

铜工艺阵列基板上数据线和公共电极不可见的短路原因分析及改善

林忱, 冯玉春, 陈曦, 汤桂泉, 李鑫, 周贺, 刘文瑞, 负向南

引用本文:

林忱, 冯玉春, 陈曦, 等. 铜工艺阵列基板上数据线和公共电极不可见的短路原因分析及改善[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(10): 1036–1043.

LIN Chen, FENG Yu-chun, CHEN Xi, et al. Research and improvement of data line and common line invisible short in copper process array substrate[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(10): 1036–1043.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203510.1036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于以顶层ITO为像素电极设计的产品工艺优化

Process optimization based on products of pixel top design

液晶与显示. 2020, 35(3): 219–226 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203503.0219>

4-Mask工艺Cu腐蚀分析及改善研究

Research of Cu corrosion in 4-Mask process

液晶与显示. 2019, 34(2): 125–129 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193402.0125>

TFT-LCD公共电压耦合畸变的影响因素及与线残像关系的研究

Influencing factors of TFT-LCD common voltage on the coupling of signal voltage and the relationship with line image sticking

液晶与显示. 2018, 33(4): 277–284 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183304.0277>

栅极坡度角对TFT器件制程的影响

Influence of gate profile on TFT manufacturing process

液晶与显示. 2020, 35(10): 1026–1035 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203510.1026>

TFT-LCD背板设计对线残像改善的研究

Investigation on the improvement of line image sticking by array mask design of TFT-LCD

液晶与显示. 2018, 33(8): 625–630 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183308.0625>

文章编号:1007-2780(2020)10-1036-08

铜工艺阵列基板上数据线和公共电极不可见的短路原因分析及改善

林 忱*, 冯玉春, 陈 曦, 汤桂泉, 李 鑫, 周 贺, 刘文瑞, 负向南
(福州京东方光电科技有限公司, 福建 福州 350300)

摘要: 本文针对铜工艺 TFT-LCD 制作过程中遇到的不可见的信号线和公共电极信号线短路(DCS), 提出切割实验方案, 精确定位不可见类型的 DCS 异常的实际位置。基于数据和失效模式分析结果, 设计不同灰化工艺时间膜层形貌观察实验, 探究发生机理。本文产出的异常发生机理是灰化过程中反应气体 SF_6 残留在“屋檐状”光刻胶下方对公共电极 Cu 金属造成腐蚀, 在产线湿度高的情况下易加剧腐蚀, 腐蚀产物向上生长, 后续栅极绝缘层/活性层镀膜无法完全覆盖住腐蚀产物, 造成源、漏(Source & Drain, SD)层镀膜后数据线与腐蚀产物相连接, 最终形成 TFT 基板膜层正面不可见的 DCS 异常。依据以上调查结果进行灰化工艺 SF_6 气体用量、产线相对湿度(RH)、灰化工序至 2nd 栅极湿刻工序等待时间和设计相关的改善验证, 最终通过量产导入灰化工艺 SF_6 气体用量降低、产线相对湿度(RH)降低、缩短灰化工序至 2nd 栅极湿刻工序等待时间和优化异常发生区域开槽设计以增大间距 H 等改善措施, 大幅减少了不可见类型的 DCS 异常。

关键词: 铜工艺; 不可见; 数据线; 公共电极; 短路

中图分类号: TN873.93 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/YJYXS20203510.1036

Research and improvement of data line and common line invisible short in copper process array substrate

LIN Chen*, FENG Yu-chun, CHEN Xi, TANG Gui-quan,
LI Xin, ZHOU He, LIU Wen-rui, YUN Xiang-nan

(Fuzhou BOE Optoelectronics Technology Co., Ltd., Fuzhou 350300, China)

Abstract: Contrapose data line and common line invisible short(DCS Invisible) in production of copper process array substrate, a new method based on cutting for locating the position of DCS Invisible is presented. Based on the result of data and failure analysis, an observation experiment of layer section with different ashing process time is designed to explore the mechanism. In ashing process, reaction gas SF_6 below the photoresist which looks like the shape of roof will corrode copper metal of common line. Under the condition of high humidity, the corrosion will be aggravated. Corrosion products grow up and can't be covered by thin film of GI/Active. After thin film process of SD(Source & Drain),

收稿日期:2020-03-31; 修订日期:2020-04-24.

