

微缩化LED显示技术的发展及应用

宋德宇^{1,2}, 方颖璐¹, 王璐^{1,2*}, 杨洪宝^{1,2}, 李晓剑^{1,2}, 樊卫华^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 210016; 2. 国家平板显示工程技术研究中心, 南京 210016)

摘要: 介绍了微缩化发光二极管(LED)显示技术的特点及典型应用, 分析了微缩化LED显示的关键技术及其解决方案, 从技术层面汇总了国内外关于微缩化LED显示的研究进展, 并对微缩化LED显示技术进行了总结和展望, 特别提出了针对军用领域, 应以Micro-LED显示器件的实用性及可靠性为目标, 加强驱动架构设计和电路控制技术, 优化器件散热能力, 解决显示器件的夜视兼容、EMC性能等特种技术问题。

关键词: 微缩化; 发光二极管显示技术; 特种技术

中图分类号: TN27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)01-0064-08

Development and Application of Micromation LED Display Technologies

SONG Deyu^{1,2}, FANG Yinglu¹, WANG Lu^{1,2}, YANG Hongbao^{1,2}, LI Xiaojian^{1,2}, FAN Weihua^{1,2}
(1. *The 55th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Nanjing 210016, CHN*; 2. *National Flat Panel Display Engineering Technology Research Center, Nanjing 210016, CHN*)

Abstract: Characteristics and typical applications of micromation LED display technologies were introduced, with analysis of the key technologies and solutions related to micromation LED display. Domestic and international research progress of micromation LED display on technical grounds, as well as prospects were summarized. Especially in military fields, it was supposed to aiming at achieving practicality and reliability of Micro-LED display, making emphasis on circuit control technology development, heat dissipation capability optimization, and special technical problem solutions, such as NVIS and EMC.

Key words: micromation; LED display technology; special technology

引 言

随着军事装备不断信息化、智能化、电子化, 装

备配套的特种显示技术也在向高性能、轻量化、低功耗的方向发展, 以机载显示应用为例, 机载平视显示器(HUD)和机载头盔显示器(HMD)对像源亮

收稿日期: 2021-10-28

作者简介: 宋德宇(1979—), 男, 工程师, 研究方向为新型显示技术;

方颖璐(1988—), 女, 工程师, 研究方向为光电子技术发展趋势与研判;

王璐(1989—), 女, 工程师, 研究方向为Micro-LED新型显示技术。(E-mail: Venuswang0915@126.com)

* 通讯作者

度要求极高,现阶段液晶数字像源和 OLED 像源均存在不同程度的亮度偏低和可靠性问题,以 Micro-LED 为代表的微缩化 LED 显示技术的出现恰如其分地弥补了液晶显示器作为平显像源的不足,其优异的亮度、视角、对比度、功耗、可靠性等性能参数是新一代平显像源的最佳选择。因此, Micro-LED 显示技术成为了业内的研究热点。

1 应用及性能概述

发光二极管(LED)是一种半导体发光器件,由含镓(Ga)、砷(As)、磷(P)、氮(N)等的化合物制成。LED 照明技术的成熟发展为 LED 显示技术奠定了良好的基础,市场大致可分为平板显示和照明两部分,相关应用包含消费电子类商用显示器、穿戴式显示器、工控显示器,甚至可以与近年来的研究热点 AR/VR 技术相结合打造军民两用的 HUD/HMD 近眼显示器^[1];LED 显示技术通过 LED 芯片的微缩化迎合多元化的应用场景,表 1 为 LED 显示技术分类对比及其应用场景分布。

表 1 LED 显示技术分类对比及其应用场景分布^[2]

Tab.1 Comparison and applications of LED display technologies

产品类型	点间距/mm	像素密度/PPI	可分辨极限距离/m	适用场合或观看距离
Micro-LED	<0.08	>300	人眼不可分辨	消费电子
	0.1	254	0.34	
	0.2	130	0.7	
Mini-LED	0.5	50	1.7	LED 电视
	0.7	36	2.4	
	0.9	27	3.1	
小间距 LED	1	25	3.4	室内,距离 3~6 m
	1.2	21	4.1	
	1.5	17	5.2	
	2	13	6.9	
普通 LED 屏	2.5	10	8.6	室内,距离 5~15 m
	3	8.5	10.3	
	4	6	13.7	
	>10	<2.5	>34.4	室外,距离 >30 m

与大尺寸 LED 相比,LED 的微缩化技术提高了 LED 的内量子效率,降低了 LED 的导通电阻,器件整体的电流均匀性更好,即提高了 LED 的光电转换效率,因此 Micro-LED 理论上可实现低能耗高亮度的指标要求^[3]。表 2 是小间距 LED、Mini-LED 和

