

Micro-LED技术路线图

2020版

第三代半导体产业技术创新战略联盟
国家半导体照明工程研发及产业联盟
深圳第三代半导体研究院
2020年4月

Micro-LED 产业技术路线图（2020 年版）

编委会名单

一、顾问：

郑有焯、刘明、江风益、张荣、李晋闽、陈弘达、刘纪美

二、指导专家：

沈波、郭太良

三、统稿人：

王新强、闫春辉、严群、刘召军、田朋飞

四、分报告撰稿人（主笔人按姓氏笔画排序）：

1.发展现状组：

组长：刘召军

撰稿人：孙小卫、邱成峰、张志宽、张珂、郭浩中、蒋府龙

2.衬底和外延组：

组长：汪莱

撰稿人：王维彪、陈志忠、柯志杰、徐宸科、郭世平

3.芯片组：

组长：刘斌

撰稿人：王维彪、柯志杰、徐宸科、陶涛

4.封装组：

组长：田朋飞

撰稿人：刘国旭、袁毅凯、龚政、章金惠

5.驱动控制组：

组长：何书专

撰稿人：季渊、耿玓

6.应用组：

组长：严群

撰稿人：田朋飞、邢亮、刘一帆、陈宁、季渊、谢相伟、樊勇

7.专利组：

组长：汪勇

撰稿人：郝玉蕾、阎冬

8.发展趋势组：

组长：闫春辉

撰稿人：刘召军、孙小卫、邱成峰、张志宽、张珂、郭浩中、蒋府龙

五、编委会成员（按姓氏笔画排序）：

于坤山、艾国齐、阮军、吕毅军、李刚、李小佳、李娟、吴挺竹、
杨兰芳、杨斌、沈思宽、张志超、陈东坡、郝建群、赵璐冰、曹建伟、
裴小明、谢镇宇

Micro-LED 产业技术路线图（2020 年版）

合作单位名单

高校（按笔画排序）：

上海大学

北京大学

台湾交通大学

南方科技大学

南京大学

复旦大学

香港科技大学

清华大学

厦门大学

福州大学

科研院所（按笔画排序）：

广东省半导体产业技术研究院

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国科学院微电子研究所

深圳第三代半导体研究院

企业（按笔画排序）：

TCL 科技集团股份有限公司

三安光电股份有限公司

上海天马微电子有限公司

中微半导体设备（上海）股份有限公司

北京华创智道知识产权咨询服务有限公司

四川长虹电子控股集团有限公司

台湾和莲光电科技股份有限公司

华灿光电股份有限公司

佛山市国星光电股份有限公司

昆山维信诺显示技术有限公司

易美芯光（北京）科技有限公司

南京浣轩半导体有限公司

海信集团有限公司

深圳市华星光电技术有限公司

深圳市思坦科技有限公司

深圳市瑞丰光电子股份有限公司

深圳市聚飞光电股份有限公司

深圳创维-**RGB** 电子有限公司

厦门乾照光电股份有限公司

微软（中国）有限公司

前 言

Micro-LED 具有自发光、高效率、低功耗、高亮度、高稳定性、长寿命等优点，已经在显示、光通信、室内定位、生物和医疗领域获得了相关的应用，并有望进一步扩展到可穿戴/可植入器件、增强现实/虚拟现实、车载显示、超大型显示以及光通信/光互联、医疗探测、智能车灯、空间成像等多个领域，具有明确可观的市场前景。2019 年 6 月，第三代半导体产业技术创新战略联盟（以下简称“联盟”）组织国内大学、科研院所、优势企业的知名学者和专家成立工作组，启动编写《Micro-LED 产业技术路线图》（以下简称“技术路线图”），旨在通过对产业和技术路线的分析和预判，为业内提供参考，为 Micro-LED 产业的发展提供支撑。

技术路线图撰写过程中，联盟组织了 34 家高校、科研院所和企业的 50 余名专家和学者参与，并与台湾等地的龙头企业进行对接，历时近 7 个月。通过统稿人统筹、各小组长牵头、各主笔负责专业领域，全体专家共讨共商的工作机制，采用专项会议讨论、问卷调研、走访调研、深入文献研究等多种方式，在工作组全体成员的共同努力下，《Micro-LED 产业技术路线图（2020 年版）》终于要正式发布。

我们希望技术路线图能够为政府的技术创新与产业发展决策提供支撑，明确发展重点和支持方向，集中有限的优势资源全力推动产业的发展；帮助企业 and 研究机构预测技术和产品的创新点，保持市场竞争力，减少科研的盲目性和重复性，同时强化产业链企业间的协同合作；为市场投资提供指导，识别产业关键技术，减少技术投资风险。

Micro-LED 产业链条较长，应用领域多，涉及专业广，由于时间和编写组成员所属专业领域的限制，肯定存在遗漏和谬误之处，在此，权当抛砖引玉，希望各位读者批评指正，我们将在后续的版本中不断修订。

技术路线图的编写是一项纯公益事业，联盟在此对所有参与编写技术路线图的顾问、指导专家以及工作组所做的繁杂和艰辛的工作表示感谢。感谢台湾光电科技工业协进会（PIDA）的协助和支持！感谢各高校、科研院所和企业的支持、参与和鼓励！

2020 年是一个承上启下的年份，在新时代下，Micro-LED 技术拥有巨大发展潜力，为行业和企业发展带来了广阔的市场空间，对此我们充满信心，在国家的支持和推动下，我们期待与各位业界的同仁聚力同心、智慧创新、融合共赢，不忘初心砥砺前行，共同推动我国 Micro-LED 技术及产业快速发展，为中国从制造大国到强国的转变增添动力！

吴 玲

第三代半导体产业技术创新战略联盟理事长

2020 年 5 月

目 录

第 1 章 Micro-LED 产业发展现状及趋势	1
1.1 概述	1
1.2 产业现状	1
1.3 应用现状及发展趋势	3
1.3.1 显示应用	3
1.3.2 非显示应用	8
1.4 结论	13
第 2 章 Micro-LED 技术路线分析	14
2.1 衬底和外延材料技术路线分析	14
2.1.1 概述	14
2.1.2 InGaN 基蓝、绿光 LED 技术路线	17
2.1.3 AlGaInP 基红光 LED 技术路线	23
2.1.4 新型 Micro-LED 技术路线	25
2.1.5 混色技术	27
2.1.6 芯片结构	28
2.1.7 性能指标	31
2.1.8 挑战与趋势	33
2.2 封装技术路线分析	35
2.2.1 巨量转移技术	35
2.2.2 色彩转换技术	43
2.2.3 检测技术	50
2.2.4 修复技术	54
2.3 驱动（控制）技术路线分析	56
2.3.1 TFT 驱动	56
2.3.2 CMOS 专用驱动芯片	59
2.3.3 结论	62
第 3 章 Micro-LED 应用	63
3.1 概述	63
3.2 VR/AR 的应用	64
3.2.1 概述	64
3.2.2 关键技术分析	65
3.2.3 结论	67
3.3 投影显示	68
3.4 小尺寸穿戴式显示	69
3.4.1 概述	69

3.4.2 关键技术分析	70
3.4.3 结论	71
3.5 手机和平板电脑显示	72
3.5.1 概述	72
3.5.2 需求分析	73
3.6 电视显示	75
3.6.1 概述	75
3.6.2 关键技术分析	76
3.7 超大显示墙	77
3.8 车载应用	79
3.8.1 概述	79
3.8.2 关键技术	83
3.9 可见光通信	84
3.9.1 概述	84
3.9.2 关键技术	85
3.9.3 挑战与趋势	88
3.10 总结	89
第 4 章 Micro-LED 专利分析	91
4.1 背景概述	91
4.1.1 文献检索和数据处理	91
4.1.2 技术分解	91
4.1.3 数据检索	91
4.1.4 验证部分	92
4.2 Micro-LED 技术全球专利态势分析	92
4.2.1 全球专利申请趋势	92
4.2.2 全球专利区域分布	94
4.2.3 全球申请人排名	96
4.2.4 专利技术领域分布	97
4.2.5 重要相关专利	98
4.3 主要结论	100
4.3.1 行业知识产权环境特点	100
4.3.2 行业技术专利布局热点、空白点	101
4.3.3 行业知识产权趋势	102
结 语	104
中英文词条标注	109

第 1 章 Micro-LED 产业发展现状及趋势

1.1 概述

Micro-LED 由微米级半导体发光单元阵列组成，是新型显示技术与发光二极管（LED）技术二者复合集成的综合性技术，其具有自发光、高效率、低功耗、高集成、高稳定性、全天候工作的优点，被认为是最有前途的下一代新型显示与发光器件之一。Micro-LED 因其体积小、灵活性高、易于拆解合并等特点，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液晶显示（LCD）和有机发光二极管（OLED）显示发挥更独特的效果。未来，Micro-LED 将从平板显示扩展到增强现实/虚拟现实/混合现实（AR/VR/MR）、空间显示、柔性透明显示、可穿戴/可植入光电器件、光通讯/光互联、医疗探测、智能车灯等诸多领域。若突破量化生产技术，Micro-LED 极有可能成为具有颠覆性和变革型的下一代主流显示技术，带来新一轮显示技术升级换代。

1.2 产业现状

近年来 Micro-LED 异军突起，迅速成为显示领域的研究热点，在全世界范围内引起各大公司及科研院所的重视，并相继投入大量人力物力进行研发和布局，包括苹果、索尼、Facebook、三星、LG、台积电、富士康等公司各自投入大量资金研发，孵化出一批 Micro-LED 相关的初创公司如 LuxVue、PlayNitride、Mikro Mesa、mLED、JBD、JDC、领导光电、思坦科技等企业，而京东方、海信、三安光电、乾照光电、利亚德、PlayNitride、台湾工研院（ITRI）、友达、群创等纷

纷加入研发 Micro-LED 的阵营。据不完全统计，全世界目前从事 Micro-LED 研究的单位已经超过 160 家，其中有 60 余家分布在中国。（如图 1-1 所示）。



图 0-1 全球 Micro-LED 产业链的企业分布

数据来源：Yole，2019

Micro-LED 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、封装和传统户外 LED 显示屏企业）；二是生产大尺寸 LCD 和 OLED 显示面板产业集群；三是集成电路(IC)产业集群。从 Micro-LED 的产品形态上可分为两个方向：1）CMOS 芯片驱动为主的高像素密度（高 PPI，PPI>1000）Micro-LED 阵列的微显示器（Micro-display）；2）薄膜晶体管（TFT）或 Micro-IC 驱动的低像素密度（低 PPI，PPI<1000）Micro-LED 阵列的中小尺寸和大尺寸显示屏。第一类产品（高密度、高 PPI 显示）主要应用领域是 AR/VR/MR，由于驱动是采用 CMOS 芯片，主要的技术来源是 LED

产业集群和 IC 产业集群。第二类产品（低密度、低 PPI 显示）主要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屏，除需要微米级 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（R/G/B LED 芯片或蓝光 LED+色彩转移）等技术问题。

我国 Micro-LED 技术的发展起步相对较晚，但面临重大机遇，即我国经济快速发展，国民消费能力、品牌消费意识逐步增强，国产品牌逐步具有国际影响力，传统显示产业规模已经处于全球领先，LED 行业规模也处于全球领先，具备了快速发展的技术、产业、应用需求基础，特别是近年来我国以 GaN 蓝光 LED 为代表的第三代半导体材料技术进步明显，产能充足，是非常有利的条件。因此，迫切需要在国家产业政策引导下，推动 LED 领域、显示领域的相关企业、科研院所协同合作，以期突破技术障碍，加速 Micro-LED 产业化。

1.3 应用现状及发展趋势

1.3.1 显示应用

从应用市场渗透路径来看，Micro-LED 已经应用于小间距(<2mm)的大屏幕显示。2021 年有望在高净值的小像素间距（20 μ m -40 μ m）电视墙领域（即豪华电视墙）开始渗透；2020-2021 年将在智能手表和可穿戴智能设备（10 μ m -15 μ m）领域开始商用；2023 年以后随着技术进步和成本进一步下降，将开始渗透高端电视市场，主要为超过 75 英寸的高端大型面板，主要面向 4K 或者 8K。VR/AR 的应用领域，

预计也将从 2021 年开始渗透，需要大量 3 μ m 以下的芯片；手机、平板、笔记本电脑等市场，量大面广，但成本要求高，预计至少要到 2022 年才能逐步开启。汽车应用市场附加值高，规模大，但是对可靠性、技术要求高，车规级产品的供应链进入门槛高，因此预计至少要 2024 年以后才有可能进入。

1.3.1.1 高 PPI 显示

高 PPI 显示器主要应用于 VR/AR/MR，当前 VR/AR 的快速发展推动了近眼显示的需求。VR/AR 的增长最初是由企业、军事和医疗等市场推动，随后进入量大面广的消费电子市场。据 IDC 预测，至 2023 年，中国 VR/AR 市场支出规模将达到 652.1 亿美元，较 2019 年的预测（65.3 亿美元）有显著增长，如图 1-2 所示。同时，在预测期内（2018-2023 年），5 年复合年增长率（CAGR）将达到 84.6%，高于全球市场 78.3% 的增长率。

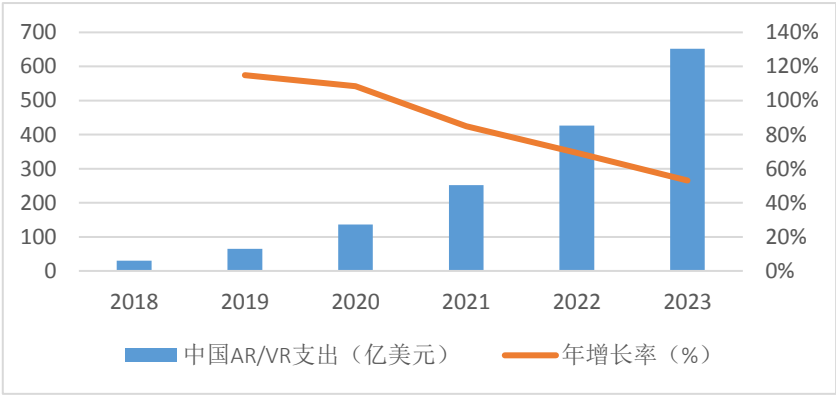


图 1-2 2018-2023 年中国 AR/VR 支出规模预测

数据来源：IDC

当前 VR/AR 等近眼显示设备都会向轻小的方向发展，其对于器件的要求主要包括几点：高像素数（高达 116M）、高像素密度、高刷新率、高填充率和低成本。从目前的几大显示技术比较来看，LCD

技术目前是主流，OLED 技术发展较快，在相当一段时期内，LCD 和 OLED 仍将还会共存于高 PPI 显示市场，Micro-LED 技术是未来看好方向。考虑改善芯片制备良率、提高转移速度、扩充产能和降低成本等工艺制程的发展，一般认为 Micro-LED 产品正式进入市场仍需 1-2 年时间。如图 1-3 所示，预计到 2021 年 Micro-LED 将开始在 AR 领域获得应用，并逐年上升，到 2027 年，Micro-LED 屏出货量有望突破千万只，在 AR 领域与 LCOS、DLP 技术并驾齐驱。

