

文章编号:1007-2780(2022)06-0709-09

# OLED 产业化历程与问题分析

王大巍\*

(京东方科技集团股份有限公司, 北京 100176)

**摘要:** OLED 技术以其自发光性能被认为具有轻薄、可柔性、高对比度、快速响应、高色域、宽视角、低功耗、低成本等优势。在手机上开始大规模应用后, 历经 10 多年时间虽然规模大幅提升, 但其他应用仍未有太多进展。本文通过对 OLED 已量产方案的性能分析以及与 LCD 的对比, 发现一方面预期的 OLED 性能优势在产品上没有完全发挥, 另一方面现有技术方案已经在设计和工艺上趋于极致。因此在向更大尺寸其他应用拓展方面, OLED 必须在设计和工艺技术上有较大突破。

**关键词:** OLED; 产业化; 技术发展

**中图分类号:** TN873.3; TN383<sup>+</sup>.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2022-0049

## OLED industrialization review and issue analysis

WANG Da-wei\*

(BOE Technology Group Co., Ltd., Beijing 100176, China)

**Abstract:** OLED technology is considered to have the following advantages with its self-emitting performance: light-thin, flexible, high contrast, fast response, high color gamut, wide view angle, low power consumption, and low cost, etc. After more than 10 years of large-scale application in mobile phones, although the scale has increased significantly, other applications have not made much progress. Through the performance analysis of mass production scheme and comparison with LCD, we find that on one hand, the expected OLED performance advantages have not been brought into full play in the product, on the other hand, the existing technical solutions have tended to be extreme in design and process. So there must be a big breakthrough in the design and process of OLED technology before it can be expanded to larger sizes and other applications.

**Key words:** OLED; industrialization; technology development

## 1 引言

显示屏作为人机交互界面, 随着手机、计算机和电视的发展, 技术也不断发展变化。阴极射线管(CRT)从电视应用开始, 随着计算机的发展拓展到桌面电脑显示器; 等离子显示器(PDP)主

要应用在电视上, 在与液晶显示器(LCD)竞争中逐步退出; LCD 随着便携笔记本电脑显示屏需求而发展起来, 逐步扩展到手机、桌面显示器和电视等几乎所有显示应用。从 LCD 开始薄膜晶体管(TFT)驱动方式成为主流, 即半导体显示的产业化开始。LCD 器件中的 TFT 仅起开关的作

收稿日期: 2022-02-09; 修订日期: 2022-03-03.

\*通信联系人, E-mail: daweiwang@boe.com.cn

用,一个子像素配备一个 TFT 即可,有机发光二极管(OLED)也是 TFT 驱动,但其不仅要作为开关,也要通过其控制流经 OLED 的电流,并保证驱动所有像素的 TFT 性能差异最小。要达到上述要求,一个子像素至少需要 3 个以上的 TFT 才能驱动,因此其要求大幅提升。LCD 和 OLED 存在相似性和产业化工工艺的继承性。OLED 伴随着 LCD 的发展不断进行改进和产业化探索,鉴于 LCD 的应用拓展,人们也期望 OLED 能和 LCD 一样不断拓展其应用领域。众所周知, OLED 生产线的固定资产投资远高于 LCD 生产线<sup>[1]</sup>, OLED 产品只有提供更大的附加价值才能获得市场的认可。游戏和照相等应用的发展,给显示提出了更多更高的要求,也为 OLED 的发展提供了机会。但 OLED 在手机产品上量产已经超过 10 年,其在其他更大尺寸应用上进展不大。本文通过对 OLED 技术产业化历程的回溯,对已量产技术方案的产品性能分析及与 LCD 的对比,分析了存在的问题并探索了未来发展需解决的难点。

## 2 产业化回顾

OLED 产业化探索首先是被动驱动 OLED (PMOLED)产品,该技术驱动简单,虽然在尺寸和分辨率上有限制,但前期厂商可利用其改善了 OLED 发光器件性能和发光材料的成熟度。在

2000 年左右,不同公司开始探索主动驱动 OLED (AMOLED)应用,包括日本先锋公司在汽车音响显示面板上,日本三洋公司和美国柯达联手在数码相机上,摩托罗拉和友达光电在手机上,日本 Sony 公司在显示器和电视上的应用<sup>[2]</sup>。