Micro-LED 的性能指标对比。

表 2 小间距 LED、Mini-LED 和 Micro-LED 的性能指标对比^[4]

Tab.2 Performance targets comparison of small-pitch LED, Mini-LED and Micro-LED

	小间距 LED	Mini-LED	Micro-LED
芯片尺寸/ μm	500 左右	60~200	<60
技术类型	自发光	自发光/背光	自发光
封装	SMD/COB	COB/IMD	CSP
背板	PCB	PCB、TFT	TFT、CMOS
发光效率	中等	高	高
对比度	$\leq 5\,000:1$	100 000:1	1 000 000:1
NTSC/(%)	≤ 110	80~100	可达 140
可视角/ $^\circ$	$\pm 160\sim 170$	± 178	± 178
反应时间	μs	ns	ns
平均能耗	高/中等	低	低

2 关键技术与解决方案

微缩化 LED 显示技术的应用领域主要有与 LCD 显示器配套的 LED 背光和直视显示两个方向。

如图 1 和图 2 所示,针对 LED 背光,在现行 LCD 显示器架构的基础上将 LED 背光源芯片尺寸微缩至 $50\ \mu\text{m}\sim 200\ \mu\text{m}$,并矩阵式密集排布在背光模块中,实现对液晶显示屏背光照明。Mini-LED 做背光源,常用的封装结构是倒装 COB,如图 3 所示,

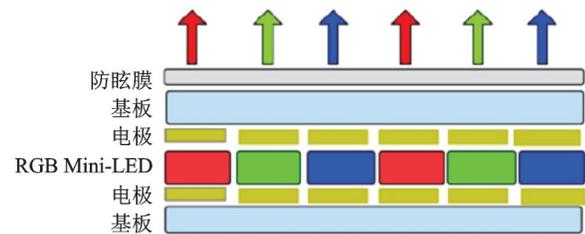


图 1 Mini-LED 用于 RGB 显示屏

Fig.1 Mini-LED applied to RGB display

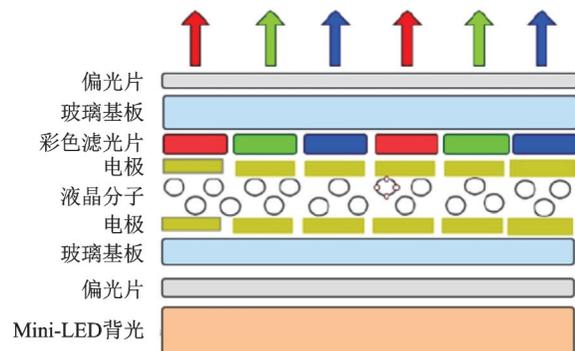


图 2 Mini-LED 用于背光照明

Fig.2 Mini-LED applied to backlights

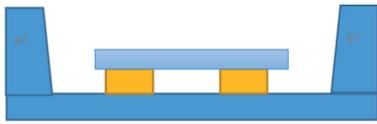
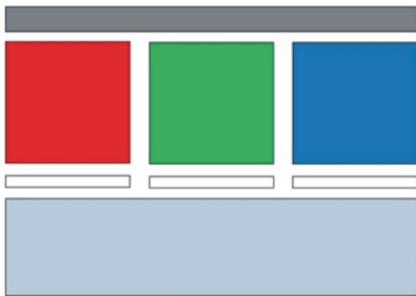


图3 Mini-LED倒装COB封装结构

Fig.3 COB packaging structure of Mini-LED

可以实现局部调光,能给LCD带来更为精细的HDR分区;LCD在HDR分区精细度上取决于背光源亮度区域调节的精细度和规模;Mini-LED采用直下式的设计,相对于侧背光式LED实现了更小范围的区域调光,达到了高动态范围的HDR屏幕效果;该设计的颜色性、色彩对比度和节能方面比OLED更好,同时可以搭配柔性基板,可以配合LCD曲面化,也能够保证画质的情况下实现类似OLED的曲面显示。得益于LED产业链和LCD产业链的成熟,使用Mini-LED的背光模组成本仅为同尺寸OLED的60%左右。

图4所示,针对LED直视显示,如RGB子像素自发光,可视角度大,发光效率高,色彩清晰,比现有的OLED技术亮度更高、发光效率更好、功耗更低。TFT-LCD是被动发光的显示器,通常TFT-LCD的透过率在3%~5%左右,因此光利用率低;另一方面,LED白管由蓝光激发黄色荧光粉发白光,红绿蓝三色比例约束在一定范围内,色域值仅有72%左右,因此色域值不如由三原色LED作为自发光显示像素的LED显示技术有优势^[5]。

图4 Micro-LED显示基本结构^[4]Fig.4 Basic structure of Micro-LED display^[4]

