

文章编号: 2096-3424(2023)01-0032-06

DOI: 10.3969/j.issn.2096-3424.2023.01.004

# mini LED 技术研究

邵鹏睿

(深圳市卓兴半导体科技有限公司, 广东 深圳, 518101)

**摘要:** 相较于传统显示技术, 次毫米发光二极管 (mini LED) 具有亮度高、响应快、高对比度、色彩丰富、寿命长等优势, 最重要的是, 由于采用  $\mu\text{m}$  级的 LED 芯片作为背光源, mini LED 显示画面的背光更均匀, 并且可以进行极其精细的背光区域控制, 对于显示市场的发展具有重大意义。综述了 mini LED 显示技术的发展历史, 总结了目前 mini LED 在背光和直显两种技术上的商业研究技术进展, 期为 mini LED 的发展应用提供参考和思路。

**关键词:** 次毫米发光二极管; LED 芯片; 背光; 直显

**中图分类号:** TN27 **文献标志码:** A

## Investigation of mini LED technology

SHAO Pengrui

(Asmade (Shenzhen) Semiconductor Technology Co., Ltd., Shenzhen 518101, Guangzhou, China)

**Abstract:** Compared with the traditional display technology, mini light-emitting diode (mini LED) has the advantages of high brightness, fast response, high contrast, rich color and long service life. Most importantly, because the micron level LED chip is used as the backlight, the backlight of mini LED display screen is more uniform, and can carry out extremely fine backlight area control, which is of great significance for the development of the display market. The development history of mini LED display technology was reviewed and the current commercial research progress of mini LED in backlight and direct display technology was summarized, in order to provide reference and implications for the development and application of mini LED.

**Key words:** mini light-emitting diode (mini LED); LED chip; backlight; direct display

自 1897 年德国 K.F. 布劳恩发明阴极射线管以来, 显示技术在人类的发展道路上扮演着越来越重要的角色。在 20 世纪 60 年代, 研究人员成功研发出液晶显示器件, 自此液晶显示进入历史舞台并大力发展。液晶显示 (liquid crystal display, LCD) 技术具有能耗低、辐射小、线性失真少、显示器轻薄、重量小的优点, 但其依然存在影像拖尾、显示

屏“坏点”以及亮度和对比度仍有缺陷的问题<sup>[1-2]</sup>。而在 2005 年后投入商业应用的有机发光二极管 (organic light-emitting diode, OLED) 显示技术则避免了这些缺陷, OLED 无需背光灯, 采用非常薄的有机材料涂层和玻璃基板 (或柔性有机基板), 电流通过涂层或基板即可发光, 这些特征使 OLED 在平面显示器的应用上显得非常突出。但 OLED 其

收稿日期: 2022-12-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB3501700) 资助

作者简介: 邵鹏睿 (1980-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为 mini LED 和 micro LED 的封装和芯片转移技术、LED 透明显示技术以及新型显示应用材料。E-mail: pengrui@163.com

引文格式: 邵鹏睿. mini LED 技术研究 [J]. 应用技术学报, 2023, 23(1): 32-37.

Citation: SHAO Pengrui. Investigation of mini LED technology [J]. Journal of Technology, 2023, 23(1): 32-37.



