

文章编号:1007-2780(2014)01-0007-08

大尺寸 TFT-LCD ECCP 刻蚀工艺低耗整合

张定涛^{1,2}, 李文彬¹, 姚立红¹, 郑云友², 李 伟², 袁 明²

(1. 北京林业大学, 北京 100083; 2. 北京京东方显示技术有限公司, 北京 100176)

摘要:为简化大尺寸液晶面板四次光刻法的刻蚀工艺、减少有毒气体使用、降低射频功率消耗,在 2 200 mm×2 500 mm 大尺寸玻璃上,采用正交实验设计,验证了功率、气压、反应气体和比例等参数对各刻蚀步骤刻蚀速率、均一性和选择比的影响关系,从而得到各膜层的最佳工艺条件。在 Enhance Cathode Couple Plasma Mode(ECCP)刻蚀模式下,采用新刻蚀条件合并薄膜晶体管有源区非晶硅、光刻胶、湿刻后源极和漏极剩余金属钼以及沟道非晶硅层干法刻蚀。利用扫描电子显微镜(SEM)对薄膜电学特性进行测试,结果显示,金属钼的刻蚀可以采用一次两步干法刻蚀,“2 干 2 湿”刻蚀可以整合为“1 干 1 湿”。整合后总刻蚀工艺时间减少 16 s,减少了氯气使用量和 RF 总功率。试验改进了均一性和刻蚀率,同时对于下底衬具有良好的选择比,保持了良好的形貌,为大批量“1 干 1 湿”生产提供了依据。

关 键 词:低耗;钼刻蚀;阴极耦合离子;试验设计

中图分类号:TN321.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20142901.0007

Low consumption combination of large-sized TFT-LCD ECCP etch process

ZHANG Ding-tao^{1,2}, LI Wen-bin¹, YAO Li-hong¹, ZHENG Yun-you², LI Wei², YUAN Ming²

(1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Beijing BOE Display Technology co., LTD., Beijing 100176, China)

Abstract: In order to simplify the lithography 4 mask etch process flow, reduce power and toxic gas volume, an orthogonal experiment was designed based on 2 200 mm×2 500 mm glass substrate. Using scanning electron microscopy (SEM) and electrical properties testing, the interacting influences of power, pressure, gas and gas ratio on etching rate, uniformity and selectivity were analyzed. Meanwhile, the optimized single layer process conditions was verified. Through a novel Enhance Cathode Coupling Plasma Mode (ECCP) etch condition, we combined active, halftone, wet etch residual metal molybdenum and N-plus doped amorphous silicon layers into dry etch fully. The result shows that the metal molybdenum etch can be divided into one time two steps, consequently, “2 dry 2 wet” etching can be modified into “1 dry 1 wet”. Total etch time can be reduced by 16 s; overall Cl₂ gas dosage and power were also decreased. Uniformity, etch rate and selectivity to bottom layer were also improved, and the profile was controlled. The study presented a critical basis of “1 dry 1 wet” future mass production.

Key words: low-consumable; molybdenum-etch; enhance cathode couple plasma; design experiment

收稿日期:2013-07-26; 修订日期:2013-09-09.

* 通信联系人, E-mail: leewb@bjfu.edu.cn

1 引 言

薄膜晶体管液晶显示器由于具有重量轻、工作电压低、全彩色、显示范围大和高分辨率的优点,仍是当今平板显示的主流产品^[1]。但是现有的 4 次掩膜法薄膜晶体管制造工艺复杂,钼金属刻蚀中氯气、六氟化硫气体和电力消耗大。通常阵列工艺需 4~6 次重复膜层沉积、光刻胶涂布、曝光、光刻、刻蚀和光刻胶剥离^[2]。在现有干湿组合刻蚀工艺,大量消耗氯气会对设备氧化铝膜层和 TFT 栅金属刻蚀层产生腐蚀^[3],形成金属残留和色斑;功率射频过大会加剧薄膜晶体管各膜层温升和膜层相界形变,并有可能使膜质变性。因此以减少工艺步骤、降低卤化气体量和降低射频电力功率为目标的低耗化研究,成为薄膜晶体管优化研究新课题^[4-6]。

