

基于MEMS辅助的显示与LCD工艺

卜倩倩, 王丹, 邱云, 孙晓, 胡伟频, 魏从从, 王纯, 姜明宵

引用本文:

卜倩倩, 王丹, 邱云, 等. 基于MEMS辅助的显示与LCD工艺[J]. 液晶与显示, 2020, 35(5): 430–436.

BU Qian-qian, WANG Dan, QIU Yun, et al. MEMS based display and LCD technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(5): 430–436.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203505.0430>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

适合产业化的显示屏化学减薄工艺的研究

Research on display panel chemical slimming process for industrialization

液晶与显示. 2016, 31(1): 52–57 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163101.0052>

色阻堆叠在阵列基板上形成液晶屏隔垫物的研究

Forming photo spacer by color filter stacking on array substrate in LCD technology

液晶与显示. 2019, 34(2): 130–135 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193402.0130>

平板电脑类产品暗态均匀性影响因素的研究与改善

Analysis and improvement research of black uniformity for tablet personal computer production

液晶与显示. 2019, 34(11): 1067–1072 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193411.1067>

反射显示技术的研究进展

Progress of reflective display technology

液晶与显示. 2019, 34(2): 169–176 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193402.0169>

基于彩色滤光片柱状隔垫物高度的液晶滴下工艺

LC drop process based on PS height of color filter

液晶与显示. 2020, 35(5): 437–443 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203505.0437>

文章编号:1007-2780(2020)05-0430-07

基于 MEMS 辅助的显示与 LCD 工艺

卜倩倩*, 王 丹, 邱 云, 孙 晓, 胡伟频, 魏从从, 王 纯, 姜明宵
(北京京东方显示技术有限公司, 北京 100176)

摘要:当前主流显示技术存在着显示功耗偏高的问题,基于 MEMS 辅助的显示由于可以取消偏光片和彩色滤光片的使用,更适用于户外、低功耗类的应用。为了将基于 MEMS 辅助的显示器大规模制造,将液晶显示工艺与基于 MEMS 辅助的显示进行材料和工艺的匹配意义重大。本文对 MEMS 与液晶显示加工工艺进行系统介绍,同时分析了 3 种主流基于 MEMS 辅助的显示模式,详细阐述了将现行规模生产下的液晶显示工艺应用于这些基于 MEMS 辅助的显示技术所做的一些工作和研究进展,并探讨了基于 MEMS 辅助的显示技术的发展趋势。

关 键 词: TFT-LCD 工艺; 基于 MEMS 辅助的显示; 研究进展

中图分类号: TN27; TN305.99 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20203505.0430

MEMS based display and LCD technology

BU Qian-qian*, WANG Dan, QIU Yun, SUN Xiao, HU Wei-pin,
WEI Cong-cong, WANG Chun, JIANG Ming-xiao

(Beijing BOE Display Technology CO., LTD., Beijing 100176, China)

Abstract: The mainstream TFT-LCD devices have the problem of high power consumption. On account of canceling the use of polarizer and color filter, the MEMS based display is more suitable for low power applications. For mass manufacturing of MEMS displays, it is significant to match TFT-LCD with MEMS based display, including material and process. This paper systematically introduces the MEMS and TFT-LCD process, analyzes three main display modes based on MEMS. Some work and research progress of applying low cost TFT LCD technology to these MEMS based display technologies are described in detail. The development trend of MEMS based display technology is also discussed.

Key words: TFT-LCD technology; MEMS based display; research development

1 引 言

薄膜晶体管(Thin Film Transistor, TFT)液晶显示技术最早出现于 20 世纪 60 年代,经过 30

余年的发展,逐步取代 CRT(Cathode Ray Tube)显示,并形成大规模生产。虽然之后出现了 OLED(Organic Light Emitting Diode)显示、QLED(Quantum Dot Light Emitting Diodes)显示及 Micro-LED(Micro-Light Emitting Diode)

收稿日期:2019-10-21;修订日期:2019-11-29.