本身属于有机体发光技术,因有机体本身的寿命受限问题使 OLED 的使用寿命通常只能达到 5 000 h,这间接增加了 OLED 的成本,并且 OLED 的面板生产的难度也较高,因此价格较昂贵<sup>[3]</sup>。目前商业领域较先进的显示技术是微发光二极管(micro light-emitting diode, micro LED)技术,它是在一个芯片上集成高密度微小尺寸的 LED 阵列,阵列中的每个 LED 微晶单元尺寸小于 50  $\mu\text{m}$ ,仅为普通 LED 的 1%,并且可以实现每个图元单独定址和单独驱动发光。其优势在于既继承了无机 LED 的高效率、高亮度、高可靠性及反应时间快等特点,又具有自发光无需背光源的特性,体积小、轻薄,还能轻易实现节能的效果<sup>[4]</sup>。但目前 micro LED 的技术并不成熟,原因就在于作为“像素点”的 micro LED “灯泡”还不够小。现有的商品化 micro LED 屏幕宽度大多达到 2.54 m(100 in)及以上,这无疑限制了其使用环境。很多家庭和办公室无法提供如此大的面积,并且其价格也让人望而却步。次毫米发光二极管(mini light-emitting diode, mini LED)显示技术成为目前显示领域最具有商业潜力的显示技术。mini LED 也被称为“亚毫米 LED”,其像素尺寸和制备难度介于传统 LED 与 micro LED 之间,业内已对 mini LED 的定义形成了统一的认知,即窄边在 50~300  $\mu\text{m}$ (不含封装)内的芯片称之为 mini LED,因此也被认为是传统 LED 与 micro LED 之间的过渡显示技术。并且由于 micro LED 规模化量产技术及工艺尚不成熟,而 mini LED 已进入规模化商用阶段,因此,在现阶段,mini LED 依然是显示领域的研究重点<sup>[5]</sup>。

根据目前的发展现状,本文综述了近年关于 mini LED 的技术进展,主要讨论了 mini LED 的背光显示技术和直显技术的发展现状,以期对 mini LED 的商业应用和研发提供新的方向。

## 1 mini LED 背光显示技术和直显技术简介

mini LED 显示技术是实现 LCD 高亮度、高对比度、高色域的重要技术。其使用大量阵列排布的 mini LED 芯片,具有超高亮度;支持局部调光,带来更精细的 HDR 分区,实现超高对比度;搭配使用有色转换膜,实现超高色域。LCD、OLED、mini LED 及 micro LED 技术的比较见表 1。

mini LED 显示技术主要包括背光显示技术和直显技术 2 类。常见的 mini LED 背光结构技术原理是将带有 mini LED 芯片阵列的灯板发出蓝光,

表 1 LCD、OLED、mini LED 及 micro LED 技术比较

Tab. 1 Comparison of LCD, OLED, mini LED and micro LED technologies

显示技术	传统LCD	OLED	mini LED	micro LED
技术类型	背光LED	自发光LED	自发光LED	自发光LED
对比率	5 000 : 1	$\infty$	$\infty$	$\infty$
亮度/(cd·m <sup>-2</sup> )	500	500	5 000	5 000
发光效率	低	中等	高	高
对比度	低	高	高	高
响应时间	ms级别	$\mu\text{s}$ 级别	ns级别	ns级别
厚度/mm	厚	薄, 1~1.5	薄	薄, <0.05

光线经过堆叠光学膜后实现光线的均匀化和颜色转换。其中,颜色转换是通过堆叠光学膜中有色转换膜(如量子点膜、荧光粉膜等)实现的,mini LED 灯板发出蓝光经过有色转换膜后混为白光。在应用场景方面,相对于主要应用于大型场馆或者直播厅场景(演唱会屏幕、监控室、体育赛事中心等)的 micro LED 产品,mini LED 产品多应用于家庭式场景和小规模会议或场馆<sup>[6]</sup>。

对 mini LED 直显技术来说,局部调光是其替代其他显示技术不可或缺的优势之一。传统的 LCD 因为液晶层的不均匀排列、滤色器的散射以及像素化电极衍射等原因,其对比度相对较低<sup>[7]</sup>。为了增强对比度,使用空间分段背光单元进行局部调光是一种有效的方法。每个局部调光区,都受到独立控制。通过背光调制,对比度可以从 1 000 : 1 增加到 5 000 : 1,甚至可以接近 1 000 000 : 1。