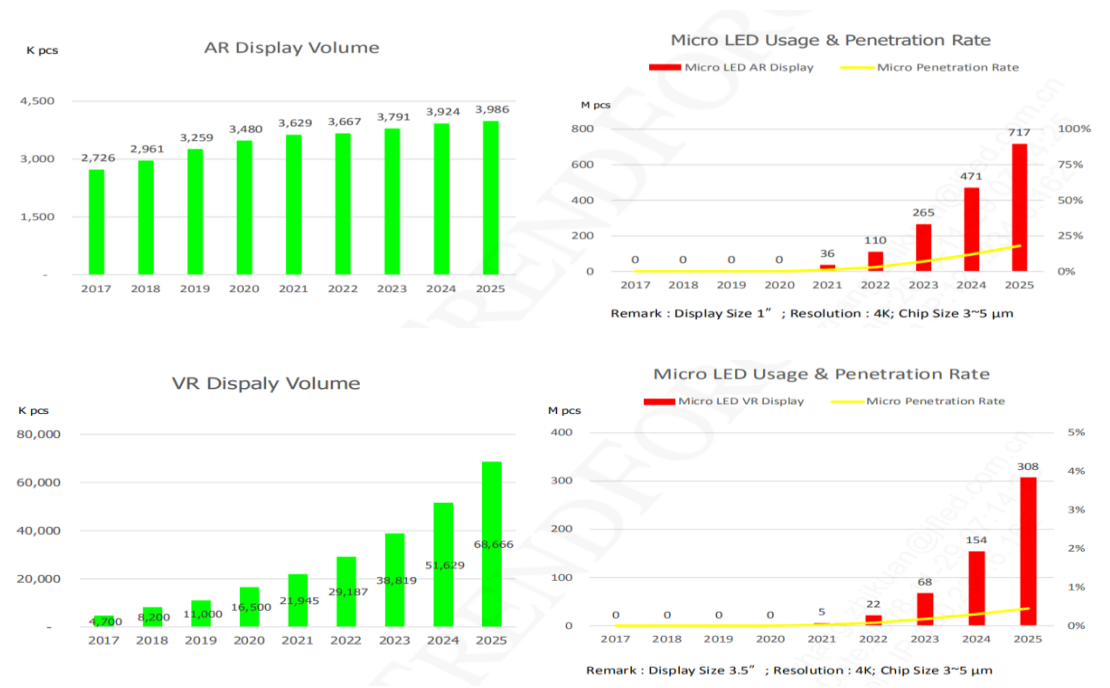


图 1-3 2018-2027 年 VR/AR 设备中 Micro-LED 所占市场份额及渗透率预测

数据来源：Yole，2019

1.3.1.2 中低 PPI 显示

1. 小尺寸穿戴式显示

Micro-LED 技术应用于穿戴显示场景，具备亮度高，可靠性好的技术优势，较小的屏体尺寸（<2 英寸）也有助于减少巨量转移工艺成本。这些都是促进 Micro-LED 技术首先在穿戴应用领域取得商业突破的有利因素。而能否有效控制生产成本，将直接决定其近期的商业

前景如何。智能手表是 Micro-LED 技术最容易突破的细分市场，显示屏尺寸小，成本占比低，像素要求低，因此技术门槛低、价格弹性大、固定投资低，对供应链要求低。业内普遍认为 Micro-LED 技术可以先突破该市场，积累经验、改进技术和培育供应链。海外 Micro-LED 厂商持较为乐观的态度。咨询机构 LEDinside 也认为 Micro-LED 穿戴产品将在 2020-2021 年迎来快速增长，未来五年预期穿戴式 Micro-LED 显示屏体产量如图 1-4 所示。

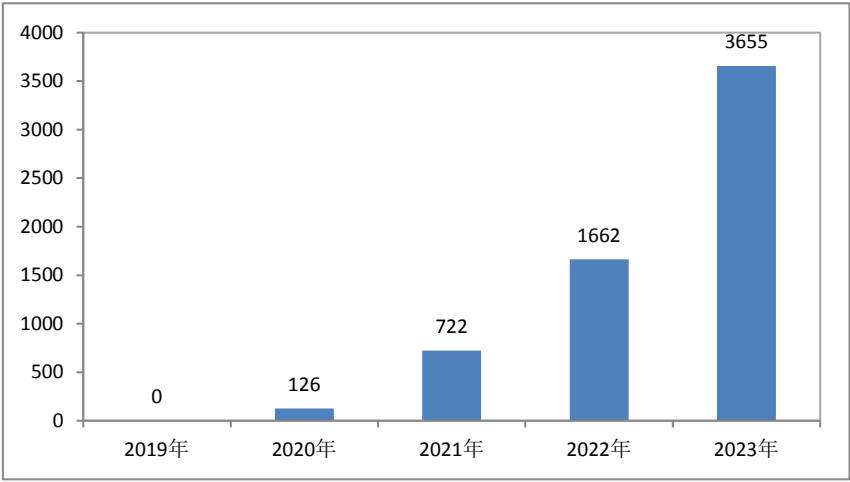


图 1-4 未来五年预期穿戴式 Micro-LED 显示屏体产量（千台）

数据来源：LEDinside 预测

2. 手机和平板电脑显示

以智能手机和平板电脑为代表的中小尺寸应用若引入 Micro-LED 显示，将带来行业的又一次洗牌。原因在于 Micro-LED 节能效果更优于 OLED。中小尺寸显示应用快速发展，尤其是存量规模巨大的智能手机市场需求变动，追求显示效果的同时致力于提高手机续航时间，引发面板的结构变动和品质提高，但是由于技术难度以及性价比与 LCD、OLED 相比的竞争力还不够，需要 3-4 年 Micro-LED 才可以在此领域商业化应用。

3. 电视显示

电视是目前显示应用体量最大的细分市场。据 Yole 数据，2019 年全球电视销量约为 2.8 亿台。但电视市场基本上一直保持平稳，行业面临利润降低和增长放缓的问题，未来几年的年均增速仅为 1.1% 左右。而电视市场的价值在于高端大型电视，高价电视占销量的 8%，但占收入的 40%，因此整个行业的目标是提供有吸引力的功能，以增加高端市场的总规模。为推动消费市场的更新和升级，行业一直在引入各种设计和技术改进，主要从图像质量、用户体验和功能、以及外观设计几个方面来演化。

尽管各显示技术激烈交锋，但业内认为 Micro-LED 技术在该领域将有一定竞争力。Micro-LED 技术将在 2021 年以后开始逐步进入电视市场，首先是“豪华电视”，2023 年以后开始进入高端电视市场。

4. 超大显示墙

大屏应用中，Micro-LED 拥有的无拼缝、高亮度、可视角度大、亮度对比度更高、画质更好等优势。三星公司于 2018 年 CES 展推出全球首款模组化拼接 146 英寸 Micro-LED TV“The Wall”。The Wall 提供 Full-HD 分辨率以及 73 英寸的尺寸，而最高将支持 8K 分辨率和 292 英寸的尺寸。索尼公司 2019 年在美国广播电视展（NAB）上展示了巨型“Crystal LED”8K 屏幕，该显示屏长约 10 米，高 5.5 米，换算成对角线尺寸约 440 英寸，而这一巨屏正是由多个更小的 Micro-LED 屏幕模块组成，并且看不到明显的屏幕接缝。这一 Crystal LED 屏幕分辨率达到 8K*4K，像素数是现有 4K 电视的 4 倍。未来伴随 Micro-LED 的良率提升，产品量产，预计价格仍有大幅下降空间。因

此，预计 Micro-LED 显示大屏由于其更出色的显示效果，将率先应用在包括户外装饰、大幅广告牌、美术馆、高端车展等高端细分领域。

1.3.2 非显示应用

1.3.2.1 车载应用

随着经济的快速发展与消费者生活水平的提高，全球乘用车销量逐年提升，如图 1-5 所示，预测从 2018 年到 2024 年，乘用车预计销量增长 13.8%，车载显示销量预计增长 34.7%。乘用车内部显示对于驾驶安全的重要性，显示功能的多样性以及美观性对于消费者来说愈加重要，车载显示面积六年间预计增加 49.3%。由此可见，车载显示市场有较大的上升空间。而 Micro-LED 由于可实现透明显示，柔性显示等，并且寿命长，亮度高，可靠性好，工作温度范围较大，用于车载领域会有很大的潜力。

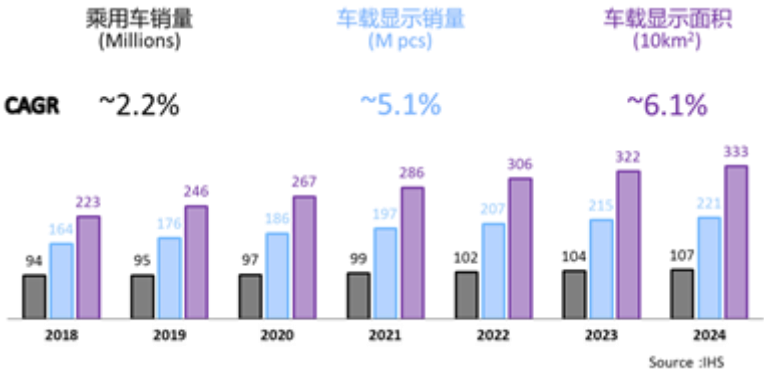


图 1-5 车载应用市场的预测

数据来源：IHS

近几年，车载应用在互联网助推下，目前已经成为承载人车交互信息最重要的界面。车载显示主要包括仪表显示、中控显示、抬头显示（HUD）、数字式后视镜、车内娱乐显示等部分。Micro-LED 的温度稳定性满足车载显示在极高的温差环境中工作的需求。另外，

Micro-LED 的高分辨率也迎合了消费者对车载显示分辨率更高的要求。车载显示追求一体化设计，生命周期比较长。但现在分离屏设计越来越多，车载显示生命周期不断缩短，与消费类电子产品显示屏趋同，具有大屏化、高清化、交互化、多屏化、多形态化优点的 Micro-LED 成为车载显示应用的未来发展趋势。

据 Yole 数据，预计到 2027 年 Micro-LED 在汽车显示方面的面板应用量将达到 7300 万个。而从技术演进的路径来看，2019 年至 2020 年主要为技术的概念、可能性等方案前期讨论，Micro-LED 公司已经在汽车显示器贸易展览会和会议上出现。2021 年将开始出现应用的示范样本，产品完成基本开发，预期 2022 年试生产，接下来两年开始供应链的构建和资质认证阶段。2024 年以后，预计将正式开始渗透和进入市场。

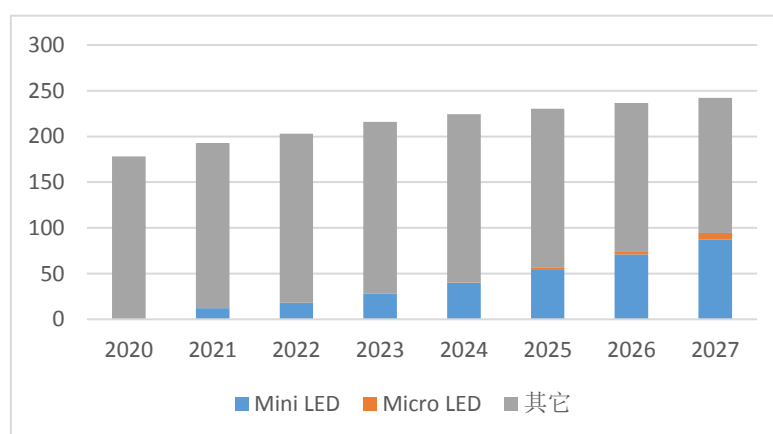


图 1-6 2020-2027 年车载显示的市场规模预测

数据来源：Yole

1.3.2.2 可见光通信

可见光通信属于产业关联度高、带动能力强、应用领域广的前沿尖端技术，因此在国际上也备受关注。而可见光通讯的应用也不仅限

于通信领域，它的重要意义在于便捷用户日常生活，推动物联网和智能社会发展（图 1-7）。

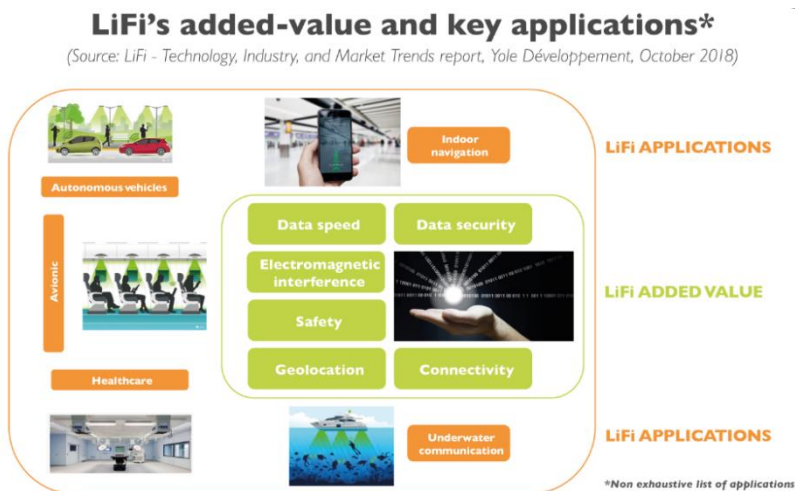


图 1-7 可见光通讯的主要用途

资料来源：LiFi Technology industry and Markets Trends report, Yole, 2018

据国际权威机构统计，可见光通信产业链长，涉及的环节多，未来可见光通信技术应用的产业规模可达万亿元级别。Micro-LED 可以实现透明显示，柔性显示，并且寿命长，亮度高，可靠性好，在可见光通信领域会有很大的潜力，如图 1-8 所示。

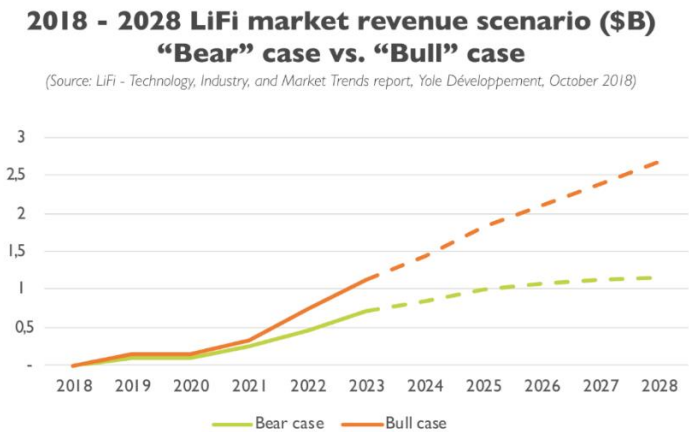


图 1-8 未来十年 LIFI 的市场预测

数据来源：LiFi Technology industry and Markets Trends report, Yole, 2018

室内绿色通信网络是未来最大的市场。Micro-LED 可见光通信是目前 WiFi 技术、蓝牙技术等重要的补充和一定范围内的替代，预计可以形成千亿元级的市场规模。旅游景点讲解 Micro-LED 可见光通

信网络作为传统无线电讲解系统的替代产品，预期可以形成数十亿元产值的市场规模。另外，基于 Micro-LED 可见光通信的移动支付提供了更为安全的支付方式，基于 Micro-LED 可见光通信技术的新型媒体广告网络，作为一个全新的开拓型市场，电视屏幕、室外大型 Micro-LED 屏幕、交通信号灯、路灯乃至大型商场、超市、写字楼以及家庭内部 Micro-LED 照明灯具均可以作为这一新型隐式广告的发布平台，预期可形成数十亿元的市场规模。

1.3.2.3 生物医学应用

Micro-LED 在医疗探测领域也具有广阔发展空间。首先，Micro-LED 可以实现可穿戴装置促进头发生长。韩国科学技术院（KAIST）日前开发出一种 Micro-LED 可穿戴装置，成功帮助小鼠重新长出毛发，该研究成果可以为治疗人类脱发提供一个新的方法。其次，Micro-LED 可以实现智能型隐形眼镜测血糖。韩国蔚山科学技术院(UNIST)研究团队研发出一款智能型隐形眼镜，由血糖传感器、无线电源传输电路和 LED 组成。该隐形眼镜通过监测糖尿病患者泪液中的葡萄糖浓度来监测血糖水平，并通过嵌入式 LED 屏幕实时显示结果。再次，Micro-LED 可以实现植入式 LED 装置治疗癌症。日本早稻田大学（Waseda University）研究团队开发出一个 LED 可植入式装置，由 LED 芯片与生物粘附纳米薄片组成通过光疗成功缩小鼠体内的肿瘤，如图 1-9 所示。Micro-LED 在生物医学方面的应用还处于探索阶段，虽然还没有明确的市场指向，但相信生物医学的突破，不仅仅是市场带来的收益，更是对社会有巨大贡献。而 Micro-LED 独特的自身特

性，正在使这些设想逐渐变为现实，让期待的生物医学领域不断突破。

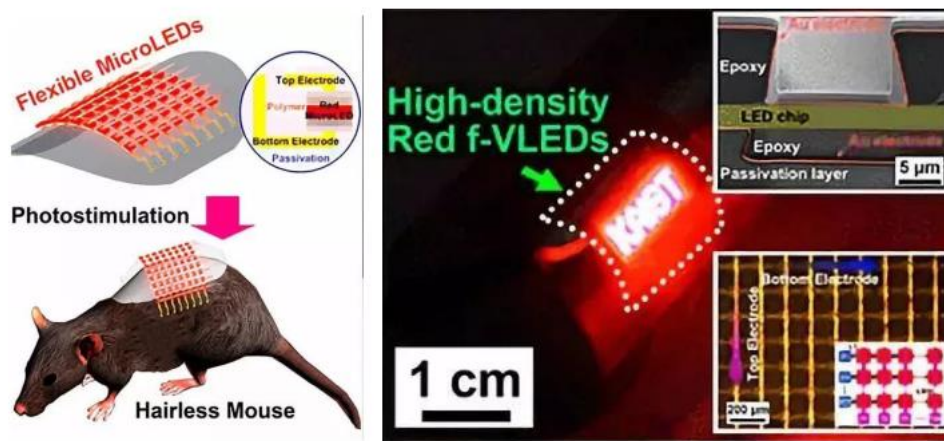


图 1-9 Micro-LED 通过光疗成功缩小鼠体内的肿瘤

资料来源：Waseda University

1.3.2.4 三维空间交互成像

三维空间成像系统是用一种将三维画面悬浮在柜体实景中的半空中成像系统。基于分光镜成像原理，通过对产品实拍构建三维模型的特殊处理，然后将拍摄的产品影像或产品三维模型影像叠加进场景中，构成了动静结合的产品展示系统。观众不需要佩戴任何偏光眼镜，裸眼即可观看到立体的影像，成像效果更加立体逼真。Micro-LED 阵列的优势在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 阵列可通过发射不同的图案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 已经可以实现全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，正常显示像素在几百微米级，发光的 LED 芯片面积只占像素面积的百分之一，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。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。

