检验项	自由度	Adj SS	Adj MF	F 值	P 值
线性	1	0.018 241	0.018 241	25.07	0.001
保压时间	1	0.018 241	0.018 241	25.07	0.001
弯曲	1	0.005 619	0.005 619	7.72	0.024

综合上述情况，将保压时间对应的阶数增加到 2，进行曲线拟合，拟合结果如图 5 所示，可见，DICD 随保压时间的变化趋势是抛物线的一部分，随着保压时间的延长，DICD 逐渐增加然后保持平稳，并且 DICD 的波动逐渐减小。

将全因子实验的两个因变量 DICD 和 Taper 进行汇总，二者的变化趋势如图 6 所示，DICD 增加，Taper 逐渐下降，总体上呈现出线性关系。

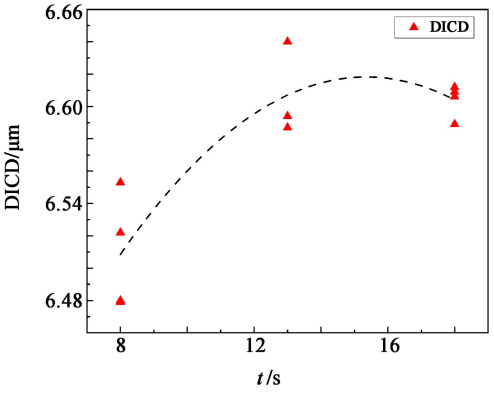

图 5 DICD 随着保压时间的变化趋势

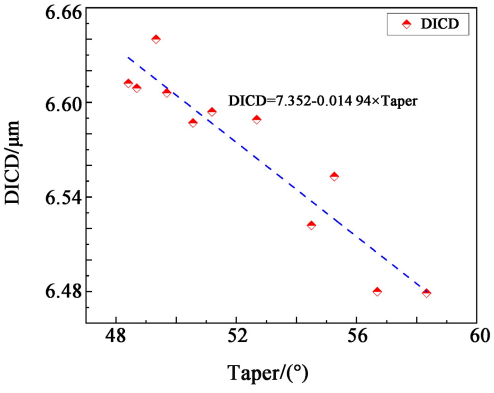

图 6 全因子实验中 Taper 随 DICD 变化趋势

2.3 光刻胶 DICD 和 Taper 与气压变化之间的关系

将涂覆光刻胶的基板置于密闭腔室，在抽气过程中，腔室内气压下降，光刻胶内溶剂的挥发速率逐渐加快，挥发出来的气态溶剂被泵抽走。对于量产条件下的 VCD 腔室，体积和温度是一定的，可以认为溶剂的挥发速率仅受腔室压强的影响。

在抽气过程中，假设 t_1 时刻腔室内的压强是 p_1，该时刻的溶剂挥发速率是 v_1；当抽气进行到 t_2 时刻，此时腔室内压强下降为 p_2，该时刻溶剂挥发速率是 v_2。以标准大气压为参考，抽气过程中，p_1 和 p_2 均小于标准大气压，标准大气压与 p_1 和 p_2 的差值分别记为 Δp_1 和 Δp_2，Δp_1 和 Δp_2 决定了各自压强差下的溶剂挥发速率。溶剂挥发速率乘以挥发时间，便获得溶剂的挥发量。

在图 7 中，以标准大气压为参考基准，VCD 抽气曲线是压强下降的曲线，箭头的长度代表压强的变化量，也即挥发速率。将时间间隔无限缩小，将压强的变化量对时间进行积分便可获得溶剂的挥发量，该挥发量以 $\Delta p \cdot \Delta t$ 进行表征。因此，将标准大气压减去抽气曲线压强获得一个函数，对该函数随着时间进行积分，便可获得总的溶剂挥发量。同时，结合图 2 中 O-A，A-B，B-C，C-D 阶段，还可以计算出各个阶段的溶剂挥发量。

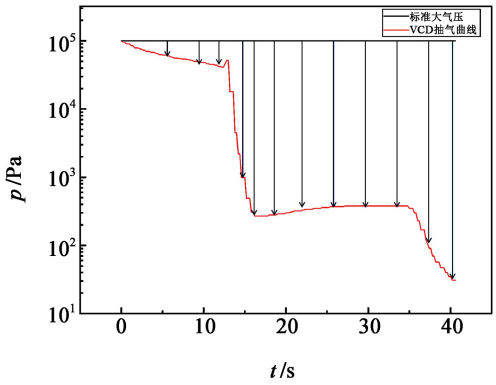

图 7 抽气过程中压强变化示意图

全因子实验一共 11 组，获得 11 个压强变化曲线，对 11 组曲线进行积分，计算出溶剂挥发总量。在液晶显示行业，为便于作图，通常对 $\Delta p \cdot \Delta t$ 求对

