特邀专稿

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2021.04.001

印刷显示及其产业链

付 东*

(广东聚华印刷显示技术有限公司,广州 510663)

作者简介:付 东(1969—),男,高级工程师,现任广东聚华印刷显示技术有限公司总经理,TCL工业研究院副院长;从事显示技术研究开发30年,先后主持国家"863"计划专项课题、国家重点研发计划课题共计5项,申请百余篇国内外发明专利,获2009年度、2017年度中国专利优秀奖;目前专注于高分辨率大尺寸印刷及柔性显示技术的研发及工程化。
(E-mail:fud@tcl.com)
* 通讯作者

摘 要: OLED技术发展迅速,已被广泛地应用在中小尺寸显示之中。业界对高端电视的首选——大尺寸OLED显示翘首以待,其中印刷OLED在柔性、高PPI等领域具有明显优势,而印刷QLED能够进一步加强印刷显示技术在色域、寿命及成本方面的突破性优势。当前印刷显示工艺、材料、装备等关键要素已逐步成熟,我国印刷显示的产业化序幕即将开启。应对上述趋势,建全我国印刷显示产业链,特别是印刷OLED/QLED材料、墨水、相关装备等的国产化,是我国印刷显示产业成功的重要保障,这需要学术界与产业界、产业链上下游等建立广泛合作。

关键词: 印刷显示;印刷有机电致发光显示;印刷量子点发光显示;印刷显示产业链

中图分类号: TN383; TS802.6 **文献标志码:** A
文章编号: 1005-488X(2021)04-0237-09

Printed Display and its Industrial Chain

FU Dong
(*Guangdong Juhua Printed Display Technology Co., Ltd., Guangzhou* 510663, *CHN*)

Abstract: OLED technology has developed rapidly and has been widely used in small and medium size displays. At the same time, industry is waiting for large-size OLED display for high-end TV. Printed OLED has obvious advantages in the field of flexibility and high PPI, and printed QLED could further strengthen the advantages of printed display technology in color gamut, life time and cost. At present, the key elements such as technology, materials and equipment have gradually matured, and the prelude to the industrialization of printed display in China has opened up. In response to this trend, building China's printed display industry chain, especially the localization of OLED/QLED materials, inks and related equipments, is an important

收稿日期: 2021-11-01

guarantee for the success of China's printed display industry, which requires extensive cooperation among academia, industry and the industry chain.

Key words: printed display; printed OLED; printed QLED; printed display industry chain

引 言

作为新一代信息技术产业的先导性支柱,新型显示对实施创新驱动发展战略,推动经济提质增效升级具有重要意义。我国新型显示产业通过几十年的发展,投入近1.3万亿,已成为全球产能最大的显示面板生产国家。现阶段,液晶显示技术在大尺寸显示领域占据统治地位。随着5G、AI技术、物联网、云计算等新一代信息技术的快速崛起,业界对作为信息窗口的显示器件提出了柔性、轻薄、省电、可折叠卷曲、超大尺寸等更多要求,下一代大尺寸显示技术的发展将何去何从呢?

面对这种需求,在"十三五"和"十四五"国家重点研发计划中,我国已将印刷及柔性显示规划为新型显示的重要技术领域,开展了共性关键技术的研究,以及材料、装备等上游产业链的布局。整体上看,印刷显示技术的发展,是显示材料、器件、装备到制造技术等整个显示产业链的一次全面的技术革命,这就需要按照"面向市场、政府引导、整合资源、实现共赢"的思路,聚集全产业链的优势力量,共同构建我国印刷显示产业,引领显示产业发展的新方向。

1 下一代大尺寸显示发展趋势

1.1 OLED是未来电视的主流技术

为什么要发展大尺寸OLED显示技术,因为OLED能够完美匹配市场对新一代电视的需求,主要表现在如下方面:

(1)优异的画质效果:完美的对比度,宽视角,广色域,快速响应清晰无拖尾;

(2)产品差异化设计:曲面/超薄/轻便,柔性/卷绕/折叠,透明显示等应用;

(3)产品竞争力:器件结构简单,批量BOM成本具有优势。

美国专业评测网站Rtings公布的全球电视排名,从184 cm~257 cm(55英寸~77英寸)电视,OLED画质均为第一,可见消费者对OLED电视认可度高。另一方面,从竞争技术看,Micro-LED技术是未来的新趋势,但目前技术上还有待突破,业界还没有明确的量产商业计划;Mini-LED直显可以通过拼接方式实现超大尺寸屏幕,这也算是对主流OLED电视的一种补充。

1.2 印刷显示的优势

目前AMOLED显示面板的制造工艺主要是采用真空蒸镀+精密金属掩膜的方式,如表1所示,这适合于中小尺寸的OLED;但对于大尺寸OLED,该技术受困于设备的限制,良率较低,产品售价居高不下,影响了AMOLED产品进一步向大尺寸普及。