AMOLED 大批量量产是 2010 年左右三星公司在手机上实现的,技术方案是低温多晶硅薄膜晶体管(LTPS-TFT)和顶发射红绿蓝三色有机发光材料蒸镀。初期是以玻璃为基板,玻璃粉激光熔封的刚性 OLED,其结构简图见图 1(a);几年后又量产以聚酰亚胺为基板,薄膜封装的柔性 OLED,其结构简图见图 1(b)。这两种在手机等小尺寸应用的技术方案均使用了高精度金属掩模板进行三色有机发光材料的蒸镀。鉴于初期柔性 OLED 在折叠等应用上技术尚不成熟,三星公司设计了一种在宽度方向略弯曲的手机(Galaxy Round),而 LGD 公司则探索了一种在长度方向整体略有弯曲的手机(G-Flex),见图 2。这两种柔性应用没有进一步推广。接下来三星公司推出了一种在屏幕侧边略弯曲的手机 Galaxy Edge(单边和双边),该设计概念在柔性 OLED 应用上获得进一步推广,推动了全面屏手机的不断发展。直到 2019 年,京东方和三星公司分别大批量量产了外折叠(Mate X)和内折叠(Galaxy Fold)的柔性 OLED,首次发挥了 OLED 的柔性优势。2020 年,手机用 OLED 出货量约 4.5 亿片,全面占领高端手机市场,不断向中端手机市场渗透。

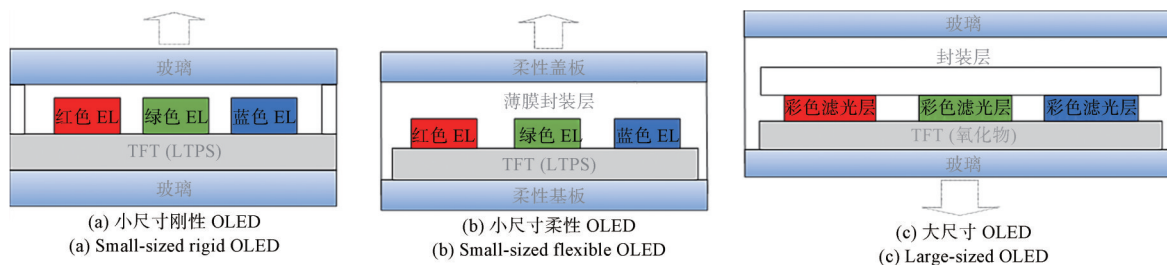


图 1 OLED 结构简图

Fig. 1 Structural sketch of OLED

2013 年, LGD 公司推出大尺寸 OLED 电视屏,技术方案是氧化物薄膜晶体管和底发射白光加彩色滤光片<sup>[3]</sup>,其结构见图 1(c)。到 2018 年,全球 OLED 电视出货量超过 200 万台,渗透率约为 1%<sup>[4]</sup>。

随着手机和电视用屏幕的产线建设的增多,

为了提高产线的利用率,更多应用领域的产业化探索也逐渐增多。笔记本电脑是其中比较大的可能市场,据市场研究机构 Omdia 统计,全球笔记本电脑年销售超过 2 亿台,而 OLED 在 2019 年出货量仅为 15 万台,2020 年 98 万台,迄今为止渗透率不及 1%。

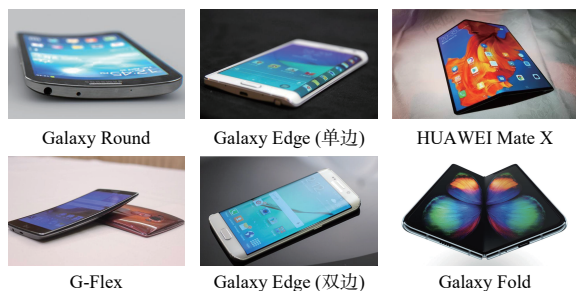


图2 OLED阶段性代表产品图

Fig. 2 Representative product photo of OLED

### 3 问题分析

TFT-LCD的大批量产业化应用是从笔记本电脑用屏幕开始的,当时没有其他竞争技术存在,而后分别向小尺寸和大尺寸拓展,不同尺寸应用的产品结构没有大的变化。与TFT-LCD技术的产业化路径不同,AMOLED产业化分别从小尺寸和大尺寸开始,产业化初期就面临既有技术TFT-LCD的竞争,且应用于小尺寸和大尺寸的产品结构和技术方案差异较大,难以形成合力促进技术的进步和产业链的优化。手机上的技术方案应用发展较快,电视技术方案的应用渗透率不及预期,笔记本电脑上的技术方案目前以小尺寸方案居多,但明显需要较大变化才能进一步拓展应用。除了成本上和竞争技术相比还比较高,技术上也存在很多需要解决的问题。