* 通信联系人, E-mail: linchen_1102@126.com

the data line will connect with corrosion products and finally cause DCS which is invisible on the front side of array substrate. Based on the research, the experiment of reaction gas consumption of SF_6 in ashing process, relative humidity, waiting time from Ashing to 2nd Gate Wet Etch and design improvement is proceeded. Finally, DCS Invisible is solved by reducing reaction gas consumption of SF_6 , decreasing relative humidity, controlling waiting time from Ashing to 2nd Gate Wet Etch and insuring space H of slotting design larger.

Key words: copper process; invisible; data line; common line; short

1 引言

随着现阶段人们生活水平的提高,对显示器尺寸、分辨率及刷新频率提升的需求越来越强烈,显示器面板从最初的中小尺寸逐渐向大尺寸发展^[1]。因此,在相同尺寸的玻璃基板上的面板数量也就相应减少。以 8.5 世代线为例,2 500 mm×2 200 mm 的玻璃基板分别只能制作 3 张 1 651 mm(65 in)、2 张 2 184.4 mm(86 in)、1 张 2 794 mm(110 in)的面板。

为实现大面积高解析度的液晶显示,通常需要采用低阻抗金属材料、高性能开关元件以及高精加工技术等手段^[2]。在低阻抗金属制作 TFT 信号线上,目前研究和使用的材料是铝(Al),而铜(Cu)相对于铝具有更低的电阻率(铜 $\sim 2 \mu\Omega \cdot \text{cm}$,铝 $\sim 4 \mu\Omega \cdot \text{cm}$)及良好的抗电迁移能力,因此越来越多的液晶面板企业转而对铜工艺的研究和制作^[3]。

TFT 工艺过程中,设备环境中的灰尘(Particle,PT)、水渍残留等异常都会造成 TFT 电路的缺陷。脱落(Peeling)类的缺陷会造成电路开路(Open),栅极信号线开路,行业内称之为 Gate Line Open,简称 GO;数据信号线的开路,行业内称之为 Data Line Open,简称 DO。残留(Remain)类的缺陷会造成电路短路,数据信号线和栅极信号线之间的短路,行业内称之为 Data Gate Short,简称 DGS;数据信号线和公共电极信号线之间的短路,行业内称之为 Data Common Short,简称 DCS;栅极信号线和公共电极信号线之间的短路,行业内称之为 Gate Common Short,简称 GCS;数据信号线之间的短路,行业内称之为 Data Data Short,简称 DDS;栅极信号线之间的短路,行业内称之为 Gate Gate Short,简称 GGS。

在 TFT 基板制作过程中会经历多道检测工

序,包括电学检测和光学检测。针对电学检测到的像素电压的差异和分布,定位缺陷所在数据信号线或栅极信号线,再通过自动光学检查机扫描定位并记录该线上的实际缺陷坐标。在后续维修过程中,通过脉冲激光的辐射烧蚀作用切割分离短路类的缺陷,通过 LCVD(利用反应气体分子对特定波长的激光共振吸收,前驱体受到激光作用后发生解离的成膜方法)等方法在大气氛围中沉积额外的导电薄膜修复开路类的缺陷,以挽回良率损失^[4]。

在铜工艺 TFT-LCD 的制作过程中,存在不可见类型的 DCS 异常,电学检测可以定位缺陷所在数据信号线,但光学检测设备扫描该数据信号线时无法查找到真实缺陷,从而造成该异常无法进行修复,导致良率损失。对于 1 092.2 mm(43 in)产品,该异常发生率高达 2.95%。随着显示器尺寸的大屏化,在同一张 TFT 基板上发生相同数量的缺陷点位就会造成更大的良率损失(例如 8.5 世代线一张玻璃上能承载 10 个 1 092.2 mm(43 in)面板或 3 个 1 651 mm(65 in)面板,若发生 1 个缺陷点,则 1 092.2 mm(43 in)产品良率损失 10%,而 1 651 mm(65 in)产品良率损失 33%)。该异常形成原因未知且无明确的改善方向,是铜工艺 TFT-LCD 行业内亟待解决的问题之一。

本文通过切割实验定位不可见类型的 DCS 异常实际位置并借助失效模式分析(Failure Analysis,FA)的手段分析异常区域膜层形貌,基于数据和 FA 分析结果设计不同灰化工艺时间膜层形貌观察实验,探究发生机理并设计改善验证方案。改善方案实施后不可见类型的 DCS 异常改善效果显著,以 1 092.2 mm(43 in)产品为例,不可见类型的 DCS 异常发生率由 2.95%降低至 0.03%。本文的实验以及数据均基于 1 092.2 mm(43 in)产品。