微缩化LED的关键技术可归类为以下四个方面:LED外延、LED微缩与集成、彩色化、驱动控制。

2.1 LED外延

就光电转换效率来说,目前蓝光LED的转换效率是最高的,在60%~70%之间,而红光的转换效率很低,因此半导体照明不得不通过荧光粉转换,才有了目前蓝光激发黄色荧光粉的主流方法。目

前国内的江风益院士团队研究的黄光LED效率得到了大幅提升,在电流密度20 A/m²的情况下,光电转换效率达27.9%,较以往的10%提升了179%^[6]。由于黄光和红光波长接近,江院士团队正在致力于高光效红光LED的研发。

想要实现微缩化LED芯片的量产能力,必须解决LED外延若干问题,如:

- ① 外延均匀性;
- ② 高精度、高良率外延芯片制程;
- ③ 小电流光效的Droop;
- ④ LED尺寸微缩带来的边缘效应;
- ⑤ Micro-LED芯片的出光效率等。

在外延结构设计方面针对小电流下的效率进行优化,使其发光效率的峰值移到更低电流密度区域,进一步提升芯片内量子效率。

2.2 LED微缩与集成

LED微缩与集成的目的是在目标基板上形成可单点驱动背光或像素,目前Mini-LED多采用倒装芯片结构,红光芯片倒装难度高于蓝、绿光芯片,需要进行衬底转移,而后通过激光切割技术形成含磊晶薄膜和衬底的微米级Mini-LED芯片,再利用相关封装技术如SMT、COB等将上述Mini-LED芯片独立焊接在显示背板上^[7-8]。与Micro-LED相比,Mini-LED的微缩与集成技术相对成熟,已进入了产业化阶段;而Micro-LED根据器件尺寸的不同有两种主流的微缩与集成方案,分别是适用于中大尺寸显示器件的巨量转移法和适用于小微显示器件的单片集成法。

巨量转移包含转移、键合和封装三个关键工艺。这里的转移指薄膜转移,首先采用物理或化学法将LED衬底剥离,以一中间载体承载LED的磊晶薄膜,再利用感应耦合等离子体(ICP)刻蚀法形成微米级Micro-LED分区像素;又或者,先利用ICP刻蚀形成微米级Micro-LED分区像素,再利用物理或化学方法剥离LED衬底留下LED磊晶薄膜,并以一中间载体承载;而后选择合适的转移治具,将Micro-LED磊晶薄膜批量转移至驱动背板上,最后通过调控温度、压力等工艺参数将每颗Micro-LED与驱动背板上的像素电极形成良好的电气连接^[7-8];其难点在于提高转移效率的同时保证转移良率,要实现商品化应用,转移良率应达到99.999 9%,因此巨量转移的成本居高不下。由于LED为微米级芯片密集排布,需要对LED芯片进行高精度的高速排

列,后续针对微米级芯片的键合过程需要超高的背板平整度及线宽精度,需要合适的键合工艺材料及参数,小间距LED和Mini-LED焊接工艺中常用的传统锡膏材料在固化过程中产生孔洞概率大,容易导致微米级芯片的焊接漂移^[9],无法满足Micro-LED的高精度固晶要求,键合材料及设备也成为急需解决的问题。封装的目的是要保证良好的环境可靠性并且满足不同的显示技术光学要求,比如用于阻隔水汽和电气绝缘的薄膜封装,用于阻止光串扰的黑矩阵,以及一些特殊应用如透明显示等,因此封装工艺需考虑封装材料的成型温度及厚度等关键参数。

单片集成法指的是在LED的磊晶薄膜层上用ICP刻蚀法形成微米级Micro-LED像素分区(含磊晶层和衬底),再将刻蚀好的单片通过点对点的方式键合于驱动背板上,而后使用物理激光剥离或化学湿法刻蚀将衬底剥离,最终在驱动背板上留下4~5 μm的Micro-LED磊晶薄膜作为显示像素^[7-8];或者,先将LED晶圆(含磊晶层和衬底)与驱动背板键合,再将衬底剥离,最后通过ICP刻蚀或离子注入等方式形成像素点阵。使用单片集成法制造的显示器件通常具有超高的像素分辨率,因此其难度在于如何保证晶圆级键合平整度,衬底的精准去除以及高分辨率像素阵列图形高精度光刻套刻,以期最大程度降低最终Micro-LED显示器件上的像素瑕疵点率。