在以往薄膜晶体管阵列 4 次掩膜法“2 干 2 湿”工艺中,金属层多为钼铝钼结构,以铝为主要载流层,采用湿法刻蚀^[7]。近年来,由于钼具有熔点高、电阻率低、耐腐蚀和生成物真空下易挥发的特点,钼逐渐取代钼铝钼结构成为集成电路中栅电极和互连的金属材料^[8]。如果能连续进行有源区非晶硅的刻蚀、光刻胶的灰化、湿刻后剩余钼刻蚀和沟道掺杂非晶硅的干法刻蚀,就实现了“1 干 1 湿”刻蚀工艺整合,从而减少工艺重复,也避免因金属层工艺滞留时间过长而产生金属腐蚀、小丘问题^[9]。

本文研究在 4 次掩膜工艺中的 1 次湿法刻蚀后,膜层为半透过光刻胶、源极和漏极(钼膜)、沟道掺杂非晶硅、非晶硅、氮化硅、栅极、玻璃基板的结构中,尽可能降低射频功率,减少氯气使用量,在一个干法反应腔一次整合完成所有干法刻蚀。

2 实验方法

使用日本东京电子公司 ECCP (Enhance Cathode Coupling Plasma)型设备进行干法刻蚀。湿刻为大日本电子公司酸法刻蚀机。基板类型是康宁公司 Eagle-XG,尺寸为 2 500 mm×2 200

mm,厚度 0.53 mm,81.28 cm(32 in)4 次掩膜工艺。物理溅射形成栅极和金属钼,等离子加强型化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition,PECVD)形成栅极绝缘层、非晶硅和沟道掺杂非晶硅层。

表 1 各单层正交试验因素和水平表

Tab. 1 Orthogonal matrix test factors & levels of all single layer

Process Factor	Leval1	Leval2	Leval3
Pressure/mT	50	70	90
Active(Source/ Bias)/kW (Cl ₂ /SF ₆)/ sccm	16/18 400/12 000	10/14 2 000/8 000	7.5/8.5 3 500/3 500
Pressure/mT	50	50	50
Ash(Source/ Bais)/kW (O ₂ /SF ₆ /He)/sccm	15/15 9 000/300/200	12/12 10 000/0/0	9/9 12 000/400/0
Pressure/mT	80	100	120
Mo-1 st (Source/ Bais)/kW (O ₂ /SF ₆ /He)/sccm	9/6 6 000/200/6 000	13/13 6 000/0/6 000	15/3 5 000/100/5 000
Pressure/mT	100	120	140
Mo-2 nd (Source/ Bais)/kW (Cl ₂ /O ₂)/sccm	9/3 5 000/5 000	9/9 3 400/6 700	12/3 2 500/7 500
Pressure/mT	50	70	90
N+ (Source/ Bias)kW	7.5/5	6/5	4/5

ECCP 模式干法刻蚀中,源极射频和偏置射频分别产生 13.56 MHz 和 3.2 MHz 高频电力。通过源极高频电力独立控制等离子密度,通过偏置高频电力独立控制离子轰击。与传统反应性离子刻蚀模式相比,虽然等离子体密度相同,但是刻蚀率高,均一性好,坡度角也更易于控制。ECCP 反应室顶部中心区域和其他区域隔开,单独控制气体流量,有效控制各区域刻蚀速度,从而在一定程度上消除大尺寸刻蚀的“边缘效应”^[10]。下部电极温度为 40 ℃,反应腔壁和其顶部温度为

50 ℃,等离子浓度终点检知器(End Point Detector, EPD)检测和控制工艺最佳刻蚀时间。上下部平行平板电极间距 300 mm。

先通过正交实验求出每个单层膜刻蚀最佳条件,以射频功率、反应气压、反应气体流量为 3 个因素,选取 $tL_9(3^4)$ 正交表,基板有膜侧选取 38 个点进行膜厚测量,如表 1 所示。用探针台阶仪测出了光刻胶和每个膜层的刻蚀率以及均一性等参数,分析这些因素的相互关系,得到各步的最优工艺参数。接着在电参数测试仪进行电学性能测试,通过扫描电子显微镜切片观察沟道处的剖面形貌和厚度,同时也判断刻蚀选择比。最终通过整合试验,测试晶体管的电学特性来确认晶体管工作性能。试验中,使用光学检查仪辅助检查工艺缺陷的发生情况。

