

特邀专稿

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2022.03.001

基于微米级LED阵列的高度集成半导体信息 显示

严 群^{1,2*}



(1. 福州大学, 福州 350108; 2. 国际信息显示学会中国区(SID China), 上海 200001)

作者简介:严 群(1965—), 博士, 教授, 博士生导师。国际信息显示行业领域权威学者和研发科学家, 国家高层次特聘人才。2022年4月获俄罗斯工程院外籍院士, 福州大学特聘教授并担任西安交通大学、东南大学兼职教授; 国际信息显示学会(Society for Information Display, SID)60年历史上首位华人财务长、执委会委员、中国区总裁、全球显示技术培训学校委员会主席; 2013年获SID特殊贡献奖(Special Recognition Award), 2017年获得SID Fellow; 中国大陆出生的唯一一位同时获得SID特殊贡献奖和SID Fellow的学者。曾任四川长虹电子集团首席科学家、美国松下等离子显示实验室首席科学家, 取得从原创技术研发、样机开发、中试到大规模生产的突出成就。在专业领域发表了100多篇文献和30多个会议报告, 专利发明40多项。现从事基于Micro-LED的高度集成半导体信息显示(Highly Integrated Semiconductor Information Display, HISID)和交互式富媒体领域的研发, 是这个新兴领域国内外公认的领军专家。
(E-mail: qunfyan@gmail.com)

摘 要:提出信息显示设备不仅能够能够在显示屏的平面上展示信息, 更重要的是能够在真实的三维空间中显示内容, 使人与信息之间的自然交互成为可能。微米级LED显示屏有可能将我们带入一个真正身临其境和互动体验的新时代。响应时间快, 体积小, 应用环境温度宽, 使用寿命长, 使Micro-LED显示屏几乎适用于所有显示应用, 甚至可以是柔性和透明显示屏。通过减小LED的尺寸, 可以实现非常高像素密度的显示器。研究认为, 基于微米LED阵列可以为实现高度集成的半导体信息显示(HISID)铺平道路, 实现下一代信息显示技术。

关键词:高度集成半导体信息显示; 微米级发光显示; 交互显示

中图分类号: TN29

文献标志码: A

文章编号: 1005-488X(2022)03-0159-08

Highly Integrated Semiconductor Information Display (HISID) Based on Micro-LED Array

YAN Qun^{1,2}

(1. Fuzhou University, Fuzhou 350108, CHN;

2. SID China, Shanghai 200001, CHN)

Abstract: The information display device is not only capable to deliver the content on the plane of the display screen, but more importantly, to display the content in a real three-dimensional space, making the natural interaction between individuals and information possible. Micro-LED displays have received much attention because they have the potential to bring us into a new era of truly immersive and interactive experience. Fast response time, micro size, wide environment temperature, and long operating lifetime, enable Micro-

收稿日期: 2022-09-11

* 通讯作者

LED display for almost all display application, even flexible and transparent display. By reducing the diameter of LEDs, they show great promise in very high pixel density display. It is believed that Micro-LEDs could pave the way for realizing highly integrated semiconductor information display (HISID), embracing the next generation information display technology.

Key Words: highly integrated semiconductor information display; Micro-LED display; interactive display

1 新产业兴起的背景

信息显示是人类获取信息最重要的终端,每一次科学技术的飞跃都离不开信息显示的革命。中国古代对人类文明贡献的四大发明中的造纸术和活字印刷是人类第一代信息显示的核心技术。通过书籍、报纸和杂志等纸质呈现形式使得知识和信息得以传播,对人类的知识推广和科学技术进步起着关键性作用。作为人类获取信息的终端电子显示屏(早期的显像管显示器到现在的平板显示屏)是互联网引领下技术革命的重要组成部分。互联网的诞生大大降低了人类获取知识和信息的成本,使得更多的人可以参与技术革新和创新,人类投入了更多的脑力带来了生产力大幅度提升,所以互联网技术带动人类在过去 40 多年来取得了科技的突飞猛进,作为人类获取信息的终端——电子显示屏的贡献功不可没。

移动互联网的普及使得人类的工作从传统的办公场所衍生到更广的空间和时间,使得工作的效率和体量进一步加强。中国具备人口体量的优势,过去 30 多年来互联网和移动互联网的基础设施的完善及知识和信息体量的优势是中国高速发展的重要原因之一,但我国人均生产力和科技创新力还低于西方发达国家,中国人口红利已经到了瓶颈期。人工智能是突破人类脑力总量瓶颈的关键,是进一步提升创造力和生产力的重要途径,但高效率和高层级的人工智能离不开通过人机交互和人机互融获取大数据资源,具备高真实度感知能力并且可交互体验的信息终端是实现人机交互和人机互融的前提条件。