1.4 结论

与 LCD 和 OLED 传统显示相比，Micro-LED 显示具有自发光、高效率、低功耗、高集成、高稳定性、全天候工作等优良特性，成为下一代主流显示技术的重要选择。目前，Micro-LED 技术已经在小间距（<2mm）、大尺寸显示方面获得应用，随着量产化技术的成熟和生产成本的降低，Micro-LED 技术将在存量规模巨大的手机和平板电脑等移动设备领域取得渗透。未来，Micro-LED 技术将进一步扩展到 AR/VR/MR、空间显示、柔性透明显示、可穿戴/可植入光电器件、光通信/光互联、车载应用、医疗探测等诸多领域。据 Yole 预测，至 2025 年基于 Micro-LED 技术的产品如高端电视机、手机、手表等将逐步上市出货量可达 3.3 亿只模组，Micro-LED 显示市场产值将超过 100 亿美元。

第 2 章 Micro-LED 技术路线分析

Micro-LED技术产业链主要由衬底和外延材料、芯片器件、颜色混合（R/G/B或量子点激发）、IC驱动基板连接（巨量转移或单片集成）、检测和修复五大部分组成，对现有产业链的每一个环节都提出了新的技术指标和要求，包括材料、工艺、设备等各领域关键技术的研发需求，且每个产业环节的技术都不是可以独立发展的，是非常复杂的技术体系，需要产业链上下游厂商、院校和研究机构密切配合，围绕Micro-LED技术的需求，展开联合攻关，才能最终实现Micro-LED技术的产业化。

2.1 衬底和外延材料技术路线分析

2.1.1 概述

2.1.1.1 衬底材料

衬底材料的选用对于 LED 的晶体质量具有重要意义。目前 GaN 蓝绿光 LED 的衬底一般采用蓝宝石（ Al_2O_3 ）衬底、硅（Si）衬底、碳化硅（SiC）衬底以及氮化镓（GaN）衬底。

蓝宝石衬底具有透光性能好、耐高温、抗腐蚀、产品商业化成熟度高（2 英寸、4 英寸、6 英寸）等特点，但由于 GaN 材料与蓝宝石衬底之间存在较大的晶格失配和热应力失配，会在外延层中产生大量缺陷，影响生长晶体的均匀性，尤其当衬底尺寸变大时，由于生长工艺过程中外延片的严重翘曲，对均匀性影响更为明显；同时，蓝宝石是一种绝缘体，需要在上表面制作两个电极，造成了有效发光面积减少；为了不断提升器件的发光效率，需要在图形衬底上进行外延生

长，图形衬底制备中增加了光刻、蚀刻工艺过程，从而提高了衬底成本。

相比于蓝宝石衬底，Si 衬底具有低成本、大面积、高质量、良好的导电导热性能等优点，并且其制备工艺相对成熟；由于 Si 的导热系数是蓝宝石的 5 倍，良好的散热性使 Si 衬底 LED 具有高性能和长寿命。同时，Si 衬底可以实现无损剥离，消除了衬底和 GaN 材料层的应力。但 GaN 材料与 Si 衬底之间存在更大的晶格失配和热应力失配，在外延层中产生更多缺陷，外延片翘曲严重，并容易造成表面龟裂；因此，对 GaN 外延工艺技术提出了更高的要求。

SiC 衬底具有良好的导电性能及高的导热性能，其与 GaN 材料之间的晶格失配较小，外延材料缺陷少，并可制备成垂直型器件，适合大电流器件需求。此外，可在 SiC 衬底上加工所需的出光面，提高发光效率，可应用于一些具有较大面积的大功率器件。但目前商用化 SiC 衬底价格较高，最大尺寸为 6 英寸。

GaN 衬底具有良好的导电导热性能，可以实现同质外延生长，外延材料缺陷少，可应用于一些高性能器件。但目前 GaN 衬底商用化程度低，价格昂贵，最大尺寸只有 4 英寸。

现在商业用红光 LED 大多是在 GaAs 衬底上通过金属有机化学气相沉积（MOCVD）和分子束外延（MBE）生长 AlGaInP 外延层获得。通过调节 AlGaInP 组分的构成达到与 GaAs 衬底的匹配，从而在 GaAs 衬底上生长晶格匹配的外延材料，且材料的 Al 组分低，发光效率高。

除了选择衬底材料，在衬底尺寸方面，优先选择较大厚度、较大尺寸的衬底，较厚的衬底可以有效缓解外延过程中因为应力集中而造成的外延片翘曲变差的异常，从而可以较好地提升外延片的均匀性；而大尺寸晶圆已经渐为主流，在工艺成本的驱动下，国内外厂家已经开始大量尝试 6 英寸及更大尺寸衬底的生产。

此外，Micro-LED 极高的良率、均匀性也要求衬底具有极低的杂质缺陷、极高的表面平整度。综合上述对尺寸大小、厚度的新要求，改进现有的衬底生产工艺是十分必要的。

2.1.1.2 外延技术

在外延生长过程中主要关注两个问题，即均匀的发光波长以及尽可能低的缺陷颗粒数量。为了解决干涉条纹（MURA）现象及提高转移的效率，Micro-LED 对波长的均匀性要求非常高，基于不同的转移技术，单片波长一般要求控制在 $\pm 2\text{nm}$ ，有些甚至要求控制在单片 $\pm 1\text{nm}$ 范围，而传统 LED 通常要求单片波长控制在 $\pm 5\text{nm}$ 。缺陷颗粒控制问题则是对目前的厂家提出了更高的要求，包括对厂房洁净度的提升、对 MOCVD 设备的操作及维护等。如果采用新式的生长方案，是否会影响相关参数也是值得研究的方向。

如果考虑在全色显示中的应用，那么三基色 Micro-LED 芯片的均匀性也是必须考虑的问题。在蓝光、绿光使用不同参数 GaN LED 芯片的同时，红光 AlGaInP 芯片也必须达到相似的工作电流条件、波长漂移幅度、工作寿命，而不同材料芯片的组装难题也必须解决。

量子效率下降（Quantum efficiency droop，简称 droop 效应）导

致市面上所有的 LED 效率曲线都呈先上升后下降的趋势。在效率极值点以下的小电流区域量子效率仍然很低，这对于 Micro-LED 的显示造成较大的影响。小注入下，表面态、穿透位错等缺陷相关的载流子输运复合机制，强的极化电场导致的波函数空间分离等均需要详细的分析。相比于正常尺寸的器件有源区结构，诸如阱宽、阱数、掺杂、电子阻挡层、电子注入层等外延结构均需要做较大的优化。

2.1.2 InGaN 基蓝、绿光 LED 技术路线

2.1.2.1 衬底技术路线分析

目前主流的衬底材料有 Si 衬底和蓝宝石衬底。两种衬底方案的比较如下表 2-1 所示。

表 2-1 两种衬底方案比较					
衬底材料	技术比较	优点	缺点	问题与挑战	潜在解决方式
硅衬底	8 英寸甚至 12 英寸生产技术已完全成熟，加工成本相对便宜。	大尺寸衬底加工技术完全成熟，晶圆尺寸提升不存在本质困难；价格低廉；电压/漏电以及可靠性方面优于蓝宝石。	晶格/热膨胀系数的失配度巨大（17%）。	对外延生长技术要求更高。	N/A
蓝宝石衬底	更大尺寸晶圆的开发需求的晶体生长/平片加工工艺存在技术困难。	与 Si 衬底相比，蓝宝石衬底与 GaN 外延层的晶格失配度低（13.6%），同时热膨胀系数差异小。	大尺寸（8 英寸）晶圆的技术尚待开发。	低晶圆翘曲度的设计与实现；低表面缺陷衬底的设计与实现。	借助导入轮磨制程，精准调控衬底形状，降低单位面积晶圆翘曲度程度；借助多道抛光加合理抛光参数设计降低表面缺陷密度。

资料整理：CSAS Research

在晶圆尺寸方面，2013 年到 2018 年统计数据显示，4 英寸晶圆

市场占有率逐渐降低，6 英寸甚至更大尺寸晶圆逐渐成为主流。未来在成本降低需求的推动下，晶圆向更大尺寸发展成为不可逆转趋势（图 2-1）。

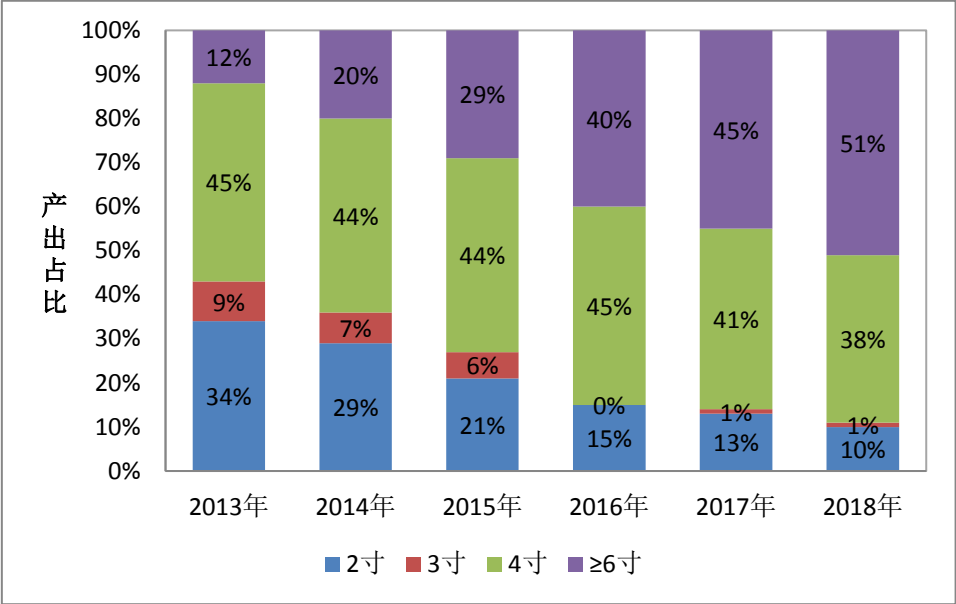


图 2-1 全球 LED 衬底产出尺寸分布

数据整理：CASA Research

2.1.2.2 外延技术路线分析

2.1.2.2.1 波长均匀性

MOCVD 外延，通常要求外延片的发光波长波动小于 $\pm 1\text{nm}$ ，这主要依赖于 MOCVD 装备和腔体设计的发展。半极性/非极性面 GaN 量子阱生长技术，是解决波长一致性的技术方案，特别是 Micro-LED 随注入电流增大的情况之下，可以有效的抑制/消除量子限制斯塔克斯效应（QCSE），减轻峰值波长的移动。

在波长均匀性方面，面临的挑战主要有以下三点：

衬底之间规格的一致性。由于蓝光、绿光 LED 是在 Al_2O_3 、SiC 或 Si 衬底上生长 InGaN 等三元材料，红光 LED 是在 GaAs 衬底上生长 AlGaInP 等四元材料，不同衬底之间的规格的一致性，对波长均匀

性的控制也非常重要。

衬底的厚度及尺寸的大小。在外延材料的生长中，衬底不同厚度及尺寸的大小对外延生长的应力控制水平也会存在差异。一般说来，衬底越厚，均匀性也越容易控制；但衬底尺寸越大，均匀性越难控制。MOCVD 设备。不同 MOCVD 设备，由于其气流模型及温场控制的水平不同，其生长出来的外延片的波长均匀性水平也会不同，外延片的波长均匀性和 MOCVD 设备及外延工艺相关。对于 Micro-LED，芯片尺寸较传统 LED 微缩了几十分之一甚至更低，无法再使用传统的挑拣（Sorting）与分选（Binning）技术，因此需要极高的波长均匀性，Micro-LED 外延片波长均匀性需控制 1σ 在 0.8nm 或更小。而外延片的波长均匀性水平和 MOCVD 设备性能相关，因此需要开发均匀性更好的新型 MOCVD 设备。

对上述三个问题，提出三个潜在解决方案如下：

(1) 严格控制衬底的来料规格，对影响波长均匀性的规格参数尤其要严格把关。对衬底厚度及尺寸的大小要求，各家可综合考虑成本、效率及工艺要求等因素，选择最佳的衬底厚度及尺寸。

(2) 对 MOCVD 的设备要求及掌握度，各家也可以根据自身工艺及技术水平，慎重选择及使用；同时，也需和设备厂家充分沟通，提出相应可改善波长均匀性的相关设计要求。

(3) 针对 Micro-LED 应用对波长均匀性的高要求，在 LED 外延生长过程中，需要对新型 MOCVD 设备的流场作进一步的优化；温度对波长的均匀性至关重要，如何进一步提升加热器的温场均匀性以及实

时可控能力，是用于 Micro-LED 应用的新型 MOCVD 设备技术的重点改进方向。此外，新型的 MOCVD 设备需更智能化，实现先进的实时监测系统、智能的控制逻辑、精确的温度控制系统等技术。

2.1.2.2.2 表面颗粒及缺陷控制

外延生长的缺陷及表面颗粒在 Micro-LED 中对应的就是一个芯片坏点，对外延片表面良率的要求也更高。

在这一方面，面临的挑战主要有以下五点：

(1) 衬底缺陷及表面颗粒的控制。在外延生长中，衬底本身的缺陷也会引起外延表面生长的缺陷；另外，在衬底加工过程中产生的表面颗粒也会影响到最终外延生长的表面质量。

(2) 厂房洁净度的影响。Micro-LED 生产厂房的洁净度将会严重影响外延片表面颗粒及良率。

(3) MOCVD 设备。不同 MOCVD 设备，由于其气流模型的不同，在外延生长过程中可能会因预反应或吸附在反应室内的颗粒掉落到外延片表面，亦或是在腔体传输过程中掉落或扩散到外延片上的颗粒，导致外延片缺陷的产生。

(4) 工艺水平。在外延生长过程中，生长条件控制的好坏，决定了外延生长出来的 GaN 材料质量的高低，所以合适的外延生长条件，如温度、V/III 比等都会影响到外延表面质量及缺陷的产生。

(5) 表面颗粒的检测。目前外延厂普遍采用显微镜手动检测样片，精确度及效率均不高。由于蓝宝石衬底的透明性，市场上还缺乏有效的检测蓝宝石外延缺陷/颗粒的设备。

对上述五个问题，提出以下五个潜在解决方案：

(1) 衬底厂商针对用于 Micro-LED 外延生长的衬底要严格管控质量，减少衬底的位错密度；在衬底的加工过程中要严格管控衬底的表面质量，提升衬底车间的洁净度等级，部分工序车间洁净度要设定在百级甚至更高级别。

(2) 严格控制外延生长车间的洁净度，外延车间的等级要设定在千级甚至更高等级。其中，人员是洁净车间的一大颗粒来源，需考虑在生产流片过程尽量减少人员操作带来的颗粒生成，如采用类似半导体 IC 厂的全自动料盒传送，全自动的衬底取放及全自动托盘搬运等。

(3) MOCVD 的选择要考虑到该设备对均匀性及表面颗粒控制的水平是否具有独特的优势。基于 Micro-LED 对外延片的表面颗粒度的苛刻要求，在兼顾长维护周期的同时，需要开发减少预反应的 MOCVD 腔体以抑制外延生长过程中所产生的表面颗粒度；并且为了避免在衬底或托盘传输过程中，可能产生的颗粒，需要引入全新的传输模式（如 Cassette to Cassette 取放外延片）以最大限度的减少中间过程地颗粒生成。其次，MOCVD 的设备维护过程可能是外延生长车间的颗粒污染来源，需考虑如何控制在维护过程中颗粒物的扩散对外延车间洁净度的影响，如将 MOCVD 托盘装卸区域与腔体区域的环境隔离等。此外，考虑到石墨托盘也可能是影响外延片表面颗粒度的一个来源，外延厂商可能需更严格管控石墨盘的使用状况及烘烤工艺。