LG公司另辟蹊径,采用了白光OLED与彩色滤光膜的技术(简称WOLED),满足了市场对OLED电视的需求,但也牺牲了一些OLED原本的特色优势。而印刷技术是利用喷墨打印(Ink Jet Printing,简称IJP)的方式,将发光材料(OLED/QLED材料)配制成墨水,喷打在所需要的像素位置,实现显示器件制作的技术,非常适用于制作大尺寸显示面板。此技术适宜顶部出光器件,色彩/效率优,灵活对应R/G/B不同厚度需求,对印刷器件结构简化、改善工艺流程、提高材料利用率(利用率大于90%),大幅降低材料成本,提高器件良品率等有极大帮助。

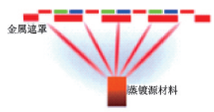
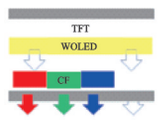
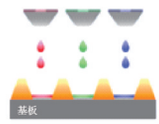
1.3 印刷显示的应用范围

当前的喷墨打印技术在小于200 ppi的打印精度级别已具备规模量产的能力。与氧化物TFT背板搭配,印刷OLED可应用于异形车载显示、监视器、电视、公共信息显示等领域。随着1×10^{-15} m^3/墨滴(即1皮升)打印头技术的成熟,喷墨技术可实现200~350 ppi精度甚至更高级别的打印,并与LTPS-TFT背板搭配,印刷OLED将应用于平板电脑、笔记本电脑、手机(采用Pentile像素排列)等,如图1所示。

由此可见,喷墨印刷工艺作为一种增材制造新技术,给新型显示产业带来一次产业技术的革命,其具有轻薄、柔性、大面积、低成本等特点,是未来新型显示的发展方向。

表1　AMOLED量产技术方案对比

Tab.1　Comparison of various technologies for AMOLED mass production

	FMM	WOLED+CF	IJP-OLED
示意图			
	真空蒸镀	蒸镀+彩膜	印刷技术
玻璃基板	G6	G8.5	G8.5(设备有实绩)
分辨率	400～500 ppi	～100 ppi	～300 ppi
材料利用率	低	中	高
设备成本	中	高/中	低
可量产性	中小尺寸已量产	大尺寸已量产	即将量产

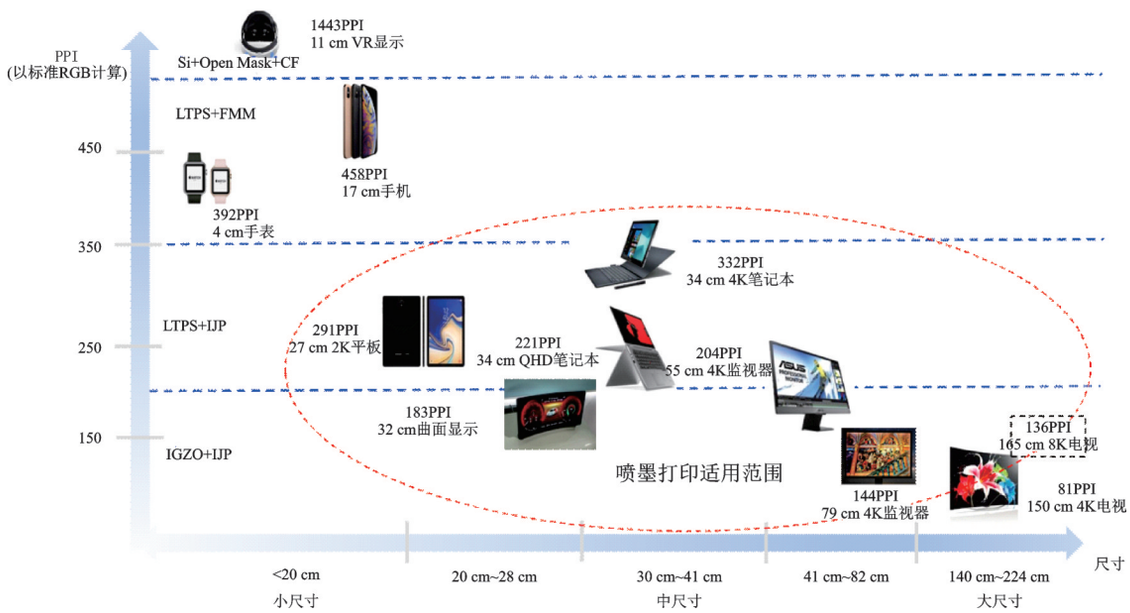


图1　喷墨印刷技术的适用范围

Fig.1　Application scope of inkjet printing technology

1.4　印刷OLED与印刷QLED

大尺寸OLED技术方案中，有多种技术路线，如图2所示。喷墨印刷OLED在柔性领域、高PPI领域明显优于WOLED；通过量子点发光材料的创新，喷墨印刷QLED能够继承印刷OLED技术的优势，并进一步加强在色域、寿命及成本方面的突破。