人类五大感知中最重要的是视觉、听觉和触觉,所以可交互显示终端是突破人类现有脑力极限实现人机融合的必备的交互界面。一旦实现这个下一代信息交互终端,中国将具备全球最多的可参与交互体验的群体大数据,中国最有希望实现突破脑力极限的高层级人工智能,将对我国的创新力提升和人类文明发展做出巨大贡献。

现有的显示屏只具备信息的单向展示,大数据牵引下的人工智能要求信息的获取和对信息的反馈同样重要,需要具备高逼真度和沉浸式的交互终端,从而可实现个性化和定制化信息推送和互动。为了实现这个

功能,对信息显示器件提出了新的要求,即显示内容不仅仅是在显示屏的平面上,更重要是能够在空间上产生真实的三维影像,使得个人与信息自然交互成为可能,使得“影视游戏化游戏影视化”交互式体验及现实和虚拟场景的交互成为可能。

2016年严群博士提出,这将诞生一个全新的产业——富媒体产业,这个新兴的产业将颠覆现有的信息产业生态圈。有别于传统的多媒体技术(视频和音频),富媒体技术是实现具备高逼真和沉浸式互动的人类五大感知(视觉、听觉、触觉、嗅觉和味觉)体验的技术,其中最主要的是具备可互动的真三维视频体验。富媒体相关技术覆盖动作捕捉、场景再现、感知技术、虚拟场景构建、交互式内容制作、影视化游戏制作、可交互的真三维光场实时采集和显示、交互式三维影像压缩格式和传输协议及通信协议方式、相关接口技术和协议标准、交互式富媒体软件操作系统、可交互的内容制作技术和分发技术等。该技术的应用领域包括但不限于电竞游戏、影视娱乐、虚实融合、远程会议、远程医疗、医疗康复、人机交互、人机融合等相关应用,这将是一个崭新的产业集群,市场规模预计将远超过万亿美元。

近年来热议的元宇宙实际上与前面提及的交互式富媒体概念是非常相近的。元宇宙将联通现实世界和虚拟世界,是人类数字化生存迁移的载体,提升体验和效率、延展人的创造力和更多可能。数字世界从物理世界的复刻、模拟,逐渐变为物理世界的延伸和拓展,数字资产的生产和消费,数字孪生的推演和优化,亦将显著反作用于物理世界。元宇宙的核心技术是区块链技术(Block chain)、交互技术(Interactivity)、电子游戏技术(Game)、人工智能技术(AI)、网络及运算技术(Network)及物联网技术(IOT),其中交互技术是制约元宇宙产业发展的核心瓶颈,同样需要具备高逼真和沉浸感的交互终端。

2 高度集成半导体信息显示

无论是富媒体产业还是元宇宙业态都离不开高真实度和沉浸感的交互体验,开发具备可交互高真实度体验的信息终端势在必行。除了高逼真的空间三

维显示,新一代的可交互显示具备能够实时感知和采集空间三维环境、人体动作和物体运动信息的功能,是场景和交互行为实时采集及空间三维显示为一体的信息交互终端。严群博士在2016年提出了集空间三维光场显示(Light Field Display, LFD)、多彩照明(Multi-color Lighting, MCL)、空间精准定位(Precise Space Positioning, PSP)、可见光通信(Light Fidelity, LiFi)等其他感知功能为一体的高度集成半导体信息显示器(Highly Integrated Semiconductor Information Display, HISID)是实现可交互富媒体技术的终端显示器件^[1-2],这类终端显示器件也将是元宇宙中现实世界与数字世界自然联通的桥梁。需要强调的是,

这里提及的高度集成是多种具备不同功能的半导体器件的集成,这些功能器件包含可实现空间三维光场显示的光源阵列,可实现空间场景和人体及运动物体实时定位和采集所需的传感器阵列,交互信息采集和信息显示数据的接受和传输器件,控制和驱动光源阵列和各类传感器阵列的集成电路器件,以及实现这些功能的能源管理器件。图1展示了其中一个简单可能的应用场景,小明通过装饰在墙上的高度集成半导体信息显示系统与远在天边的朋友晓敏进行身临其境的交流,晓敏的空间三维影像投射在小明前面,仿佛晓敏就在身旁。小明的哥哥坐在沙发上通过他的个人HISID终端观看三维影像信息。



图1 集成空间三维光场显示、多彩照明、空间精准定位与可见光通信等多功能的高度集成半导体信息显示系统的应用展望
Fig.1 Application prospects of highly integrated semiconductor information display systems with Light Field Display, Multi-color Lighting, Precise Space Positioning, and visible light communication