而对于 mini LED 背光技术来说,背光区域的调光单元是实现其对比度和显示效果提升的关键。郭举等<sup>[8]</sup>分析了 mini LED 侧入式和直下式背光区域调光单元的光学特性,经过建模和仿真,对市面上的 mini LED 光学性能和出光效果进行了详细对比研究,开发出新型的角入式 mini LED 背光调光单元,通过图案化导光板网点实现了区域调光的均匀性优化。该结构兼容了直下式和侧入式背光源的优势,为 mini LED 背光模组的发展和商业应用提供了很好的技术参考。

## 2 mini LED 背光显示技术

mini LED 的空间分段背光单元技术使其具有峰值亮度高、显示高清和厚度超薄的优势,并可以抑制光晕效应和削波效应<sup>[9]</sup>。传统的侧光式 LCD 外形较薄,但如果使用高亮度大面积 LED 阵列,导光板的厚度会成比例地上升,整体厚度会明显增加。另一方面,传统 LCD 虽然仅需少量 LED 灯珠即可

具有高亮度和高清晰度,但需要相对较长的传输距离来确保良好的背光均匀性<sup>[10-11]</sup>。相比之下,采用大量的尺寸较小的 LED 灯珠,则可以将光均匀地扩散,从而使 LED 和扩散器之间所需的光学距离更短。光晕效应和削波效应是局部调光 LCD 中的常见问题。光晕效应是光从明亮的物体扩散到相邻的黑暗区域,从而使发光点看起来有光晕。削波效应来自当相邻区域调光时局部调光区域中的亮度不足时产生的副作用。因此,对于需要局部调光的显示技术来说,主要有 2 种方法来解决光晕效应和削波效应带来的问题:①优化局部调光算法,Burini 等<sup>[12]</sup>比较了不同的算法并进行优化,以实现功率约束的光晕和削波效果;②从硬件方面来解决,无限高的对比度或像素级调光可以消除这 2 种效应的影响,但目前来看尚难以实现。在实际的高清 LCD 设计和优化中,增加局部调光区域的数量可以减少受光晕效应影响的暗区,而更高的 LCD 对比度可以有效抑制亮区中的光晕效应,减少区域串扰的方法有助于抑制光晕效应和削波效应。

### 2.1 组装技术

目前主要采用键合工艺制备 mini LED,即采用键合技术将 mini LED 的外延结构与其衬底相连接,组装整个 mini LED 显示器。目前主流的键合技术是 SiO<sub>2</sub> 键合,但由于 SiO<sub>2</sub> 自身材料属性的原因,该过程工艺复杂且键合难度较大。班国训<sup>[13]</sup>采用一种新型的键合方式改善了外延结构与衬底的连接方式,采用复合胶层和黏附层使外延结构与衬底相连接,从而提高外延结构和衬底之间的黏附力,保证 mini LED 的制备质量。

### 2.2 背板技术

为保证 mini LED 在开发阶段的灵活性和开发效率,可采用印刷电路板作为 mini LED 的背板。印刷电路板具有尺寸不受限、背板面积无效区域小、可拼接性好等优点,但其成本较高、且容易受到真空回流焊影响而造成背板变形。因此在未来背板技术的开发中,采用玻璃基板作为 mini LED 的背板有很大的优势<sup>[14]</sup>。例如 Xu 等<sup>[15]</sup>采用薄膜晶体管来制作 mini LED 的玻璃基板线路,以实现多层线路的开发,同时印刷 4 层板的成本仅为印刷电路板的 25%。同时由于使用光罩工艺,因此玻璃基板与焊接盘的对接精度高,平整度好,非常适合生产大面积的 mini LED 背光基板;采用薄膜晶体管作为控制基板驱动,成本得到大幅度降低。