* 通信联系人, E-mail: buqianqian@boe.com.cn

显示等多种显示技术,TFT-LCD(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display)显示技术仍为显示技术的基石。TFT-LCD 结构包括 TFT 基板、彩色滤光片基板、液晶层、配向膜、偏光片与背光模组。显示过程如下:背光模组发出光线,光线先后通过偏光片、液晶层、彩色滤光片单元,通过 TFT 控制液晶偏转实现显示。TFT-LCD 由于使用了偏光片、彩色滤光片等光损耗单元,其光利用率极低,约为 8%。近些年来,由于显示市场的激烈竞争,TFT-LCD 的市场受到了极大的挤压,然而由于工艺成熟度高,TFT-LCD 具有其他显示结构所不具备的成本优势。OLED 与 QLED 虽为自发光显示,但是由于材料稳定性与发光强度较难平衡,因而有其局限性。Micro LED 亦为自发光显示,具有低功耗、高亮度及高色彩饱和度等优点,但由于其转印技术不成熟,全彩化实现等方面还存在诸多技术瓶颈,因而并未实现产业化应用。

微机电系统(Micro-electro-mechanical Systems, MEMS)是一种集成机械和电学元素实现特定功能的系统,被广泛应用于日常的传感、制动器及电子等微结构中^[1-3]。MEMS 由静止单元和可移动单元组成,具体包括道、孔、悬臂、膜、腔以及其他结构。电源或电极用来提供电压和电荷至可移动单元和静止单元。若正电荷积累在可移动单元,负电荷积累在静止部分,就会产生一个相互吸引的静电力。静电力会使可移动单元移动到静止部分。当静电力比回复力大时,部件保持闭合;当电压被除去,根据不同的设计,可移动单元保持或回到初始状态。

MEMS 技术广泛应用于显示器件。主流的基于 MEMS 辅助的显示技术包括干涉调制显示(Interferometric Modulator Display, IMOD)技术、时分复用光学开关显示(TMOS, Time Multiplexed Optical Shutter Display)技术及光学微开关显示(DMS, Digital Micro Shutter Display)技术。本文对 MEMS 与 TFT-LCD 加工工艺进行了系统介绍,分析了 3 种主流的基于 MEMS 辅助的显示模式,讨论了近些年将低成本 TFT-LCD 工艺应用于基于 MEMS 辅助的显示技术所做的一些工作及研究进展。

2 MEMS 工艺与 TFT-LCD 工艺

MEMS 加工工艺目前主要有体硅微机械加工工艺、表面微机械加工工艺和非硅工艺 3 种。

体硅微机械加工工艺通过双面光刻、腐蚀及键合的方法对硅衬底进行加工,形成三维立体微结构。在体硅微机械加工工艺中,由于需要双面光刻机,因此需要在硅片正反面制作有精确位置要求的图形。常用于针对几十或几百微米的硅片,制作大的深宽比。深硅刻蚀是体硅微机械加工工艺的核心,利用刻蚀剂对硅的晶向依赖性,即其在不同晶面具有不同的腐蚀速率,从而刻蚀出具有高深宽比的凹槽。

表面微机械加工工艺,通过在硅片表面形成牺牲层并对其进行腐蚀,形成各种表面微结构。由于其微加工过程都是针对腐蚀硅片表面的薄膜上的牺牲层进行的,因而又称为牺牲层腐蚀技术。表面牺牲层技术是表面微机械技术的核心工艺,其关键在于牺牲层和腐蚀液材料的选择,需要腐蚀液在腐蚀牺牲层的同时几乎不腐蚀上面结构层和下面衬底。由于精度控制要求较高,因而通过精确控制膜厚,可以形成几微米的结构图形。