2.3 彩色化

彩色化方案主要包含三色LED转移、高精度量子点彩色化、以及棱镜合成投影法。近年来由于微型发光二极管以及扩增实境/虚拟实境等新颖的应用场域都需要利用高解析度、全彩的显示屏幕。考虑到利用一般红蓝绿微型发光二极管的方式仍有一定的限制,利用量子点的特性来制作大规模的制程似乎是可行的方案,将大面积量子点图案化、微小化,有希望达到微米尺度或是次微米尺度的规格。在所有实现Micro-LED阵列全彩的方式中,由蓝光激发量子点实现绿光和红光,从而获得红绿蓝三原色的方法是最佳途径。在整个工艺制备过程中,实现量子点全彩的方式及相应细微结构的调整也较为复杂。首先需要制备相应挡光结构,以阻隔不同像素或者被转换的像素位置的光的相互串扰,其次需要保证量子点光刻胶中量子点浓度、掺杂散射因子大小、膜层厚度等在适当的范围。原则上希

望可以将量子点膜层做到尽可能的薄,从而有利于最终产品的轻薄便携;还值得提出的是,量子点光刻胶的种类有待进一步筛选,因为目前开发出来的专用光刻胶及量子点的种类有限,需要进一步尝试以期获得最佳的蓝光转换效率、最薄的膜层厚度等。

实现量子点全彩化的工艺手段主要有:多重曝光法、纳米压印法、纳米表面处理法以及量子点膜层刻蚀等手段,这是非常重要的前沿研究。据实际经验表明,刻蚀手段似乎具有更高的效率,曝光显影等可能造成工艺复杂度的提升。

2.4 驱动控制

对于LED背光应用来说,目前的静态调光技术因为需要串联IC数量,驱动电路成本高昂,IC控制I/O数量庞大,驱动电路体积大,背光刷新频率低且容易有闪烁感,因此已经难以满足新型LED背光技术的需求,区域调光技术恰好可以弥补静态调光的不足,但目前还存在分区背光的亮度均匀性、刷新频率和背光的光效均偏低、集成度以及调光分辨率的精细程度不高等一系列问题^[10-11]。

对于LED直视显示来说,由于LED点间距越来越小,使用的LED芯片数量越来越多,芯片尺寸越来越小,这导致驱动电流也越来越小,使得驱动IC对电流的精准控制也越来越难;并且,与OLED相比,Micro-LED的发光特性具有较大的差异,在低电流密度状态下Micro-LED的发光电流效率低且变化快,传统AMOLED驱动中采用的经典的模拟驱动方案在Micro-LED显示中并不适用,该方案会导致发光像素的效率低下和面板功耗升高,并且在面板低亮度显示条件下无法实现灰阶的正常展开而导致图像显示质量下降,因此需要开发背板驱动技术,针对小电流下的灰阶显示和超高范围调亮比的目标需求进行模拟和PWM数字驱动的混合电路设计,目前缺少成熟的背板驱动解决方案;再加上大量LED芯片及驱动IC的长时间工作导致背板热量快速积聚,若不能及时散热,高温会使驱动IC模块产生偏色,因此更高集成度和更低功耗的驱动IC也是未来发展方向^[12]。

3 国内外研究进展

国内外针对微缩化LED显示的关键技术研究进展如下。

3.1 微缩制程

微缩制程的侧壁缺陷导致 Micro-LED 的发光面积大幅降低,如图 5 所示,使其外量子效率由常规 LED 的 35% 左右,下降至 10% 甚至 2%,其原因是边缘漏电导致非辐射跃迁。为了克服不同机制的漏电,可以从材料、结构等多角度提出不同的方法。例如,可以借鉴半导体技术如分辨率增强技术来实现,其中包括了光学邻近校正、离轴照明、次分辨率辅助图形和移相掩模等方法^[13]。

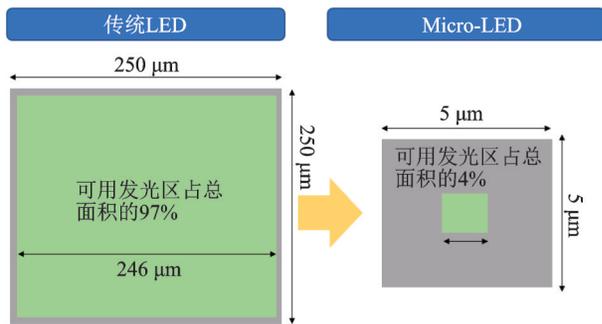


图 5 Micro-LED 的侧壁缺陷导致可用发光面积大幅缩小
Fig.5 Wall defects sharply decreased Micro-LED light-emitting area

3.2 巨量转移技术

大尺寸 LED 的常规转移方式为真空吸附,然而真空管存在物理极限尺寸,最大只能抓取约 80 μm 的 LED 颗粒,对于单颗像素小于 50 μm 的 Micro-LED 而言,真空吸附的方式不再适用^[14-15]。