2 不可见类型 DCS 异常失效模式分析

2.1 切割定位实验

实验所需设备:精测检查机(武汉精测)、激光显微镜(首尔工程, Borderless_65)。

将面板(Open Cell)与精测检查机连接并点亮放置于激光显微镜平台上,显微镜调整背光亮度充当背光源,控制精测检查机将面板显示画面调整为 L127 灰阶画面。DCS 点灯现象为单根渐变暗线,如图 1 和图 2 所示。

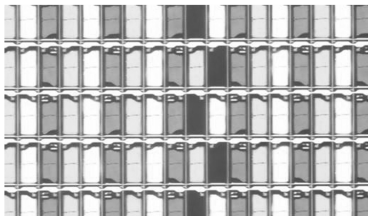


图 1 DCS 现象实物图

Fig.1 Actual image of DCS phenomenon

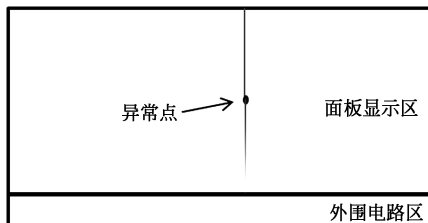


图 2 DCS 现象示意图

Fig.2 Simulate image of DCS phenomenon

控制显微镜激光镜头移动并从面板的 Data Pad Opposition(DPO)侧开始以一定间隔距离切割该异常数据线。切割第 1 点时,DPO 侧至切割点处的数据线被隔离显示为暗线(DO),切割点处至 Data Pad(DP)侧的数据线仍受短路点位影响显示为渐变暗线(DCS)。切割至第 N 点时,异常点仍未被隔离,DPO 侧至切割点 N 处显示为暗线(DO),DP 侧至切割点 N 处显示为渐变暗线(DCS)。点灯现象如图 3 和图 4 所示。

继续控制显微镜激光镜头切割至第 $N+1$ 点时,DCS 点位被隔离,DPO 侧至切割点 $N+1$ 的数据信号线被隔离显示为暗线(DO),DP 侧至切割点 $N+1$ 处的数据信号线不再受短路点位影响

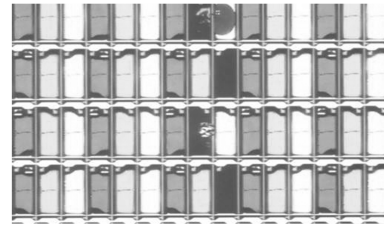


图 3 切割点 N 处的现象实物图

Fig.3 Actual image of phenomenon of point N

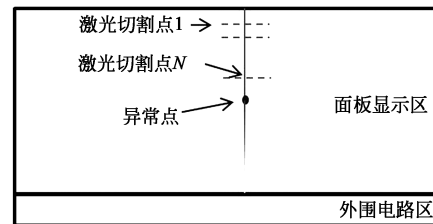


图 4 切割点 N 处的现象示意图

Fig.4 Simulate image of phenomenon of point N

而恢复正常显示。点灯现象如图 5 和图 6 所示。

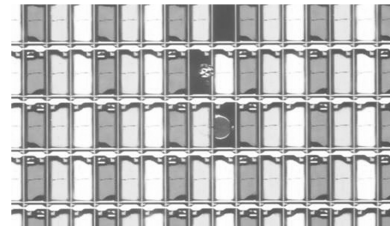


图 5 切割点 $N+1$ 处的现象实物图

Fig.5 Actual image of phenomenon of point $N+1$

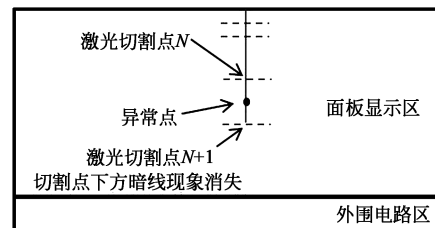


图 6 切割点 $N+1$ 处的现象示意图

Fig.6 Simulate image of phenomenon of point $N+1$

最后使用激光显微镜查找面板 TFT 侧切割点 N 至切割点 $N+1$ 之间的异常数据信号线,可发现 TFT 侧数据信号线和公共电极信号线交界处存在正面不可见、背面可见的小黑点,如图 7 和图 8 所示。针对 20 张不可见类型的 DCS 异常面板进行切割定位实验观察,发现小黑点均如图 8