从器件结构上可以看到，QLED与OLED相似性很高，除材料墨水的替换外，工艺制作流程可复用，所以印刷QLED能借鉴和继承印刷OLED的关键共性技术开发成果、量产经验积累以及上下游产业链等，他们之间是工艺继承与迭代的关系，而非竞争关系。

不同于以上的技术策略，三星显示开发了一种结合OLED和量子点特色的大尺寸显示技术：QD-OLED技术，其蓝光使用OLED电致发光；同时蓝色光也激发量子点材料光致发光，产生红色与绿色。这种组合突出了量子点红绿色的色纯，但原WOLED固有的问题没有解决，部分问题还出现了恶化，总体而言这也是一种过渡性技术。

综上，各大面板厂家对新一代大尺寸显示技术的发展策略各有不同，但最终或许都是：印刷工艺+量子点电致发光(印刷QLED)。

1.5　全球大尺寸OLED产业

目前全球大尺寸OLED的量产以韩系面板厂LG Display(LGD)和Samsung Display(SDC)为主，如表2所示。其中LGD采用WOLED技术，已实现量产。SDC公司则开发了QD-OLED技术，并计划于2022年正式推出产品。

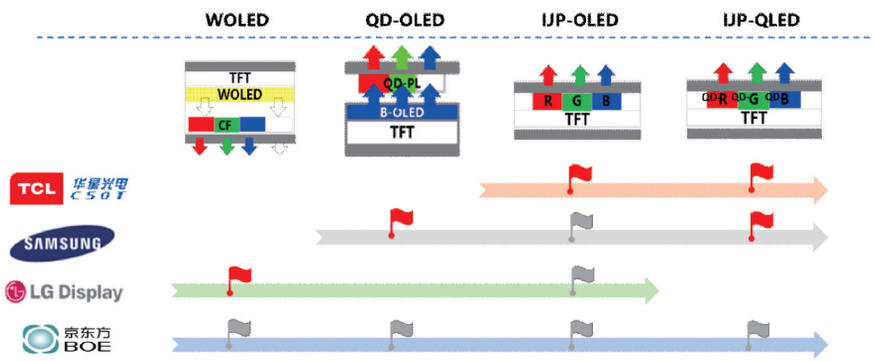


图2 面板厂家对新一代大尺寸显示技术的发展策略

Fig.2 Large-size display development strategy of panel makers for next generation

表2 全球大尺寸OLED产能分布(2022-2023年为预计)

Tab.2 Global capacity for large-size OLED

公司	工厂地点	产线	产能(K/M)				
			2019	2020	2021	2022	2023
LGD	坡州(E3)	G8.5	13	13	13	13	13
	坡州(E4)	G8.5	75	75	75	75	75
	广州(P10-A)	G8.5	30	30	60	90	90
	坡州(P10-B)	G10.5					45
SDC	牙山(Q1)	G8.5			30	30→60	30→60
	牙山(A5)	G10.5					60(计划)
JOLED	石川	G4.5	2	2			
	能美	G5.5		20	20	20	20

印刷OLED技术方面,全球面板厂商均在大力开发,试图在下一代显示技术来临时占领产业先机。日本企业JOLED已率先启动,建设了G5.5的能美工厂,小批量生产印刷OLED的51 cm~76 cm监视器产品;韩系面板厂LGD和SDC也正在研发印刷技术,但目前暂未有宣布量产规划。国内,京东方和TCL华星正在加快印刷显示工艺技术的研发工作,发布了各类印刷显示样机。其中TCL华星已与广州市签署了协议,计划在广州黄埔开发区建设全球第一条G8.5印刷柔性显示量产线。

2 大尺寸印刷OLED/QLED器件与工艺流程

大尺寸印刷OLED显示的主流技术方案有如下三个特点:

(1)采用金属氧化物TFT背板技术,即适用于G8.5以上大世代玻璃基板,同时又具有较高载流子迁移率。

(2)采用顶发射器件和喷墨打印制程工艺。为了提升喷墨打印OLED的器件性能,多采用具有微腔结构的顶发射多层OLED器件结构。通过高反射阳极和半透明阴极构成共振腔,利用光的干涉效果,起到增强出光和改善色纯度的作用。

(3)大尺寸硬屏印刷OLED显示通常使用玻璃硬封装,即用CVD沉积一层水氧阻隔材料,再采用玻璃盖板与填充材料进行封装。为了实现柔性卷绕的功能,则可采用薄膜封装(TFE)工艺和基于PI基板的激光剥离(LLO)技术。这种无机-有机相交叠的TFE封装,是小尺寸OLED显示面板比较成熟的柔性封装结构。