非硅工艺则是通过光刻、电铸和注塑工艺,形成较大深宽比(可达 200)的微结构,又称为 LIGA(即德文 Lithographie(光刻)、Galanofomung(电铸)与 Abformung(注塑))。由于要制作深度较大的微型器件,需要穿透力较强的 X-Ray 进行照射。而由于 X-Ray 深度光刻成本较高,无法进行大批量生产,因此目前 LIGA 技术的产业化需要通过电铸制模来实现。

TFT-LCD 是将微电子技术 with 液晶显示器技术巧妙结合的一种技术。将在硅基上进行的微电子精细加工的技术移植到大面积玻璃上,并将该阵列基板与带有彩色滤色膜的基板对盒,最后经偏光片贴覆等过程,形成显示器件。TFT-LCD 的制造工艺包括以下 4 部分:(1)在玻璃基板上形成 TFT 阵列;(2)在彩色滤光片基板上形成彩色滤光图案;(3)基板对盒;(4)安装外围电路、组装背光源。其中 TFT 阵列基板最为常用的为非晶硅 TFT,其主要利用的是金属和非金属薄膜工艺,经掩膜版曝光、显影、干法刻蚀及剥离步骤后形成所需布线图案。

在 3 种 MEMS 加工工艺中,由于体硅微机械加工工艺需要双面光刻机及键合技术等,LIGA 工艺需要 X-Ray 曝光机,因而不能与 TFT-LCD 工艺兼容。而表面微机械加工工艺简单,易于与 TFT-LCD 工艺兼容,因而得到广泛应用。本文所介绍的基于 MEMS 辅助的显示工艺,皆以表面微机械加工工艺为基础。

3 干涉调制显示

干涉调制显示(IMOD)是由 Iridigm Display Corporation(之后并入 Qualcomm 公司)提出后而为大家所熟知的一种显示技术,即 Mirasol 显示^[4-6]。IMOD 的关键结构是可以调节的光学微腔,类似于法布里-珀罗标准具,由独立的金属反光膜与薄膜堆叠形成的半透半反膜形成一个微小的平行反射镜。其中,金属反射膜位于下部,是可变形的。在两层薄膜间施加电压,可使下部金属反射层隆起,进而改变两层薄膜间隙。如图 1 所示,当环境光入射到微结构中,光线会受到底部金属反射膜及上层薄膜堆叠的半透半反膜的反射。根据需要的波长选择两层薄膜间隙的高度,对于特定的波长,底层金属反光膜反射的光线与上层堆叠结构反射的光线存在微小相移动。根据相位差的不同,某些波长将发生相长干涉,另一些发生相消干涉。通过增强的干涉,人眼会接收到特定波长的一种颜色,包括红色、绿色和蓝色。而相消干涉会导致一个黑态,产生黑色。按照这种方式,通过施加驱动电压可以选择性地控制显示的颜色^[7-10]。

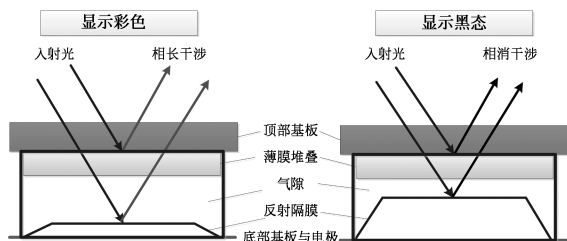


图 1 IMOD 显示器件结构和工作原理

Fig.1 Device structure and operating principle of IMOD display device

IMOD 显示像素的设计基于以下原则:(1)根据薄膜干涉调制原理,利用环境光产生颜色;(2)利用微腔 MEMS 的开关结构,改变像素的状态

(R/G/B/黑态)。由于反射光从环境光源回收,且低电压 MEMS 像素开关意味着显示阵列寻址时是低功耗的,因此与目前主流的显示技术相比,IMOD 显示具有低功耗的特性。与常规的反射显示相比,干涉调制的环境光会造成一个显著的视觉体验,因此,显示技术的图像质量,如对比度、色域更佳且没有衰减。