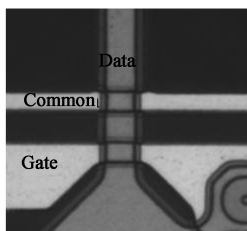


图 7 异常点正面图
Fig.7 Front image of abnormal point

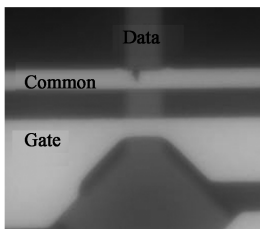


图 8 异常点背面图
Fig.8 Back image of abnormal point

所示位于公共电极信号远离栅极信号线的一侧。正因为该异常在 TFT 正面不可见,所以光学检测设备扫描该数据信号线时无法查找到真实缺陷,造成该异常无法进行修复。

2.2 失效模式(FA)分析

借助聚焦离子束-扫描电子显微镜(FIB-SEM)设备对切割定位实验锁定的小黑点进行微观截面形貌分析,可见公共电极信号线 Cu 金属部分缺失并伴随向上生长,导致与数据信号线发生短路,如图 9 所示。从微观形貌图还可以看出栅极绝缘层/活性层(GI/Active)覆盖向上生长的 Cu 膜层,证明 Cu 膜层异常发生在栅极绝缘层镀膜前,即栅极工艺区间段。

借助能谱分析仪(EDS)对图 10 中的异常区域和图 11 中的正常区域进行元素分析,可见公共电极信号线正常区域主要元素为 Cu。异常区域

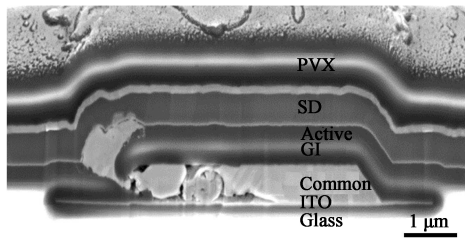


图 9 异常点 FIB 图
Fig.9 FIB image of abnormal point

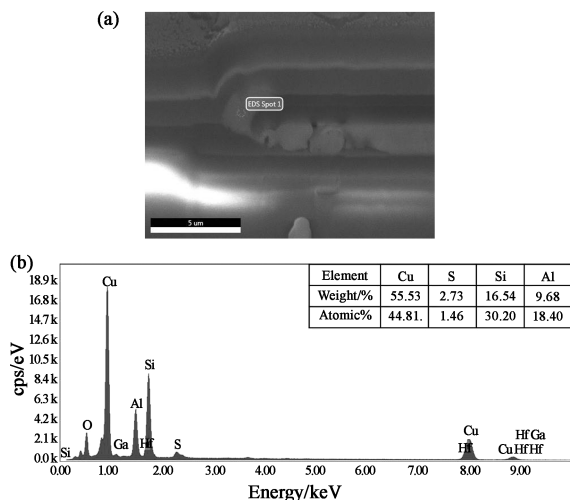


图 10 异常点成分分析。(a)成分分析点位;(b)成分分析结果。

Fig.10 Component analysis of abnormal point. (a) Position of component amalysis; (b) Result of component analysis.

主要元素为 Cu 且同时存在少量 S 元素,判定为 Cu 的腐蚀产物。

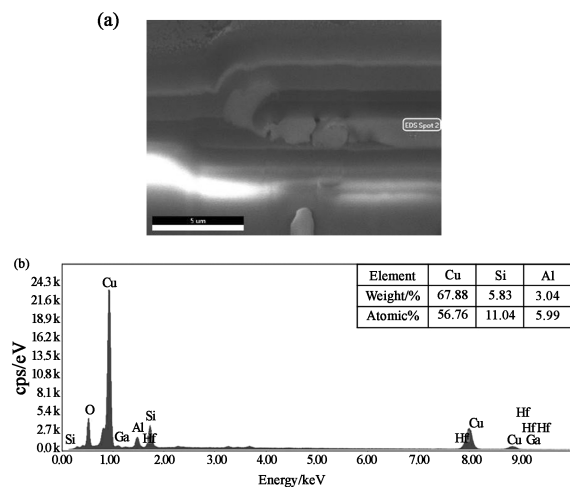


图 11 正常点成分分析。(a)成分分析点位;(b)成分分析结果。

Fig.11 Component analysis of normal point. (a) Position of component amalysis; (b) Result of component analysis.