巨量转移主要的技术包括静电力释放技术,范德华力技术,磁力吸附和释放技术,激光图形化释放技术,自主装(流体力)技术和转印技术,见图 6。

科研工作者对弹性印章研究的时间最长,早在

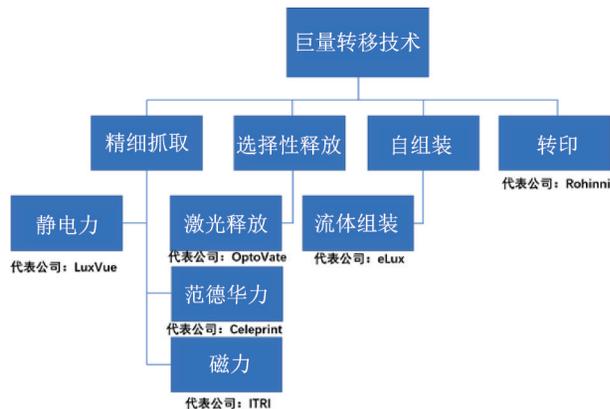


图 6 巨量转移技术^[16]
Fig.6 Mass transfer technologies^[16]

2000 年就有专家学者利用 PDMS 作为印章材料,转印微米级图形^[17]。印章转移印刷实现了革命性的制造策略,其中首先将 LED 组装成微型化的微型系统“光引擎”,然后进行微转移印刷并直接互连到金属化的大幅面板上。行业内多使用弹性印章的方式做转移,是目前的一种主流转移技术。激光辅助转移工艺在灵活性、可靠性、可量产性等方面相对其他技术方案有优势,尤其是可以兼容修复工艺,所以目前是被行业给予厚望的重要路线。印章转移的方案,核心是弱化结构芯片的工艺制备和 PDMS 材料的选取,配合激光辅助转移,使得该种巨量转移方案可以兼顾转移和修复,可以兼容多种设计和多种尺寸芯片,在设备成本和耗材成本方面有显著优势,具有更多的灵活性,见图 7。

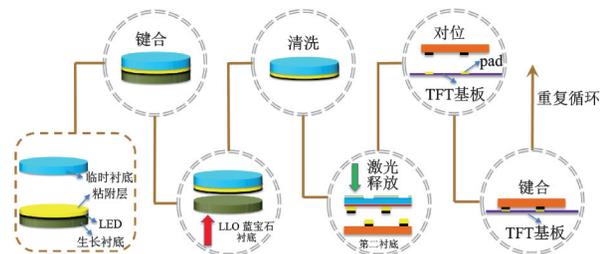


图 7 巨量转移(印章+激光辅助)示意图
Fig.7 Schematic of mass transfer (stamp plus laser)

3.3 键合技术

2019 年, JBD 发布了 5 000 DPI Micro-LED 微显示器件,如图 8 所示,采用的是单片集成技术,其像素间距为 5 μm,分辨率 1 280×720,由 PWM IC 背板设计供电。该产品可适用于 AR、VR、微型投影仪和其它移动显示应用。此外, JBD 还发布了世界上最小的显示面板(3.3 mm),如图 9 所示。其像素密度为 6 350 DPI,像素间距 4 μm。用此款 Micro-LED 微显示面板做投影机光引擎,体积可小至 0.45 cm³。内置 RAM,且像素可根据需要更新,面板功耗约 20 mW。这种具备低成本优势的面板非常适合近眼提示信息类 AR、运动光学以及瞄准器类应用。

美国的德克萨斯理工大学在 2011 年《应用物理快报》上发表成果^[18],用 GaN 蓝宝石基板和硅基驱动基板,通过倒装焊进行电气互联,像素周期是 15 μm×15 μm,分辨率 640×480,单绿色样品,器件结构和样品见图 10 所示。