### 2.3 背光模组

mini LED 和 micro LED 的背光显示,大多是

通过在背光模组上安装大量的 LED 芯片来实现背光区域的调光。随着显示器的轻薄化发展,背光模组上 LED 芯片之间的距离逐渐缩小,即 LED 芯片到扩散板之间空气层的厚度越来越小。此种情况下,LED 芯片的发光可能相互影响,导致出光不均匀。因此,为了保证视效均匀,将 LED 芯片之间的距离缩小是目前常用的方法之一。紧密排列 LED 芯片可以使出光更饱满均匀,但较小的间距导致热量累积急剧增加,而且减小排布间距需要加厚扩散板并叠加扩散膜片,这又会增加显示屏的重量。Lee 等<sup>[16]</sup>设计了一种集成导光板,在导光板上表面制作微结构,实现导光板光线角度调制,最终提高了其主视角亮度。李德君等<sup>[17]</sup>提出通过逆棱微结构的扩散板背光模组来降低混光高度从而实现 LED 背光模组超薄设计的方法。杨宇琦<sup>[18]</sup>通过改善 mini LED 背光模组和显示装置上的反射片、微结构扩散膜结构来保证背光模组的均匀发光。通过反射单元层对 mini LED 芯片发射的小角度光线反射,经反射单元层反射的光线反射后再次入射反射单元层,反射单元层再次过滤小角度光线,而大角度光线则经过透射反射单元层后入射微结构扩散膜,微结构扩散膜对大角度光线进行扩散,从而保证出射光的均匀性。这些设计提高了 mini LED 芯片发光的均匀性,还能够减小背光模组及整机的厚度和质量,为 mini LED 显示屏的轻薄化发展提供了新的技术支持。

## 3 mini LED 直显技术

mini LED 直显技术是将 mini LED 芯片直接作为像素点来显示图像的技术。类似于 micro LED 显示技术,mini LED 直显将微型化的 LED 灯珠形成阵列后再组成直接显示面板,但 mini LED 直显没有背光模组的参与。其通过驱动控制灯珠,从而达到直接显示的目的。相对于 micro LED 芯片,mini LED 芯片的尺寸大小仅需达到 50 μm 左右,其技术瓶颈相对较容易突破。但相对于 mini LED 背光技术,mini LED 直显技术则更具有挑战性。一方面,固晶技术是目前有待突破的技术难题,固晶技术的好坏直接决定了 mini LED 显示面板的良率;另一方面,mini LED 直显将 μm 化的灯珠作为显示单元,具有较好的显示效果,但如何在面板上集成数百万颗灯珠仍需深入研究。

目前,对于 mini LED 直显技术来说,主要的技术挑战包括:转移 LED 芯片过程带来的制造良率下降和成本提升、强内反射导致的对比度的下降、

以及随着芯片尺寸减小而降低的内部量子效率。LED 芯片、灯珠颗粒和复杂繁琐的巨量转移过程均可能使显示面板成品产生缺陷,制造成品率相对较低。为确保显示屏的质量,应在每个步骤严格控制整个面板的匀色度。以 4K(分辨率 4 000 px)全彩显示器为例,如果制程良率为 99.99%,则大约有 2 200 个不良子像素需要修复,需要高达 99.999 9% 的成品良率才能将坏子像素的数量减少到大约 22 个<sup>[19]</sup>。因此,对于处在前沿显示技术行列的 mini LED 直显技术来说,如何提升其成品良率以及控制生产成本是目前的研究重点。

### 3.1 传统 mini LED 直显

不同于 mini LED 背光显示,mini LED 直显不需要背光模组,这也就避免了现有 mini LED 背光模组的高功耗、出光不均匀、光晕重叠等缺陷,并且由于采用 mini LED 芯片像素点直接显示,因此显示效果更细腻<sup>[20-24]</sup>。