3 不可见类型 DCS 异常发生机理探究

3.1 数据分析

A-Si TFT 8.5 世代线主要为 4 掩膜版工艺,

栅极/公共电极工艺区间段采用半色调掩膜版工艺进行制作,具体工艺流程为 1st ITO 沉积→栅极/公共电极沉积→光刻→1st 栅极湿刻→1st ITO 湿刻→灰化→2nd 栅极湿刻→去胶。收集生产过程中大量数据分析发现,栅极工艺区间段灰化工艺设备不同,不可见类型的 DCS 异常发生率则不同,且生产线 a 层灰化设备产出产品不可见类型的 DCS 异常发生率明显高于 b 层灰化设备。实际测量产线 b 层相对湿度(RH)为 58%,产线 a 层相对湿度(RH)为 60%,存在湿度差异性。

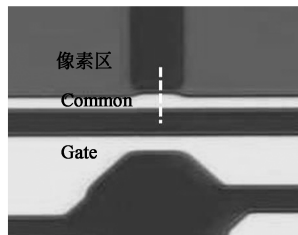


图 12 截面 1 位置

Fig.12 Position of section 1

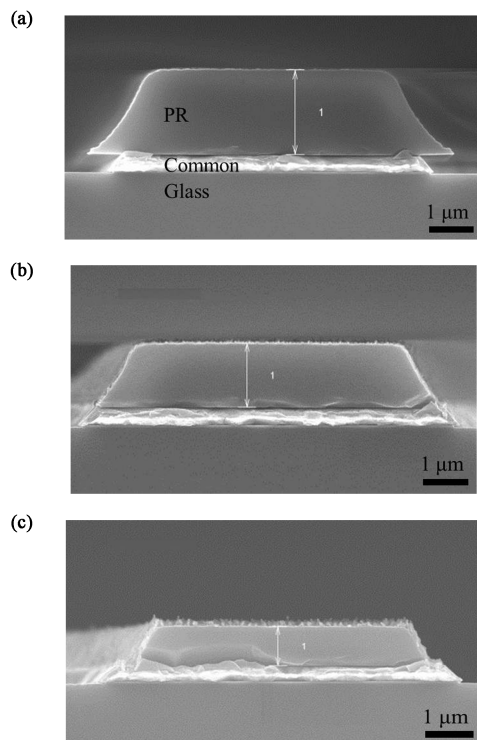


图 13 不同灰化工艺时间条件下截面 1 形貌。(a) 未灰化;(b)灰化 40 s;(c)灰化 80 s。

Fig.13 Image of section with different ashing process time. (a) Noashing; (b) Ashing 40 s; (c) Ashing 80 s.

3.2 不同灰化工艺时间形貌观察实验

针对异常发生位置设计不同灰化工艺时间截面形貌观察实验。图 12 是公共电极信号线截面 1 位置示意图,该示意图采用栅极/公共电极工艺完成后的光学图片进行展示。图 13 中(a)、(b)和(c)分别是未灰化、灰化 40 s 和灰化 80 s 的截面 1 位置扫描电镜(SEM)形貌图。图 14 是像素区截面 2 位置示意图,该示意图采用栅极/公共电极工艺完成后的光学图片进行展示。图 15 中(a)、(b)和(c)分别是未灰化、灰化 40 s 和灰化 80 s 的截面 2 位置 SEM 形貌图。截面 1 是正性光刻胶未

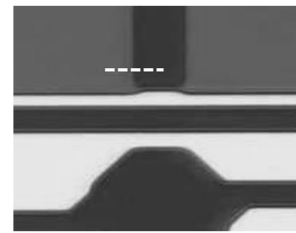


图 14 截面 2 位置

Fig.14 Position of section 2

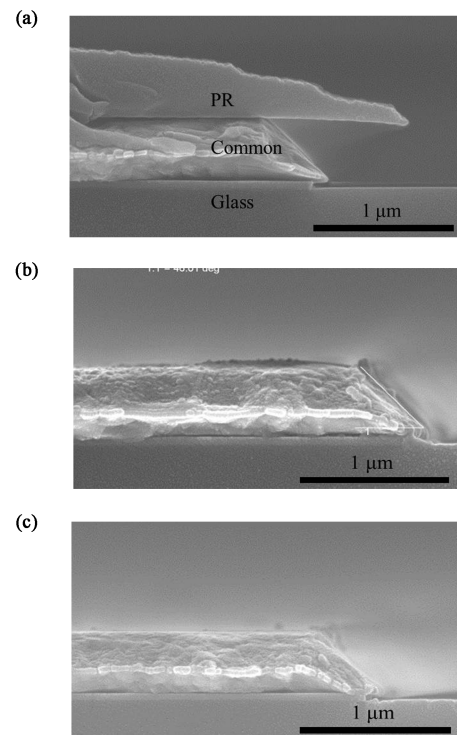


图 15 不同灰化工艺时间条件下截面 2 形貌。(a) 未灰化;(b)灰化 40 s;(c)灰化 80 s。

Fig.15 Image of section 2 with different ashing time. (a) Noashing; (b) Ashing 40 s; (c) Ashing 80 s.