大尺寸印刷显示工艺流程主要包括TFT阵列工艺、电致发光(EL)工艺、封装工艺、后工序及模组工艺等四大部分,如图3所示。TFT阵列工艺包含PI涂布、TFT制作、平坦化层制作、阳极制作、像素定义层制作及检测修复。EL工艺包含基板前处理、空穴注入层/空穴传输层/发光层的打印(其中每一层又包括喷墨打印,减压干燥,烘烤三个工艺制程)、电子传输层和注入层的蒸镀、阴极和光提取层的蒸镀或溅射成膜。封装工艺分为硬屏封装和薄膜封装两大类,硬屏

封装包括阻水氧框胶/干燥剂/填充材料的涂布、封装玻璃对位组合以及固化；薄膜封装包含数次的无机膜/有机膜交叠成膜工艺。后工序及模组工艺包括切割、测试修补、绑定、激光剥离、老化和机构组装。

对于柔性OLED的制作一般以玻璃为载体，PI溶液经过涂布工艺，然后固化形成PI基板，在PI基板上完成TFT阵列工艺，OLED打印蒸镀封装工艺，测试、修补和模组绑定后，再使用激光将柔性显示屏从载体玻璃上剥离，形成可弯曲、可折叠的柔性显示器。

图3　大尺寸印刷显示主要工艺流程

Fig.3　The process flow for large-size printed display

3　印刷显示产业链

印刷显示技术是显示材料、器件、装备到制造技术等全产业链的创新突破。因此，印刷显示产业链的构建与完善，是印刷显示产业成功的重要保障。文中，平板显示产业链共性的部分，如前段TFT制程共性的情况，就不再赘述，将聚焦在印刷显示的重要新增环节。图4为印刷显示产业链的分解简图。

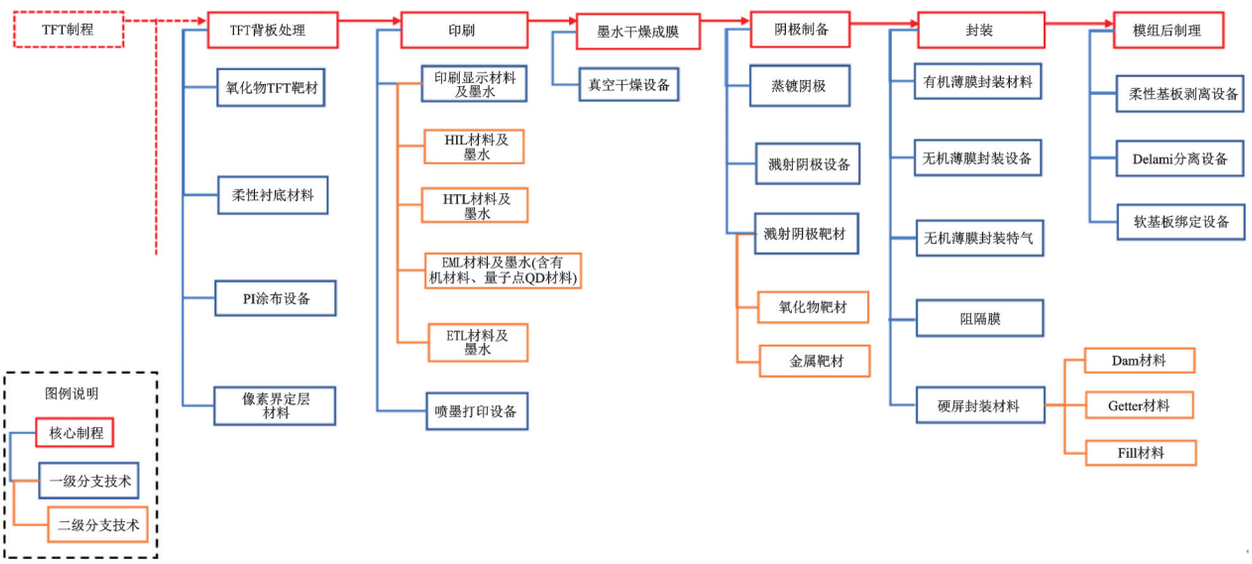


图4　印刷显示产业链分解简图

Fig.4　Breakdown diagram of printed display industry chain

3.1　背板制程

3.1.1　金属氧化物TFT材料与技术

金属氧化物TFT基于金属离子键的结构，在较低的成膜温度(低于350 ℃)就可以制备高迁移率、性能均一性好的TFT器件；同时在制造工艺上，可兼容非晶硅TFT的量产工艺和设备，更容易实现G8.5以上大尺寸和低成本制造。因此，金属氧化物TFT已成为实现大尺寸印刷OLED/QLED显示的主流背板技术。另外其较低的工艺温度，大大降低了工艺过程中热应力管理的难度，可与耐温性低的透明PI衬底配合，实现柔性透明的印刷OLED/QLED显示。从大尺寸柔性印刷显示的应用看，产业需要高迁移率高稳定的半导体材料。如应用于基于外部补偿的大尺寸印刷显示像素驱动，迁移率希望达到20～30 cm^2/Vs；PBITS/NBTIS信赖性方面希望$\Delta V_{th}<\pm 1$ V。为进一步发挥印刷OLED/QLED的性能及成本优势，可采用GOA设计与内部补偿像素设计，这就对高迁移率半导体材料提出了新的挑战，例如迁移率希望大于50 cm^2/Vs。