目前市面上的转移技术大多是将 LED 芯片一颗一颗地转移。这样不仅效率差,而且所有的 LED 发光晶体都在同一块基板上,基板布线极为复杂,同时在基板上的 LED 发光晶体需要按色彩分别排布,操作更加复杂。1 颗红光芯片(R)、1 颗绿光芯片(G)和 1 颗蓝光芯片(B)3 颗芯片为 1 组,可构成 1 个像素点显示单元。在传统全彩 LED 封装固晶工艺中,红光芯片、绿光芯片、蓝光芯片需分别独立完成固晶,即每次识别 1 次焊盘,摆臂抓取转移放置 1 颗芯片,每次完成每个像素点的 1/3。与蓝光和绿光芯片不同,红光芯片为垂直芯片,因此固晶机无法同时抓取 3 色芯片。而且红光芯片固晶时使用导电银胶,而蓝绿光芯片固晶采用绝缘胶,这就导致 2 个工艺制程没法统一,从而导致固晶良率不高,固晶效率低下等问题。

### 3.2 像素固晶 mini LED 直显

对于目前的 mini LED 生产技术来说,最重要的是如何将  $\mu\text{m}$  级的芯片转移并封装在基底上。直显技术不需要背光,仅仅通过驱动和程序控制  $\mu\text{m}$  级的 LED 灯珠来完成复杂的显示任务,带来高对比度、高清晰度、高还原度的显示效果,但如何在大尺寸的基板上转移数以百万计的 LED 灯珠并实现高良率高效率的固晶,成了研究难题之一。在保证良率和成本的前提下,mini LED 直显技术的关键是决定良率高低的巨量转移技术和对应的固晶技术。

巨量转移技术是将数以百万的 LED 芯片转移到基板上的技术,其不仅要有高的转移效率,还要

有高的准确性。该技术转移的仅是 LED 发光晶体的外延层,并不是转移基底,搬运的晶体的重量和厚度都是极小的,因此需要有极精细的操作技术;并且转移的晶体数量大,技术要求极高。因此,巨量转移技术已成为现阶段的研究重点<sup>[14, 24]</sup>。目前,巨量转移技术的主要难点在于转移数量的突破、转移速度的改善、转移精度的提高、转移良率的提升、转移成本的控制;目标是将  $\mu\text{m}$  级 LED 芯片大批量精确转移并固定在衬底上。

目前较为成熟、良率最高的巨量转移技术之一是机械接触式摆臂固晶技术,该技术通过使用摆臂直接将芯片抓取然后转移到衬底上,来实现芯片的巨量转移,和传统转塔固晶方式相比,有更高的转移效率和良率。其他的技术,例如黏弹体印章转移技术,其是采用具有一定黏弹性的聚合物印章将 LED 芯片黏附,然后转移到衬底上,从而实现印制的技术。激光剥离转移技术,其是采用激光束将临时衬底上的 LED 芯片烧蚀到目标衬底上,将临时衬底上的 LED 芯片推向目标衬底,从而实现巨量转移的技术。除此之外还有滚轴转移技术、电磁力转移技术、静电力转移技术、流体自组装转移技术、化学剥离转移技术等<sup>[14]</sup>。在巨量转移技术方面,研究人员进行了大量的工作。Bibl 等<sup>[25]</sup>发明了一种传输微器件的巨量转移方法,可应用于生产 mini LED 和 micro LED。Choi 等<sup>[26]</sup>采用自对准滚轮转印技术,利用无机发光二极管和单晶硅薄膜晶体管的滚制叠加和对准转移,制备了有源矩阵型可拉伸显示器,其可在高达 40% 的拉伸应变下稳定工作。阙祥灯<sup>[27]</sup>采用将上层基板镂空的方法为下层基板的安装提供对位点,可以实现同色 LED 发光晶体的大批量转移操作,极大地提升了巨量转移的效率。此方法通过对基板膜层单元的排列进行模块化设计,利用承载载板和转移载板进行定位,从而提高巨量转移技术的效率和良率,有助于柔性 mini LED/micro LED 显示屏幕和 mini LED 透明显示屏幕的商业化生产。