为了将 IMOD 进行大规模制造,在 TFT-LCD 工厂进行 IMOD 材料和工艺的匹配。主要包括如下关键步骤:像素阵列制作、显示面板制作和组装^[11]。

IMOD 的像素制作,大部分基于普通 TFT 实验室的整体工艺步骤,包括等离子增强化学气相沉积(PECVD)和磁控溅射沉积,光刻图案化,干法和湿法刻蚀,但是仍需额外使用表面微处理工艺。MEMS 工艺过程包括形成空气间隙和沉积一个牺牲层,并通过适当的掩膜版进行图案化,刻蚀并剥离,完成制作。IMOD 器件的简单工艺制作流程见图 2。与标准的 TFT 阵列工艺类似,工艺过程需要大量额外的控制和优化,以保证 IMOD 器件满足所需的操作和可靠规格。

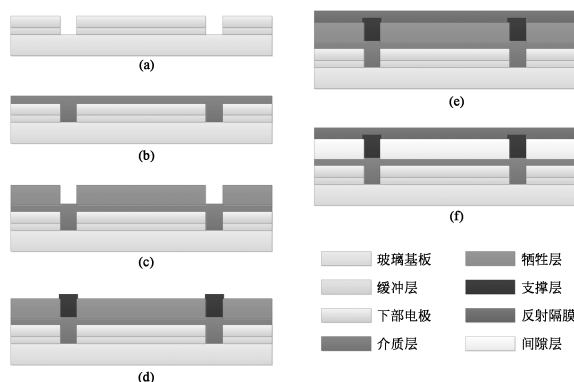


图 2 IMOD 器件 TFT-LCD 兼容的背板工艺制作流程。(a) 图案化后的缓冲层和下部电极层;(b) 沉积介质层;(c) 图案化后的牺牲层;(d) 图案化后的支撑层;(e) 沉积反射间隔层;(f) 剥离牺牲层。

Fig.2 Back plate process flow of IMOD device compatible with TFT-LCD. (a) Patterned buffer layer and bottom electrode layer; (b) Deposited dielectric layer; (c) Patterned sacrificial layer; (d) Patterned supporting layer; (e) Deposited reflection interval layer; (f) Stripping the sacrificial layer.

在显示面板制作与显示模组组装工艺过程中,通常将阵列玻璃和一个盖板玻璃封装在一起,以保护 MEMS 器件不受物理损坏或环境污染(图 3)。典型的 IMOD 封装溶液,可借鉴使用目前 TFT 工业的封框胶,封装工艺在近大气压力条件下进行。需要注意的是,为了防止水分进入,需要额外引入一种具有吸水功能的膜层,以提高显示面板的寿命。IMOD 的固有显示模式,减少了传统显示部件(偏光片和彩膜)的使用,同时也减小了显示模组构架的复杂性。

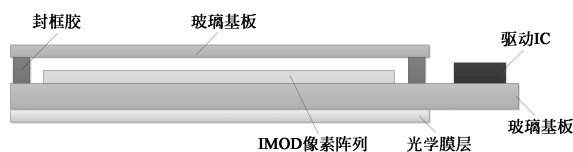


图 3 IMOD 器件 TFT-LCD 兼容的模组封装结构
Fig. 3 Module encapsulation structure of IMOD device compatible with TFT-LCD

4 数字微开关

数字微开关显示(Digital Micro Shutter Display, DMS)是一种新型的基于 MEMS 辅助的显示技术^[12-16],通过将 DMS 制作在 TFT 背板上,作为光调制器控制光开关状态。典型的 DMS 结构由开关、悬臂梁和电极构成,通过静电力驱动实现开或关的状态,并控制开关的水平移动。图 4 是 DMS 显示器件典型的光学结构,从顶部至底部分别为 TFT 背板、MEMS 膜层、开口挡板和背光单元,在开口挡板和 TFT 背板上刻蚀出沟槽。DMS 开关作为光阀,控制光是否穿透。