实现高逼真的空间三维光场显示,显示的光源必须具备超高密度(微米级)、超快响应速度(几十纳秒,以用时间换空间的方式实现三维光场显示)、巨量的点阵叠加、高动态亮度范围、低功耗高效率、柔性、任意形状和尺寸。为了实现高真实度的空间三维可交互的影像视频,视频本身必须是米数量级的三维影像。简单的估算一下,在1 m外观察 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的三维光场空间,在空间像素间距约 $300\text{ }\mu\text{m}$ (达到视网膜分辨率)情况下,需要约370亿($3\ 333 \times 3\ 333 \times 3\ 333$)个空间像素点(Holgel),如果要实现角度分辨率为 1° 水平并且具备 120° 视角和垂直 90° 视角,则需要 $120 \times 90 = 10\ 800$ 个光线方向。如果是 60 Hz (16.6 ms)视频刷新率,每秒至少需要 $3.7 \times 10^{10} \times 10\ 800 \times 60 \times 2 = 4.8 \times 10^{16}$ 线光源。微米级LED(Micro-LED)是指将传统毫米级尺寸LED微缩化后形成微米级尺寸(并且不带有蓝宝石或硅衬底材料)以达到超高密度像素阵列。Micro-LED

可以实现 20 ns 脉宽,若实现256灰阶约需要占用约 $5\text{ }\mu\text{s}$,单个Micro-LED光源每秒可实现20万可能的线光源,所以需要Micro-LED点光源数量是 $4.8 \times 10^{16} / 2 \times 10^5 = 2.4 \times 10^{11}$ 个光源,如果每个独立光源所占面积是 $10\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$,需要的总面积为 24 m^2 (8 m 宽 $\times 3\text{ m}$ 高),如果每个独立光源能减少到 $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$,需要的总面积可以减小到为 6 m^2 (3 m 宽 $\times 2\text{ m}$ 高)。Micro-LED具备微米级发光光源阵列和 10 ns 级响应速度,可见Micro-LED阵列能够实现高空间分辨率和米级尺度的三维光场显示^[2]。

Micro-LED阵列由于其高密度和快速响应速度使得巨量的三维空间显示点阵可以实现。同时Micro-LED发射阵列可通过不同图案的发射和反射图案的采集实现空间多人和物体的精准定位,单个Micro-LED已经可以实现高清视频的实时传输,作为整个Micro-LED阵列可实现巨量的信号传输带宽。Micro-LED芯片由于尺寸在微米级,传统显示屏的显

示像素在百微米级,发光的 Micro-LED 芯片面积只占像素面积的千分之一,有足够的空间集成微米级 IC 和微米级各类传感器,有望实现超大规模集成半导体信息显示器件(HISID),并使之成为交互式富媒体信息显示终端。需要提出的是,这里提及的高度集成是具备不同功能的微米级器件的异质集成形成米级尺寸的交互终端。其产品形态可能已经不是传统的显示屏,很有可能有机地融入在室内和户外装潢之中。

Micro-LED 阵列除了可实现下一代交互式富媒体显示终端 HISID 的核心器件,现阶段 Micro-LED 在传统平面显示领域也有其独特应用市场。相比 OLED 和 LCD, Micro-LED 具备更高的发光效率、更快的响应速度、更长的寿命和更高的亮度,同时具备轻薄、省电和全天候使用的优势,使得 Micro-LED 在显示方面的应用尤为突出。Micro-LED 阵列的初级应用包含 LCD 背光源、柔性显示、透明显示、AR/VR 的微显示、中小尺寸(5~50 cm)车载/机载显示和基于“模块化拼接”的 Micro-LED 大尺寸显示屏(对角线 >120 cm)。预计到 2025 年, Micro-LED 显示市场产值将超过 100 亿美元。

预计到 2030 年将实现基于 Micro-LED 的超大规模集成发光单元的显示模块,并实现 Micro-LED 在照明、空间三维显示、空间定位及信息通信高度集成系统,引入人工智能技术完成高度智能型高速信息交互空间网络,是继互联网、移动通信之后第三代信息高速网络,在民生和军事上具有重大战略性意义,同时可以促成可互动可交互的富媒体崭新产业,经济市场体量预计将超过万亿美元,是中国信息产业从技术跟踪到引领下一代产业整个战役中获胜的关键之战, Micro-LED 显示及其集成技术将是核心关键技术。LED 和显示产业是我国的优势产业,具有比较好的技术和产业基础,提前布局这个新兴产业对我国下一代电子信息产业的升级至关重要。相关的可交互式空间三维视频的采集技术,交互式空间三维视频信号的压缩、传输、通信及相关接口技术和协议标准、交互式显示终端硬件系统和软件操作系统、可交互的内容制作技术和分发技术将对这个新兴产业带来巨大的商业机会。