#### 3.1 性能预期优势不够突出

首先,OLED技术被认为属于自发光器件,有高对比度、轻薄、可弯折、低功耗、宽视角、广色域、快速响应等<sup>[5-9]</sup>技术优势。利用OLED制作的显示屏,与现有TFT-LCD对比,只有高对比度和可弯折的优势有所体现,其他优势并不突出,甚至有所不如,下面将逐项分析其原因。

(1) 高对比度。OLED像素是主动发光,因此对比度可以非常高,至少100 000:1以上,该优势能否在产品中体现出来需要考虑人眼的分辨能力和竞争技术的性能提升。人眼能感知并分辨的对比度为10 000:1<sup>[10]</sup>,但人类视觉系统是一个高度复杂的视觉信息处理系统,涉及生物学和心理物理学特性。研究发现,人的视觉系统能够主动适应的光强度级别范围很宽,在进入特定环境下,人眼会根据环境亮度调整,即亮度适应现象。在特定亮度下,人眼分辨亮度变化的能力是

有限的。在视觉系统的亮度分辨能力研究方面有一个著名的韦伯实验,研究的内容是人眼视觉系统在一定背景亮度下的亮度分辨能力,即亮度敏感性。图3显示的是人眼在不同亮度灰度级下对数字图像的敏感性曲线<sup>[11]</sup>,从图中可知,人眼对偏暗和偏亮环境敏感性弱于中间亮度,也就是说在偏暗和偏亮环境下需要更高对比度才能让人眼感知到差别。最明显的例子是在户外太阳光比较强的情况下,显示屏需要高对比度才能保证可视性。在中间亮度环境下保持显示质量所需的对比度将低于10 000:1。在室内的亮度环境下,如果不是两个显示产品放在一起,对比度超过1 000:1后,对使用者来说,变化的可感知度变低。一般显示器的对比度指标为静态对比度,属于暗室测量值。当环境亮度升高后,显示器自身亮度是另外一个影响因素,环境亮度越高,显示屏自身亮度在对比度中所占比重越大。另外一个需要考虑的是竞争技术,即TFT-LCD的对比度提升,为提升户外等高亮度环境下可视性<sup>[12-13]</sup>,TFT-LCD一直在优化设计、工艺和材料,通过液晶材料的变化、背光源控制以及双盒设计不断提升对比度<sup>[14]</sup>,使其对比度可以超过10 000:1。从上面的分析可知,OLED高对比度的优势并不明显。

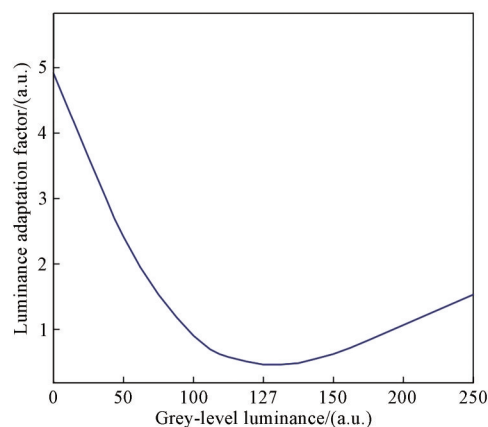
图3 数字图像的亮度适应性图<sup>[11]</sup>

Fig. 3 Luminance adaptation for digital images

(2) 轻薄。OLED产品与LCD产品比较确实可以做到更轻更薄,特别是柔性OLED可以做到轻薄50%以上,但带来的用户体验不如预期好。以厚度为例,如表1所示,TFT-LCD产品也

做到了相当好的水平,一般可以做到 1.5 mm 以下。由于少了背光源和一片偏光片,基板厚度变薄,柔性 OLED 可以做到小于 1 mm,甚至 0.5 mm,虽然降低的幅度很大,但从使用者来看,绝对值变化带来的价值没有预期大。

表 1 小尺寸 LCD 与 OLED 产品厚度分解表

Tab.1 Thickness decomposition of small size LCD and OLED (mm)

| 膜层厚度     | TFT-LCD | 刚性 OLED | 柔性 OLED |
|----------|---------|---------|---------|
| 上偏光片     | 0.1~0.2 | 0.1~0.2 | 0.1~0.2 |
| 盖板       | 0.3~0.5 | 0.3~0.5 | 0.2~0.4 |
| 彩色滤光层    | 0.03    | 0       | 0       |
| 液晶层      | 0.035   | 0       | 0       |
| 封装层      | 0       | 0.005   | 0.02    |
| OLED 发光层 | 0       | 0       | 0.001   |
| TFT 层    | 0.003   | 0.003   | 0.003   |
| 基板       | 0.3~0.5 | 0.3~0.5 | 0.02    |
| 下偏光片     | 0.1~0.2 | 0       | 0       |
| 背光源      | 0.5~1   | 0       | 0       |
| 背膜       | 0       | 0       | 0.2~0.4 |
| 合计       | 1.3~2   | 0.7~1.2 | 0.5~1   |