图 4 DMS 显示器件的典型的光学结构
Fig. 4 Typical optical structure of DMS display device

DMS 系统的主要功耗优势在于其可以利用更多的背光。在 TFT-LCD 中,由于偏光片和彩色滤光片的使用,光学叠加光转向损耗及像素开口率损耗,导致 LCD 背光的利用率小于 8%,这对于功耗是一个很大的损失,尤其是在高亮环境

中。DMS 技术使用反光背光系统,取消了高光损失膜层,如偏光片、彩色滤光片、液晶及 ITO 膜层,可以允许 50%~80% 的光透射到人眼,因此,背光的利用是非常有效的。

由于电子微开关的开关速度比液晶快很多,因此,使用场序彩色代替彩色滤光片的应用。通过使用 RGB LED 灯,快速产生时序彩色画面。通过颜色整合方式,可以看到全彩画面。此方法已应用于许多投影显示及基于 TI 微镜阵列的显示。LCD 由于常规液晶材料响应时间太长,不能使用场序彩色;而 DMS 开关时间在 100 μ s 左右,与透明液晶相比快得多,适合于场序彩色的使用。

为了获得更为丰富的色彩显示,每种颜色被划分为不同时间的切片帧,从最短的光照亮开始,在时间上以 2 倍的速度递增。每个像素通过控制每个像素开或关的持续时间来控制其所需亮度。与典型的液晶显示一样,一个完整的 24 位色的单帧以这种方式在 1/60 s 内完成,也可使用不同算法达到进一步节省功耗的效果。

与 LCD 相比,DMS 显示由于使用时间场顺序颜色背光,不再需要彩色滤光片和偏光片,因此,背光的使用是非常有效的。若从开口挡板的反射表面得到循环光,效果更佳,开关速度约为 100 μ s。DMS 显示具有高光效、宽色域、低功耗、高对比度和高速场序彩色驱动等优点^[17-19]。

当 DMS 显示大批量制作时,费用是首先需要考虑的因素。近年来,由于 LCD 市场的激烈竞争,TFT-LCD 的成本受到了极大的挤压。为了保持生产成本,因地制宜,充分利用低成本的 LCD 制造业意义重大。基于此,DMS 流程被设计为 100% 使用 LCD 标准材料和加工设备。

与 LCD 显示类似,DMS 显示同样需要一个背板二极管来寻址每个像素处于开或关的状态。为了与 LCD 工艺尽量兼容,使用标准的薄膜晶体管背板工艺。

首先,使用双层牺牲材料,制作一个三维结构,包括开关、悬臂梁和驱动器,如图 5(a)所示。TFT 背板用牺牲层覆盖,然后被图案化制作通孔,其尺寸和形状与 LCD-TFT 中的孔洞支撑和孔洞类似。锚定孔在这一层被图案化,以提供与 TFT 背板的电接触与机械接触。之后,进入模板层工艺,如图 5(b)所示。在此层进行 DMS 微弹簧和执行器的模板制作,类似于制造金属零件的

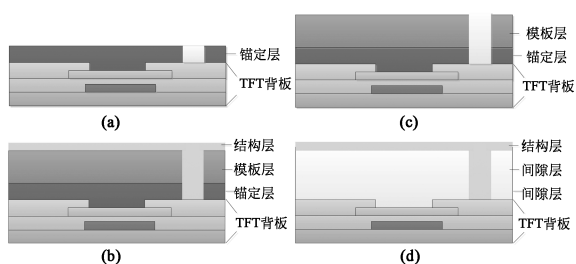


图 5 DMS 器件 TFT-LCD 兼容的背板工艺制作流程。(a) 开关、悬臂梁和驱动器的制作;(b) DMS 微弹簧和执行器模板的制作;(c) 光束层的制作;(d) 移除牺牲层,完成制作。

Fig.5 Back plate process flow of DMS device compatible with TFT-LCD. (a) Fabrication of the switch, cantilever, and driver; (b) Fabrication of the template of DMS spring and actuator; (c) Fabrication of the beam layer; (d) Removing the sacrificial layer, and completing the production.