由于 mini LED 直显屏幕生产时都是倒装芯片,无论是采用印刷锡膏将红绿蓝的焊盘一次性印刷,还是采用喷助焊剂直接喷涂完成,都可以达到固晶目的,因此固晶工序的工艺灵活性较高。识别 1 次焊盘,一次性把红、绿、蓝 3 颗芯片转移放置完成,实现 1 次转移 1 个像素点,这种方法就称为像素固晶。像素固晶具有以下优点:

(1) 更高的光学一致性。传统单芯片识别固晶法在每次识别和移动过程中都存在误差,导致芯片

位置和芯片之间的距离存在较大差异,点亮芯片时,其混光或反光的光学的一致性较差,就导致 LED 显示模块存在花屏等问题。而像素固晶具有更高的固晶位置的一致性,在做成成品后,具有更高的光学一致性。

(2) 更高的固晶转移良率。在同样识别精度误差条件下,跟传统的固晶方式相比较,像素固晶识别的次数和像素级位移次数减少了 2/3,相应地由于识别和移动导致的固晶不良率也减少了 2/3。

(3) 混芯片生产的效率更高。在颜色校正技术未成熟的条件下,传统 LED 屏的生产为了解决显示屏的光学一致性,需要做 2 方面处理:①在生产 LED 显示封装器件时,生产过程中需要经过混灯或炒灯过程,才进行编带包装;②同一个显示模块还要采用多个包装料进行混贴或混打,才能达到较好的光学一致性。同理,在 mini LED 显示生产过程中,也是需要进行混芯片生产。混芯片的方式通常是将多张蓝膜上的 mini LED 芯片按照一定规则转移到同一显示模块上。在混芯片生产时,采用像素固晶法,由于采用像素级混晶法生产,其像素间距移动的次数是传统单芯片固晶法的 1/3,有效地提高了设备的稼动率(activation)。

(4) 混芯片生产的良率更高。由于 mini LED 的直显封装是采用混芯片或芯片混打的方式来解决显示模块内部或模块与模块之间的颜色偏色、花屏的问题,从而提高出货率、降低成本,传统单芯片固晶法在多蓝膜芯片混打时,焊盘间移动的距离更大,导致误差和识别错误率更高。而像素固晶法,无论是移动次数还是焊盘的识别次数,都是传统单晶固晶法的 1/3,实现更高的混芯片生产良率。

对于 mini LED 来说,无论是直显还是背光技术,成本控制依然是亟须解决的问题。目前,降低 mini LED 直显屏制造成本的有效方法是:通过减少固晶过程中的移动路程以及定位时间来避免定位误差和锡膏的“活性降低”;通过减少固晶步骤的复杂度和时间避免因时间长、路程多带来的晶圆位置误差和粉尘吸附。传统固晶方式仅仅可以满足部分 mini LED 的固晶要求,但固晶质量却一言难尽。因此现在亟须将传统固晶方式进行优化,或者开发新的固晶技术来提升 mini LED 的固晶效果,来实现 mini LED 直显屏幕的大规模商业应用。

## 4 生产流程

基于以上的讨论,将市面上的传统固晶机与像素固晶机的参数进行对比(见表 2)。固晶技术要素

主要可以从像素、混光、效率 3 个方面进行比较。为实现成本控制,仍需要研究人员的创新,以解决目前固晶方式的低良率和低效率问题。每小时产出(units per hour, UPH)是指每小时的产量。如表 2 所示,传统固晶方案中,转塔固晶方法整体效果较好。企业目前主要通过转塔固晶机来实现高速取放 LED 芯片并完成固晶点胶等流程;转塔固晶机通过晶圆的自校正系统来补偿误差,从而达到较高的良率和混固效率,但其混光效果和光学效果已经无法满足市场需求。基于此,各大 mini LED 直显企业将焦点放在了像素固晶机的研发上。例如第一代卓兴 AS3603 像素固晶机从结构层面优化了电机参数,使摆臂更轻量化,夹具兼容性更广。在像素固晶上,像素固晶机的固晶方式为单机 1 次形成,而传统固晶机采用转塔方式进行像素固晶需要单机 3 次完成,3 机串联则需要 3 机 3 次完成,像素固晶机的固晶速度不仅远远超过其他传统固晶,在固晶效果也是最佳。在混光的方式和效果方面,像素固晶也具有较大的优势。在效率方面,传统固晶机采用转塔方式的混固效率较好,但在稼动率方面,像素固晶机具有较大的优势,表 3 是 mini LED