(3)可弯折。柔性 OLED 可弯折的特性是其独特的优势,但在应用推广中进展比较慢<sup>[15]</sup>。一方面是柔性 OLED 改变了消费者的使用习惯,与可以以标准化可控品质产品提交给客户的 LCD 或刚性 OLED 比较,柔性 OLED 在使用时屏幕会发生弯折变化,需要和整机的结构件相互配合才能实现柔性的折叠、卷曲等动作,其屏幕设计和整机设计目前分别是不同厂商负责,这导致开发周期变长,开发成本增加,涉及产业链变化较大。另一方面是因为弯折性能所需的材料特性改善和搭配难度较大,最大的问题来自于显示屏结构强度与小弯折半径之间的矛盾。在满足小半径折叠可靠性的前提下,还要考虑表面抗冲击、刮擦、屏幕折痕等整机外观和结构强度<sup>[16-17]</sup>。这些对盖板材料、粘结层材料、背膜材料性能的调整以及其他功能膜层的搭配提出了相当高的要求,即使将所有材料性能最优化后应用到折叠产品中,屏幕折痕在现有技术水平下也不能完全消除。而且为了保证小半径弯折特性,表面防划伤的性能基本在 H 硬度以下。三星公司首款折叠

手机形态确定为内折也应该有这方面的原因,内折形态对表面防划伤要求不需要太高,但因为内折不符合通常使用习惯,在其外边必须增加一块非折叠屏幕,从这方面看外折手机对屏幕要求更高。这些技术问题的不断改善,柔性手机特色应用的开发与使用推广将是可弯折产品应用拓展的关键。

(4)低功耗。OLED 显示屏每个像素的静态功耗( $P$ )可以表示为流经 OLED 的电流( $I$ )乘以跨压( $U$ ): $P=UI$ 。跨压主要由 3 部分电压构成: $U=U_{\text{OLED}}+U_{\text{TFT}}+U_{\text{IR Drop}}$ 。首先是直接加载在 OLED 材料上的驱动电压( $U_{\text{OLED}}$ ),不同颜色的 OLED 的驱动电压是不同的;其次是驱动 TFT 电压( $U_{\text{TFT}}$ ),通过控制该电压获得不同的 OLED 工作电流;最后是补偿像素位置距离驱动 IC 不同造成的电压下降( $U_{\text{IR Drop}}$ ),该部分电压与显示屏的尺寸相关,尺寸越大,电压下降越大,所需补偿电压越大,在功耗上的损耗也就越大。这也是大尺寸产品应用推广的难点之一,表 2 对比了 152.4 mm (6 in) 手机和 431.8 mm (17 in) 笔记本电脑用屏的跨压分解对比。同样的器件结构下, OLED 材料上的电压约为 3.5 V, 驱动 TFT 的电压约 3 V, 152.4 mm (6 in) 手机需补偿电压下降约 1 V, 431.8 mm (17 in) 笔记本电脑用屏的补偿电压下降约为 4 V, 在功耗中所占比例已经接近 40%, 更大尺寸电视其所占比例更大。电流与显示亮度和 OLED 器件发光效率及透过率直接相关。如果只从上述静态功耗看,随着 OLED 发光材料效率的提升,在一定尺寸下与液晶显示相比较确实有低功耗的优势,但受限于像素设计和保证封装的环境信赖性,其光取出的比例一直比较低,同时为了防止外部环境光的反射,在出光路线上一般要放置圆偏光片,其对显示屏像素点发光的阻隔超过 50%, 因此 OLED 在功耗上的优势有限,且超过一定屏幕尺寸,功耗会变成劣势。

从单像素发光效率比较, OLED 可能比 LCD

表 2 不同尺寸 OLED 显示屏的跨压对比

Tab.2 Cross-voltage comparison of different sizes OLED displays (V)

|                        | $U_{\text{OLED}}$ | $U_{\text{TFT}}$ | $U_{\text{IR Drop}}$ |
|------------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| 152.4 mm (6 in) 手机     | ~ 3.5             | ~3               | ~1                   |
| 431.8 mm (17 in) 笔记本电脑 | ~ 3.5             | ~3               | ~4                   |