目前金属氧化物TFT材料的种类包括IGZO/IZTO/IGTO/IGZTO/Ln-IZO等半导体材料，其中国内华南理工大学/新视界公司的联合团队在稀土

掺杂的氧化物半导体(Ln-IZO)材料方面构建了具有自主知识产权的技术体系,获得了高迁移率和优秀的光稳定性,预期会成为第一个商业化量产的国内自主氧化物TFT技术。

3.1.2 PI基板

大尺寸柔性印刷显示借鉴了在小尺寸柔性蒸镀OLED产业中已广泛应用的聚酰亚胺(PI)基板技术。在实际应用中,根据工艺与产品设计的差异性,对PI材料的热稳定性(如热膨胀系数*CTE*,玻璃化温度T_g,分解温度T_d等)、机械强度(如杨氏模量,拉伸率等)、光学性质(如透过率T_r,雾度*Haze*等)、涂布性质(如粘度,固含量等)都提出了各自的需求。目前产业中PI材料供应商以国外的宇部兴产、Kaneka、杜邦等为主,国产厂商正在追赶中。

沿用小尺寸柔性蒸镀OLED的技术路线,上述PI材料适用于激光剥离工艺。但G8.5以上大面积激光剥离也存在难度,所以就产生了大尺寸柔性显示的新需求——舍弃昂贵激光器和精密光路系统的机械剥离,其核心是引入介于玻璃与PI材料之间的离型层材料(De-bonding Layer),提供合适的与玻璃间的结合力,既能耐受工艺环境又便于机械剥离。目前学术界与产业界正在这个领域攻关,期待开发出适宜于大尺寸柔性的工艺路线。

3.1.3 Bank 材料

Bank材料是指喷墨打印特需的像素定义或像素坑材料,业界通常采用表面疏水型的光敏聚酰亚胺(PSPI)材料。其中添加的疏水成分,在工艺过程中会浮聚在Bank材料表面,从而提高了对打印装备墨水落点精度的宽容性,也有利于喷墨打印的成膜控制,如图5所示。另外,为提高显示面板的对比度,Bank材料中还可添加吸光成分形成黑色Bank。

目前喷墨打印用的Bank材料厂商主要有AGC、日产化学、三菱化学等公司,国内厂商暂未涉足此领域。

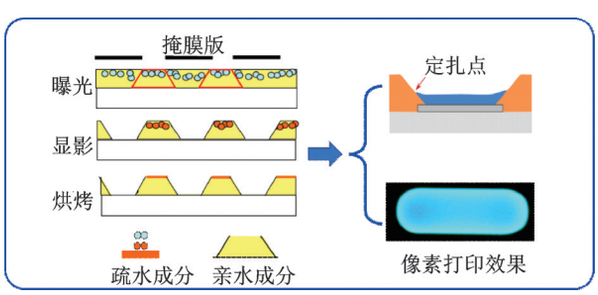


图5 Bank材料疏水特性示意图

Fig.5 The hydrophobic characteristics of Bank materials

3.2 喷墨打印制程

3.2.1 印刷OLED材料及墨水

印刷OLED材料体系包括了以下几个方面:R/G/B三色发光材料,从技术路线上又细分为小分子三色发光材料和高分子三色发光材料;空穴传输材料,从技术上细分为聚合物材料与小分子交联材料,目前市场主流是聚合物材料;空穴注入材料,由聚合物与可溶p-dopant材料混合得到;高纯溶剂,可溶解上述材料,同时又具有合适的粘度、沸点、表面张力等以满足打印工艺需求。电子传输材料方面,通常印刷OLED器件在这一工序也采用蒸镀工艺,所以可以沿用蒸镀OLED的材料体系,但从发展的角度看,可溶电子传输材料与墨水(正交墨水)是产业未来的新需求,这可降低设备投资额,同时又大幅减小辅助电极接触孔电阻,改善大面积OLED显示的IR-Drop,如图6所示。

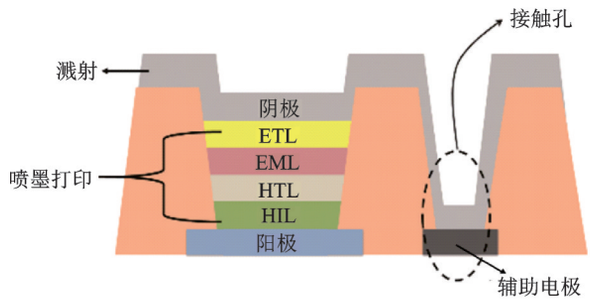


图6 产业对打印ETL材料的需求

Fig.6 Application of printing ETL materials in industry

目前印刷OLED材料厂商主要有住友化学、LG化学、三菱化学、默克、日产化学等,材料性能已能满足产业化的需求。在国内,基于小分子蒸镀型OLED材料的快速发展,小分子印刷OLED材料可借鉴蒸镀材料的成果,同时又可回避蒸镀材料蒸发温度、多源共蒸不易控制等的限制,预期国产小分子OLED材料厂商将开启可溶性OLED材料的新赛道。