表 2 传统固晶机与像素固晶机的参数对比

Tab. 2 Comparison of parameters between traditional soliders and pixel soliders

固晶技术要素	像素固晶机	传统固晶机	
		转塔固晶机	普通3机串联
像素	固晶方式	单机1次形成	单机3次形成
	光学效果	最优	次优
混光	方式	单机36环	单机18环
	效果	最优	次优
效率	混固效率	45K (UPH)	50K (UPH)
	稼动率	0.98	0.95

表 3 mini LED 直显的像素固晶与传统固晶技术方案的对比

Tab. 3 Comparison between the pixel solidification technology of mini LED direct display and traditional solidification technology

固晶技术要素	mini LED	mini LED
	像素固晶	传统固晶
单个像素固晶	固晶方式	1次固晶
	芯片排布一致性	优
	像素间光学一致性	优
混固(18张蓝膜)	混固芯片方式	像素级
	产品装夹次数	1次
	固晶平台移动次数	6次
	固晶效率损失	<10%
	良率	高
光学效果	优	良

直显的像素固晶与传统固晶技术方案的对比。如表 3 所示, mini LED 像素固晶在固晶方式、芯片排布一致性、像素间光学一致性等方面都比 mini LED 传统固晶展现出更大的优势。而且由于 mini LED 像素固晶的产品装夹次数比 mini LED 传统固晶更少, 在移动次数上也相应的减少, 减少了固晶效率的损失也相应地提高了固晶的良品率。

## 5 结 语

本文介绍了 mini LED 背光显示技术和直显技术, 综述了目前 mini LED 的技术难点以及 mini LED 固晶技术的研究及应用情况, 介绍了此领域减少成本、提升固晶良率的最新技术进展, 希望能给各大厂商和研究机构提供参考, 带来研发灵感, 从而推动显示屏产业的发展。