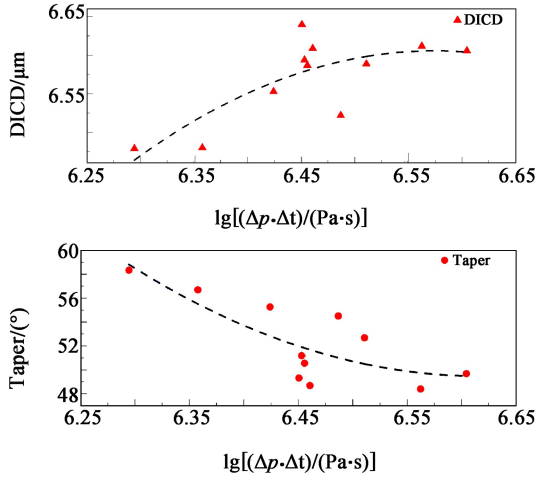

图 8 溶剂挥发量随 DICD 和 Taper 的变化趋势

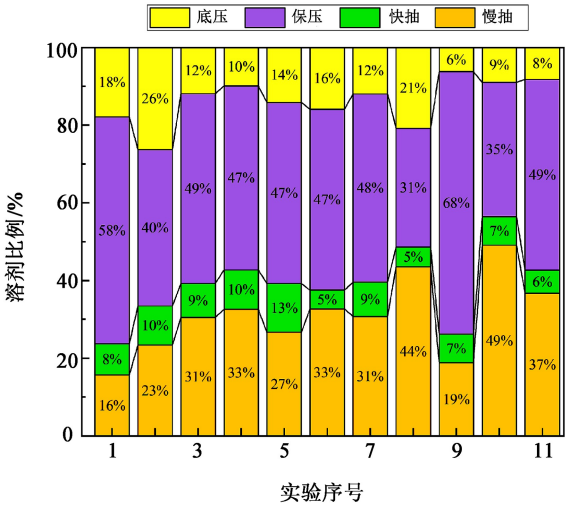

图 9 VCD 各阶段溶剂挥发比例

数，即 $\lg(\Delta p \cdot \Delta t)$ 随光刻胶 DICD 和 Taper 的变化趋势如图 8 所示，可见其变化趋势与保压时间的变化趋势一致。以曲线积分的方式，将 VCD 过程中慢抽、快抽、保压、底压阶段分别计算 $\Delta p \cdot \Delta t$，查看各个阶段溶剂挥发比例，情况如图 9 所示。从图 9 中可看出，保压阶段溶剂挥发量所占比例最高，其次是慢抽阶段。综合上述，在减压真空干燥过程中，保压阶段溶剂挥发量最多，溶剂挥发越多，DICD 逐渐增加，Taper 逐渐减小。

2.4　对现象的解释

光刻胶是光刻工艺制程的核心材料，由树脂、溶剂、感光剂、添加剂等组成，真空干燥后的光刻胶再经过曝光、显影形成图案，不同干燥条件下得到了不同的 DICD 和 Taper。本文认为：真空干燥对显影后光刻胶的图案产生影响，是由光刻胶的溶剂在截面上不均匀分布导致的。

如图 10 所示，对光刻胶绘制示意图，在涂覆光刻胶之后进行减压真空干燥，干燥过程中，顶部光刻胶中溶剂优先挥发，其次是中部溶剂，最后才是底部溶剂。减压真空干燥过程完成后，光刻胶内仍然会残留溶剂，自上而下形成溶剂浓度梯度：顶部的溶剂少，底部的溶剂多。在此过程中，光刻胶中的感光剂浓度分布却与溶剂相反：顶部感光剂浓度高，而底部感光剂浓度低。当延长干燥时间时，溶剂的浓度梯度仍然存在，只是整体的溶剂残留量下降。溶剂挥发总量增加，光刻胶的致密度增加，而致密度增加会导致光刻胶在显影过程中的溶解速度下降，这最终导致光刻胶 DICD 增加。如前所述，在减压真空干燥过程中，溶剂主要在保压阶段挥发，如果增加保压时间，那么溶剂挥发量增加，光刻胶致密度增加，显影速率下降，最终导致光刻胶 DICD 增加，由此可以解释图 5 和图 8 中的 DICD 变化趋势。