(4) 外延生长过程中，生长温度、气体流量、压力等生长条件都会影响到外延生长的材料质量，合适的生长条件的选择，充分满足外延

生长过程时气体的层流状态，可以减少位错密度及表面缺陷的产生。

(5) 通过行业上下游合作制定符合 Micro-LED 应用特点的外延缺陷统一标准，包括缺陷类型标准、颗粒数目标标准、颗粒尺寸标准等。并且开发能检测小于 $1\mu\text{m}$ 尺寸颗粒的检测设备；同时，需开发蓝宝石衬底标准颗粒度标准样片。

2.1.2.2.3 小电流密度下的峰值效率

Micro-LED 使用电流往往非常小，要求控制在 μA 甚至 nA 的层级水平，对应的电流密度往往小于 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 甚至更低。在如此低的电流密度下，为了达到最佳的节能效果，往往要求 Micro-LED 芯片在低电流密度下的外量子效率刚好为芯片的峰值效率。由于外延缺陷密度和存在内应力等因素的影响，传统 LED 在小电流密度下的峰值效率低，在这种电流密度下使用的 LED 难于实现节能和稳定使用的效果。

Micro-LED 效率会随电流密度的增大而增大，当达到峰值之后随电流密度的增大而减小。而随着 Micro-LED 尺寸的减小，效率峰值向大电流密度方向移动，且效率峰值不断降低。Micro-LED 尺寸较小之后，边缘效应也更加明显。而且随着温度和使用时间的增加，Micro-LED 的效率也会发生变化。

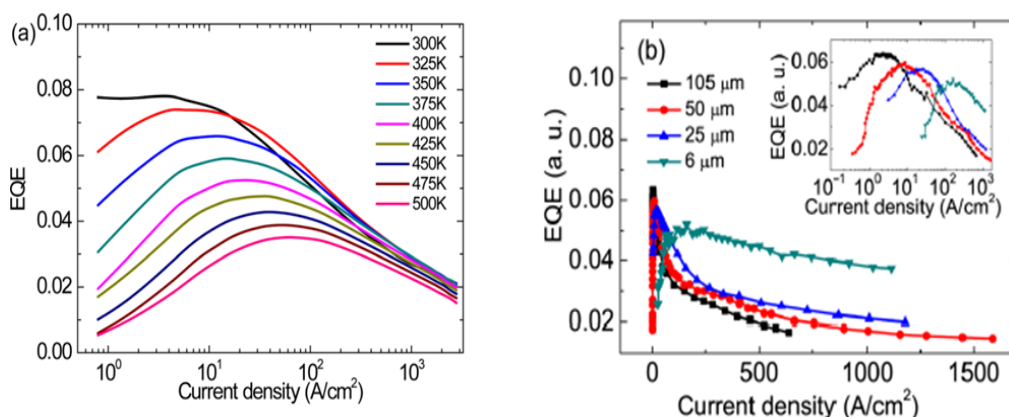


图 2-2 (a) 40 微米 Micro-LED 的外量子效率随温度变化曲线 (b) micro-LED 的外量子效率的尺寸效应

资料来源: Applied Physics Letters 105, 171107 (2014); Applied Physics Letters 101, 231110 (2012)

对上述问题，有以下三种解决方案：

(1) 提升外延生长的质量，减少材料生长产生的位错密度，传统蓝绿光 GaN 的位错密度在 10^8cm^{-2} 以上，而提升小电流密度下的峰值效率，位错密度要控制在 10^7cm^{-2} ，甚至更小的级别；而多量子阱中的点缺陷，也可能是造成低电流密度的主要原因。所以，如何减少多量子阱中的点缺陷密度，也是外延生长中要充分考虑的因素之一。

(2) 改变外延的结构设计，尽量减少外延材料的内部应力的产生。

(3) 提升电子空穴的浓度，减少 p-GaN 材料的缺陷密度。

2.1.3 AlGaInP 基红光 LED 技术路线

2.1.3.1 衬底优化

选择低腐蚀坑密度、低翘曲、合适载流子浓度值的衬底，以保证片内均匀性和同炉次片间一致性。

2.1.3.2 降低缺陷

在材料生长中可采用合适 V/III 比、生长速率和形核温度，保证

晶体质量。材料界面处，保证气流平稳切换，减少反应室压力波动，以保证界面清晰陡峭。生长大失配材料时，先生长应力驰豫的缓冲层，再采用三维岛状型核，提高生长温度生长二维平面材料，缓慢提升生长速率，避免过程中螺位错和刃位错产生，以及避免在外延层中含有 In 元素。

改进设备，增加每个生长周期（Run）的清洗反应腔等动作，以减少颗粒（particle）的产生。

2.1.3.3 提升均匀性

红光 LED 芯片光电性能均匀性调整，包括生长设备的硬件调整和外延工艺调整两个方面。

前者包括： AsH_3 气流、 PH_3 气流均匀性以及气体流量阀门的控制更加精准；更精准的在位温度控制系统以及硬件改进等。

后者包括：在高质量衬底上外延；保证外延过程中纵向温度场的稳定，以在稳定流场前提下实现材料生长速率、组分精确控制；宽的阱垒厚度窗口，使波长更均匀、稳定；生长程序优化，包含 Run to Run/Wafer to Wafer 的均匀性等。

2.1.3.4 提高小电流密度下的峰值效率

采用合适阱垒/势垒高度、厚度，提高内量子效率；同时提高晶体质量，降低背景掺杂，提高载流子寿命以及对阱区的高注入，以及减少深能级杂质形成的非辐射复合中心，提高内量子效率。

另外，小电流下，侧壁非辐射复合效应显著，应降低外延层整体厚度；或者与后端芯片制程结合，尝试于外延结构中或者制程工艺进

行时，形成电流阻挡层，以集中电流于芯片中央区，提高发光效率。

2.1.3.5 降低成本

从提高电性良品率、可靠性良品率、外观良品率、高设备转动率、低维护成本、低物料清单成本、更大尺寸工艺（如 6 英寸）等方面入手。

其中，外观良品率重点控制颗粒，首先控制衬底本身携带的颗粒，其次避免人员上下片操作不当引入颗粒，再次外延过程中，注意反应室 ceiling 的及时保养，外延过程中合理的温度变化，气流变化，压强变化，小盘转动变化，减少外延过程中颗粒的掉落。

2.1.4 新型 Micro-LED 技术路线

常规外延技术难以解决的问题，例如 GaN 基红光 LED 制备、Si 衬底上 GaN 应力缺陷的调控、大注入下的效率减低、响应速率低等，均有望通过微米柱、纳米柱 LED 技术得以实现。

2.1.4.1 微/纳米柱实现 GaN 红光 LED

（1）不同尺寸纳米柱。通过改变 nano rod LED 的几何尺寸，nano rod LED 的发光波长可以从蓝紫光连续调节到红光直至红外光。

（2）非极性、半极性小面生长。利用微/纳米柱侧面的小面生长，可以实现经济、高效率的非极性、半极性面生长，获得高效红光 LED。

（3）InN 量子点与单分子层。克服高 In 组分 InGa_N 量子阱晶体质量差和强极化电场难题，采用 MBE、MOCVD 结合制备单分子 InN 层有源区或者量子点/量子阱有源层，得到红光 Micro-LED 外延片生长技术。

2.1.4.2 微/纳米柱调控 Si 上 GaN 应力、缺陷

克服大失配衬底上 LED 外延层应力、缺陷调控的难题，在大尺寸 Si 衬底上获得高光效、高波长/亮度均匀性、易于剥离的蓝、绿光 LED 外延片的制备技术。

在单晶 Si 表面，通过经典的光刻以及金属沉积技术，通过成熟的 CMOS 工艺，制备出可以发蓝光的纳米线 LED 单位发光体。这过程中不涉及任何特殊的与 CMOS 工艺不相容的材料，同时也可以使用成熟的 Si 片加工工艺。

最后通过蓝光纳米线 LED 发光元器件与色彩转换层配合的方式，完成彩色 Micro-LED 显示像素单元的制备。



图 2-3 采用蓝光纳米线加色彩转换层形成彩色 Micro-LED 的示意图

2.1.4.3 大注入、高速响应微纳米 LED

3D 微纳米柱 Core-shell LED 结构，可以实现较大注入下的高效率工作。不过随着尺寸的减小，空间电荷限制以及热传导将带来困难；但是导波模式减少，微腔效应明显，带来的 Purcell 因子也明显增大，因此有望实现辐射复合速率的快速增加。在 GaN 自支撑衬底上制备非极性的 LED 结构，无疑是一个非常优越的技术路线。电流密度提高 LED 的调制带宽是一个可行的方案。

2.1.5 混色技术

混色是 Micro-LED 显示的关键技术。颜色混合方面，目前存在多种技术路线。

(1) R/G/B 三色 Micro-LED 芯片转移混色。

采用三种芯片混合，在亮度、效率、稳定性和颜色显示效果方面最优，调频响应时间最快，但是缺点是需要三次巨量转移，成本高，工艺良率挑战大，驱动匹配难度较大。通过外延或者外延结合芯片工艺实现三色 LED，可控性差，较难实现。特别是红光 LED 部分以及在微米尺度下如何提升 LED 的亮度，难度也非常高。如果都采用半导体 LED 结构，R/G/B-LED 芯片中蓝光和绿光 LED 是采用 GaN 基材料，而红光 LED 则是采用 III-V 族半导体 AlGaInP 基材料，本身两类材料的外延生长、制备工艺和安全要求均有差异，会带来成本的大幅上涨。其次，宽禁带 GaN-LED 与窄禁带 AlGaInP-LED 光电性能存在差异，如小电流工作条件，发光波长温度漂移，工作寿命等都会给后期的显示应用带来不良影响。

(2) 发光芯片+红绿蓝光转换材料或蓝光芯片结合红绿色光转换材料混色。

采用 GaN 蓝光/紫外 LED 芯片结合红绿色光转换材料，可以减少巨量转移难度，也可以不采用巨量转移，用外延级焊接或薄膜转移方法，这需要与外延端和封装端密切配合。传统荧光粉已不适用于 Micro-LED。目前认为纳米尺寸的量子点光转化材料是 Micro-LED 显示的终极解决方案之一。但是量子点的精确涂敷方法也是一个待解决

的课题。目前最为看好的技术路线是以蓝光或紫外 Micro-LED 二维阵列作为激发光源，激发无机材料的三基色量子点薄膜，发射出纯正的 R/G/B 三色光。量子点采用 II-VI 族（Zn, Cd, Se, S）等具有核壳结构的材料体系，稳定性佳，成本不高。量子点材料具有较大的斯托克斯位移(stokes shift)，发光效率高；量子点材料对可见光散射小，出光效率高；量子点材料对蓝光全吸收，可降低蓝光 LED 发射功耗，均对显示应用有利。

（3）通过外延或与芯片工艺结合实现 GaN 基三色 LED。

考虑到 AlGaInP 基材料体系 LED 在微小尺度下的效率大幅衰减问题难以解决，目前部分研究人员认为采用 GaN 基材料向红光 micro-LED 推进也是一种可行方案。但是由于铟组分含量的提升，外延材料中应力集聚，缺陷与位错密度难以降低，导致外延和芯片工艺难度巨大。同时，高铟组分又会导致更大的 QCSE，使得芯片在发光波长的单色性和一致性上出现问题。以 Si 衬底 LED 为基础向红黄光发展，有望可以优化这些问题，南昌大学研究团队已经做出了不少成果。但是 GaN 体系的红/黄光 LED 的量子效率仍然很低，难以发挥 III 族氮化物 LED 效率高的优势。因此，需要高校和研究所等科研单位配合企业界加大投入，尽早实现技术突破，届时将有望利用同种材料体系形成 R/G/B 三色芯片，解决宽禁带 GaN-LED 与窄禁带 AlGaInP-LED 光电性能差异的问题。

2.1.6 芯片结构

Micro-LED 的尺寸定义并不是绝对，通常尺寸小于 100 μ m 的 LED

芯片就逐步进入了 Micro-LED 领域。当然，根据最终应用环境的不同，Micro-LED 芯片的尺寸可以大致分为三个区：面向超大屏幕显示，芯片尺寸大约是 40 μm -90 μm ；面向小尺寸屏幕，芯片尺寸大约是 20 μm -50 μm ；面向高 PPI 的 AR 和 VR 显示，芯片尺寸则需要小至 10 μm 。随着 Micro-LED 发光单元尺寸变小，Micro-LED 芯片的效率也会降低，且在小电流下的效率下降更为显著，这对小电流密度下工作的 Micro-LED 较为不利。这应该是由于小尺寸单元中芯片表面缺陷态密度占比增大导致的。

针对这一问题，主要技术发展趋势是：尽量局限电流扩散范围在有效发光区域内，避免电流扩散到表面缺陷态区域；由于芯片尺寸缩小后电流扩散不再是 LED 效率瓶颈，可减少掺杂来降低缺陷态密度；此外，采用湿法化学、退火或 ALD 致密介质材料绝缘钝化，来减少表面缺陷态。

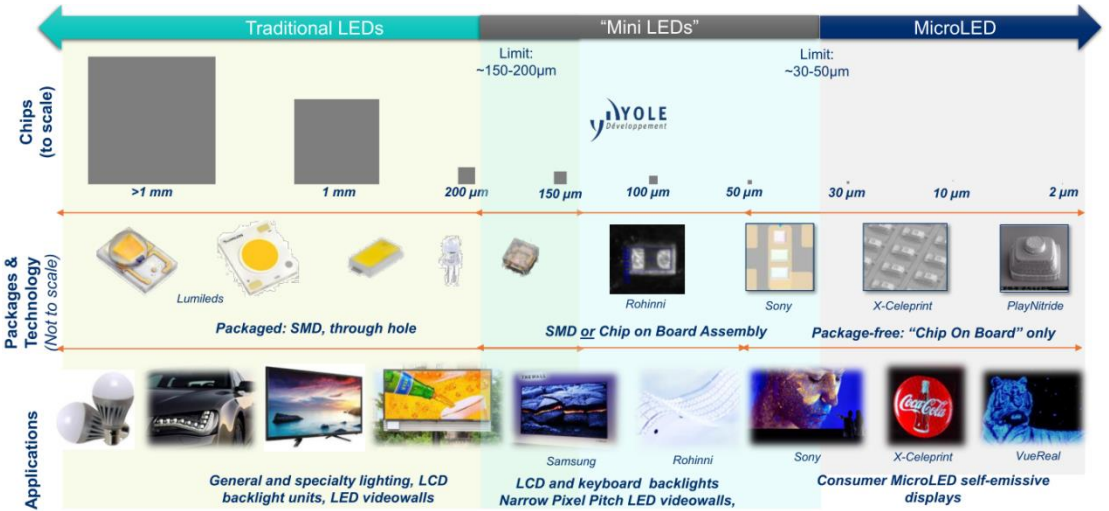


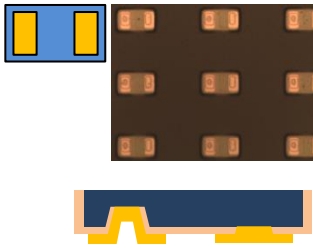
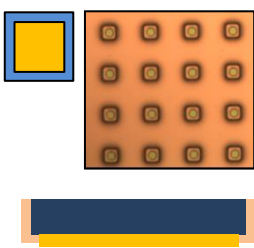
图 2-4 LED Landscape as of 2019

资料来源：Yole Development

芯片结构主要存在着两种技术路线，一种是倒装结构，另一种是

垂直结构。倒装结构需要两个共面的电极，其优点是：电路设计更简单，可修复性更强。倒装结构的单元尺寸通常大于 $30\mu\text{m}$ 。垂直结构的电极位于芯片上下两边，相对于倒装结构，尺寸可以做得更小，绑定的控制更容易，因而成本也更低。垂直结构可以采用 $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 的芯片单元，其成本约是倒装结构 $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$ 的 1/10。目前普遍认为垂直芯片结构是 Micro-LED 的发展趋势。两种技术路线各有其优缺点。针对垂直结构以及倒装结构应用范围以及其对于工艺的优劣势比较如下表：