3 Micro-LED 显示发展现状

Micro/Mini-LED 显示技术在过去的 20 年引起人们的广泛关注,从早期的实验室研究工作逐渐进入公司的开发项目,部分已经进入商用产品阶段。关注和从事 Micro-LED 显示开发有三类产业集群,一是 LED 产业集群(含 LED 外延生长、分装和传统户外 LED 显示墙企业);二是生产大尺寸 LCD 和 OLED 的显示面板生产集群;三是集成电路产业集群。从 Micro-LED

平面显示的产品形态上可分为两个类型:

1) CMOS 芯片驱动为主的高密度(高 ppi, $\text{ppi} > 1\,000$)像素 Micro-LED 阵列的微显示器(Micro Display);

2) TFT 或 Micro-IC 驱动的低密度 Micro-LED 阵列的(低 ppi, $\text{ppi} < 1\,000$)中小尺寸和大尺寸显示屏。

第一类产品(高密度、高 ppi 显示)主要应用层面是 AR/VR/MR,驱动采用 CMOS 芯片,主要的技术来源是 LED 芯片产业集群和 IC 产业集群。第二类产品(低密度、低 ppi 显示)除了需要微米级 LED 芯片的光电特性高度一致之外,还需要解决微米级 LED 芯片的巨量转移和键合,采用何种驱动方式,如何实现全彩色(RGB LED 芯片还是蓝光 LED+色彩转移)。这类产品可应用于如手表之类穿戴式显示产品、中小尺寸车载显示产品、大尺寸显示屏和超大尺寸显示墙产品。

中国显示产业在面板生产上已经投入了近万亿元人民币,尽管这些投入主要用于 TFT-LCD 和 TFT AMOLED,显示企业在 TFT 基板方面的规模化生产和技术积累的优势使得其在低密度(低 ppi) Micro-LED 显示方面的开发和未来的生产方面掌握先机。中国所有大型显示面板生产企业,如 BOE、华星、天马、中电熊猫、维信诺等以及整机和系统集成企业如华为、小米、TCL、海信、康佳、创维等都已经投入大量资金进行了 Micro-LED 显示的研究。作为上游材料的核心方,LED 芯片企业如三安、华灿、乾照、兆元等也积极地投入 Micro-LED 芯片的开发,非常期望能够通过 Micro-LED 显示的规模化生产消化 LED 芯片的产能,他们较显示面板企业更有积极性去推动 Micro-LED 显示技术,但由于其产业的特点,更需要与显示企业和研究机构合作共同推进。一些企业包括传统的芯片封装企业也投入了 Mini-LED 转移技术的开发。尽管在现阶段 IC 企业介入 Micro-LED 的比较少,一旦微米级芯片的转移和键合技术有明显突破,基于 Micro-IC 的驱动方式和 IC 的垂直键合/封装技术对实现以 Micro-LED 阵列为核心的多功能集成显示器件将是一个关键技术。IC 产业集群将逐渐主导下一代高度集成半导体信息显示(HISID)产业发展。

在高密度($\text{ppi} > 1\,000$, 每英寸像素数 $>1\,000$)微显示方面,一般 Micro-LED 芯片与 CMOS 芯片通过芯片-芯片或 wafer-wafer 键合实现 CMOS 对 Micro-LED 像素对视频的控制。2014 年美国 Ostendo 公司推出了命名为 QPI(Quantum Photonic Imager)的全彩色 Micro-LED 显示。图 2(a)所示 QPI 是一种由三层(蓝光、绿光和红光)LED 垂直堆积组成 Micro LED 阵列像素,每个像素由键合的 CMOS 芯片进行像素级的控制,是一种 3D-IC 半导体器件,像素尺寸 $20\ \mu\text{m}$,分辨率 640×360 ,显示器尺寸 $12.8\ \text{mm} \times$

7.8 mm。Ostendo在2015年SID显示周I-zone上展示由8个Micro-LED显示器组成的空间悬浮的2×4 Micro-LED模块组成空间悬浮三维骰子影像子(图2