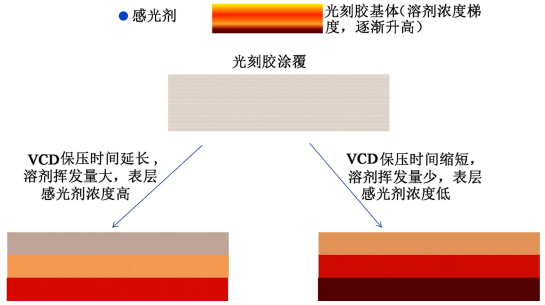

图 10　VCD 阶段光刻胶溶剂和感光剂浓度分布示意图

减压真空制程完成后，便进行烘烤。在烘烤过程中，溶剂进一步挥发，挥发的方式和减压真空制程中一样，溶剂的分布也与图 10 所示浓度梯度一样。完成烘烤之后，光刻胶需经历曝光，掩膜板阻挡光，光从缝隙透过掩膜板并照射到光刻胶表面。图 11 显示了光照射到光刻胶，光刻胶顶部的感光剂与光即将发生光化学反应的一刹那。如果在 VCD 制程中，干燥时间延长，那么光刻胶顶部的感光剂浓度越高，反之亦反。光照射光刻胶，光刻胶中的感光剂发生光化学反应，光刻胶顶部的光照强度最大，光沿着光刻胶厚度方向逐渐衰减，光化学反应逐渐减弱。如果在 VCD 阶段干燥时间延长，顶部的感光剂浓度会增加，这会促进光化学反应，使得光刻胶顶部发生光化学反应的感光剂数量增加。在曝光后的显影制程中，发生光化学反应位置处的树脂会溶解，如果光刻胶顶部发生光化学反应的感光剂数量增加，那么如图 12(a)所示，顶部光刻胶的横向显影程度会增加，最终造成光刻胶的 Taper 下降。由此，可以解释图 4 和图 8 中的 Taper 变化趋势。

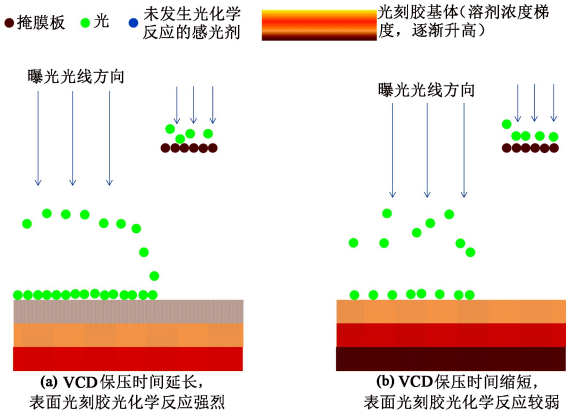

图 11　光化学反应示意图

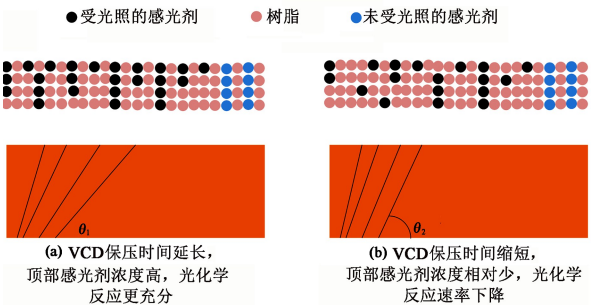

图 12　光刻胶显影过程示意图

3　结论

本文结合全因子实验，探究了干燥制程中慢抽时间、保压时间、底压等三个参数对光刻胶 DICD 和 Taper 的影响，确认影响因素的重要性顺序并建立回归方程。提出结合 VCD 的抽气曲线进行积分，

用积分数值反映溶剂的挥发量的观点，探究了溶剂挥发量随光刻胶 DICD 和 Taper 的变化趋势，并进行了原理分析。实验结果表明，在 VCD 制程中，保压时间对 DICD 和 Taper 的影响最显著，其余两个参数可以忽略。随保压时间延长，溶剂挥发量逐渐增加，光刻胶致密，这导致显影速率下降，最终造成 DICD 逐渐增加；此外，保压时间延长，导致光刻胶顶部侧向显影程度增加，故 Taper 减小。结合回归方程，保压时间在 8～18 s 范围变化，光刻胶锥角 Taper 可以在 50°～56°范围进行微调。该工作为薄膜晶体管光刻产线优化参数、提升产品良率提供了参考。

参考文献：

[1] 李继军，聂晓梦，李根生，等. 平板显示技术比较及研究进展[J]. 中国光学，2018，11(5)：695-710.
Li J J，Nie X M，Li G S，et al. Comparison and research progress of flat panel display technology[J]. Chinese Opt.，2018，11(5)：695-710.