3 试验结果与分析

3.1 有源层刻蚀试验

目前有源层在 4 次掩膜工艺采用氯气、六氟化硫气体^[11]。主要反应产物 $SiCl_4$ 具有低温挥发

时颗粒化的性质,残留在反应室内容易聚合形成颗粒散落在基板表面,从而产生有源层残留。六氟化硫辅助提高刻蚀率,其反应产物 SiF_4 也具有挥发性,从而很好抑制有源层残留形成。目前 4 次掩膜法的干法刻蚀中射频功率源极、偏压功率分别为 14 kW、10 kW,压力为 50 mT(1 T=133 Pa),六氟化硫、氯气流量为 600 sccm、12 000 sccm(1 sccm=1 mL/min)。实验结果表明影响刻蚀率的因素从大到小依次为压力、气体比例和射频功率;而对均一性影响最大的是气体比例。压力从 50 mT 上升到 70 mT,刻蚀率明显增大,均一性则无明显变化。而射频功率从 16 kW、18 kW 降到 7.5 kW、8.5 kW,刻蚀率下降不明显。随着射频功率降低,均一性则明显改善。随着氯气量的增加和六氟化硫量的减少,均一性明显改善,刻蚀率也显著提高,从而节省了刻蚀时间。因为沟道掺杂层刻蚀要严格控制均一性和形貌,本试验最后选择均一性小于 10% 的第 3 组组合条件,实验结果如图 1。

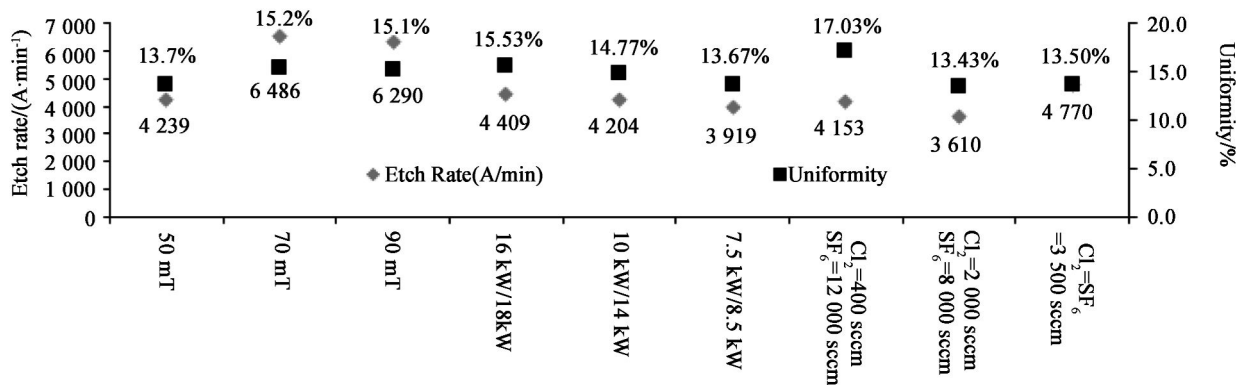


图1 功率、压力和气体比例对有源层刻蚀率和均一性的影响

Fig. 1 Power, pressure, and gas ratio effect on the a-Si layer etch rate and uniformity

3.2 Ash(光刻胶灰化)试验

单独使用氧气对光刻胶有很好的灰化效果,但是会导致下层金属钼的表面发生氧化,从而降低钼的刻蚀率^[12]。在灰化刻蚀气体中加入少量六氟化硫,能有效地去除生成的钼的氧化物。

目前在 4 次掩膜工艺灰化速率达到 1 000 nm/min,源极、偏置射频功率为 15 kW、15 kW,压力为 50 mT,六氟化硫、氧气流量为 400 sccm、12 000 sccm,

均一性为 20%,坡度角在 40°~55°。如果刻蚀均匀性差,源极和漏极金属可能裸露,极易被灰化工艺损伤,而受损的部位连接着长金属线,引起电荷积累产生“天线效应”^[13],容易发生金属线间静电击穿。沟道表面的均一性和宽度取决于初始半透型光刻胶形貌和灰化后的形貌,因此首要确保灰化后的均一性,二是降低射频功率。氧气流量过大会使光刻胶后退加快露出金属,所以也要尽可能减少氧气使

用量。

由图 2 表明,压力从 50 mT 上升到 90 mT,随着灰化速率的显著下降,均一性也逐渐恶化。仅使用氧气刻蚀,灰化率低而且均一性不好。兼顾灰化率和均一性,最后选用的条件为:压力 50 mT,射频源极、偏置功率分别为 12 kW、12 kW,氧气、六氟化硫、氦气(9 000、300、200 sccm)的组合条件。其中,加入氦气的目的是为了等离子均一化。