表 2-2 不同结构应用范围及其工艺的优劣势比较

	倒装结构	垂直结构
芯片结构		
适用分辨率	<800 PPI	>800 PPI
芯片尺寸	随芯片尺寸缩小，工艺设备要求高，芯片有效利用面积受限	易于芯片尺寸缩小 (ex: $<10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$)
转移工艺	应用于一般 pick&place 巨量转移工艺，工艺相对简单	一般需要额外的激光剥离工艺，工艺相对复杂
接合工艺	芯片接合/电性连结同时完成	芯片接合后，需要额外的工艺来进行表面电极的电性连结
芯片成本	工艺道数多，需要更高精度设备，成本相对高	工艺简单，成本相对低

为了配合不同的转移方案与芯片应用，也衍生出了一些特殊的芯片结构设计：

(1) Chip on Wafer (COW)

主要是在外延层/蓝宝石衬底上透过蚀刻、沉积、金属蒸镀等半导体工艺制作成 Micro-LED 芯片结构，以晶圆方式直接出货。

(2) Tether-type Chip on Carrier (T-COC)

主要芯片结构是以微机电技术方式在蓝宝石基板上制作出具有可释放结构的 Micro-LED 芯片，一般称之为弱化结构。技术特征是以蚀刻牺牲层的方式制作出悬空结构，与之搭配的转移技术方案为使用弹性膜 Stamp Pick & Place 转移技术、滚轴转移方式等。

(3) Freestanding Chip on Carrier (F-COC)

主要是在外延层/蓝宝石基板上制作完成 Micro-LED 芯片后，使用激光剥离技术 (Laser Lift-off, LLO) 将芯片转移至暂时性载板上，此载板上可因应客户需求使用特定胶膜贴合 (UV 胶膜、热解胶膜等、激光解离胶膜等)，与之搭配的转移技术方案可使用激光转移技术、弹性层 Stamp Pick & Place 转移技术、滚轴转移技术等。

根据不同的制备技术，首先 Micro-LED 需要考虑厚度与长、宽度的比例因素，而基于 GaN 的 LED 芯片还面临着物理上的限制。其次，优化 LED 尺寸微缩带来的边缘效应降低芯片的亮度。芯片的几何结构关系到像素光源的出光角度，因此面向不同的应用需求，芯片几何结构需要做出相应的改变。这需要上下游领域的密切配合。随着芯片尺寸的缩小，像素光源的密集程度增加，各像素点之间的光串扰问题变得不容忽视。需要从芯片结构设计上配合封装技术对像素进行有效隔离，减少像素点之间的光串扰。

2.1.7 性能指标

基于 GaN 的 LED 芯片面临着物理上的限制。例如，LED 光效的 Droop 问题，即 LED 的发光效率随着注入电流增加明显下降。其次，

LED 尺寸微缩带来的边缘效应,因为通过刻蚀工艺制程的 Micro-LED 芯片,侧壁会留下不可避免的刻蚀损伤,成为表面非辐射复合的通道,从而降低芯片的亮度。第三,亮度和波长的一致性和稳定性问题,从高品质显示的需求出发,要求蓝、绿、红 LED 的发光亮度稳定性高,波长一致性好,半峰宽窄,即颜色更纯,这又对材料的量子阱结构,芯片工艺提出了更苛刻的要求。第四,随着 Micro-LED 芯片尺寸的缩小,出光效率方面也需要进行优化,特别是面向显示的 Micro-LED 在广角范围内的出光强度也需要优化。

从工作电流来看,常规照明芯片工作的电流密度较大,通常大于 $35\text{A}/\text{cm}^2$,并且希望在电流密度高的区间效率维持在较高水平,减少 Droop 效应的影响。Micro-LED 用于显示时,工作在小电流区间,主要范围为 $0.02\text{-}2\text{A}/\text{cm}^2$ 。因此在外延材料和芯片工艺领域,需要做相应的改变。针对这一问题的技术发展趋势是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,并且可以进一步提升芯片内量子效率。显示应用最关注的还是效率:亮度/功率的评价体系。但是亮度因为是直视,应采用毫坎德拉(mcd)或者尼特(nit)的评价方式。

反向漏电流正常需要控制在 pA 级别;比如 $<10\text{pA}@-5\text{V}$ 的要求,目前在 -5V 下可以做到 $10^{-4}\text{-}10^{-5}\mu\text{A}$ 级别。

电压均匀性也相当重要,因为切分灰阶时是采用电压控制。

波长均匀性要求能够到达整片 3nm 的范围内,波长标准差(std)达到 $0.7\text{nm}\text{-}1\text{nm}$ 的范围。

2.1.8 挑战与趋势

2.1.8.1 主要问题与挑战

- (1) 外延片厚度、波长、亮度均匀性与一致性要求更高；
- (2) 小电流以及超小电流下的光效问题、缺陷漏电和表面损伤等；
- (3) 芯片制程所需制程机台与环境，若要达到高良品率的水平，传统 LED 工厂难以满足，建议需求如下：
 - 环境：洁净度需达百级或更佳；
 - 机台作业方式：自动化机台为佳；
 - 黄光微影制程：解析度与对位精度需要同时考虑，光刻胶等工艺原料协调优化；
 - 湿蚀刻制程与干蚀刻制程的精准控制问题，刻蚀损伤，刻蚀角度等；
 - 氧化物沉积的阶梯覆盖率提升，致密度提升；
 - 点测：可进行小尺寸 LED 收光的全点测，或间接式大面积测评方案；
 - 高速的适合量产的微小尺寸芯片的 AOI 设备。
- (4) 制程工艺难点：
 - 匹配转移技术的 Micro-LED 芯片工艺：比如牺牲层结构匹配印章转移方式；含激光响应层的临时键合技术匹配激光转移方式；特殊的芯片几何形状匹配流体转移技术；特殊电极结构匹配电磁转移方式；

- 高良率的衬底去除工艺，尤其是对于激光剥离的方式，做到更高的良率，减少剥离损伤；
- 红光的临时键合工艺需要考虑后续的制程高温工艺，大约 300℃-400℃，同时临时基板还需要可移除，所以制程相对复杂和难度更高；
- 红光临时键合的高良率难题；
- R/G/B 三色结构的高度一致性问题，尺寸分配问题；
- 后续到 TFT 等基板的键合工艺；
- 超高解析度、超小尺寸的芯片制程，需要更高精度的光刻设备以及更高精度的制程控制手段；
- 与 CMOS 基板键合后的高良率衬底剥离工艺以及避免光串扰的相关制程工艺；
- 6 英寸的制程挑战，在更大的外延上执行高良率精密微制程的挑战，配套工艺制成全线升级。

2.1.8.2 发展趋势

（1）高密度显示器件采用垂直结构芯片，低密度显示器件依然可采用倒装结构芯片。

（2）适应不同 PPI 显示和各种应用，芯片尺寸逐步根据市场需求进行分流，相应的结构设计与工艺条件也会做出调整。

（3）晶圆尺寸向 6 英寸推进，配套制成工艺全线升级。

（4）外延、芯片、封装、应用上中下游相互配合、协同发展。

2.2 封装技术路线分析

2.2.1 巨量转移技术

外延芯片部分结束后,需要把数百万甚至数千万颗微米级的 LED 晶粒正确且有效率的移动到电路基板上,以一个 4K 电视为例,需要转移的晶粒就高达 2400 万颗(以 $4000 \times 2000 \times R/G/B$ 三色计算),即使一次转移 1 万颗,也需要重复 2400 次,这种技术叫做巨量转移。现有的设备、制程和工艺无法满足 Micro-LED 量产化的需求,不仅制作成本高,同时生产效率也很低。因此, Micro-LED 量产化应用的实现,巨量转移是其得以有效发展的第一步。**Micro-LED 巨量转移技术的开发存在许多问题与挑战:**

(1) 在转移之前,需要将 Micro-LED 从外延片移动到载体。

(2) Micro-LED 的厚度仅为几微米,将其精确地放置在目标衬底上的难度非常高。

(3) Micro-LED 的芯片尺寸及间距都很小,要将芯片连上电路,也充满挑战。

(4) Micro-LED 芯片需要进行多次转移(至少需要从蓝宝石衬底→临时衬底→新衬底),且每次转移芯片量非常大,对转移工艺的稳定性 and 精确度要求非常高。

(5) 对于 R/G/B 全彩显示而言,由于每一种工艺只能生产一种颜色的芯片,故需要将红/绿/蓝芯片分别进行转移,需要非常精准的工艺进行芯片的定位,极大的增加了转移的工艺难度。

不同的 Micro-LED 巨量转移技术具有不同的技术特性,未来针

对不同的显示产品，可能都会有相对适合的解决方案。现有的转移技术及其代表厂商如图 2-5 所示，主要分为芯片转移和外延级键合两大类。其中，芯片转移技术分为物理方式和化学方式：物理方式主要为电磁力转移、静电吸附和流体装配技术；化学方式主要为范德华力/粘力、激光转移以及滚轮转印等。

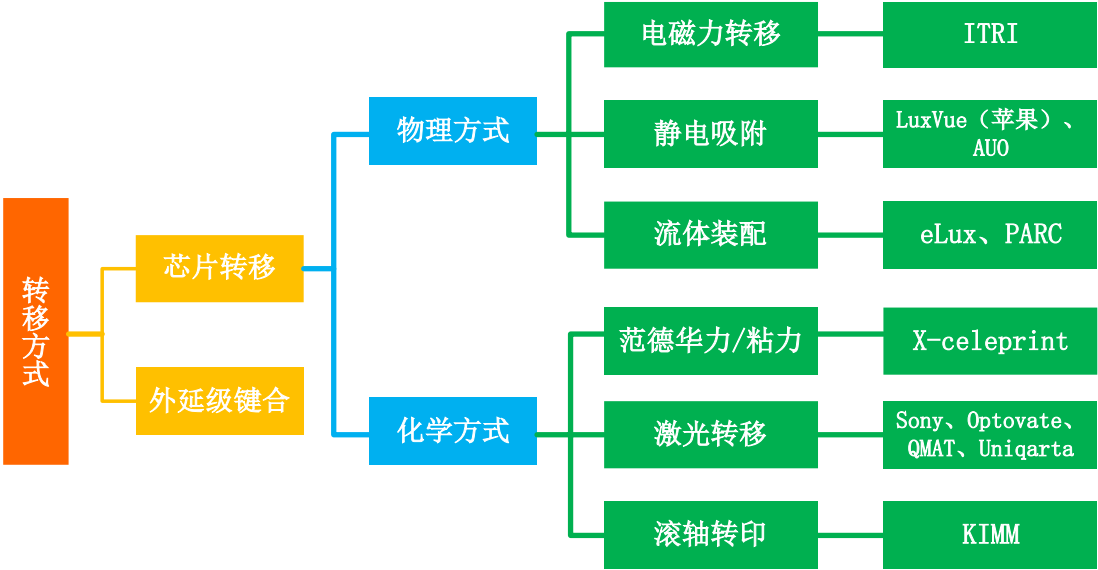


图 2-5 芯片转移的几种方式

资料整理：CASA Research

芯片转移主要是通过剥离 LED 衬底，以一临时衬底承载 LED 外延薄膜层，再利用感应耦合等离子蚀刻，形成微米等级的 Micro-LED 外延薄膜结构；或者先利用感应耦合等离子蚀刻，形成微米等级的 Micro-LED 外延薄膜结构，通过剥离 LED 衬底，再通过临时衬底承载 LED 外延薄膜结构。外延级键合技术是将一片单色 Micro-LED 外延片和一整片 CMOS 驱动电路晶圆键合在一起。几种芯片转移技术其余相关参数参照表 2-3。

表 2-3 几种芯片转移方式对比

技术方案	关键材料	关键设备	设备开发情况	UPH (million)
电磁力吸附	芯片磁性材料	电磁力转移设备	未了解到相关设备	~0.9
静电吸附	芯片介电层	静电力转移设备	未了解到相关设备	~12
流体装配	流体墨水	静电印刷设备	有实验机	>56
弹性印模转移	PDMS, 转移膜	转移设备, 设备精度 2 μ m	已有相关设备在开发	1-36
激光转移	芯片 GaN 缓冲层	激光剥离设备	已有相关设备在开发	2-100

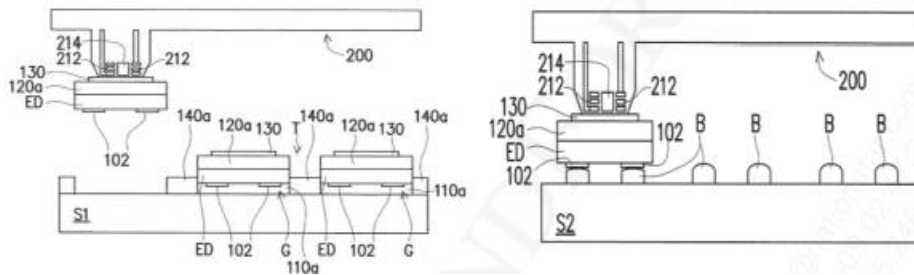
资料整理：CASA Research

2.2.1.1 芯片转移技术

(1) 电磁力吸附转移技术

电磁力吸附转移技术要点如图 2-6 所示。主要是利用线圈电感产生电磁力的方式，将 Micro-LED 吸附及放下，拾取装置为电子-可编程磁性模块包括微机电系统（MEMS）和键合设备。在 Micro-LED 拾取阶段，主要方式为去除牺牲层，使其处于悬空状态，电子-可编程磁性模块产生磁力，吸附芯片，然后进行拾取；在 Micro-LED 打印阶段，电子-可编程磁性模块通过加热工艺将导电模块与接收衬底对准并接触，从而有效地促进固态结合，将 Micro-LED 与接收衬底键合。最后，断电消除磁力，拾取电子-可编程磁性模块，最终完成 Micro-LED 的电磁力吸附转移。

该技术的难点在于需要在芯片上制作一层磁性材料，磁性材料的均匀性会影响电磁力吸附的精度和一致性，电子-可编程磁性模块的设计较为复杂，转移芯片间距不宜太小，电极材料需要匹配。



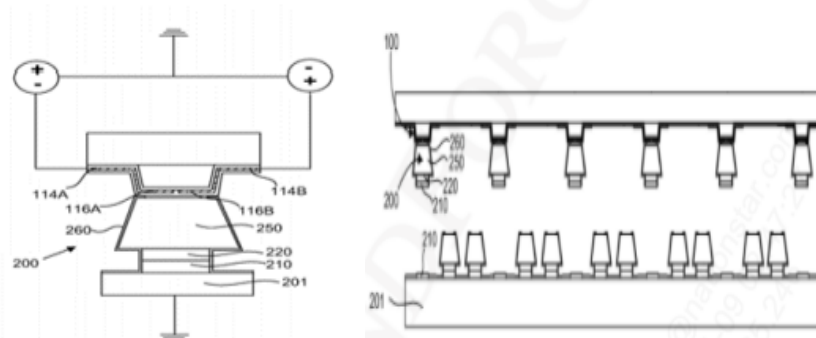
(a) 拾取 Micro-LED 示意图； (b) 打印 Micro-LED 示意图

图 2-6 电磁力吸附专利示意图

资料来源：ITRI

(2) 静电吸附转移技术

静电吸附转移技术要点如图 2-7 所示。利用 Al_2O_3 或 Ta_2O_5 等材料做成转移头主体，其转移头可做成单电极或双电极的类型，以符合抓取不同结构的微型电子组件。此电极区域镀有 TiW 等高熔点材料，而在电极的表面镀有高介电系数的介电材料（如： Al_2O_3 ， Ta_2O_5 ），转移头的平台结构被介电层对半分离形成一对 Si 电极。转移技术原理主要是利用静电力来控制内外电极电压差，实现对 Micro-LED 的吸附和转移。拾取 Micro-LED 阶段，在吸附转移头和芯片上产生不同电荷，利用异性相吸的原理将 Micro-LED 吸附拾取。同时在待转移衬底上的 Micro-LED 下方的低熔点键合材料，在转移头抓取微型电子组件之前，先将此材料加热融化，产生从固体到液体的相变化，以达到顺利抓取 Micro-LED 的目的，并且将转移头数组在微型器件衬底上来回摩擦晃动，以便移除任何移转头或微型器件的接触表面上可能存在的任何微粒。放置 Micro-LED 阶段，通过调节内外电极电压差，使得电压差为零，将 Micro-LED 放置到接收衬底，同时，再将 Micro-LED 下方的低熔点键合材料再次加热融化，以与接收衬底上的组件接点结合，达到移转与置放的目的。