省电。目前随着 OLED 材料效率的改善,在 152.4 mm (6 in) 左右手机应用上功耗略优于 LCD,但随着显示尺寸的增大,OLED 功耗增加速度比 LCD 大。两种技术的功耗模型不同,LCD 是侧向背光源通过导光板以光路形式形成面光源,显示尺寸增大在光路上的能量损失较小,因此其功耗改善以背光效率提升为主。随着 LED 的应用,其功耗改善较大。OLED 则不同,随着显示尺寸的增大,除了像素数量和面积增加外,还需要考虑引线电压下降的损失,且这部分损失随显示尺寸增大而增加,因此在大尺寸电视应用上,一方面要使用厚铜电极尽量降低引线电阻,另一方面通过叠层 OLED 器件的使用,通过提高工作电压来降低工作电流,这两方面共同作用降低了在引线上的功耗损失。

(5) 宽视角。在 OLED 产品量产前,视角的主要评判方法是测量对比度的下降,虽然也有对视角色偏的考量,但不是主要的评价方法。而 OLED 不显示时是不发光的,对比度比较高,反而是在一定角度下色偏和亮度下降的感觉更明显,因此视角的测量方法也发生了变化,引入了视角色偏来评价 OLED 视角特性,指标分别是  $\Delta u'/v'$  和最小可视色偏差 JNCD (Just Noticeable Color Difference)。这两个指标越小,视角色偏越小。小尺寸手机技术方案采用的是顶发射器件设计,即 OLED 发光材料处于全反射金属阳极和半透半反金属阴极之间,阳极和阴极之间将形成微腔效应,OLED 发出的光在微腔中会产生干涉现象。微腔对光具有高度波长选择性,特定波长的光沿特定方向出射,因此不同视角下光强、光谱均会发生变化,且相当敏感<sup>[18-20]</sup>。根据微腔效应机理可知,OLED 发光层中激子复合发光位置也会影响到视角特性,复合位置越靠近阴极,其视角特性越好。研究发现,阴极厚度和不同发光层主客体掺杂比对视角影响也比较明显。为减弱微腔效应对 OLED 视角特性的影响,最常用的方法是在靠近阴极出光一侧蒸镀一层有机材料作为光耦合层(CPL),该材料具有可见光波段的高折射率和低吸收系数,且一般不会影响器件的效率和寿命,提高出光效率。

从上面研究结果可以看出,微腔效应造成不同颜色光随视角变化不一致的色偏,相关影响在

OLED 阴阳极之间,该距离小于  $1\text{ }\mu\text{m}$ ,也就是需要在小于  $1\text{ }\mu\text{m}$  的范围内控制位置精度、材料厚度和整个显示面的均匀性,可见其视角特性的敏感性之大,所以器件需要非常精巧的设计和工艺实现。虽然用于大尺寸的底发射方案的微腔效应非常弱<sup>[21]</sup>,以牺牲透过率、降低器件效率、增加功耗的代价获得了视角上的相对提升。而其竞争技术 LCD 通过宽视角液晶模式的应用,视角特性获得大幅提升,OLED 在视角方面没有绝对优势。

(6) 广色域。小尺寸三色蒸镀方案的色域取决于红绿蓝三色发光材料的选择和显示器件的结构设计。三色材料同时要满足效率和寿命的要求,而三色材料要形成一个器件,相互之间也有搭配的问题,因此,很难在满足效率和寿命的同时实现广色域的提升。特别是在 LED 背光应用在液晶显示器件中后,其色域与 OLED 相比较不相上下。三色蒸镀 OLED 通过增加彩色滤光片可以提升不同视角的色域,但会影响甚至牺牲其他方面的性能水平。大尺寸白光加彩色滤光片方案的色域取决于彩色滤光片的材料特性<sup>[22]</sup>,与液晶显示中彩色滤光片比较,其发展时间较短,因此量产大尺寸 OLED 电视的色域一直不比液晶电视的色域更广。但 OLED 因为其光谱可由使用的发光材料及结构设计调整,所以有获得更广色域的可能,但要在效率和视角特性等方面有所牺牲。另外在色彩管理方面的改善需要信号处理来配合,除了扩展色域还希望能更好地还原真实世界的色彩,即色彩还原能力。

(7) 快速响应。该特性主要是针对显示器画面质量,特别是运动图像的显示质量,因此评价指标为运动图像响应时间(MPRT)<sup>[23-24]</sup>。OLED 和 LCD 都是薄膜晶体管控制的显示器件,属于保持型显示,因此其运动图像响应时间由两部分控制:液晶或发光材料的响应时间和薄膜晶体管电路的响应时间,薄膜晶体管电路响应时间又分为采样和保持时间。对液晶显示技术来说,材料响应时间是指液晶偏转控制显示屏亮暗转换的时间,通常是 10 ms 级别。而 OLED 材料发光过程的响应时间是纳秒级别,因此 OLED 器件被认为响应速度很快。而薄膜晶体管电路的响应时间与显示屏的尺寸和分辨率有关,在几