Chen C J 等人^[19]采用钢-钢倒装焊工艺连接 Si CMOS IC 和蓝宝石基 LED,成功研制出了分辨率



图8 0.78 cm Micro-LED
Fig.8 0.78 cm Micro-LED

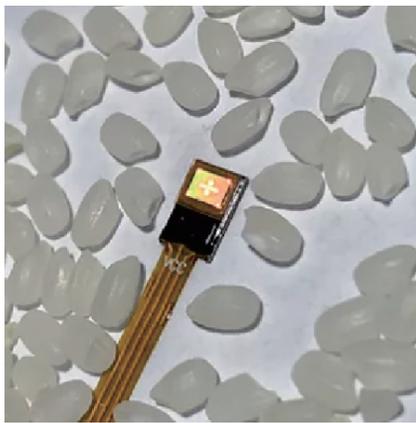


图9 0.33 cm Micro-LED
Fig.9 0.33 cm Micro-LED

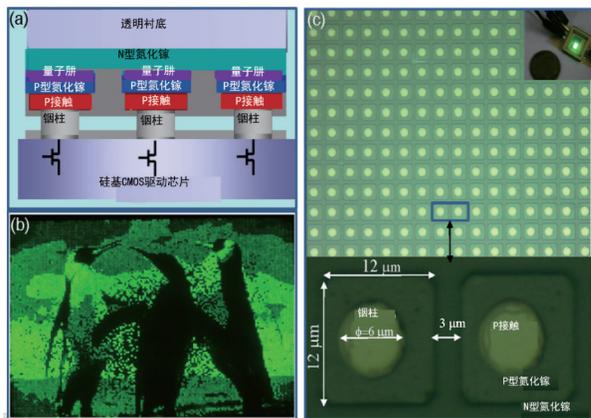


图10 德克萨斯理工大学研制样品
Fig.10 Samples produced by Texas Tech University

为 960×540 的单色(蓝光)有源 Micro-LED 微显示器件(1.4 cm),其剖面结构如图 11 所示。

除了钢-钢倒装焊连接外,Tempier 等人^[20-21]通过在 CMOS 驱动芯片上制备微型管状结构(micro-tube)用于倒装连接也成功制备了硅基 Micro-LED 微显示器件,如图 12 所示,其分辨率为 873×500 。



图 11 倒装焊器件剖面结构
Fig.11 Cross-sectional structure of flip-chip device

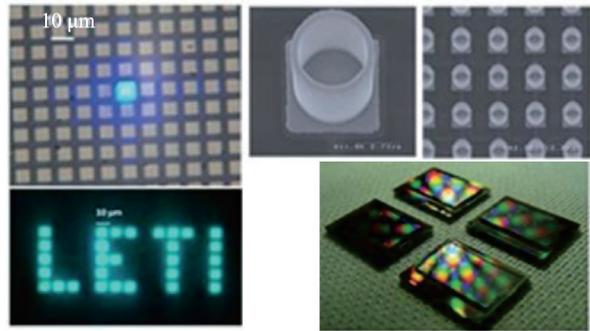


图 12 采用微型管状结构制备的硅基 Micro-LED 微显示器件
Fig.12 Silicon-based Micro-LED display prepared with Micro-tube structure

3.4 彩色化方案

新竹交通大学林建中组深入研究了多层次叠量子点结构的设计、制程、图形化以及效率^[22],产出结果见图 13。

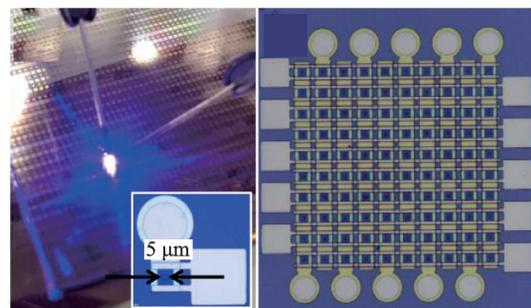


图 13 林建中课题组产出成果
Fig.13 Achievements of Lin Jianzhong research group

台中中兴大学武东星课题组对 Micro-LED 显示器晶粒关键基础技术进行了研发,图 14 展示了器件晶粒的工艺技术,主要内容有高效率低漏电 Micro-LED 晶粒的设计与制作, Micro-LED 晶粒的核壳量子点、嵌入式量子点及钝化层材料的设计与开发,高效率复合钙钛矿量子点应用于全彩 Micro-LED 显示器的技术开发,低串扰 Micro-LED 显示器的晶粒结构设计及制作等。另外该课题组正聚焦于高阻气包覆型量子点、分散技术、光扩散

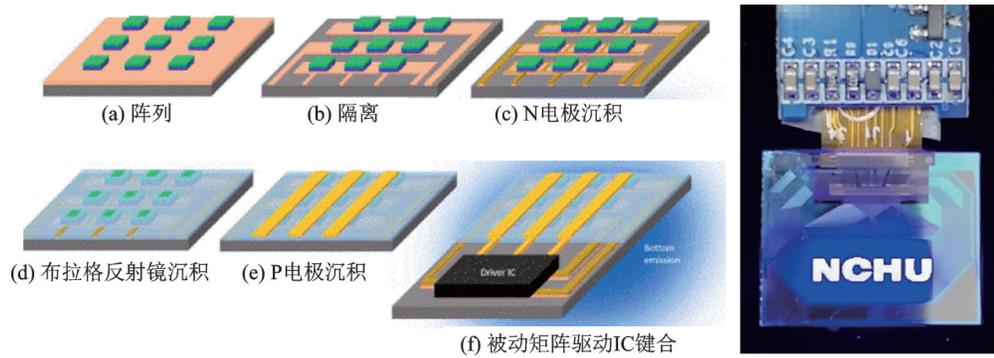


图 14 武东星课题组产出成果

Fig.14 Achievements of Wu Dongxing research group

层制程与 Micro-LED 显示载具搭配验证等,提出高阻气包覆型量子点开发与全彩 Micro-LED 显示器的异质整合研究^[23]。

新竹交通大学郭浩中课题组以 Aerosol Jet 喷涂技术并利用光学微影蚀刻出模具来分隔三种颜色的量子点以制作平面全彩单元 Micro-LED 显示阵列,图 15 展示了器件彩色化的过程,为直视型超广视角 AR 眼镜装置的显示阵列开发贡献力量^[24]。