3.2.2 印刷QLED材料与墨水

印刷QLED材料与墨水是一个有待突破的全新体系,包括R/G/B量子点材料、ZnO电子传输材料、空穴注入与传输材料以及相应的打印墨水。

其中,印刷QLED红/绿材料及墨水的开发重点是高性能红/绿量子点发光材料(镉系)与稳定批量生产技术,以及量子点发光材料的墨水配方及其配体化学;高性能蓝色量子点材料(镉系)性能突破

的重点是量子点核壳能带设计优化及表面配体优化，提升量子点在器件能级及墨水中的适配性，同时建立QLED器件衰减机理解析及相应表征手段，突破蓝色量子点材料的寿命短板；电子传输材料与墨水方面，ZnO墨水尽管有稳定性和重复性等诸多问题，但仍是目前与量子点匹配较好的电子传输材料，后期开发的重点是其纳米材料的缺陷调控与配体化学优化；空穴注入/传输材料则可沿用印刷OLED材料体系的有机材料，或者选择NiO、MoO_3等无机氧化物材料。此外，无镉量子点体系方面则有InP、$CuInS_2$、$AgInS_2$、ZnSeTe 、GaN等体系，为突破高性能电致应用的无镉量子点材料，尤其是蓝色无镉量子点，这需要从适合于无镉量子点的QLED器件结构设计及优化，以及相应传输层材料开发和器件机理研究等方向展开系统研究。

目前，镉系红/绿量子点材料及器件性能已可满足产业需求，但蓝色量子点器件的寿命还有待突破，而无镉量子点体系的性能离产业应用还有差距。总体而言，CdSe & InP是目前最主要的商业化量子点，AgInS和GaN是未来有希望的量子点材料。

3.2.3　打印装备

目前应用于大尺寸印刷显示的喷墨打印头大都采用压电喷墨方式。市场上主流的喷墨打印设备厂商，如日本TEL、日本Panasonic、美国Kateeva等公司有销售200×200 mm到G8.5不同尺寸规格的打印设备；国内厂商也从小尺寸装备入手，开始进军这一核心领域。

针对批量生产所需的高分辨率(8K)高世代喷墨打印设备技术，喷墨打印装备的主要技术开发方向如下：

a.G8.5以上工作台及其移动精度控制

b.满足量产节拍的打印头阵列集成设计与其组装精度控制

c.皮升级高精度墨滴体积控制与墨滴落点位置控制

d.打印头稳定性的检测与维护系统

e.高产能/高良率/MURA Free的打印策略及实现

3.3　封装制程

3.3.1　封装材料

OLED材料对水/氧敏感，需要对面板进行封装阻隔水/氧进入器件，大尺AMOLED TV对使用寿命要求高，因此对封装技术有更高的要求。目前成熟的技术有硬屏封装和柔性薄膜封装(TFE)两个体系。

硬屏封装采用传统的玻璃封装，结构如图7(a)，主要材料有：Fill填充材料，需具备高透光和高稳定性，同时可含散射粒子，以增加视角，材料厂商主要有积水、Denka、Nagase等公司；Dam边框材料，需具备高的水氧阻隔性能，材料厂商主要有积水、Denka、Nagase等公司；Getter材料则吸收渗透漏过的少量水氧，材料厂商主要有Futaba等公司。相对OLED材料(成膜厚度几十纳米)，封装材料的膜厚在几～十几微米级别，材料用量较大，对国内的材料厂商而言是具有商业价值的一个领域。

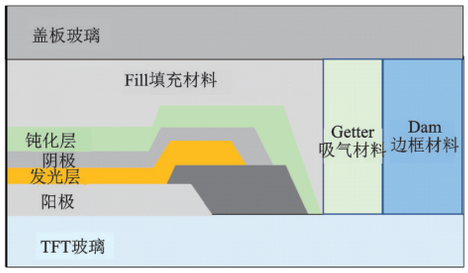
柔性薄膜封装是用无机膜与有机膜交叠的结构提供水氧阻隔，并在器件上再整体覆盖一片阻隔膜(Barrier Film)，如图7(b)。其中，薄膜封装有机材料需具备高透光、高折射率、析出气体少的性能，从技术路线上分为亚克力系材料与环氧系材料两大类，材料厂商主要有SDI、三井、积水、松下等公司，国内材料厂商已有多家介入这一领域开始送样，期待着他们的突破。阻隔膜主要作用是机械保护下层TFE薄膜，同时提供$WVTR<10^{-2}$的初级水氧阻隔，如果当阻隔膜技术发展到$WVTR<10^{-5}$时，则可直接替代TFE薄膜。目前材料厂商主要有味之素、Toray、日东等公司。