毫秒到几十毫秒范围。从上面的分析可知,对液晶显示技术而言,关键控制因素是液晶材料偏转速度;对 OLED 器件而言,其关键控制因素则变为驱动薄膜晶体管电路的响应时间。随着液晶材料的优化,其响应时间已经下降到 5 ms 以下。薄膜晶体管电路的响应时间可以通过提高输入信号的频率和插黑帧缩短。图 4 是韩国 LGD 公司对比各种电视技术的结果<sup>[25]</sup>。从图中可以看出,人眼可感知的运动物体响应时间为 5.7 ms,因此 LCD 和 OLED 的响应速度都取决于薄膜晶体管电路的响应时间。即使将频率提升到 120 Hz, LCD 和 OLED 电视的响应时间都高于 6 ms,对于电压驱动型的 LCD,频率提升到 240 Hz 即可低于 5 ms;而对于电流驱动的 OLED 来说,信号频率再提升比较困难,但利用插黑帧等方式也可以达成 5 ms 以下的水平,因此 LCD 和 OLED 在响应速度方面差异不大<sup>[26-28]</sup>。

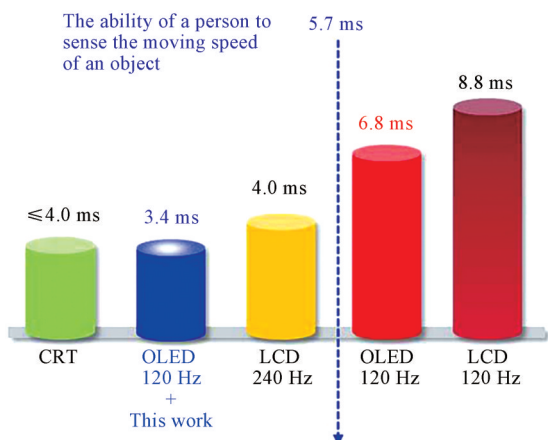


图 4 各种电视技术的运动图像响应时间比较<sup>[25]</sup>

Fig. 4 Comparison of the MPRT characteristics classified by the display type

### 3.2 技术方案在设计和工艺能力上的进一步优化难度大

AMOLED 分别在小尺寸手机和大尺寸电视方面开始大批量量产,但这两种应用的技术路线完全不同,相同的是这两种技术几乎都达到了性能的极限,技术本身已经无法达成所需的性能指标,必须通过各种补偿技术。电学补偿通过屏幕内部和外部的电路设计使薄膜晶体管的各项性能稳定可控;光学补偿通过对屏幕光学性能的获取和分析后进行相对校正,使显示屏光学性能更

均匀稳定。小尺寸蒸镀用的高精细掩模版的厚度已经低于 30  $\mu\text{m}$ ,在兼顾机械强度和位置精度的情况下已经达到挑战极限。小尺寸手机应用单个子像素驱动电路需要 6 个以上的薄膜晶体管,对于 400 ppi 以上的设计,已经在平面上塞满整个子像素区域,为了提高分辨率不得不利用虚拟像素技术,并对子像素排列进行渲染<sup>[29]</sup>。OLED 是自发光的电流器件,除了需要通过薄膜晶体管控制像素的通断,还需要控制通过电流的大小,这样的要求即使将薄膜晶体管的阈值漂移控制在 0.2 V 以内,仍然需要电路和光学补偿来保证画质的均匀性和一致性。

## 4 未来思考

针对现有已量产技术方案性能优势不足,且设计和加工工艺都难以大幅提升的问题,要想在除手机外的应用上拓展 OLED 应用需要对技术方案有较大改进。目前比较集中的研究方向有两个:

(1) 柔性 OLED 的应用拓展。包括不同于直板平面显示以外的多样化形态以及更大尺寸便携产品应用拓展,例如笔记本电脑。需解决和提升的主要技术问题首先是寿命提升<sup>[30]</sup>。移动笔记本电脑用显示屏寿命需要现有手机用器件寿命的 3 倍以上,而有机发光材料的寿命提升一般会导致效率的下降,如何在提升寿命的同时保证器件效率不下降将是开发的难点<sup>[31]</sup>。其次尺寸增大后功耗的降低将是最大问题。发光器件设计上可以采用叠层设计,增加器件电压,减小电流,以减少屏幕尺寸增大造成的电压下降所需的补偿,同时要考虑材料和工艺上的改进,进一步降低因尺寸增大带来的屏幕两端的电压差,即使如此其功耗和同尺寸 LCD 相比仍然没有优势,需要进一步提升器件效率。最后是柔性在形态优势上的发挥,除目前已量产的折叠形态外,还要着重于滑卷、卷曲等新业态的屏幕开发与优化以及整机结构和系统的应用开发,最大程度提升柔性 OLED 的附加价值才能弥补成本增加的劣势。