(a) 转移头示意图； (b) 拾取 Micro-LED 示意图

图 2-7 静电转移的专利示意图

资料来源：Apple

该技术的难点在于需要在芯片上制作一层介电材料层，由于抓取微型电子组件的力量大小与通入电压有关，因此通入愈高的电压，除了选用较高介电系数的材料之外，介电层材料的厚度亦需再提高，以防止组件崩坏。而由于 Mesa 主体的厚度约 $2\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$ ，因此，对于被吸取微型电子组件衬底的平整度要求很高，以免衬底平整度起伏过大，造成无效的抓取动作。该技术适用于小尺寸的芯片和芯片间距，抗 ESD 性能较好。

(3) 流体装配转移技术

流体装配转移技术要点如图 2-8 所示。将芯片分装在流体内，通过控制流体的流动以及临时衬底上静电作用力的方式，实现 Micro-LED 的分散和排列，最后将 Micro-LED 芯片转印到封装衬底上。这种生产方式可以用一个公式来控制 and 计算应用流体组装的速度，液体在衬底的板面上流过，利用液体的流力和重力的作用，可以有效将其中的 Micro-LED 颗粒捕获并放置到固定的地方。流体装配转移技术可以进行一些原位的控制，通过设备感知捕获 Micro-LED 颗粒，并且可以清晰地知道哪些是多余的颗粒配备，同时配备 AOI 技术测试，

可以识别出有缺陷的 Micro-LED 颗粒，让整个测试过程变得相对简单。

流体组装技术仅需在 Micro-LED 芯片上做特殊设计，芯片即可准确对位，因此 Micro-LED 间距不受限于转移机台对位的精准度。

此技术难点在于芯片损伤的修复技术、流体选择是否会影响 Micro-LED 性能、多余芯片的去除、需要将流体挥发干后才能进行下一步的封装。该技术可适用于任意大小的芯片，芯片几何形状可多样，芯片间距不宜过小，晶圆利用率适中。

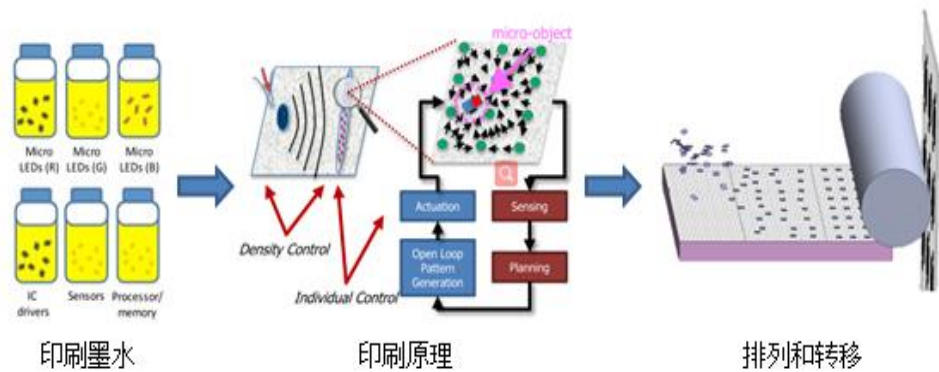


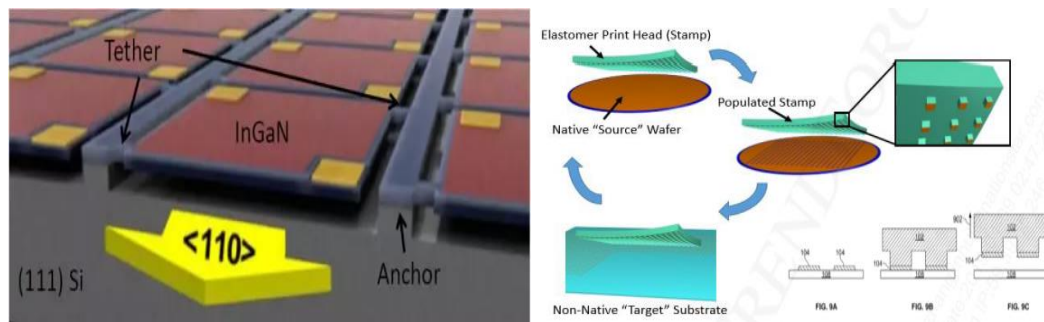
图 2-8 流体装配转移技术示意图

资料来源：eLux

（4）弹性印模转移技术

弹性印模转移技术要点如图 2-9 所示。弹性印模是利用聚二甲基硅氧烷（PDMS）材料作为转移膜材料。要实现这个过程，对于原生衬底的处理相当关键，要让制备好的 LED 器件能顺利地弹性体材料吸附并脱离原基底，需要先处理 LED 器件下面使之呈现“镂空”的状态，器件只通过锚点和断裂链固定在基底上面。当喷涂弹性体后，弹性体会与器件通过范德华力结合，然后将弹性体和基底分离，器件的断裂链发生断裂，所有的器件则按照原来的阵列排布，被转移到弹

性体上面。制作好“镂空”、“锚点”和“断裂点”的基底如图 2-9（a）所示。



(a)制作“镂空”，“锚点”和“断裂点”的基底示意图；(b)弹性印模转移技术示意图
图 2-9 弹性印模技术图示

资料来源：X-celprint

此技术的难点在于 PDMS 需要制作为 PDMS stamp 形状，只有粘附在表面平整度极为平坦的平面，才不影响转移的良率和精度，而且需要精准控制各个阶段粘力大小，否则将无法实现转移。

（5）激光剥离转移技术

与 Pick & Place 技术相比，激光剥离（LLO）转移技术跳过 Pick 环节，直接将尚未剥离的 LED 芯片衬底转移放置于背板上。使用紫外激光器在蓝宝石晶圆的生长界面处照射，根据材料间不同的吸收系数，引起界面的热膨胀。若为 GaN 外延片，界面处的 GaN 缓冲层分解成 Ga 和 N₂，实现芯片的分离和转移，做到平行转移，实现精确的光学阵列。其他衬底也类似。激光剥离技术可以进行 Micro-LED 的选择性转移，也可以多个 Micro-LED 同时转移。

此技术的难点在于，响应材料的选取，需要精准控制激光的功率和分辨率才不影响芯片的性能；激光维护成本较高；另外还需要控制好 GaN 分解的作用力才能实现精准对位。该技术适用于小尺寸芯片，小间距范围，单次转移面积适中。

（6）滚轴转印转移技术

滚轴转印转移技术要点如图 2-10 所示。主要是利用带有计算机接口的滚轮系统，进行滚轴对滚轴方式，通过反馈模块可以精确控制接触 Micro-LED，反馈模块包含两个负载传感器和两个 z 轴执行器。此外，滚轮系统通过两个安装的显微镜保持精确对准，最终将 Micro-LED 转印至接收衬底上，实现巨量转移。通过滚轴转印技术的巨量转移效率相较传统打件制程的速度平均快上 1 万倍左右，生产速度大大提高。

此技术的难点在于，一个是使辊隙压力均匀化，另一个是使辊的角运动与样品安装台的平移运动同步。

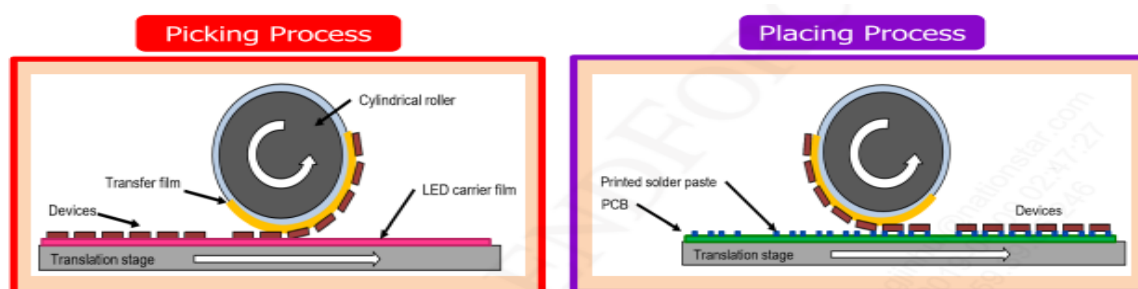


图 2-10 滚轴转印技术示意图

资料来源：KIMM

2.2.1.2 外延级键合技术

外延级键合技术要点如图 2-11 所示，该技术首先将一片 InGaN 蓝色 Micro-LED 外延片和 CMOS 驱动电路晶圆键合在一起，再在该键合后的蓝色 Micro-LED 上涂覆色转换材料，得到红色和绿色晶圆级 Micro-LED，然后通过连续切割制备成单个 R/G/B Micro-LED 像素，最后将独立的 R/G/B Micro-LED 像素转移到接收基板，如行列导线构成的基板。

该技术无需制备红色和绿色 Micro-LED，简化了制备流程；同时无需 TFT 背板，因而不受驱动尺寸的限制。

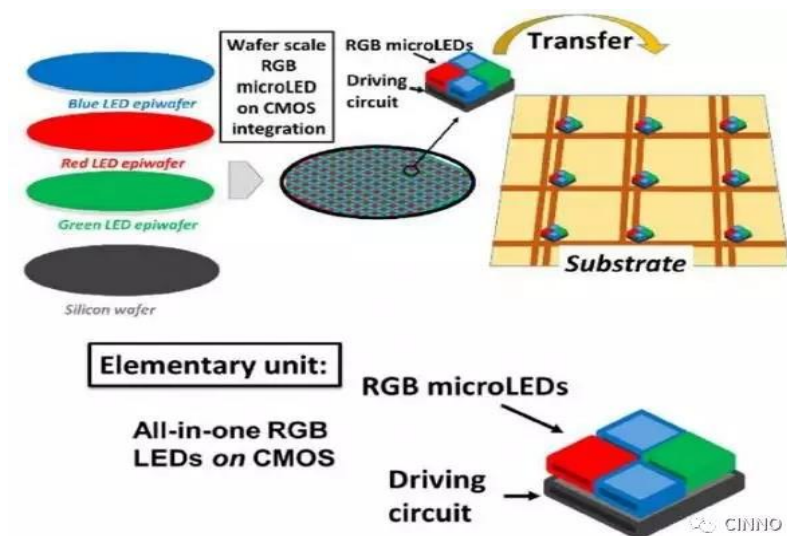


图 2-11 外延级键合示意图

资料来源：Leti

2.2.2 色彩转换技术

目前可以通过喷墨打印技术、转移印刷及光刻工艺开发 Micro-LED+色转换材料实现全彩化技术，对低 PPI 和高 PPI 的显示产品都适用。

2.2.2.1 色彩转换材料

可用于色转换技术的转换材料主要分为以下几种：

(1) 纳米荧光粉：由于传统荧光粉尺寸过大，无法集成到尺寸相对小的 Micro-LED 上，并且粉体化传统大尺寸荧光粉涂覆密度较低，发光效率较差，因此发展了亚微米尺度的纳米荧光粉。但在光转换过程中其能量损耗较大，随着时间和环境的变化，荧光粉会产生色温漂移，光的稳定性较差。

(2) 有机荧光材料：如 F8DP， F8BT 等，但有机材料存在稳定

性差和寿命短等问题，需要发展特殊的包裹材料来提高其稳定性和抗氧化性。

(3) 量子点：主要包括无机量子点 CdSe/ZnS，碳量子点，钙钛矿量子点等；传统量子点 CdSe/ZnS 寿命长，量子效率高，但有毒性；碳量子点成本低廉，低毒但量子效率较低；钙钛矿量子点量子效率较高，但稳定性不好。

2.2.2.2 量子点/荧光粉与 Micro-LED 集成技术

目前文献中报道的将量子点 (QD) /荧光粉与 Micro-LED 集成的方法，主要有以下几种方式：

(1) 喷墨打印

喷墨打印即采用量子点墨水来形成量子点图案的一种技术。打印喷头包含一个或多个喷管，它们能够把墨盒中的量子点墨水喷洒出去。同时通过步进电动机来控制墨滴的位置，从而产生整齐而持续的图像，如图 2-12 所示。

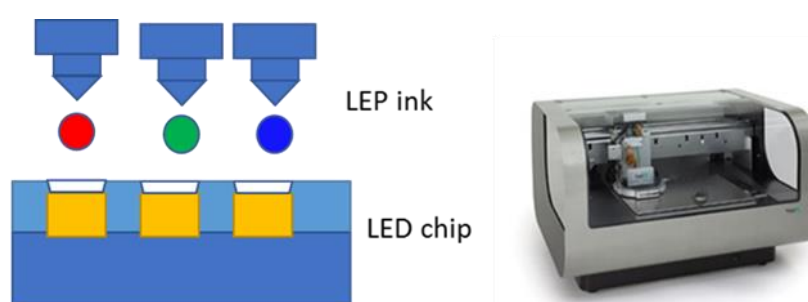


图 2-12 喷墨打印示意图

为了便于墨水形状的调控，通常需要采用化学修饰对 Micro-LED 进行表面处理，以获得憎水表面，从而形成半球状墨水。通过这种喷墨打印技术即可把量子点墨水直接打印集成在 Micro-LED 像素上，

从而实现多色显示，如图 2-13 所示。

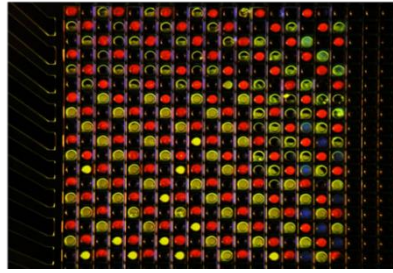


图 2-13 通过喷墨打印集成的量子点/Micro-LED

（2）气雾喷流打印

气雾喷流打印技术通过将量子点油墨雾化，雾化后的量子点传送到喷嘴，再通过喷嘴中添加气场使得量子点油墨不直接接触喷嘴壁，从而被打印在物件上形成图案的一种技术。如图 2-14 所示为气雾喷流打印的示意图。若光源为紫外光，则需要红绿蓝三色量子点；若光源为蓝色光，则只需要红绿二色量子点即可实现三色集成。

打印过程中，由于液滴边缘溶剂的蒸发速度高于液滴中心，薄膜表面较容易出现“咖啡环效应”。可以通过调整量子点溶剂的粘度、表面张力，制备高粘度、低挥发性油墨，有效抑制“咖啡环效应”的产生。

为了增加紫外光子的利用率，在器件上布置分布式布拉格反射器，该技术工艺与传统喷墨技术相比，材料浪费率低，能够灵活适应 Micro-LED 微米级的芯片尺寸，实现高分辨率显示。

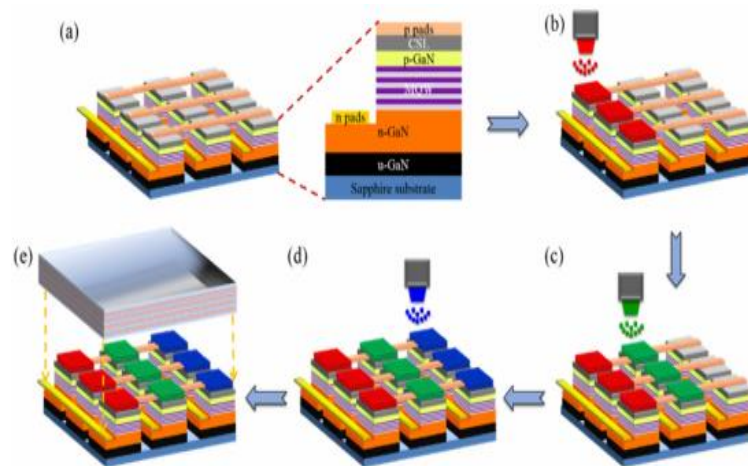


图 2-14 气雾喷流打印技术示意图

资料来源：OSA Publishing

(3) 光刻技术

通过光刻技术实现光转换材料与 Micro-LED 的集成方案有两种，其中一种方案是首先采用光刻技术形成网格状光阻模板，然后采用刮涂的办法，往网格模板里填充量子点材料，从而形成图形化的量子点光转换膜；通常为了便于刮涂，量子点混入到一种聚合物基质材料。再通过粘合、贴合、键合等方式将这种图形化的量子点膜集成到 Micro-LED 阵列上，即可实现全彩显示，如图 2-15 所示为通过光刻技术制备图形化量子点膜。