被曝光的区域;截面 2 是半掩模区域,该区域正性光刻胶残留的膜厚比未被曝光的区域薄。

未灰化时,如果把光刻胶比作“山”,则异常高发区域就是三面环山的设计。光刻胶宽度大于公共电极信号线宽度,呈“屋檐”状。“屋檐”状的光刻胶下方容易残留灰化过程中的反应生成物以及反应气体(SF_6)。

随着灰化工艺时间的增加,光刻膜厚减薄并伴随宽度减小。灰化 80 s 时,公共电极信号线两侧已不受光刻胶保护,公共电极信号两侧表面平整度差,存在反应物残留的可能性。

3.3 机理探究

铜的化学腐蚀主要来自几个方面^[5]:氧化性的酸性物质,如硝酸、浓硫酸等;胺基化合物与 Cu 形成的络合物;氧化性的重金属盐,如 FeCl_3 ;S 和含活性 S 的化合物,形成 Cu_xS 。Cusano 等^[6]用电镜检测长时间运行的铜、铝合金部件,发现部件的表面形成一层几纳米到几十纳米的腐蚀斑或腐蚀膜。用 X 射线衍射(XRD)方法分析得到的腐蚀膜主要成分是 $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$,还有少量的 CuS 和 Cu_2S ,说明润滑油造成的铜腐蚀主要是由润滑油中存在的活性硫或使用过程中产生的活性硫引起的^[7]。

研究表明,硫腐蚀生成的硫化物易粘着于基体上并凸起向上生长^[8],并且随着相对湿度(RH)和 S 浓度增大,腐蚀反应加快^[9-10]。

基于以上分析结果,灰化过程中反应气体 SF_6 残留在“屋檐状”光刻胶下方会对公共电极信号线 Cu 金属造成腐蚀,产线湿度高更易加剧腐蚀。腐蚀产物向上生长,后续栅极绝缘层/活性层镀膜无法完全覆盖住腐蚀产物,造成源漏层镀膜后数据信号线与腐蚀产物相连接,最终形成 TFT 基板膜层正面不可见的 DCS 异常。

4 改善方向和验证结果

4.1 灰化工艺 SF_6 气体用量

灰化工艺使用气体是 SF_6 和 O_2 。基于以上机理提出降低 S 浓度的验证方案,进行 SF_6 流量为 2 400 mL/min 和 1 000 mL/min 条件验证。 SF_6 气体用量 1 000 mL/min 验证条件较 2 400 mL/min 验证条件下不可见类型的 DCS 异常发生率降低 0.3%。

4.2 产线相对湿度(RH)

实际测量产线 b 层相对湿度(RH)为 58%,产线 a 层相对湿度(RH)为 60%,存在湿度差异性,a 层灰化设备产产品的不可见类型的 DCS 异常发生率明显高于 b 层灰化设备。基于以上机理,提出降低产线相对湿度(RH)的验证方案。

控制产线相对湿度(RH)至 51%~53.5% 范围进行产品验证,验证结果如图 16 所示。从图中可以看出,相对湿度(RH)<52% 时,不可见类型的 DCS 异常发生率明显降低。

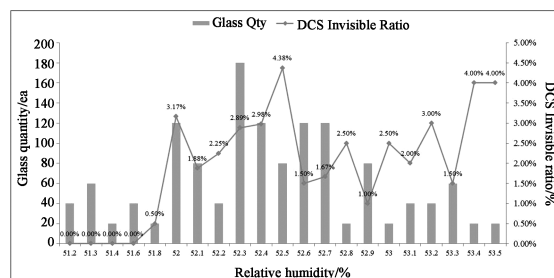


图 16 相对湿度与不可见类型的 DCS 异常发生率关系

Fig.16 Relationship between RH and DCS Invisible ratio

4.3 灰化工序至 2nd栅极湿刻工序等待时间

基于以上机理提出缩短灰化工序至 2nd栅极湿刻工序等待时间的验证方案,以避免灰化工艺完成后残留反应气体以及反应物的产品在高湿度的产线环境中停留,降低腐蚀发生的可能性。