(2) 印刷工艺的应用。采用印刷工艺的目的是降低成本和应对小批量定制化开发。解决目前技术方案投资成本和产品开发成本高的问题。理想的工艺路线是全印刷方案,即 TFT 和

有机发光层均采用印刷工艺。有机发光层的印刷工艺研究较多,喷墨打印工艺也有少量量产的尝试<sup>[32]</sup>,但一方面印刷需要考虑溶剂的相容性使材料选择范围受限<sup>[33]</sup>,另一方面加入溶剂使发光材料效率和寿命受到影响,性能发生不同程度下降。而TFT的印刷工艺尚在探索阶段,印刷方式、引线 and 半导体材料选择还存在诸多不确定性,需要新材料和新工艺方面的突破。在印刷工艺的产业化方面也有两个通用性问题需要不断优化和改善:首先是大面积印刷的工艺均匀性和一致性。与光刻和蒸镀的整面薄膜

制备不同,印刷的逐点工艺方式的工艺均匀性和一致性其本身难度就很大,而且印刷一般需要干燥过程,由于无法同时完成整面印刷,各点干燥时间不同造成画面质量差异的情况会影响产品品质。其次是印刷工艺的精度提升。目前印刷工艺可对应的显示屏分辨率在200 ppi左右,随着显示分辨率的提升,印刷的量产稳定性会大幅下降。综上,印刷工艺开发包括新材料开发与印刷墨水调控、印刷设备优化、成膜及干燥后处理等工艺优化、环境控制及器件设计优化等多方面的突破。

## 参 考 文 献:

- [1] BARNES D. LCD or OLED: who wins?[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 26-27.
- [2] 高鸿锦,董友梅. 液晶与平板显示技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2007:304-305.  
GAO H J, DONG Y M. *Liquid Crystal and Flat Panel Display Technology* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2007: 304-305.
- [3] YIN Y M, ALI M U, XIE W F, *et al.* Evolution of white organic light-emitting devices: From academic research to lighting and display applications [J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2019, 3(6): 970-1031.
- [4] 潘卓伟. OLED电视发展现状及趋势探讨[J]. 中国新通信, 2020, 22(1): 127-128.  
PAN Z W. Discussion on the development status and trend of OLED TV [J]. *China New Telecommunications*, 2020, 22(1): 127-128. (in Chinese)
- [5] 李继军,聂晓梦,甄威,等. 显示技术比较及新进展[J]. 液晶与显示, 2018, 33(1): 74-84.  
LI J J, NIE X M, ZHEN W, *et al.* New developments and comparisons in display technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(1): 74-84. (in Chinese)
- [6] 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 Optics*, 2018, 11(5): 695-710. (in Chinese)
- [7] 王云萍. 显示技术的TFT-LCD与OLED的相关分析[J]. 电子世界, 2021(17): 13-14.  
WANG Y P. Correlation analysis of TFT-LCD and OLED display technology [J]. *Electronics World*, 2021(17): 13-14. (in Chinese)
- [8] 王伟. OLED、QLED电视发展趋势研究[J]. 企业科技与发展, 2019(12): 225-226.  
WANG W. Research on the development trend of OLED and QLED TV [J]. *Sci-Tech & Development of Enterprise*, 2019(12): 225-226. (in Chinese)
- [9] 江洪,王春晓. 国内外OLED显示材料技术进展[J]. 新材料产业, 2019(9): 48-52.  
JIANG H, WANG C X. Progress of OLED display materials technology at home and abroad [J]. *Advanced Materials Industry*, 2019(9): 48-52. (in Chinese)
- [10] 林敬昊. 新型显示技术的视觉感知和工效研究[D]. 南京:东南大学, 2020: 68-73.  
LIM K. Study on visual perception and ergonomics work efficiency of new display technology [D]. Nanjing: South-east University, 2020: 68-73. (in Chinese)
- [11] ZHANG X H, LIN W S, XUE P. Improved estimation for just-noticeable visual distortion [J]. *Signal Processing*, 2005, 85(4): 795-808.
- [12] CHEN H W, TAN G J, WU S T. Can LCDs outperform OLED displays in ambient contrast ratio?[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 981-984.
- [13] CHEN H W, TAN G J, WU S T. Ambient contrast ratio of LCDs and OLED displays [J]. *Optics Express*,