3.3.2　无机薄膜新装备

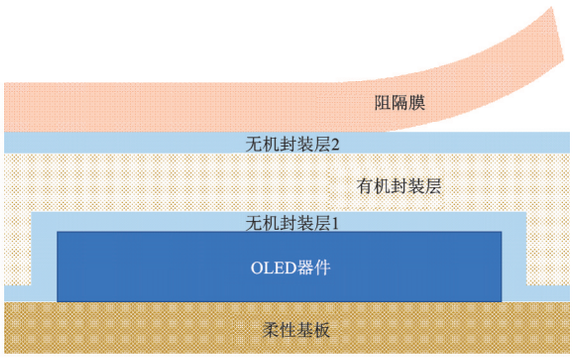
大尺寸OLED柔性薄膜封装的无机膜形成，可沿用目前成熟的CVD工艺，但此时的基板已完成氧化物TFT阵列的制作，薄膜封装中的CVD工艺会带来H^+离子，这会对氧化物TFT的性能产生不利影响。从优化大尺寸柔性薄膜封装的角度看，可以开发无H^+离子的新工艺装备，例如连续ALD和离子镀膜，如图8所示。

ALD成膜具有很好的膜层质量以及缺陷包覆性，ALD的成膜速率较低，单腔室条件下无法对应量产要求，需用空间性连续ALD的薄膜沉积方案以及开发相应的装备。

离子镀膜保证了成膜质量，又可实现低温快速成膜，其采用弯管结构设计，并用电场控制离子束运动方向，过滤成膜过程中的中性颗粒，提升成膜品质。



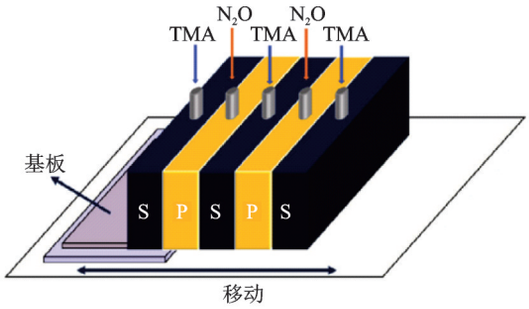
(a) 硬屏封装



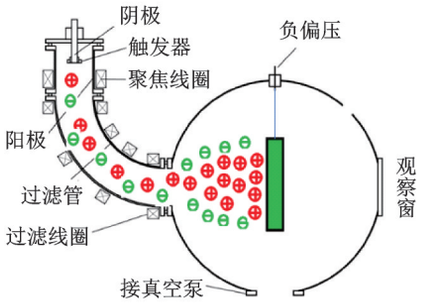
(b) 柔性薄膜封装

图7 硬屏封装与柔性薄膜封装

Fig.7 Glass encapsulation and flexible thin film encapsulation



(a) 空间性连续ALD薄膜沉积



(b) 离子镀薄膜沉积

图8 新的无机薄膜成膜示意图

Fig.8 Schematic of inorganic film formation

3.4 模组制程

大尺寸柔性印刷显示模组段与大尺寸LCD显示模组常规工艺相似度高，新增装备主要为：柔性基板剥离、PI基板取下分离与背面支撑贴膜、软基板绑定等。

柔性基板剥离主流技术采用激光剥离(LLO)方案，对应装备由工业级激光器、激光剥离光斑的光学整形系统、以及机械扫描运动系统构成。工业级的激光器是该装备的核心，目前主要由美国相干、德国通快两家公司控制；激光剥离光斑的光学整形系统方面，国内已有公司可提供完整的方案；LLO整机系统厂商有韩国AP system等公司，国内则有大族激光等公司。

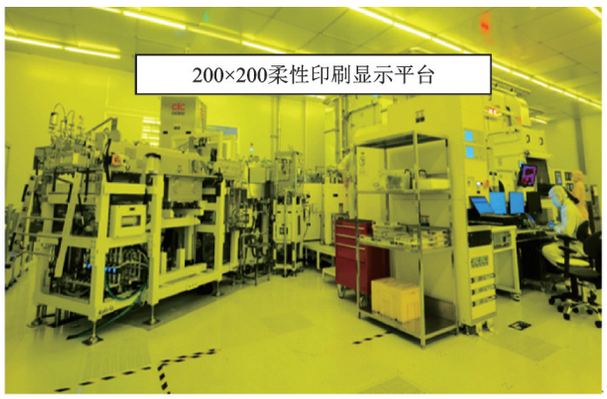
PI基板取下分离设备在完成LLO工艺后，将PI基板与玻璃基板分离，随后通过大尺寸贴膜系统(Film to Film)完成背面支撑膜贴附。该领域国外主要设备厂有SFA、IONES等公司。此领域是国内模组装备公司的强项，可成为国内模组装备厂家率先发力的方向。