控制灰化工序至 2nd栅极湿刻工序等待时间处于 0~3 h 进行产品验证,验证结果如图 17 所示。从图中可以看出,等待时间<1 h 时,不可见类型的 DCS 异常发生率明显降低。

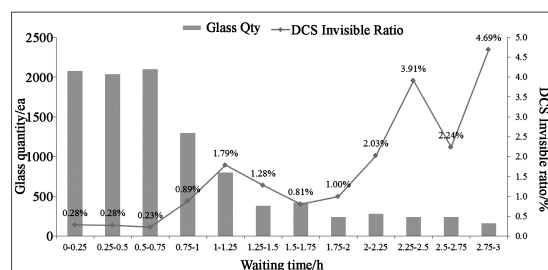


图 17 等待时间与不可见类型的 DCS 异常发生率关系

Fig.17 Relationship between wait time and DCS Invisible ratio

4.4 设计优化

前期失效模式分析以及不同灰化工艺时间形貌观察实验所观察到的现象如下:异常发生区域均位于公共电极信号线远离栅线的一侧,该区域3面均被“屋檐”状的光刻胶所包围,“屋檐”状的光刻胶下方容易残留灰化过程中的反应生成物以及反应气体(SF_6),加剧腐蚀。基于该实验现象进行异常区设计优化,该区域空间越狭窄越容易残留灰化反应气体,采用开槽设计将间距 H 从 $16\text{ }\mu\text{m}$ 增大至 $23\text{ }\mu\text{m}$ 以扩大该区域空间。

图 18 是设计优化前和优化后的栅极/公共电极工艺完成后的光学实物图,图 19 是优化前和优化后的设计图。

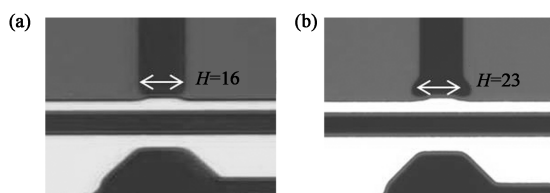


图 18 设计优化前(a)和优化后(b)的实物图

Fig.18 Actual image before (a) and after (b) optimal design

优化设计的新掩膜版验证导入后,不可见类型的 DCS 异常发生率降低 0.5%。

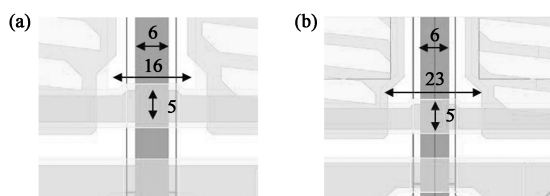


图 19 优化前(a)和优化后(b)的设计图

Fig.19 Drawing before(a) and after(b) optimal design

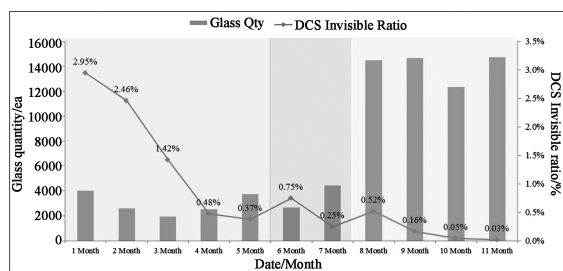


图 20 不可见类型的 DCS 异常发生率

Fig.20 DCS Invisible ratio

本文针对铜工艺 TFT-LCD 的制作过程中遇到的不可见类型的 DCS 异常,提出切割实验方案精确定位不可见类型的 DCS 异常实际位置,基于数据和失效模式分析结果设计不同灰化工艺时间膜层形貌观察实验进行发生机理探究。再依据以上调查结果进行灰化工艺 SF_6 气体用量、产线相对湿度(RH)、灰化工序至 2nd 栅极湿刻工序等待时间和设计相关的改善验证。改善效果如图 20 所示,阶段 1(1~5 Month)量产导入产线相对湿度(RH)降低和缩短灰化工序至 2nd 栅极湿刻工序等待时间的改善措施;阶段 2(6~7 Month)量产导入灰化工艺 SF_6 气体用量降低的改善措施;阶段 3(8~11 Month)量产导入开槽优化设计以增大间距 H 。可以得出结论如下:

(1)降低灰化工艺 SF_6 气体用量可以减轻 S 腐蚀对 Cu 金属的影响,降低腐蚀反应速率;

(2)降低产线相对湿度(RH)可以减轻 S 腐蚀对 Cu 金属的影响,降低腐蚀反应速率;

(3)缩短灰化工序至 2nd 栅极湿刻工序等待时间可以避免灰化工艺完成后残留有反应气体以及反应物的产品在高湿度的产线环境中停留,从而达到减轻 S 腐蚀对 Cu 金属的影响的目的;

(4)异常发生区域采用开槽设计扩大该处空间以避免灰化反应气体残留,从而达到减轻 S 腐蚀对公共电极信号线 Cu 金属的影响的目的。

5 结 论

灰化过程中反应气体 SF_6 残留在光刻胶下方会对公共电极信号线 Cu 金属造成腐蚀,产线湿度高更易加剧腐蚀。腐蚀产物向上生长,后续栅极绝缘层/活性层镀膜无法完全覆盖住腐蚀产物,造成源漏层镀膜后数据信号线与腐蚀产物相连接,最终形成 TFT 基板膜层正面不可见的 DCS 异常。该异常可以通过降低灰化工艺 SF_6 气体用量、降低产线相对湿度(RH)、缩短灰化工序至 2nd 栅极湿刻工序等待时间和优化异常发生区域开槽设计以增大间距 H 的措施得以改善。

参 考 文 献:

- [1] 刘莎,王丹,杨照坤,等.TFT-LCD 技术发展趋势浅析 [J].液晶与显示,2018,33(6):457-463.
LIU S, WANG D, YANG Z K, *et al.* Key technology trends analysis of TFT-LCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(6): 457-463. (in Chinese)
- [2] 罗丽平,负向南,金基用.TFT-LCD 生产及发展概况 [J].现代显示,2012(3):31-38.
LUO L P, YUN X N, KIM K Y. The manufacturing and developing of the TFT-LCD [J]. *Advanced Display*, 2012(3): 31-38. (in Chinese)
- [3] TSAIW C, LAI J Y, TU K Y, *et al.* A novel barrierless Cu gate for TFT-LCD [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2006, 37(1): 1181-1184.
- [4] 张伟,陈小英,马永生,等.激光化学气相沉积法在 TFT-LCD 电路缺陷维修中的应用 [J].液晶与显示,2019,34(8):755-763.
ZHANG W, CHEN X Y, MA Y S, *et al.* Application of laser chemical vapor deposition in repairing TFT-LCD circuit defects [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(8): 755-763. (in Chinese)
- [5] SANAD S H, TAMAN A R. Corrosion inhibition of copper and carbon steel in white petroleum oil [J]. *Surface Technology*, 1984, 23(2): 159-166.
- [6] CUSANO C M, WANG J C. Corrosion of copper and lead containing materials by diesel lubricants [J]. *Lubrication Engineering*, 1995, 51(1): 89-95.
- [7] 韩恒文,段庆华.含硫添加剂对润滑油铜腐蚀性能的影响 [J].石油炼制与化工,2013,44(4):70-74.
HAN H W, DUAN Q H. Effect of S-containing additives in lubricant oil on copper corrosion [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2013, 44(4): 70-74. (in Chinese)
- [8] 王嘉敏,董佩环.铁基合金在六氟化硫中的腐蚀[J].腐蚀与防护,1987(3):2-5.
WANG J M, DONG P H. Corrosion of iron-base alloy in sulfur hexafluoride [J]. *Corrosion and Protection*, 1987(3): 2-5. (in Chinese)
- [9] 齐东梅,成若义,杜小青,等.Cu 及其合金的大气腐蚀研究现状 [J].中国腐蚀与防护学报,2014,34(5):389-398.
QI D M, CHENG R Y, DU X Q, *et al.* Review on atmospheric corrosion of copper and copper alloys [J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2014, 34(5): 389-398. (in Chinese)
- [10] SASAKI T, ITOH J, HORIGUCHI Y, *et al.* Quantitative determination of corrosion products and adsorbed water on copper in humid air containing SO₂ by IR-RAS measurements [J]. *Corrosion Science*, 2006, 48(12): 4339-4351.

作者简介:



林 忱(1989—),男,福建福州人,硕士,工程师,2015 年于东南大学获得硕士学位,主要从事 TFT-LCD 工艺技术研究。E-mail: linchen_1102@126.com