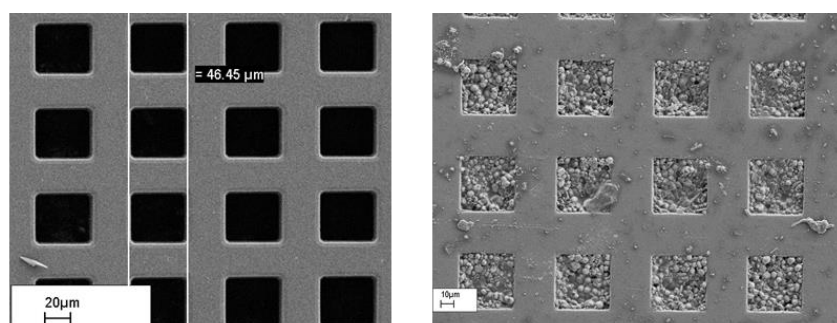


图 2-15 通过光刻技术制备图形化量子点膜示意图

另外一种方案是通过光分散剂将量子点溶液均匀的分散到光刻胶（PR）中，之后将 QD PR 溶液旋涂在目标基板表面，经过紫外曝

光使 QDs 膜硬化，并通过显影，洗去多余的 QD 材料，最后，将图案化的 QD 膜固化以制成硬膜，如图 2-16 所示。利用这种 QD PR 的解决方案，可以通过光刻工艺将光转化层像素间距缩短到 $10\mu\text{m}$ ，但是，此方案容易造成的量子点效率降低。此外，QD 的溶解度是一个障碍，QD 能否在 PR 中均匀的分散，将直接影响显示效果。对于 Micro-LED 微米级的芯片尺寸，对掩模版的精度要求也会越来越高。

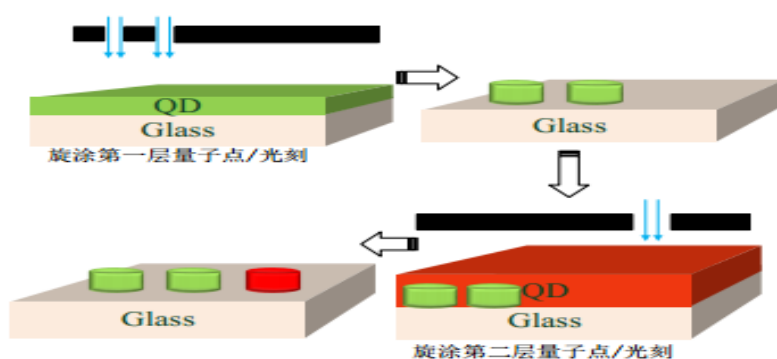


图 2-16 光刻技术示意图

资料来源：复旦大学

（4）弹性印章转印

利用转印技术可以将量子点层中的所需部分通过各种基板不受限制地转移到器件层中的特定位置上。将量子点材料旋涂在黏附力较小的 Si 基板上，通过图案化的聚二甲基硅氧烷（PDMS）印模快速地拾取量子点层中所需部分，最后利用 PDMS 转压到目标基板上，实现量子点层与目标基板紧密结合，如图 2-17 所示。该方法制备工艺简单，但是转印压力的均匀性难以控制，导致图案边缘无法完全拾取量子点层，量子点层存在高度差异，制造成本增加，并且量子点层依次转印的过程中，由于存在高度差异，会导致量子点材料位置偏移或部分粘除。

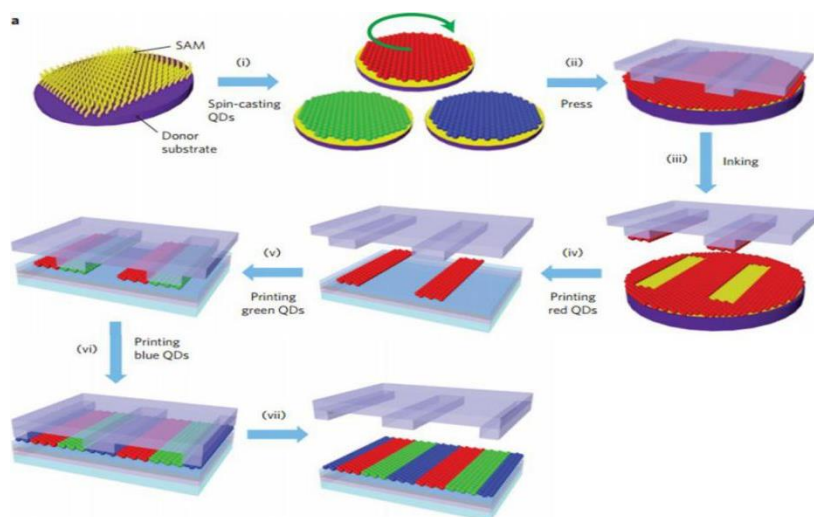


图 2-17 转印技术方案示意图

资料来源：三星研究团队

此外，目前转印技术方法还存在的一些技术问题，主要表现在以下几个方面：对于 Micro-LED 微米级芯片的尺寸，量子点图案将受到印模尺寸的限制，并且转印压力的均匀性也难以控制，制造成本增加；每一层材料的表面特性需要仔细考虑，以确保有足够的粘合力相互作用，才能实现高产转移；R/G/B 量子点层依次转印的过程中，由于存在高度差异，会导致量子点材料位置偏移或部分粘除。

2.2.2.3 问题和挑战

- (1) 量子点/荧光粉的图形化工艺：光刻法容易造成其发光效率严重下降，材料稳定性降低；
- (2) 喷墨打印技术有精度、良率、重复性方面的问题；目前比较难打印 $5\mu\text{m}$ 以下的量子点；打印的量子点厚度难以调控；
- (3) 量子点墨水稳定性较差，难以合成高质量量子点墨水；
- (4) 封装必须有效抑制相邻像素间的光串扰现象；
- (5) 量子点稳定性较差，必须采用合适的材料包裹；

(6) 量子点打印成膜特性较差，与旋涂成膜相比，质量差很多；

(7) 若 R/G/B 三种颜色的转换材料都由紫外光激发产生，其对调制信号的响应时间会比较一致(都取决于色转换材料的响应时间)，但是紫外 Micro-LED 制备工艺要求较高。若采用蓝光激发红光和绿光，则红光和绿光的响应时间会明显慢于蓝光(色转换材料的响应时间比 LED 的响应时间慢)，导致三种颜色的响应时间不一致；

(8) 色转换材料往往不能够把 Micro-LED 的发光全部转换为长波长的光，波长的转换意味着光子能量的损失，光子经过波长转换所损失的能量大部分转换成热能并被荧光粉或量子点所吸收，从而导致荧光粉或量子点温度升高。而荧光粉或量子点的温度升高，又会反过来进一步降低其波长转换的效率。

2.2.2.4 发展趋势

(1) 图形化荧光材料其线宽越来越小，最终可与 Micro-LED 尺寸比拟 ($5\mu\text{m}$ 左右)，线宽发展预期如下图 2-18 所示；

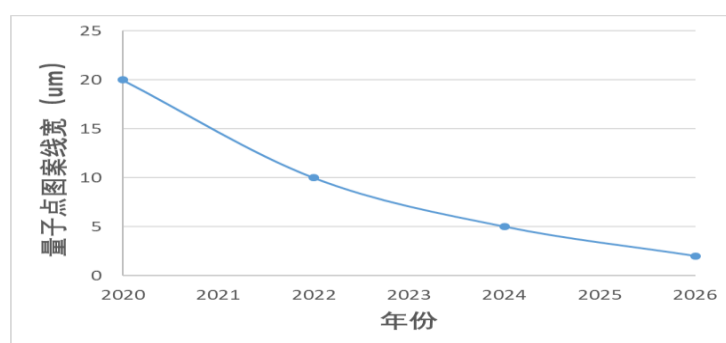


图 2-18 荧光材料线宽发展预期

(2) 荧光材料的效率、寿命越来越高；在热、湿、氧及强蓝光/UV 环境下，稳定的量子点改性及包覆技术越来越好；下图 2-19 是量子点寿命及量子效率的预测；

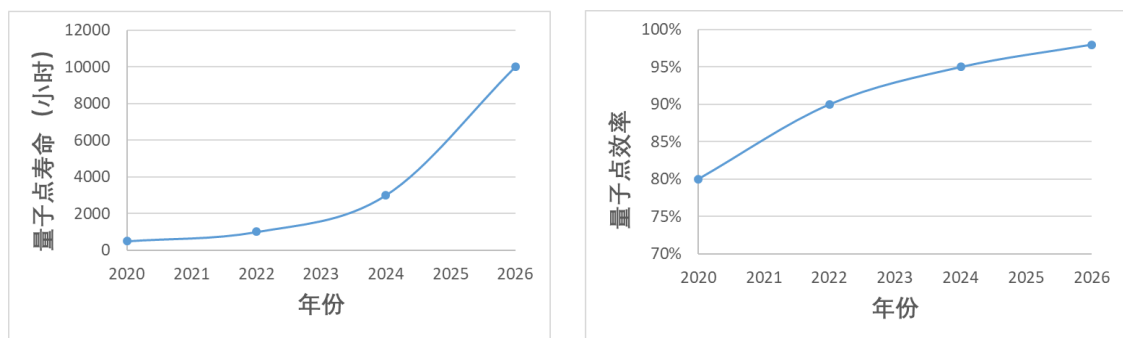


图 2-19 量子点寿命及量子效率的预测

- (3) 新的荧光粉材料不断涌现；
- (4) 高性能量子点喷墨打印、光刻或转印技术越来越成熟。

2.2.3 检测技术

为了满足工业大批量生产，因此发展 Micro-LED 巨量转移技术势在必行，相对应的检测技术必须得到同步发展。除了在生产过程中对产品的检测外，在产品的工作过程中由于散热、老化等问题，也会导致显示器成像缺陷进而影响其成像质量。因此对于显示器的缺陷检测就显得尤为重要，如何在百万级甚至千万级的芯片中对坏点进行检测修复是一大挑战。

传统大尺寸 LED 测试技术，主要包括光致发光测试 (Photoluminescence, PL) 及电致发光测试 (Electroluminescence, EL) 两部分。PL 测试能在不接触且不损坏 LED 芯片的情况下，对 LED 芯片进行测试，但检测效果与 EL 测试相比略为逊色，可能无法检测出所有瑕疵，因此在一定程度上会降低后续的生产良率。相反的，EL 测试通过对 LED 芯片加以电流来进行测试，能够找出更多缺陷，却可能因与芯粒接触而造成芯片损伤。而 Micro-LED 由于芯片体积过小，传统测试设备难以适用，因此 EL 检测的难度相当高。但是 PL 测试

又可能出现电学上不良器件检测的遗漏，造成检测可靠性不高。因此，有必要发展新的测试方法以提高检测速度、可靠性和成本。

（1）光学检测技术

光学检测缺陷手段包含影像辨识、光致发光影像检测 (Photoluminescence imaging detection)、光相位等技术。光相位技术重建 3D 影像图。能够检测 GaN 外延片的所有重要的宏观、微观缺陷，多通道探测有利于缺陷准确分类。用检测设备做 Micro-LED 产品的色彩及均匀度的检测，并且利用光学模拟软件及算法做亮度不均匀 (Mura) 的消除分析，也可以有效控制解决微显示器色彩均匀度的问题。

（2）显微高光谱光电热综合检测技术

配备高像素的相机，可以很可靠的检测到 Micro-LED 表面的细微刮痕等，是 Micro-LED 制程中不可或缺的表面检查设备。高光谱技术是一项能同时探测空间维和光谱维的新型测试技术，同时具有成像功能和分光特性，将影像信息和光谱数据有机地组成图谱合一的三维数据立方。提供比普通光谱仪或相机更丰富的信息。与显微镜结合，不仅可完成 Micro-LED 表面形貌检测分析，也能实现 Micro-LED 表面二维光热综合检测。

显微高光谱相机通过图像辐亮度校准获得芯片表面每个像素点光谱辐亮度分布，便可以通过计算得到 Micro-LED 的表面二维亮度、色度分布。例如已研发出一种显微高光谱成像系统用于 Micro-LED 测试，该系统结合了电脑、电流源、高光谱成像仪与显微镜搭配支援软

件能够捕捉并分析显微影像，测量 Micro-LED 芯片的二维光谱、亮度与相关色温（CCT）分布等等。基于显微高光谱成像技术，利用 LED 芯片发光光谱与温度线性关系实现 LED 芯片二维温度分布测试技术，可实现芯片表面二维温度分布的高空间分辨率、高精度测试。与红外热像仪相比，空间分辨率大大提高，达到亚微米级（仅受限于光学显微镜分辨率）。

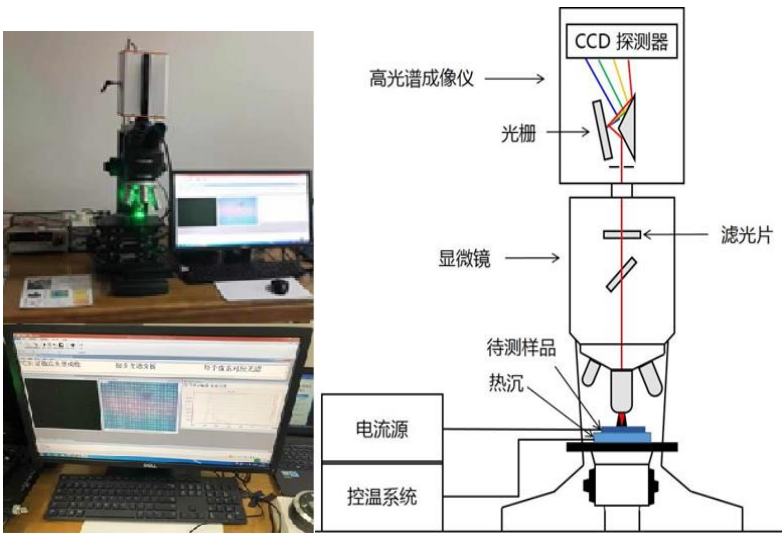


图 2-20 显微高光谱成像系统检测技术

资料来源：和莲光电

（3）接触式光电检测技术

利用 EL 或 PL 检测整片 Micro-LED 阵列的坏点并能计算良率。

例如已经研发出的一种运用数码式 Si 基电光平台结合探针座结合软件 HD Die Tester，运用接触式 EL 量测，在几分钟内可检测高达 1952×1112 百万颗等级的 pixel 数量，为每颗 Micro-LED 的电压及电流等电特性信息建立数据资料库储存于电脑中，并可及时读出制作成电压-电流曲线图及 Micro-LED 显示屏均匀性分布图，如图 2-21 所示。在单颗芯片的检测流程中，如果是在键合 Micro-LED 之前，这种

方法能够确保像素操作(如 SRAM)的效果不会因为重新布线(RDL)或任何后端晶圆处理而变差;如果载片上已经填充了 Micro-LED,那么在使用柔性电路板(FPC)进行引线键合之前,这种方法能够在较小的区域内评估 Micro-LED 的像素品质。

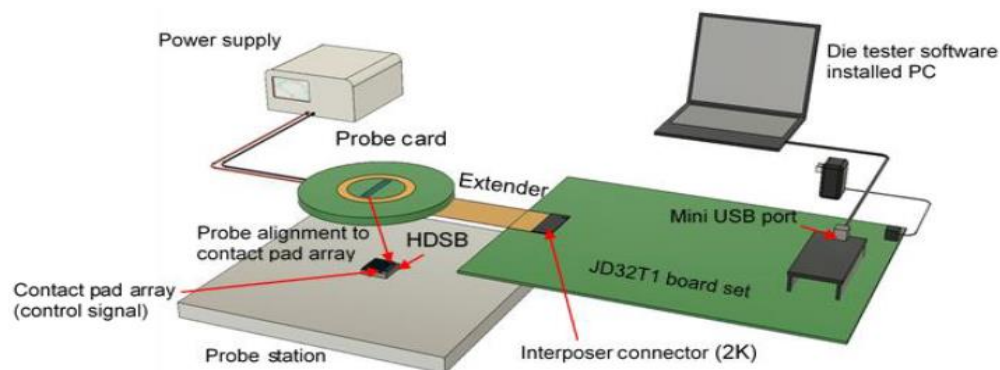


图 2-21 接触式 EL 检测技术

资料来源: 和莲光电

(4) 非接触式 PL 检测技术

高精度 3D 传感技术可以用于 Micro-LED 自动光学检测(AOI), 焊膏检测(SPI)和坐标测量(CMM)。此外, 还可检测外延片的缺陷, Micro-LED 晶片发光状态及波长位移的情况。例如已经研发出的一种非接触式 PL 量测频谱, 通过研发的演算法及结合两个 Camera 的光学系统, 从 PL 强度分布中快速筛选与过滤出 Micro-LED 发光状态, 4 英寸外延片约需 15 分钟的检测时间, 像素分辨率约 $0.65\mu\text{m}$; 相比于 EL 量测, 其准确性高达 97%以上, 如图 2-22 所示。