(c)影像,并获创新区(I-zone)创新奖,掀起了显示界对Micro-LED技术的高度关注, Micro-LED显示被评价为有可能实现最完美的显示技术。

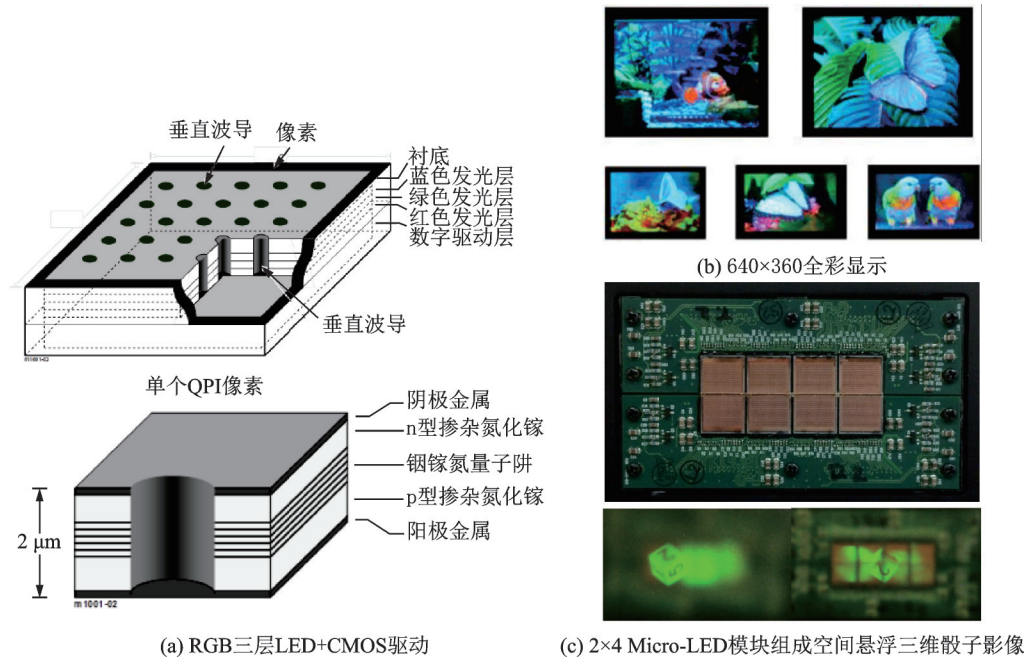


图2 Ostendo QPI器件

Fig.2 Ostendo QPI devices

2017年瑞典公司Glo与中国台湾的Jasper公司合作在SID显示周的I-zone上展示了1.8 cm 1 000 ppi全彩色的Micro-LED显示屏(图3)并获得创新第二名。这个屏全色彩的实现是采用纳米LED柱红色、绿色和蓝色发光,驱动是采用Jasper公司提供的CMOS驱动背板。用于AR应用的显示屏可产生100 000 cd/m²的亮度、无限对比度、120% DCI-P3色域、120 Hz刷新率,仅使用3.25 W功率。2018年北大青鸟显示JBD在SID显示周的I-zone上成功展示了5 000+ppi超高密度Micro-LED RGB单色显示,通过LED外延wafer与CMOS wafer的金属键合和后续的刻蚀,实现单个LED发光像素小于5 μm。此技术也在I-zone上获得第二名的好成绩。

2019年4月福州大学联合乾照光电、中科院微电子所、中科院长春光机所、广东省半导体产业研究院成

功研制出1.4 cm 1 323 ppi单色(间距19.2 μm,分辨率640×360)Micro-LED显示样机(图4),采用蓝宝石衬底的氮化镓LED外延片制备10 μm Micro-LED芯片,间距19.2 μm 640×360阵列。驱动采用硅基CMOS芯片,通过芯片-芯片键合的方式实现对每个像素的控制^[5]。同年五月英国Plessey公司在SID显示周上展示了在Si衬底上生长的LED外延片,实现了由CMOS驱动的Micro-LED显示器。这个领域的最新进步是北大青鸟显示(JBD)和中国台湾PlayNitride, JBD开发了0.33 cm分辨率为640×480 5 000 ppi的Micro-LED显示产品,红色亮度高达25万 cd/m²,绿色

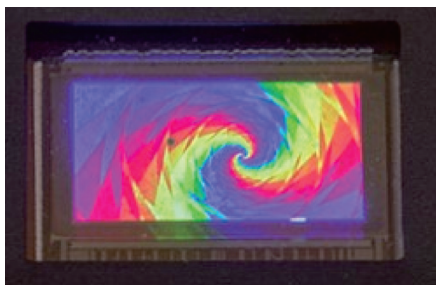


图3 Glo公司0.8 cm 1 000 ppi RGB Micro-LED显示屏

Fig.3 Glo 0.8 cm 1 000 ppi RGB Micro-LED display

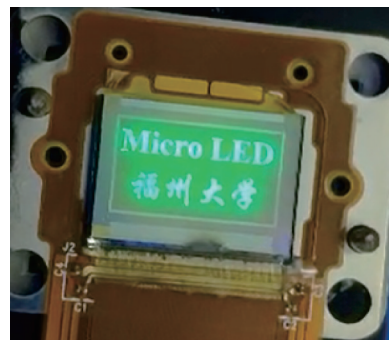


图4 福州大学开发的1.4 cm 1 323 ppi单色 Micro-LED 显示屏

Fig.4 1.4 cm 1 323 ppi monochrome Micro-LED display developed by Fuzhou University