3.3 第一步钼刻蚀试验

氧气、六氟化硫、氯气是常用的蚀钼干法刻蚀气体。以往在小尺寸的刻蚀研究表明:气压是刻蚀率和均一性最显著的影响参数^[14];金属钼的刻

蚀速率由于受均一性和对非晶硅选择比的制约而难以提高。实际上钼的刻蚀中还存在着均一性差、剖面倒角过大等问题。为保证高速刻蚀过程中不损伤沟道和栅极绝缘层,实验中将钼的刻蚀分为 2 步:第一步使用大量氯气快速刻蚀,第二步采用取消六氟化硫和减少氯气实现慢速平缓刻蚀。试验结果表明:对于刻蚀率,气体比例是最大的影响因素。氧气、六氟化硫、氯气和气体流量为 6 000、200、6 000 sccm 时可以满足生产实际。压力和射频总功率主要影响均一性。压力 100 mT、源极和偏置射频功率都为 13 kW 的组合条件是最优条件,实验结果如图 3 所示。

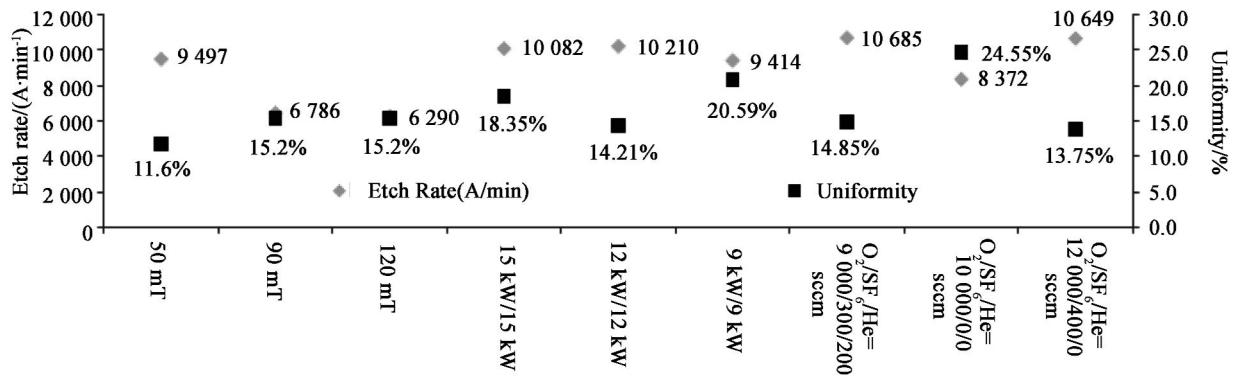


图 2 功率、压力和气体比例对光刻胶刻蚀率和均一性的影响

Fig. 2 Influence of power, pressure, and gas ratio on the ash rate and uniformity in ash

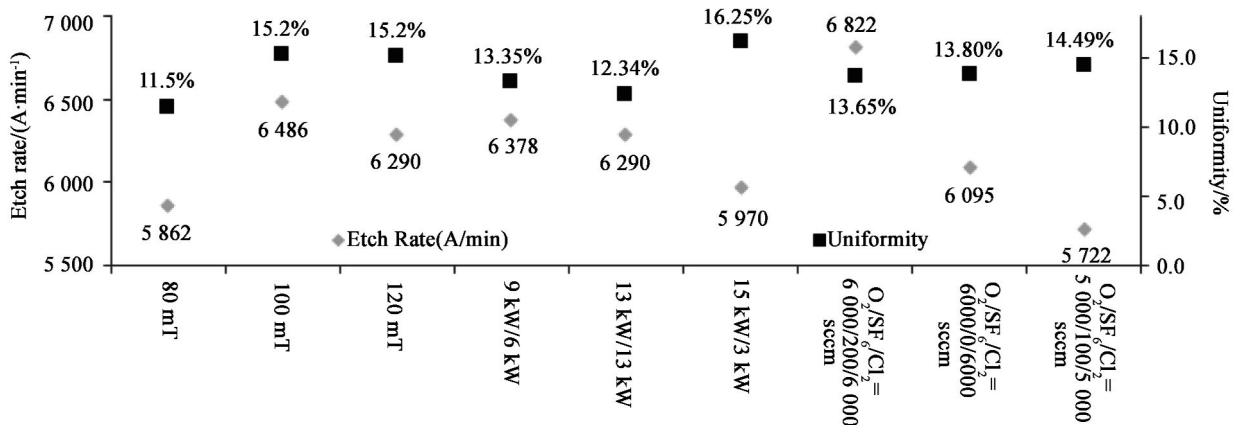


图 3 功率、压力和气体比例对第一步钼刻蚀率和均一性的影响

Fig. 3 Influence of power, pressure, and gas ratio on the etch rate and uniformity in 1st step Mo