塑料零件或砂型的注塑模具。模具层与锚层类似,均为一种牺牲材料的涂层,具有定义快门组件形状的特征。但是,模具层有一额外的限制,即图案化后必须有一个非常直的侧壁。这正如前所述,侧壁将允许形成侧壁梁。

将一个结构膜层沉积在两层牺牲层之上,进行光束层的制作,如图 5(c)所示。要求对底层膜层进行水平和垂直表面的全覆盖。在此步骤中使用标准的 LCD 光刻胶工艺,以制作一个保护开关和锚区域的结构膜层。之后,使用具有各向异性的等离子进行干法刻蚀工艺,将结构膜从未被光束层光刻胶保护的垂直表面移除,同时也在模具上留下结构膜的垂直图案,形成侧壁梁弹簧和传动装置。

在最后阶段,牺牲层被移除,开关可以实现移动,如图 5(d)所示。钝化层介电材料用于 DMS 器件,以阻止任何电短路发生。之后完成 DMS 所有的组装步骤,即与 LCD 组装过程类似,覆盖玻璃板,贴附驱动芯片及连接器。

5 时分复用光学开关显示

时分复用光学开关显示(Time Multiplexed Optical Shutter, TMOS)是根据受抑全内反射(FTIR, Frustrated Total Internal Reflection)原

理制作的显示系统,由 Uni-Pixel 显示公司发明^[20-22]。

FTIR 显示的基本原理是:光通过一种薄的平面透明波导从边缘注入,在波导内发生镜像反射。活性层与导光板之间靠粘合剂粘贴,会有轻微的分层。当活性层被压缩时,棱镜会接触到导光板。由于受抑实现全内反射效应,此时导光板内的光会从导光板逃脱,形成开态;若棱镜回到正常的位置,导光板再次捕获光,形成关态(图 6)。

TMOS 是一个创新的平板显示技术,与传统显示不同,其根据受抑全内反射原理制作而成,使用光开关,具有更大的开口和更快的响应速度。同时,时序生色也大大简化了 TMOS 显示结构。由于不需要使用彩色滤光片与偏光片,因此,可实现超高光效率,达 LCD 的 10 倍。

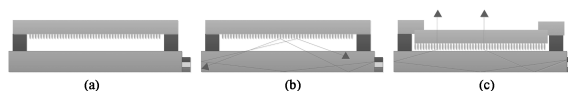


图 6 不同状态下的 TMOS 像素。(a) 像素关,背光关;(b) 像素关,背光开;(c) 像素开,背光开。

Fig.6 TMOS pixels in different states. (a) Pixel off, backlight off; (b) Pixel off, backlight on; (c) Pixel on, backlight on.

TMOS 显示由照明系统、导光板 TFT 像素驱动电路与活性层 4 部分组成(图 7)。TMOS 结构使用 RGB LED 等作为光源,并使用合适的粘附手段保证照明系统与导光板的匹配性,阻挡漏光,重新定向杂散光线进入系统。而导光板作为系统中的核心光源透过介质,常使用标准的 TFT-LCD 玻璃基板进行制作^[23]。



图 7 TMOS 显示器件组成结构

Fig.7 Component structure of TMOS display device

TMOS 单个像素的驱动使用可变的电容结构来控制。电容由两个互相平行的导电电极组成,两电极由亚微米的空隙分开。当电容之间产生电压差时,库伦力将两个导电平行板拉到一起。在 TMOS 显示结构中,一个电容器平面电极设置

在导光片上,另外一个电极则设置在活性层之上或之内。导光板上的平板电极每个像素是分离的,且每个像素被一个或多个 TFT 控制;而活性层上的导电电极则是一个薄的连续网络,也就是说,导电膜层延伸整个薄膜表面。最后,通过控制每个像素的充电和放电,提供控制吸引力,通过活性层的局部变形,激活每个单独的像素。在最初的原型器件中,使用“直接驱动”方法,即 TFT 驱动控制像素。而在“简单矩阵”模式中,通过导光板和活性层上的行条纹交叉点,确定提供延迟控制快门电容的点像素功能。