[2] 廖燕平. 薄膜晶体管液晶显示器显示原理与设计[M]. 北京：电子工业出版社，2016.
Liao Y P. Thin Film Transistor Liquid Crystal Display[M]. Beijing：Publishing House of Electronics Industry，2016.

[3] Luo C P，Lin W F，Hsu M A. Advanced black matrix potoresist for next generation color filters[C]// Proc. of Inter. Conf. on Display Technol.，2018，49(S1)：609-610.

[4] Cho A T，Hsu J，Zhou J，et al. Advanced halftone photolithography using four-mask process architecture for G8.6 TFT-LCDs[J]. J. of the Society for Information Display，2018，49(1)：1471-1774.

[5] 周 刚. TFT-LCD 光刻产能提升的分析与研究[D]. 上海：复旦大学，2011.
Zhou Gang. Analysis and study on the productivity enhancement of lithography process in TFT-LCD[D]. Shanghai：Fudan University，2011.

[6] 郑志强. TFT-LCD 四次光刻工艺改善研究[D]. 广州：华南理工大学，2019.
Zheng Z Q. Study on improvement of four mask photolithography process in TFT-LCDs[D]. Guangzhou：South China University of Technology，2019.

[7] 姚江波. 薄膜晶体管液晶显示器 3 道光刻技术研究[D]. 广州：华南理工大学，2019.
Yao J B. Research on 3-step lithography technology of thin film transistor liquid crystal display[D]. Guangzhou：South China University of Technology，2019.

[8] 刘 丹，陈启超，黄 晟，等. 光刻制程参数对光刻胶 DICD 和锥角的影响[J]. 液晶与显示，2019，34(2)：146-154.
Liu D，Chen Q C，Huang S，et al. Influence of lithography process parameter on DICD and taper of photoresist[J]. Chinese J. of Liquid Crystals and Displays，2019，34(2)：146-154.

[9] 陈崔军. TFT-LCD-ARRAY 光刻制程 CD 均一性分析和实现[D]. 成都：电子科技大学，2018.
Chen C J. Analysis and implementation of CD uniformity in TFT-LCD ARRAY lithography process[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2018.

[10] 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)：929-935.
Zhang Y H，Yue H，Wang J M，et al. Improvement of uniformity of TFT lithography DICD[J]. Chinese J. of Liquid Crystals and Displays，2016，31(10)：929-935.

[11] 张玉虎，徐海涛，李亚文，等. TFT 光刻平面补偿优化[J]. 光电工程，2019，46(5)：51-59.
Zhang Y H，Xu H T，Li Y W，et al. The improvement of TFT lithography plane compensation[J]. Opto-Electron. Engin.，2019，46(5)：51-59.

[12] 张玉虎，李亚文，罗传文，等. TFT 光刻平面倾斜对光刻图形的影响及改善[J]. 光电工程，2019，46(10)：64-72.
Zhang Y H，Li Y W，Luo C W，et al. The effect of TFT lithography plane inclination onlithography pattern and improvement[J]. Opto-Electronic Engin.，2019，46(10)：64-72.

[13] 陈仲仁. 显影液中光刻胶浓度对特征线宽的影响研究[D]. 广州：华南理工大学，2017.
Chen Z R. Study on the influence of photoresist concentration in developer on critical dimension[D]. Guangzhou：South China University of Technology，2017.

[14] 马逢时. 六西格玛管理统计指南[M]. 北京：中国人民大学出版社，2018.
Ma Fengshi. Guide to Six Sigma Management Statistics[M]. Beijing：China Renmin University Press，2018.

作者简介：

刘 丹(1988－)，男，重庆市忠县人，博士研究生，工程师，主要研究方向为薄膜晶体管光刻、刻蚀、器件性能优化；

方 亮(1968－)，男，四川乐山人，博士，教授，博士生导师，主要从事光电薄膜材料与器件研究。