3.4 第二步钼刻蚀试验

钼的第二步刻蚀,使用小流量氯气,为改善金属钼刻蚀的均一性,采用加大过刻时间的方法,确保金属刻蚀充分,并保持沟道掺杂层表面的形貌、

不过度损伤下底膜。试验发现:压力从 120 mT 上升到 140 mT,刻蚀率明显降低,均一性变差,因此压力选择 120 mT。源极和偏置功率为 9 kW 和 3 kW 时刻蚀率和均一性最好。氯气比例降

低、氧气上升后,刻蚀率下降。为了减少氯气的使用并能维持较好的均一性和刻蚀率,试验最后采用氯气和氧气为 3 400 sccm 和 6 700 sccm 的气体比例,采用的源极和偏置射频功率分别为 9 kW 和 3 kW。在此组合条件,测试得到均一性为 11.7%。

实验表明(如图 4 所示),钼刻蚀率随时间递减,刻蚀率的计算得到的是平均值,在 10 ~ 15 s 的刻蚀时间段,刻蚀率下降十分明显。这是由于刻蚀沿着坡面向下进行,钼的横向尺寸剩余逐渐减小,出现“微负载效应”,负载效应其实就是等离子体浓度和刻蚀率的相关关系,即离子浓度和刻蚀率成正比,和所需刻蚀的薄膜表面面积大小成反比。当所需刻蚀的薄膜表面面积增大,致使离子的浓度在局部表面被摊薄导致刻蚀率下降。这是刻蚀化学性蚀刻导致的刻蚀非线性^[15]。微负载效应也会造成横向过刻过大,因此要有效抑

制。试验结果得到过刻时间延长 15 s 时微负载效应最小。

3.5 沟道低耗化试验

沟道掺杂非晶层是决定薄膜晶体管载流性能的关键膜层。除了沟道的形貌和厚度外,沟道刻蚀后剩余尺寸和表面粗糙度也会直接影响到薄膜晶体管的漏电流大小,从而影响整个薄膜晶体管液晶显示器电学特性^[16-17]。目前“2 干 2 湿”法沟道刻蚀的条件一般设置源极和偏置射频功率分别为 7.5 kW 和 5 kW,六氟化硫、氯气流量分别为 600 sccm、9 000 sccm。试验结果表明(如图 5 所示),压力上升可以提高刻蚀率,但是均一性不稳定。源极和偏置射频功率分别降低到 4 kW 和 5 kW 时,不仅刻蚀率没有明显减小,而且均一性显著改善。氯气减半使用到 4 500 sccm,均一性和刻蚀率也能保持不变。

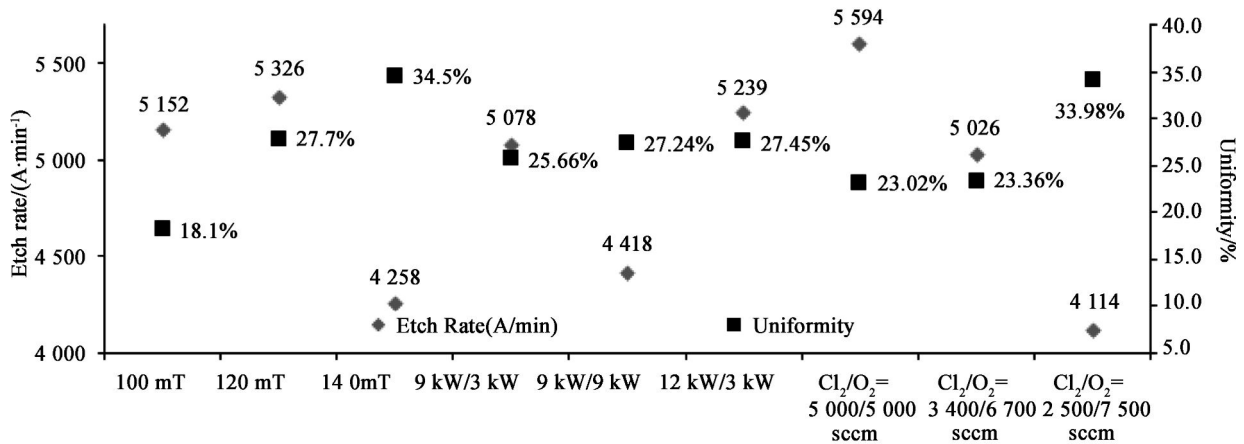


图4 功率、压力和气体比例对第二步钼刻蚀率和均一性的影响

Fig. 4 Influence of power, pressure, and gas ratio on the etch rate and uniformity in 2nd step Mo