软基板绑定设备的重点是大尺寸高精度COF对位压合系统、大尺寸柔性基板无损搬运转移系统。大尺寸软基板绑定是伴随大尺寸柔性印刷显示而产生的新的应用市场，目前暂无太高的市场进入壁垒，也是国产装备公司有机会扩展的领域。

4 国家印刷及柔性显示创新中心

广东聚华成立于2014年12月，于2017年10月获批国家印刷及柔性显示创新中心。现已建成技术条件全球领先的印刷及柔性显示公共平台，如图9所示，包括G4.5柔性印刷平台/200×200柔性印刷平台/柔性模组平台/检测评价平台等，最大基板尺寸为730×460(mm×mm)，可以对应79 cm(31英寸)印刷有机电致发光显示(印刷OLED)和印刷量子点发光显示(印刷QLED)。

目前创新中心聚焦于印刷OLED和印刷QLED的关键技术攻关，并对柔性印刷显示工程化技术做了大量的验证工作，现已开发各式高分辨、高画质的显示样机，如8.9 cm(3.5英寸)600 ppi超高分辨率印刷OLED样机，79 cm(31英寸)4K印刷AM-OLED样机，79 cm(31英寸)4K印刷QLED样机，79 cm(31英寸)柔性可卷绕印刷AM-OLED样机等。在此基础上，聚华平台也与产业链伙伴广泛合作，不断健全印刷显示产业链，推动柔性印刷OLED/QLED技术的产业化落地，让我国新型显示技术迈上新台阶。



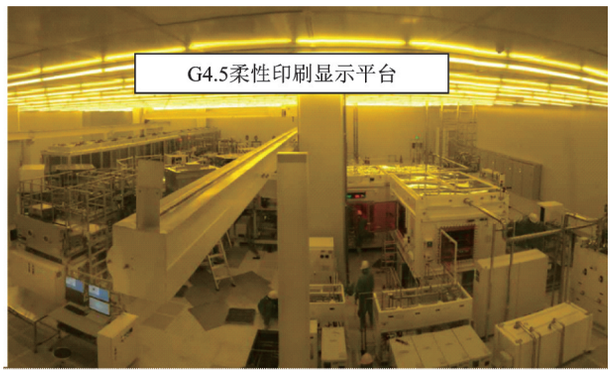


图9　国家印刷及柔性显示创新中心公共平台

Fig.9　Open platform in Innovation Center of national printed and flexible display

5　结　论

总体而言，目前印刷工艺与器件技术、印刷显示材料与墨水、喷墨打印装备等要素条件均已具备，印刷显示产业化序幕即将开启；印刷OLED/QLED材料、墨水、相关装备等的国产化，是印刷显示产业成功的重要保障。同时，印刷显示的工程化，特别是良率提升等还有一段路程要走。

伴随着印刷显示产业技术的加速发展，印刷显示产业链正在形成与完善，存在大量的商业机会。我们期待着学术界与产业界、产业链上下游等的广泛合作，从机理、材料、装备、工艺等方面展开合作，迎接挑战，共同构建我国印刷显示产业，引领显示产业发展的新方向。

参　考　文　献

[1] Levermore P, Schenk T, Tseng Hsin-Rong, et al. Ink-jet-printed OLEDs for display applications[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2016.

[2] Park C I, Seong M, Kim M A, et al. World's first large size 77-inch transparent flexible OLED display[J]. Journal of the Society for Information Display, 2018, 26(5): 287-295.

[3] Xiang C, Cao W, Yang Y, et al. The dawn of QLED for the FPD industry[J]. Information Display, 2018, 34(6):14-17.

[4] Cao W, Xiang C, Qian L, et al. Highly stable QLEDs with improved hole injection via quantum dot structure tailoring[J]. Nature Communication, 2018, 9(1): 2608-2614.

[5] Nakano S, Saito N, Miura K, et al. Highly reliable a-IGZO TFTs on a plastic substrate for flexible AMOLED displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2012, 20(9): 493-498.

[6] Xu Hua, Xu Miao, Peng Junbiao, et al. Trap-assisted enhanced bias illumination stability of oxide thin film transistor by praseodymium doping [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(5): 5232-5239.

[7] Kao S C, Li L J, Hsieh M C, et al. The challenges of flexible OLED display development [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1):1034-1037.

[8] Qin Z, Huang X, Wang D, et al. Formation of conducting layers on excimer-laser-irradiated polyimide film surfaces[J]. Surface & Interface Analysis, 2015, 29(8):514-518.

[9] Hasan M M, Billah M M, Jin J, et al. Robust oxide thin-film transistors with embedded CNT buried layer for stretchable electronics[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2019,7: 801-807.