亮度高达 400 cd/m^2 , 蓝色亮度达到 50 cd/m^2 。平均工作条件下功耗仅为几百毫瓦。RGB 显示模块与立方棱镜结合可组成全彩投影仪。PlayNitride 实现了 $1.24 \text{ cm} \times 1.920 \times 1.080 \times 4.536 \text{ PPI}$ 全彩 Micro-LED 显示样机。这些高密度全彩 Micro-LED 技术为高度集成半导体信息显示(HISID)提供了核心的骨架。

低密度($\text{ppi} < 1000$)Micro-LED 显示应用中又可以细分为中小尺寸(对角线 $> 4 \text{ cm}$)显示屏和超大尺寸显示墙应用, 像素发光是通过 TFT 或 Micro-IC 阵列背板实现。由于是低密度发光阵列, 所以 Micro-LED 芯片的巨量转移和键合是必不可少的。Micro-LED 电流密度决定了发光效率和发射波长。脉冲幅度调制(PAM)驱动方法通过调整 LED 电流的幅度来控制亮度, 这会导致在显示低灰度级时在低电流下的低光效以及在不同电流电平下的颜色偏移。脉宽调制(PWM)方式通过调整电流脉冲的宽度来控制亮度, 可以避免 PAM 驱动方式的缺点。然而, PWM TFT 电路比 PAM TFT 电路复杂得多, 因此占用了更多的像素面积, 限制了像素密度。通过同时调整电流脉冲的宽度和幅度即 PAM-PWM 混合驱动方法是一个现阶段可行的驱动方案。由于 Micro-LED 芯片尺寸一般在 $10 \mu\text{m} \sim 30 \mu\text{m}$ 之间, 发光面积远远小于像素面积, 使得 Micro-LED 低密度显示非常容易实现高透明和柔性显示。另外由于 Micro-LED 是全无机半导体器件, 工作温度范围大, 适合地球全天候环境下工作, 所以也是车载显示的最佳选择。

天马通过采用高耐水氧 TFT 背板技术、精细的叠层电极线技术并结合 PAM-PWM 混合驱动技术成功开发出 24 cm 、 70% 透明度、 960×480 分辨率、亮度大于 800 cd/m^2 的 Micro-LED 面板(如图 5 所示)。



图 5 天马 LTPS TFT 驱动的 24 cm 、 70% 透明度、 960×480 分辨率 Micro-LED 显示屏

Fig.5 Tianma LTPS TFT-driven 24 cm Micro-LED display with 70% transparency and 960×480 resolution

X-celprint 获得 John A. Rogers 教授独家授权 Micro-Transfer-Printing(μTP)技术, 专注于 Micro-LED 转印技术及设备解决方案的研发和销售。X-celprint 专门成立 X-Display 公司开发 Micro-LED

显示相关技术的研发和授权。该公司还首次采用微米级 CMOS 芯片(Micro-IC)并通过独特的印章转移技术实现巨量转移 Micro-LED 芯片和 Micro-IC 芯片, 并实现 Micro-IC 对每个像素的独立驱动。图 6 展示了 X-display 开发的 $8 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ LED 芯片, Micro-IC 驱动的 13 cm 70 ppi 全彩 Micro-LED 透明显示屏。

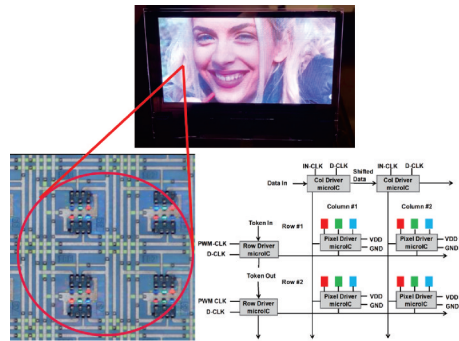


图 6 X-Display 公司采用 Micro-IC 驱动的 13 cm 70 ppi Micro-LED 显示技术

Fig.6 X-Display 13 cm 70 ppi Micro-LED display driven by Micro-IC

同样由于 Micro-LED 芯片尺寸在微米级, 发光面积远远小于像素面积, 使得 Micro-LED 非常容易实现柔性显示。PlayNitride 和天马均实现柔性显示样机。图 7 展示了由 550 万 $30 \mu\text{m}$ 的 Micro-LED (228 ppi) 在柔性 TFT 基板上实现的 24 cm 柔性显示屏, 弯折半径达 50 mm 。



图 7 PlayNitride 与 AUO 合作实现 24 cm 228 ppi 柔性 Micro-LED 显示屏

Fig.7 24 cm 228 ppi flexible Micro-LED display developed jointly by PlayNitride and AUO

通过在有源阵列中应用 GOA(阵列上的栅极驱动器)可以实现拼接间隙小于 $100 \mu\text{m}$ 无缝拼接 Micro-LED 显示模块。京东方、TCL-华星、天马、成都辰显等公司均开发了百微米级的无缝拼接技术, 实现了不同尺寸玻璃基的 Micro-LED 拼接屏。图 8 展示了成都辰显实现的采用 $25 \mu\text{m}$ Micro-LED 芯片的 32 cm 的拼接屏。