TMOS 的核心元素是活性层,包括一个载体膜层(设置于其上的光学微结构)和制作在光学显微镜上面或中间的连续的导体层。光学微结构的尺寸、几何形状和光学特性,控制着显示系统的光输出特性。活性层是一个聚合物载体膜层,具有光学微结构,使用涂层导体浮雕涂覆于表面。光学微结构使用 UV 浮雕制作。决定显示特性的材料特性的是载体膜层的机械特性,光学微结构材料的光学特性和光学微结构的光耦合效率。

TMOS 的驱动控制电路系统采用时序驱动控制。TMOS 显示作为像素的一系列的光开关,控制着每个像素开和关,并根据特定的时间来发光。每个像素处理所有的色彩,而不再需要 RGB 亚像素。与其他技术需要模拟设置以控制光调制不同,TMOS 使用开关时序,通过脉冲宽度调制的方式产生灰度。

TMOS 技术与 TFT-LCD 工艺兼容,可以以更低成本替代传统 TFT-LCD。通过对 TMOS 面板进行匹配设计,经过 TFT-LCD 面板厂商授权,

可以使用现有的 LCD 厂的 TFT-LCD 设备进行 TMOS 面板的制作^[24]。

TMOS 显示的结构需要克服两个关键挑战,需要在批量生产过程中进一步优化:足够低的像素驱动电压和适当的粘附度。薄膜上的导体与 TFT 玻璃上的导体所构成的电容结构是由电压差驱动的,电压差产生库伦力,从而驱动薄膜上的推拉作用。由于这种电容结构尺寸在单个像素级别,因而导电板之间的距离直接与驱动像素所需的电压直接相关。工艺的挑战在于在确保两个导体距离足够近的前提下,电压足够低以与 TFT 制作工艺兼容,一般而言,电压需要 $<20\text{ V}$ 。

6 结 论

近些年,基于 MEMS 辅助的显示稳步发展。IMOD、DMS 与 TMOS 3 种基于 MEMS 辅助的显示均具有低功耗的特点,因而受到了广泛关注。MEMS 加工工艺主要有体硅微机械加工工艺、表面微机械加工工艺和非硅工艺 3 种,其中体硅微机械加工工艺需要双面光刻机、键合技术等,LIGA 工艺需要 X-Ray 曝光等,因此不能与 TFT-LCD 工艺兼容;表面微机械加工工艺简单,可与 TFT 工艺兼容,是基于 MEMS 辅助的显示部分重点关注方向。IMOD、DMS 与 TMOS 的器件电极与驱动阵列部分均可使用 TFT 产线制作。同时,由于 MEMS 封装占据了基于 MEMS 辅助的显示制造大部分成本,为了进一步降低成本,以与 TFT-LCD 工艺兼容为方向,MEMS 封装将向着系列化和标准化、微型化和复杂化发展。

参 考 文 献:

- [1] LEEK B. Principles of microelectromechanical systems [J]. *Encyclopedia of Nanotechnology*, 2010, 9(4): 14-22.
- [2] HUANG Y H, SAI SARATHI VASAN A, DORAISWAMI R, *et al.* MEMS reliability review [J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2012, 12(2): 482-493.
- [3] 耿卫东,刘会刚,商广辉. MEMS 显示技术[J]. *液晶与显示*, 2008, 23(2): 230-234.
GENG W D, LIU H G, SHANG G H. MEMS-based display technologies [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(3): 230-234 (in Chinese).
- [4] BITAI, GOVIL A, GUSEV E. Mirasol®-MEMS-based direct view reflective display technology [M]//CHEN J L, CRANTON W, FIHN M. *Handbook of Visual Display Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 1777-1786.
- [5] MARTIN A, LEWIS A, MIGNARD M, *et al.* Driving mirasol® displays: addressing methods and control electronics [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 330-333.
- [6] 黄子强. 平板显示中的双稳态技术: 现状与进展(一)[J]. *现代显示*, 2009, 20(4): 5-10.