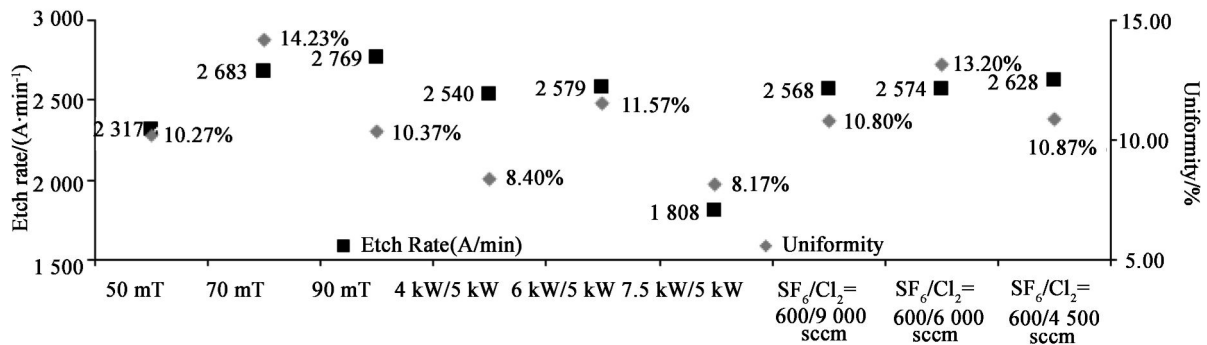
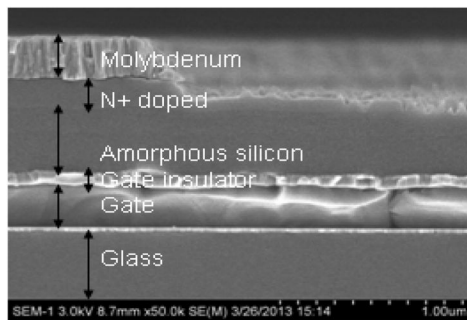


图5 功率、压力和气体比例对欧姆接触层刻蚀率和均一性的影响

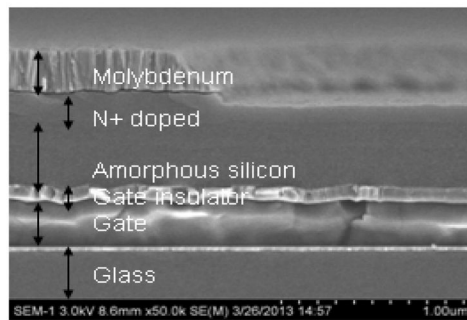
Fig. 5 Influence of power, pressure, and gas ratio on the etch rate and uniformity in n-plus

3.6 全膜整合试验

在以上单层膜试验的基础之上,我们得到 4 个步骤各自的刻蚀最优条件。由于四步刻蚀是整合在后刻蚀性能和单层隔离刻蚀不同,因此要在全层膜验证 4 个条件的相互之间的影响,试验观察前一个步骤对后续步骤的影响从而继续进行工艺微调。有源层刻蚀为了维持较小的有源层“边缘凸沿”,将刻蚀时间增加 8 s。试验结果有源层线和数据线之间的 Fence(边缘凸沿)宽度差为 $2.19\ \mu\text{m}$ 。单层钼 1 次湿刻后剩余 $(220+20)\ \text{nm}$ 。第一步选用氯气、氧气、六氟化硫(6 000、6 000、200) sccm,刻蚀 10 s,第二步采用氯气、氧气流量为 3 400 sccm 和 6 700 sccm,第二步刻蚀钼的过刻率为 100%(即增加 15 s)。沟道刻蚀之后的后处理步骤对于沟道粗糙度的影响很大,为了提高均一性、改善沟道的粗糙度,从而改善电气特性,沟道刻蚀之后增加 500 sccm 氦气进行等离子体均一化。但是在高功率条件下,氦气会与非晶硅膜层发生刻蚀反应,薄膜晶体管特性改变,所以氦气通常用于低功率的刻蚀工艺^[18],因此后处理步的射频功率降为 2 kW(源极)、3 kW(偏置)。