在大尺寸显示墙应用方面, 日本 Sony 公司在 2012 年发布的 140 cm “Crystal LED Display”(图 9(a)) 使用约 6 百万个 LED, 对比度可达 $1000000:1$, 色饱和度可达 140% NTSC, 无反应时间和使用寿命问题。

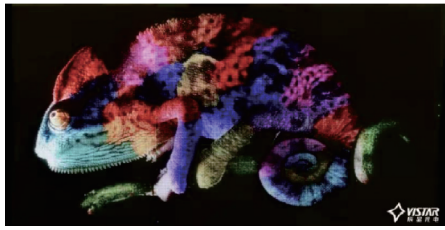


图8 辰显开发的 32 cm Micro-LED 拼接屏

Fig.8 32 cm tiled Micro-LED display developed by Vistar

2016年 Sony 在原产品的基础上推出了“模块化拼接”

的概念,经多片模组拼接成大尺寸显示屏(图9(b)),每个模组(403×453 mm)由320×360 RGB,345 600 Micro-LEDs 组成阵列,通过采用在PCB板上的Micro-IC驱动Micro-LED阵列。显示墙亮度达到1 000 cd/m²,像素间距1.26 mm, Micro-LED芯片只有30 μm,发光面积占像素面积小于1%,实现了高对比度。近年来各大显示企业如三星、TCL、海信、利亚德、洲明、雷曼等公司均有推出基于PCB驱动背板的P0.7~P1.2 Mini-LED显示墙产品。



(a) Sony 140 cm Crystal LED FHD显示屏



(b) Sony 超高对比度Micro-LED 显示墙

图9 Sony 大尺寸显示屏

Fig.9 Sony displays

相较于PCB基板,玻璃基板耐热冲击力更强,散热性提高可使得画面均一性强。基板平整度好,可实现高精度拼接和超薄形态。京东方和TCL-华星充分利用其大面积玻璃基板TFT技术上的优势,开发了玻璃基主动式驱动的Mini-LED直显和背光技术。2020年TCL-华星成功开发了带有IGZO TFT玻璃基板驱动的Mini-LED显示墙样机(图10)。BOE(京东方)219 cm玻璃基Mini-LED产品(图11)采用了全新一代Mini LED玻璃基主动式驱动技术,在玻璃基板上集成了多达20 736 Mini LED,亮度达到1 500 cd/m²,2 304个物理分区实现4 096级阶梯变化,真实还原画面细节和显示色彩;同时采用主动式恒流驱动,与传统的被动式驱动相比,显示亮度与瞬时亮度可快速保持一致,极大改善了传统显示的频闪,显示画面稳定流畅,缓解了长期观看的视觉疲劳。该产品获得国际信息显示

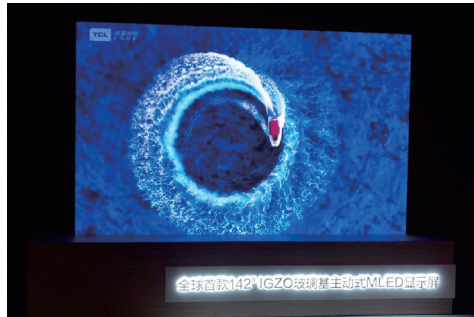


图10 TCL 361 cm IGZO 玻璃基板Mini-LED显示墙

Fig.10 TCL 361 cm IGZO glass substrate Mini-LED display wall

学会(SID)2022年最佳年度显示部件产品奖(Best Display Component Award)。

2022年CES,三星推出226 cm 4K分辨率, Micro-LED芯片尺寸34 μm×85 μm,0.44 mm像素间距(P0.4),由玻璃基LTPS-TFT驱动的



图11 BOE 218 cm玻璃基Mini-LED背光,集成了多达20 736 Mini-LED,2 304分区

Fig.11 BOE 218 cm glass-based Mini-LED backlight with 2 304 zones by 20 736 Mini-LEDs

Micro-LED 的显示墙产品(图 12)。这个成果把玻璃基 TFT 驱动 Micro-LED 推进到接近量产的水平。

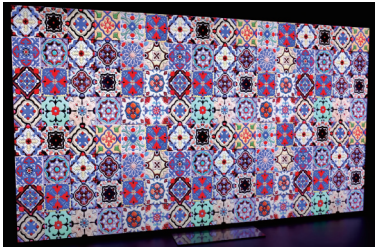


图 12 三星 226 cm LTPS-TFT 驱动的 4K Micro-LED 显示屏
Fig.12 Samsung's 226 cm 4K Micro-LED display driven by LTPS-TFT