- HUANG Z Q. Bistable technology in flat panel display: actuality and headway(1) [J]. *Advanced Display*, 2009, 20(4): 5-10 (in Chinese).
- [7] GAIL O. DISPLAYS: MEMS-based iMoD display reads like paper [J]. *Laser Focus World*, 2006, 42(12): 17-18.
- [8] CHENC P, YANG Y X, LI Y, *et al.* Single-layer fabry-pérot interferometric display for both color and intensity modulations [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2014, 45(1): 338-340.
- [9] JI Z, ZHU L P. Reflective interferometric modulator display with temporal color modulation [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 1246-1249.
- [10] CHANG T, CHAN E, HONG J, *et al.* Single mirror IMOD display for practical wearable device [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 5-7.
- [11] CHANE K, CHANG T, FUNG T C, *et al.* Continuous color reflective display fabricated in integrated MEMS-and-TFT-on-glass process [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, 26(1): 143-157.
- [12] AKINORI K, TAKETOSHI N, HIROHIKO N, *et al.* 7 inch digital micro shutter display driven by IGZO oxide TFT [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2014, 45(1): 289-292.
- [13] WU J H, STEYN J L, BROSNIHAN T, *et al.* Mechanical reliability of digital micro shutter (DMS) displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 1419-1422.
- [14] GANDHI J, KIM J H, HAGOOD N, *et al.* Digital micro shutter technology for color & video e-reader displays [J]. *Journal of the Imaging Society of Japan*, 2011, 50(2): 116-123.
- [15] GANDHI J, KIM J H, HAGOOD N, *et al.* Sunlight readability of digital micro shutter based display technology [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 834-837.
- [16] GANDHI J, KIM J H, HAGOOD N, *et al.* High image quality of ultra-low power digital micro-shutter based display technology [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 532-535.
- [17] STEYN J L, BROSNIHAN T, FIJOL J, *et al.* A MEMS digital microshutter (DMSTM) for low-power high brightness displays [C]//*Proceedings of 2010 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*. Sapporo, Japan: IEEE, 2010: 73-74.
- [18] BUCKLEY E. Pixtronix DMSTM technology for head-up displays [C]//*Proceedings of SID Vehicles and Interfaces Conference*. Dearborn, MI, 2011: 74-77.
- [19] PAYNE R S. The joys of being digital for low-power, mobile, multi-media devices [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 859-862.
- [20] VAN OSTRAND D K, RAMAKRISHNAN R. Time multiplexed optical shutter displays [M]//CHEN J L, CRANTON W, FIHN M. *Handbook of Visual Display Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 1787-1802.
- [21] KYKTA M. Designing with LEDs for time multiplexed optical shutter displays: determining LED size during the design phase indicates the resulting display luminance, efficiency and power requirements [J]. *Photonics Spectra*, 2008, 42(2): 57-65.
- [22] VAN OSTRAND D, COX B T. Time multiplexed optical shutter (TMOS)-advantages & advances [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2008, 39(1): 1054-1057.
- [23] SELBREDE M, YOST B. Time multiplexed optical shutter (TMOS) display technology for avionics platforms [C]//*Proceedings of SPIE 6225, Defense, Security, Cockpit, and Future Displays II*, Florida: SPIE, 2006: 62251B.
- [24] D V. Shedding light on alternative to LCD manufacturing time-multiplexed optical shutter [J]. *Solid State Technology*, 2008, 51(3): 16-17.

作者简介:



卜倩倩(1986—),女,河南开封人,高级研究员,2012年于兰州大学获得硕士学位,主要从事显示及传感方面的研究工作。E-mail: buqianqian@boe.com.cn