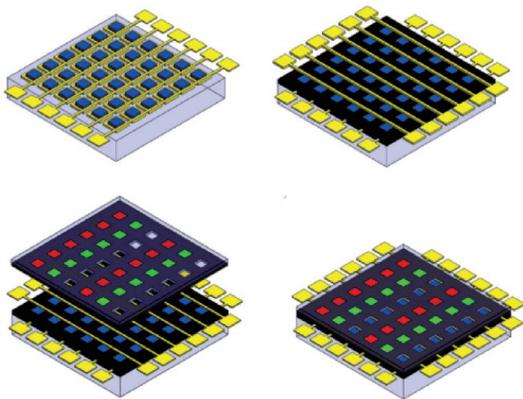


图 15 郭浩中课题组产出成果

Fig.15 Achievement of Guo Haozhong research group

4 总结及展望

5G 时代对显示产品的高清晰度、高精度、超快响应速度、高分辨率、高刷新率、高亮度、更高对比度、长寿命、轻薄、低能耗等方面有了更加迫切的需求,微缩化 LED 显示技术的发展无疑为 5G 时代的到来打下了深厚的基础。

LED 微缩化技术的不断发展,逐步孕育了 Mini-LED 背光技术和 Micro-LED 显示技术,其中 Mini-LED 作为 Micro-LED 的过渡,其在 LCD 背光方向的应用前景十分广阔,是 Mini-LED 的核心增

量市场之一。Mini-LED 背光技术定位于传统侧入光背光 LED,基于传统 LCD 的设计结构,其显示性能可与 OLED 技术相媲美,而成本端具备持续下降的潜力。Micro-LED 则被认为是下一代显示的最佳解决方案, Micro-LED 像素间距小于 $50\ \mu\text{m}$ 且可单点寻址驱动发光,在发光效率和发光能量密度上有绝对优势,因此 Micro-LED 相比于其他显示技术在高亮度、低功耗、长寿命、超高解析度和色彩饱和度等方面均更有优势。

LED 微缩化的关键技术需要从 LED 外延、LED 微缩与集成、彩色化和驱动控制四大方面解决各自的技术难点,重点突破巨量转移技术、量子点彩色化技术、驱动背板技术、驱动 IC 技术等,才能实现微缩化 LED 显示技术的产业化。

值得一提的是, Micro-LED 显示器凭借其超高亮度的优势,在军用头盔显示和平视显示领域有着不可替代的作用,需要加强开发力度。未来,建议根据民用和军用等不同应用环境对 Micro-LED 显示器件的实用性及可靠性要求,加强研究 Micro-LED 窄边框技术,研究整体驱动架构设计,包括驱动背板、驱动电路、时序控制、驱动 IC 功耗降低等等。具体是要实现一种多级灰阶下可稳定显示并且可以进行大范围亮度调整的 Micro-LED 显示器的数字驱动方法,比如在 LTPS 上实现像素驱动电路和两组独立的扫描驱动电路,在像素驱动结构上分别设计用于控制置数和用于控制关断显示的信号,根据数据信号以及幅度可变的 LED 驱动电源 VLED 控制 Micro-LED 像素的通断,在时序控制器、数据驱动电路和扫描驱动电路的控制下将一帧视频信号按照位平面分 X 个子场,实现 2X 级灰阶的稳定显示;通过“卷帘显示”模式的 PWM 时间调制技术和分段改变 VLED 幅度实现 Micro-LED 显示屏的大范围亮度调节,通过“卷帘显示”将驱动负载

在时间上均匀分布,提高显示控制系统的稳定性。研究优化Micro-LED器件的散热能力,比如优化降低LED像素与基板键合界面的热阻,设计特殊的齿形外接散热结构,配合超高热导率的导热材料等,有效提高器件的使用寿命;研究逐点亮度校正和色彩补偿技术,解决LED半导体器件离散性、衰减性及模块化拼接产生的亮度不一致性问题;研究显示器件的夜视兼容、EMC性能等特种技术问题,比如可通过控制外延波长均匀性、量子点材料成分及结构的优化应用,甚至引入滤色片等方法解决夜视兼容的问题;通过外接结构形成屏蔽回路和有效接地结构,配合吸波材料的应用实现EMC性能。