- 2017, 25(26): 33643-33656.
- [14] GUO L, SHAO X B, LIAO Y P, *et al.* Development of dual-cell LCD with mega contrast [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2020, 51(1): 119-121.
- [15] LIU Y F, FENG J, BI Y G, *et al.* Recent developments in flexible organic light-emitting devices [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(1): 1800371.
- [16] SHI S M, LI Z, TSAI P, *et al.* Research on commercial foldable AMOLED and relevant technologies [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2020, 51(1): 826-829.
- [17] 谷朋浩, 史世明, 蔡宝鸣, 等. 浅析折叠屏幕材料及难点[J]. 微纳电子与智能制造, 2020, 2(2): 112-119.
- GU P H, SHI S M, CAI B M, *et al.* Brief analysis on the material and its issue of the foldable display [J]. *Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing*, 2020, 2(2): 112-119. (in Chinese)
- [18] 袁桃利, 张方辉, 牟强, 等. 微腔 OLED 的视角特性研究[J]. 现代显示, 2012(7): 45-48.
- YUAN T L, ZHANG F H, MU Q, *et al.* Study on angular dependence in micro-cavity OLED [J]. *Advanced Display*, 2012(7): 45-48. (in Chinese)
- [19] BOHER P, LEROUX T, COLLOMB-PATTON V, *et al.* Optical characterization of OLED displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 23(9): 429-437.
- [20] YOON J M, KIM Y H, KWAK M S, *et al.* Study on viewing angle characteristics by color layer with cavity effect [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 1967-1970.
- [21] CHOI H S, KIM T S, HAN C W, *et al.* Recent progress of white light-emitting diodes for an application to new models of OLED TV [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 605-608.
- [22] LI M Z, LIU S, GAO S, *et al.* A method to improve the color quality and efficiency for WOLED display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 1910-1911.
- [23] 宋玉, 夏振平, 胡伏原, 等. 基于人因的液晶显示动态图像质量研究[J]. 液晶与显示, 2020, 35(10): 1051-1058.
- SONG Y, XIA Z P, HU F Y, *et al.* Moving image quality of liquid crystal display based on human factor [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(10): 1051-1058. (in Chinese)
- [24] 彭枫琳, 陈海伟, 苟方旺, 等. 具有 CRT 式快速运动图像响应时间的高性能液晶显示器[J]. 液晶与显示, 2017, 32(8): 581-589.
- PENG F L, CHEN H W, GOU F W, *et al.* High performance LCDs with CRT-like motion picture response time [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(8): 581-589. (in Chinese)
- [25] SHIN H J, CHOI S H, CHOI J Y, *et al.* A high image quality organic light-emitting diode display with motion blur reduction for ultrahigh resolution and premium TVs [J]. *Journal of Society Information Display*, 2020, 28(6): 557-565.
- [26] PENG F L, CHEN H W, WU S T. Can LCDs outperform OLED displays in motion picture response time? [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 478-481.
- [27] CHEN H W, LEE J H, LIN B Y, *et al.* Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 17168.
- [28] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, *et al.* Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 105.
- [29] LIN H C, SUN P L, WEN C H, *et al.* Sub-pixel rendering for a high resolution OLED display with low resolution photomasks [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 33-36.
- [30] SWAYAMPRAKASH S S, DUBEY D K, SHAHNAWAZ, *et al.* Approaches for long lifetime organic light emitting diodes [J]. *Advanced Science*, 2021, 8(1): 2002254.
- [31] LEE J, HAN M, SONG W, *et al.* Methods for overcoming the trade-off between efficiency and lifetime of organic light-emitting diodes: OLED lifetime simulation [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2020, 51(1): 815-817.
- [32] 刘迪莹, 钟锦耀, 唐彪, 等. 柔性印刷 OLED 研究进展[J]. 液晶与显示, 2021, 36(2): 217-228.
- LIU D X, ZHONG J Y, TANG B, *et al.* Research progress of flexible and printed OLED [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(2): 217-228. (in Chinese)

- [33] LEE S, SEO M H. Low-temperature cross-linkable small molecules for fully solution-processed OLEDs [J]. *Chemistry—A European Journal*, 2018, 24(66): 17419-17423.

作者简介:



王大巍(1974—),男,吉林长春人,博士,教授级高级工程师,2003年于北京科技大学获得博士学位,主要从事显示器件、柔性OLED显示技术方面的研究。E-mail: daweiwang@boe.com.cn