(a)用氦气的沟道刻蚀结果
(a)N+etch result with helium



(b)不用氦气的沟道刻蚀结果
(b)N+etch result without helium

图 6 完整膜层的扫描电子显微镜结果

Fig. 6 SEM results of full layer experiment

扫描电子显微镜对比结果和刻蚀后图形尺寸的测量结果如图 6 和图 7,结果显示沟道表面粗糙度得到了改善。下底膜的损伤厚度控制较好,测得沟道厚度损失量为 816 nm,栅极绝缘层剩余厚度为 384.9 nm,电子迁移率为 $0.93\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, I_{on} 为 $7.15\ \mu\text{A}$, I_{off} 为 $3.53\ \text{pA}$, V_{th} 为 $0.28\ \text{V}$ 。比起“2 干 2 湿”,薄膜晶体管开关沟道变短,开口率变大,轮廓更易于保持。

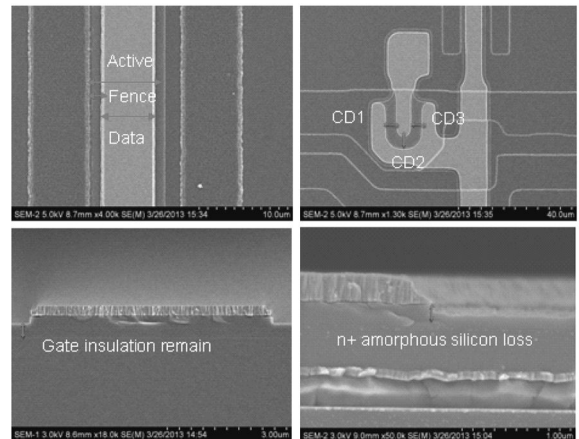


图 7 完整膜层试验的刻蚀后尺寸测量图

Fig. 7 CD (Critical dimensions) of full layer experiment

4 结 论

(1)“1 干 1 湿”刻蚀整合后的结果表明:“1 干 1 湿”法在半透过光刻胶简化步骤,使射频功率减少了 6 kW,氧气使用量减少 3 000 sccm;在有源层刻蚀共减少射频功率 18 kW。六氟化硫、氯气流量也分别从 6000 sccm、12 000 sccm 减少为 3 500 sccm 和 3 500 sccm。在沟道刻蚀工艺共减少 3.5 kW 射频功率,氯气使用量减少 50%。从整体上实现了射频功率降低和氯气减少,从而实现了低耗化。

(2)金属钼的干法刻蚀采用 2 步完成,第一步氯气量 6 000 sccm,第二步氯气量降低为 3 400 sccm,组合刻蚀完成总厚度为 220 nm 的单层钼膜后,扫描电子显微镜测试结果显示坡度角为 53° ,得到了较好的形貌。但是钼的刻蚀速度并不均匀,存在明显的“尺寸效应”。因此如果对于其他不同厚度的钼刻蚀,需要重新验证计算刻蚀率。刻蚀率不是一个常量,和剩余膜层厚度存在非线性关系。

(3)沟道刻蚀的后处理步骤增加 500 sccm 氮气,同时使用较低的射频电力(源极功率、偏压功率为 2 kW、3 kW)后,发现沟道非晶硅的厚度变小、粗糙度得到改善,从而保证了刻蚀口的图形尺寸和薄膜晶体管电学特性。

(4)大尺寸薄膜晶体管液晶显示器的 4 全膜层的“1 干 1 湿”,比起“2 干 2 湿”方法,蚀刻工艺总时间减少了 16 s;薄膜晶体管沟道变短,开口率变大,电子迁移率增大。

参 考 文 献:

- [1] Kai Y U. TFT-LCDs as the future leading role in FPD [C]// *Process of the International Workshop on the Physics of Semiconductor Devices*, Kobe: Ukai Display Device Institute, 2007: 29-34.
- [2] 谷至华. 薄膜晶体管(TFT) 阵列制造技术[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007: 67-69.
Gu Z H. *Thin Film Transistor Array Manufacturing Technology* [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2007: 67-69. (in Chinese)
- [3] Li L, Qin W, Xue J S, *et al.* Analysis of TFT array erosion defect [J]. *Chin. J. Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(1): 29-33.
- [4] Song J H, Kwon D J, Kim S G. Advanced four-mask process architecture for the a-Si TFT array manufacturing method [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2002, 3(1): 1038-1041.
- [5] Li C M, Tian L H, Xu Z, *et al.* Sputtering of W-Mo alloy under ion bombardment [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 1999, 12(3): 629-633.
- [6] 李远士, 牛焱, 吴维径. 金属材料的高温氯化腐蚀[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2000, 12(1): 41-44.
Li Y S, Niu Y, Wu W J. Metal materials, high-temperature chloride corrosion [J]. 2000, 12(1): 41-44. (in Chinese)
- [7] Muhammad M H, Nairn M, Zhan Z B. Metal wet etch issues and effects in dual metal gate stack integration [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2006, 153(5): 43-46.
- [8] Kang S, Efremov A, Yun, *et al.* Etching characteristics and mechanisms of Mo and Al₂O₃ thin films in O₂, Cl₂, Ar inductively coupled plasmas: effect of gas mixing ratios [J]. *Thin Solid Films*, 2004, 552(3): 105-110.
- [9] Xiong S Z, Zhao Y. Al Ti alloy grid a-Si TFT study [J]. *Chin. J. Semiconductors*, 1997, 18(10): 771-775.
- [10] 谢晓强, 戴旭涵, 赵小林, 等. 反应离子刻蚀中的边缘效应及其补偿办法[J]. *真空电子技术*, 2005, 12(2): 41-44.
Xie X Q, Dai X H, Zhao X L, *et al.* Reactive ion etching of edge effect and its compensation method [J]. *Journal of vacuum electronic technology*, 2005, 12(2): 41-44. (in Chinese)
- [11] Zheng Z R, Chen Z W, Jiang D H, *et al.* Study on reactive ion etching of Si and SiN_x in Cl₂ + SF₆ mixtures [J]. *Advanced Display*, 2008, 19(3): 48-50.
- [12] 刘翔, 王章涛, 崔祥彦, 等. 液晶阵列四次光刻工艺中光刻胶灰化工艺的研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2008, 28(4): 291-293.
Liu X, Wang Z T, Cui X Y, *et al.* Photoresist ashing in four-mask fabrication of thin film transistor crystal liquid [J]. *Chin. J. Vacuum Science and Technology*, 2008, 28(4): 291-293. (in Chinese)
- [13] 张智胜. 超深亚微米物理设计中天线效应的消除[J]. *半导体技术*, 2012, 37(6): 429-432.
Zhang Z S. Process antenna effect elimination in ultra deep submicron physical design [J]. *Semiconductor Technology*, 2012, 37(6): 429-432. (in Chinese)
- [14] 苟本鹏. 大尺寸面板液晶显示屏阵列工艺中的金属钼刻蚀研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007: 62-70.
Xun B H. Large size liquid crystal display panel array of molybdenum metal etching research [D]. *Chendu: University of Electronic Science and Technology*, 2007: 62-70. (in Chinese)
- [15] Baek K H, Yun S J, Park J M, *et al.* The role of Sulfur during Mo etching using SF₆ and Cl₂ gas chemistries [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1998, 17(17): 1483-1486.
- [16] 闫方亮, 沈世妃, 侯智, 等. a-Si 厚度对 TFT 开关特性的影响[J]. *现代显示*, 2011, 12(7): 23-25.
Yan F L, Shen S F, Hou Z, *et al.* Effect of a-Silicon thickness on TFT characteristic [J]. *Advanced Display*, 2011, 12(7): 23-25. (in Chinese)

- [17] 宋跃, 邹雪城. a-Si TFT 亚阈特征参数与有源层的厚度效应[J]. 固体电子学研究进展, 2004, 12(1): 20-25.
Song Y, Zou X C. a-Si TFT threshold characteristic parameters with the thickness of the active layer effect [J].
Journal of Solid State Electronics Research and Development, 2004, 12(1): 20-25. (in Chinese)
- [18] 刘北平, 李晓良, 朱海波. 氯气基气体感应耦合等离子体刻蚀 GaN 的工艺[J]. 半导体学报, 2006, 27(7): 1335-1338.
Liu B P, Li X L, Zhu H B. Cl_2 gases inductively coupled plasma etching process of GaN [J]. *Chin. J. Semiconductors*, 2006, 27(7): 1335-1338. (in Chinese)

作者简介: 张定涛(1977—), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 研究方向为林业加工装备与技术。E-mail: zhang dingtao@boe.com.cn