Micro-LED 显示作为新一代主动发光显示技术,与现有的主流显示技术(LCD、OLED 等)相比,具有高发光效率、潜在的低功耗可能性、可柔性、高透明、可集成、可交互、高稳定性、全天候工作的优点,被认为是具备全功能和全应用领域的显示技术。Micro-LED 因其体积小、灵活性高、易于拆解合并等优点,能够部署在现有的从最小到最大尺寸的任何显示应用场合中,并且在很多情况下它将比 LCD 和 OLED 发挥更独特的效果。Micro-LED 显示几乎可以覆盖当前所有显示应用和未来可交互的空间光场显示,但该技术同时面临良率低、成本高、可量产性差、整机功耗高的现状,如图 12,展示具体面临的挑战体现在 LED 芯片尺寸达到微米级后发光效率下降,特别是红光 Micro-LED 效率低、Micro-LED 芯片高速巨量转移、Micro-LED 芯片与驱动芯片或背板金属键合、全彩化显示、高光提取效率和高对比度、低功耗驱动技术、检测和修复、以及实现大尺寸显示屏的无缝拼接技术。尽管挑战重重,相应的技术解决方案都在逐渐完善,预计在 2 到 3 年内, Micro-LED 的量产技术将趋于成熟。

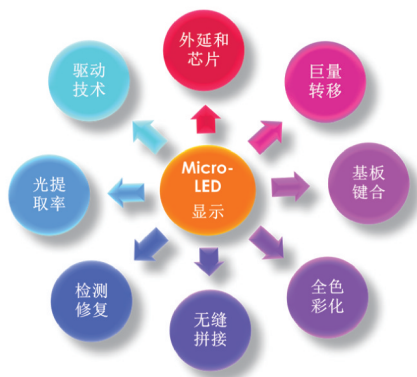


图 13 Micro-LED 显示技术面临的挑战

Fig.13 Challenges of Micro-LED display technology

4 结束语

人类正在进入下一个科技大爆炸阶段,高阶人工智能的发展将大幅度提高人类整体的智慧容量,而这个革命性的进步离不开沉浸式人机交互体验技术的进步。高保真可交互显示终端是顺应这个时代的下一代信息显示的必然产物。纵观信息显示技术更新换代的规律,作为革命性的下一代显示技术必须具备超越现有的显示技术的性能,能实现更新的体验,即显示视觉效果更佳,比如色彩(含色域和层次)、分辨率(含静态和动态)、可视角、亮度和对比度、视觉疲劳等效果更优秀;显示器件更节能和环保,比如功耗更低,制造更绿色和环保,产品可回收;应用领域更广,可覆盖各种尺寸和形态、柔性可折叠、可透明;可量产化,具备可量产工艺技术,大规模生产成本低;功能集成性强,除了基本的平面显示外,可实现空间三维显示,可与各类传感器和驱动 IC 集成。一个新技术成为主流除了需要技术性能方面更有优势之外,行业精英、产业资本和各级政府的推动也是新技术实现更新换代的至关重要的因素之一。

如果 Micro-LED 显示只是简单的替代 LCD 和 OLED 在现有各类显示方面的应用,其现有的低性价比很难脱颖而出成为主流。尽管在车载显示、AR 眼镜、超大尺寸显示屏, Micro-LED 明显优于 LCD 和 OLED,但这些产品的可替代性和市场体量也还不足以使得 Micro-LED 显示成为主流技术。但基于 Micro-LED 阵列的高度集成半导体信息显示(HISID)无论从各方面的技术性能和可实现全新的交互体验等特征使其具备下一代革命性显示技术的必要条件。人工智能发展、元宇宙、富媒体产业均需要空间三维交互式的新体验,这些需求将有助于推动基于 Micro-LED 阵列的 HISID 技术快速发展成为革命性的新一代显示技术,这些应用的普及将是 Micro-LED 显示技术真正的爆发点。基于 Micro-LED 阵列高度集成半导体显示技术需要学术界、工业界和各级政府精诚合作、统筹资源,尽快形成上中下游技术和产业生态圈,加快布局好技术开发,建立全球领先的下一个万亿美元规模的富媒体新兴产业。

参 考 文 献

- [1] Yan Qun. Emissive displays rise and fall and rise again[J]. Information Display, 2016, 32(6): 4-35.
- [2] Yan Qun. Micro-LED driving the third wave of technology revolution of information display[J]. International Display Workshop, Proceedings of the International Display, 2018, 25: 1349-1351.
- [3] Nie Junyang, Ke Zhijie, Zhang Yongai, et al. Towards high resolution active-matrix GaN μ -LED based micro displays[J]. Proceedings of the International Display, 2019, 26: 1476-1479.