### 参考文献:

- [ 1 ] 黄晓丽, 孙玉宝, 马红梅. 液晶显示器多种显示模式色彩表现的研究进展 [ J ]. 液晶与显示, 2021, 36 ( 3 ): 355-370.
- [ 2 ] 勋瑞光电. LCD液晶显示屏有哪些优缺点 [ EB/OL ]. [ 2019-07-26 ]. [https://www.sohu.com/a/329422998\\_120077140](https://www.sohu.com/a/329422998_120077140).
- [ 3 ] 夏威. 柔性OLED的研究进展与应用现状 [ J ]. 光源与照明, 2022 ( 1 ): 58-60.
- [ 4 ] 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 ]. [ 2018-03-22 ]. [http://www.ds-360.com/news/2018/3/2018\\_28\\_30448.htm](http://www.ds-360.com/news/2018/3/2018_28_30448.htm).
- [ 5 ] 信达证券. mini LED行业研究: 新产品加速落地, mini LED蓄势待发 [ EB/OL ]. [ 2021-04-20 ]. <https://new.qq.com/rain/a/20210420A07FRT00>.
- [ 6 ] 炼金术资本. 什么是mini LED [ EB/OL ]. [ 2020-11-12 ]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/147876852>.
- [ 7 ] CHEN H, TAN G, LI M, *et al.* Depolarization effect in liquid crystal displays [ J ]. *Optical Express*, 2017, 25 ( 10 ): 11315-11328.
- [ 8 ] 郭举, 申琼鑫, 江宗钊, 等. mini LED背光区域调光单元的光学特性研究 [ J ]. 液晶与显示, 2021, 36 ( 7 ): 939-946.
- [ 9 ] DAY J, LI J, LIE D, *et al.* III-nitride full-scale high resolution microdisplays [ J ]. *Applied Physics Letters*, 2011 ( 99 ): 031116.
- [ 10 ] DE GREEF P, HULZE H. Adaptive dimming and boosting backlight for LCD-TV systems [ J ]. *SID International Symposium: Digest of Technology Papers*, 2007, 38 ( 1 ): 1332-1335.
- [ 11 ] LIN F, HUANG Y, LIAO L, *et al.* Dynamic backlight gamma on high dynamic range LCD TVs [ J ]. *Journal of Display Technology*, 2008, 4 ( 2 ): 139-146.
- [ 12 ] BURINI N, NADERNEJAD E, KORHONEN J, *et al.* Modeling power-constrained optimal backlight dimming for color displays [ J ]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9 ( 8 ): 656-665.
- [ 13 ] 班国训. 一种mini LED制作方法以及mini LED: 中国, CN202210253074.0 [ P ]. [ 2022-03-15 ].
- [ 14 ] 季洪雷, 陈乃军, 王代青, 等. mini-LED背光技术在电视产品应用中的进展和挑战 [ J ]. 液晶与显示, 2021, 36 ( 7 ): 983-992.
- [ 15 ] XU H, XIAO J, FEI J, *et al.* AM MLED backlight units on glass for 75-inch LCD displays [ J ]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2020, 51 ( 1 ): 122-125.
- [ 16 ] LEE J H, LEE H S, LEE B K, *et al.* Simple liquid crystal display backlight unit comprising only a single-sheet micropatterned polydimethylsiloxane ( PDMS ) light-guide plate [ J ]. *Optics Letters*, 2007, 32 ( 18 ): 2665-2667.
- [ 17 ] 李德君, 刘刚, 吕国强, 等. 直下式LED背光模组的超薄设计 [ J ]. 液晶与显示, 2014, 29 ( 6 ): 1101-1105.
- [ 18 ] 杨宇琦. mini LED背光模组及显示装置: 中国, CN115185124 A [ P ]. [ 2022-10-14 ].
- [ 19 ] 博客园. 巨量转移概述 [ EB/OL ]. [ 2019-08-26 ]. <https://www.cnblogs.com/Sonny-xby/p/11413675.html>.
- [ 20 ] HUANG Y, TAN G, GOU F, *et al.* Prospects and challenges of mini-LED and micro-LED displays [ J ]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27 ( 7 ): 387-401.
- [ 21 ] KALIL K, MASAFUMI O. A monolithic block-wise functional light guide for 2-D dimming LCD backlight [ J ]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41 ( 1 ): 997-1000.
- [ 22 ] TAKASAKI N, HARADA T, SAKAIGAWA A, *et al.* Development of RGBW LCD with edge-lit 2D local dimming system for automotive applications [ J ]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46 ( 1 ): 616-619.
- [ 23 ] JUNG S, KIM M, KIM D, *et al.* Local dimming design and optimization for edge-type LED backlight unit [ J ]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42 ( 1 ): 1430-1432.
- [ 24 ] BAE S, YOON G, YOON J. Ultra-thin edge type single sheet backlight unit for seamless two-dimensional local dimming [ J ]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47 ( 1 ): 1406-1408.
- [ 25 ] BIBL A, HIGGINSON J A, LAW H, *et al.* micro device transfer head heater assembly and method of transferring a micro device: US, 8349116 [ P ]. [ 2013-01-08 ].
- [ 26 ] CHOI M, JANG B, LEE W, *et al.* Stretchable displays: stretchable active matrix inorganic light-emitting diode display enabled by overlay-aligned roll-transfer printing [ J ]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27 ( 11 ): 1606005.
- [ 27 ] 阙祥灯. 一种mini LED和micro LED的巨量转移技术: 中国, CN202210576796. X [ P ]. [ 2022-08-19 ].

( 编辑 张永博 )