总的来说,微缩化LED显示技术的应用开发有重要的科学意义和极高的国防价值,利用国际大环境中的Micro LED研究热潮,在材料外延、器件研制和驱动控制等方面积极布局和加大投入,为解决Micro LED显示器件的工程化问题提供新思路、新方法和新途径,避免相关“卡脖子”的核心技术持续被西方国家垄断,进而能够一举抢占新型显示器件技术的制高点。

参 考 文 献

- [1] 吴科任. Micro-LED有望成为显示产业新风口[N]. 中国证券报, 2019-12-14.
- [2] LED网. 全面梳理 Micro-LED 的历史与现状[EB/OL]. <http://wenku.baidu.com>, 2016-08-04.
- [3] 王 珍. 一年狂吸 300 亿投资 Micro LED 产业化尚难破局[N]. 第一财经日报, 2019-12-25.
- [4] 智慧城市网. 浅析 Mini LED 技术难点及趋势[EB/OL]. https://www.afzhan.com/Tech_news/detail/285602.html. 2018-10-15.
- [5] 数字标牌网. Micro Led 技术原理及简介(Micro Led 功能特性和优势及发展前景)[EB/OL]. http://www.ds-360.com/news/2018/3/2018_28_30448.html, 2018-03-22.
- [6] 胡伟频, 卜倩倩, 孙 晓, 等. 微米级 LED 显示应用浅析[J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4(4): 5-8.
- [7] 电子网. 苹果自身从事研发显示面板, Micro LED 技术遭遇瓶颈, 能否挑战 LCD 和 OLED?[EB/OL]. <https://www.21ic.com/article/842253.html>. 2020-08-11.
- [8] 电子发烧友网. 连苹果都着了 OLED 的道, 国内却在关注另一个非 QLED 却远胜过 OLED 的技术[EB/OL]. <http://www.elecfans.com/led/oled/511692.html>. 2017-04-27.
- [9] 赵继业, 杨 旭. 纳米级工艺对物理设计的影响[J]. 中国集成电路, 2008(8): 43-51.
- [10] 柳竹宁. 基于 65nm 工艺的 256BiteFuse 设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [11] 郭智骏. 基于蒙特卡洛方法建立用于产品良率估算的最小工作电压模型[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
- [12] 柴林峰, 刘倩倩. 基于 FRFT 算法的移动平台水声信道编码技术研究[J]. 河南科技, 2019, 676(14): 12-15.
- [13] 高伟民. 现代光刻工艺中的分辨率增强技术[C]. 中国光学学会学术大会, 中国杭州, 2004: 9-14.
- [14] 迎 九. MicroLED 的市场趋势及制造检测挑战[J]. 电子产品世界, 2018, 25(11): 84-85.
- [15] 邵建鹏, 郭伟玲. Micro LED 显示技术研究进展[J]. 照明工程学报, 2019, 30(1): 18-25.
- [16] Francois J Henley. Combining engineered EPI growth substrate materials with novel test and mass-transfer equipment to enable microLED mass-production[J]. SID International Symposium: Digest of Technology Papers, 2018, 49(2): 688-691.
- [17] Li H, Luo C X, Ji H, et al. Micro-pressure sensor made of conductive PDMS for microfluidic applications[J]. Microelectronic Engineering, 2010, 87(5-8): 1266-1269.
- [18] Day J, Li J, Lie D, et al. III-Nitride full-scale high-resolution microdisplays [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99 (3) : 42-44.
- [19] Chen C J, Chen H C, Liao J H, et al. Fabrication and characterization of active-matrix 960 × 540 blue GaN-based micro-LED display [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2019, 55(2): 1-6.
- [20] Templier F. GaN-based emissive microdisplays: A very promising technology for compact, ultra-high brightness display systems [J]. Journal of the Society for Information Display, 2016, 24(11): 669-675.
- [21] Marion F, Bisotto S, Berger F, et al. A room temperature flip-chip technology for high pixel count micro-displays and imaging arrays [C]. IEEE Electronic Components & Technology Conference, IEEE, Las Vegas, NV, USA, 2016: 929-935.
- [22] 蔡志豪, 施希弦, 林建中, 等. 量子点堆叠结构及其制造方法及发光元件[P]. 中国: CN103545404A, 2014-01-29.
- [23] 吴孟斋, 武东星, 洪瑞华. 白光发光元件及其制造方法[P]. 中国: CN1773703, 2006-05-17.
- [24] Wu Tingzhu, Lin Yue, Huang Yuming, et al. Highly stable full-color display device with VLC application potential using semipolar μ LEDs and all-inorganic encapsulated perovskite nanocrystal [J]. Photonics Research, 2021, 9(11): 2132-2143.