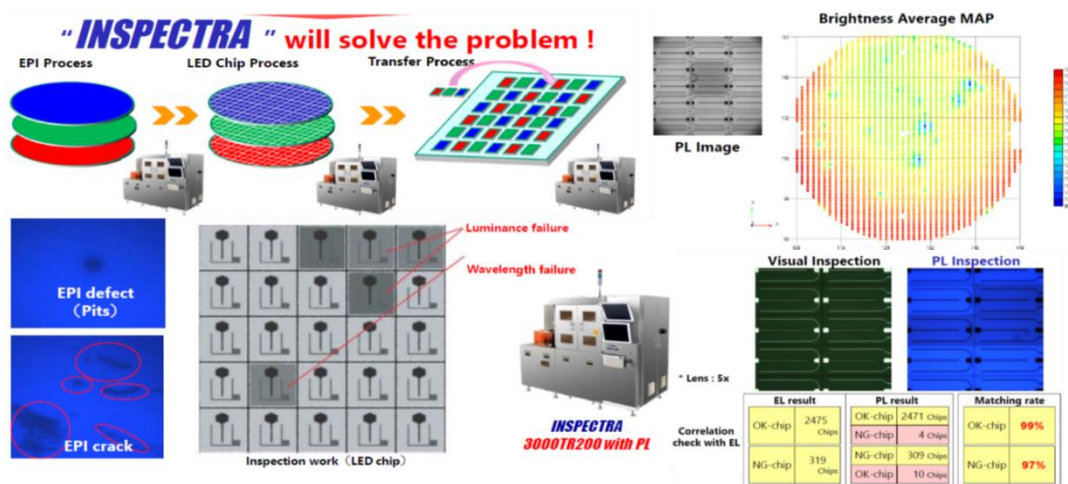


图 2-22 非接触式 PL 检测技术

资料来源: Inspectra

以光线自动检测工具进行零接触检测的 Micro-LED 检修解决方案,检测完以后使用激光修剪工具,根据检测结果剔除 Micro-LED 芯片不良品。

(5) 非接触式 EL 检测技术

结合了非接触型 EL 测试与波束定位 (BAR) 的转移方法,能够将优良的 Micro-LED 芯片高速转移到目标基板上。

(6) 紫外线照射光电检测技术

通过对 Micro-LED 芯片加上电压,然后进行紫外光线的照射,检测出性能不佳或者异常的 Micro-LED 芯片不良品。

2.2.4 修复技术

在通过检测技术挑出 Micro-LED 缺陷晶粒之后,如何有效维修并替换坏点 pixel 也是 Micro-LED 显示领域不可或缺的一项技术。目前针对 Micro-LED 坏点的修复技术,主要包括冗余电路修复技术、选择性激光修复技术及选择性拾取修复技术等。

(1) 冗余电路修复方案: 由于 LED 外延生长及制备过程中的不

均一性，EL/PL 由于技术局限性也难以检测出个别坏点，而且转移和键合技术不够成熟、良率较低等，以上原因难以避免在转移并键合到基板后会产生坏点。目前，为了方便坏点修复，LED 键合位置会做冗余设计，当键合上去的 LED 被检测为坏点时，对其连接电路进行切断，使其不能再对电路产生影响，后续在备用位置键合新的 LED，完成修复动作。冗余电路修复流程如图 2-23。

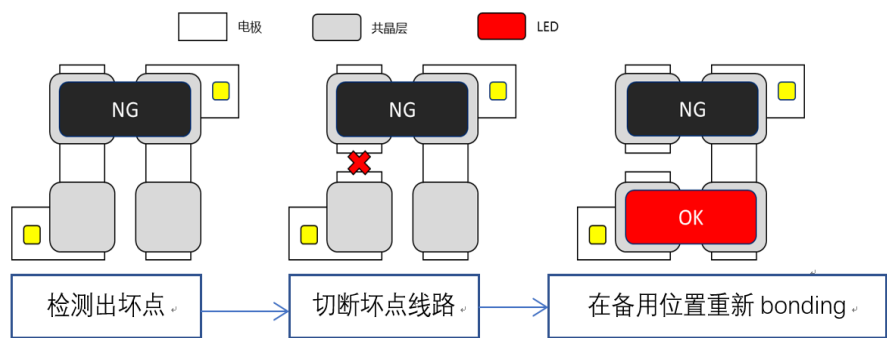


图 2-23 冗余电路修复流程图

（2）选择性激光修复方案：利用光线自动检测工具进行零接触检测，检测完以后使用激光修剪工具进行修复，根据检测结果剔除 Micro-LED 芯片不良品。

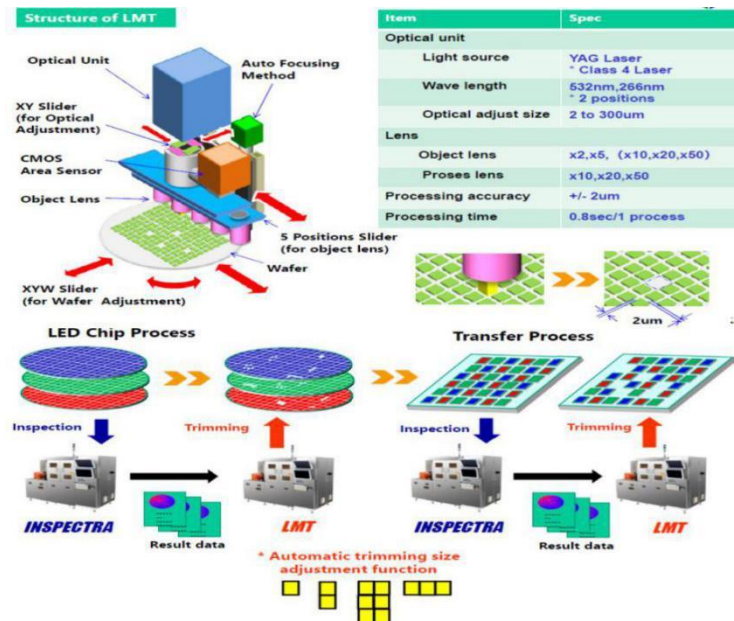


图 2-24 选择性激光修复流程图

资料来源：Toray

(3) 选择性拾取修复方案：结合非接触型 EL 测试与波束定位 (BAR) 的转移方法，能够只将好的 Micro-LED 芯片高速转移到目标基板上，同时也可进行替换修复。

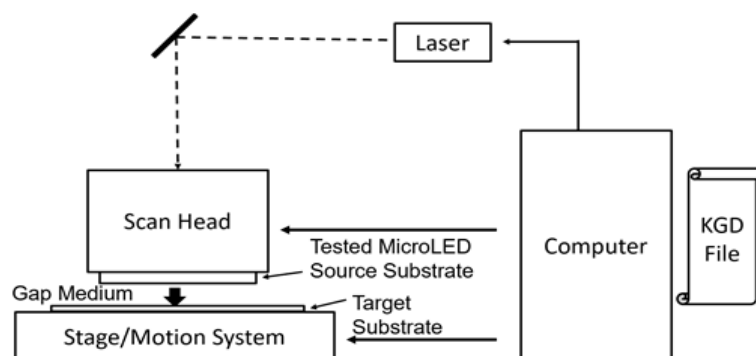


图 2-25 选择性拾取流程图

资料来源：LEDinside

2.3 驱动（控制）技术路线分析

2.3.1 TFT 驱动

(1) 驱动因素

薄膜晶体管（Thin Film Transistor, TFT）自 20 世纪 60 年代发明以来，一直有着广泛的应用，发展速度也非常迅速。从非晶 Si TFT 到多晶 Si TFT，从高温多晶 Si TFT 到低温多晶 Si TFT，技术日趋成熟，应用对象也逐渐发展，可以驱动传统 LCD 和 OLED。对于未来市场的主力 Micro-LED 来说，大面积低密度的显示产品中基本可以继续延用 TFT 作为驱动。

(2) 性能分析

非晶硅薄膜晶体管（a-Si:H TFT）：20 世纪 70 年代提出非晶硅薄膜晶体管技术。器件半导体层中通常含有大量的悬挂键，载流子的迁移率很低，一般小于 $1\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ，通常会进行氢化处理以提高迁移率；制作温度低，可用玻璃为基底，并具有大面积均匀性、能实现

大面积彩色显示、具有大容量、高像素显示性能，但由于较低的迁移率，采用非晶 Si TFT 工艺很难制备高性能、全集成的超薄型结构紧凑的显示器模块。

多晶硅薄膜晶体管 (Poly-Si TFT)：TFT 以多晶硅 (Poly-Si) 为半导体层，相对于 a-Si:H TFT，Poly-Si TFT 具有较高的迁移率、响应速度较快、易高度集成化、具有 P/N 型导电模式、自对准结构、抗光干扰能力强、分辨率高、可以制作集成化驱动电路等优点。多晶 Si 薄膜工艺主要分为高温工艺和低温工艺。高温工艺需要以昂贵的石英为衬底，TFT 性能好，但只适用于中小尺寸的显示屏或投影屏；低温多晶硅(LTPS)TFT 由于其低功耗、轻便、薄型、提供大电流和系统集成性而被广泛地应用于有源(主动)驱动显示薄膜晶体管液晶显示 (TFT-LCD) 和主动矩阵有机发光二极管显示 (AMOLED) 中，获得低温多晶 Si 薄膜并低温制备多晶 TFT 是实现有源矩阵显示的关键。

铟镓锌氧化物薄膜晶体管 (IGZO-TFT)：IGZO-TFT 以氧化物半导体材料充当半导体活性层。在结构上与非晶 Si 薄膜晶体相似。但氧化物薄膜晶体管具有较高的电子迁移率，实现极低的漏电流、较大的驱动电流、较快的器件响应速度。IGZO-TFT 的导电沟道属于 N 型沟道，器件的迁移率大致为 $10\sim 20\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ，开关比为 $10^7\sim 10^9$ ，开启电压 $-2\text{V}\sim 2\text{V}$ 。IGZO-TFT 器件在可见光谱范围均有较高的光透过率，制作工艺相对简单，但仍然有器件工艺稳定性较差等缺点。目前已经在中尺寸的 TFT-LCD 产品中，以及大尺寸的 AMOLED 产品中有所应用，可以实现高性能，全集成、紧凑的显示模块，也很有可能

应用于 Micro-LED 的 TFT 驱动中。

有机薄膜晶体管（OTFT）：有机薄膜晶体管以有机半导体材料充当栅绝缘层、半导体活性层。它是在无机薄膜晶体管基础之上发展起来的，两者结构相似。目前聚合物晶体管的特性还不能和传统的无机晶体管相比，由于有机半导体在常温下多为热跳跃式传导，表现为高的电阻率、载流子迁移率低，但有机薄膜 TFT 具有可弯曲显示的特点，因此不但耐冲击，而且重量轻、体积小，不仅改变了显示器的外观，应用环境也因此大为扩展且多样化。近年来随着高迁移率有机半导体材料、薄膜物理和器件工程等方面研究的快速发展，OTFT 的迁移率、开关电流比等性能已经达到和超越非晶 Si 晶体管的水平，但是实现大规模商业化仍然面对很多挑战。

（3）成本分析

非晶 Si TFT 由于起步最早，工业生产技术已经相当成熟，已经发展成为当今世界液晶显示器的主流产品；高温工艺下制备多晶 Si TFT 由于衬底材料昂贵，所以造价较高，低温工艺成本比高温工艺低，但整体来看多晶 Si TFT 的制造成本相对较高，未来的发展目标主要是进一步降低大面积制造的成本；发展较晚的 OTFT 和 IGZO-TFT 虽然已经表现出优良的性能，也开始逐步投入使用，但是实现大规模商业化和如何降低加工成本仍然是技术的瓶颈。

（4）良率

目前非晶 Si TFT 技术制备工艺成熟，相对简单，成品率高，适合于大面积生产。低温多晶 Si LTPS-TFT 技术亦相对比较成熟，产品

集中在小屏幕，良品率低。IGZO-TFT 技术刚刚起步，虽然已经部分商用，但是工艺尚未成熟。OTFT 仍处在研发阶段。

(5) 技术要点和待解决的问题

TFT 驱动电路是基于多个 TFT 构成的逻辑电路，其中包括多个开关 TFT 和驱动 TFT。在 Micro-LED 显示应用中，驱动电路需要至少支持 60Hz 的屏幕刷新频率，12bit 的灰阶等级以及高动态范围图像（HDR）。要满足以上性能指标，TFT 驱动电路通常需采用模拟与数字混合的驱动方式，来实现全灰阶响应。同时，针对驱动 TFT 需要加入阈值电压的补偿，这主要是因为其驱动 TFT 的不均一性，以及在工作过程中，每个晶体管会持续受到不同栅压的影响，阈值电压会发生漂移，这就需要对最为关键的驱动晶体管进行阈值电压补偿设计以保证输出的图像稳定正确。另外，要满足数字驱动需求，TFT 驱动电路的驱动能力是首要考虑因素。对于显示面板来说，尤其是高分辨率面板，负载电阻电容较大，TFT 驱动电路需要有较高的驱动能力，使得输出信号具有较短的上升下降时间以及较高较平稳的输出电平。这就要求驱动 TFT 有较高的迁移率。与此同时，对于显示矩阵而言，TFT 驱动电路需要保证连续多级输出信号稳定无衰减，同时要满足实际应用中低功耗的诉求，这就要求 TFT 需要有较低的漏电流，不需要借助额外的电源即可维持节点电压水平。

2.3.2 CMOS 专用驱动芯片

(1) 驱动因素

目前小点间距 LED 显示屏的驱动芯片一般采用多路恒流驱动方

式，具有匹配性好、可以准确设置输出电流的优势，并能够通过串行数字和脉宽调制（Pulse Width Modulation，PWM）使能信号（enable signal）的配合，使画面达到高灰度显示。

（2）性能分析

集成度/分辨率：随着 Mini-LED、Micro-LED 的发展使得 LED 大屏的像素点间距越来越低，集成度大幅度提高，使得传统的驱动 IC 排布及 PCB 走线越来越复杂，空间不够用，必须使用更高集成度的驱动 IC。

动态范围与对比度：传统驱动 IC 受限于 PCB 板级的灰阶时钟频率的传输，PWM 精度最高达到 14bit。此时理论对比度仅 16,383:1，未能满足 HDR10 要求。面向 Micro-LED 的驱动 IC 必须灰度达到 16bit 或以上，此时的理论对比度可达 65,535:1，满足 HDR10 的规格要求。

色域空间与驱动 IC 电流误差：HDR 定义的色域空间为 BT.2020，将 BT.2020 在 R/G/B 三原色的波长拿出来看，分别为红光 630nm、绿光 532nm、蓝光 467nm，对于目前 LED 外延技术，因绿光波长的半宽波长离散度较大，目前的显示设备不容易达成 BT.2020。而 LED 波长会随着电流大小漂移，所以驱动 IC 的电流误差范围需要小于 1.5%。目前传统驱动 IC 的典型电流误差范围在 3%。

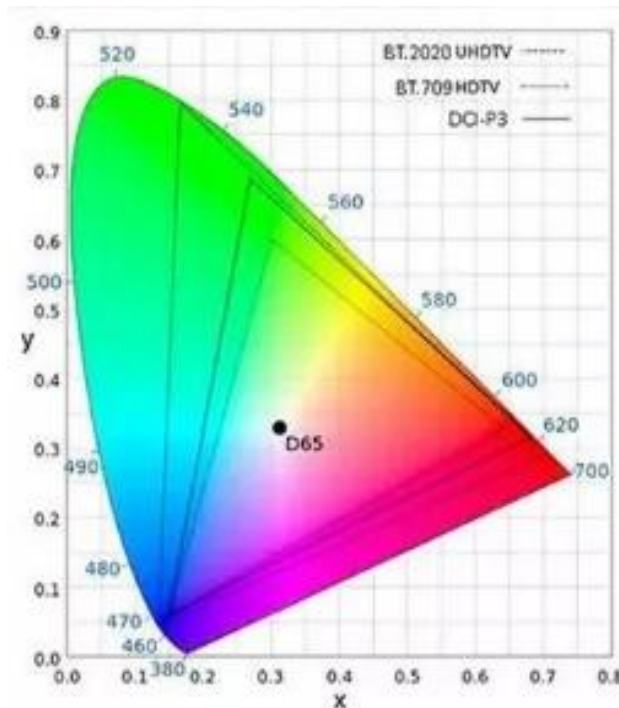


图 2-26 BT.709/2020 在 CIE1931 的覆盖范围

(3) 待解决的问题

高带载、高集成度的专用驱动芯片：Micro-LED 微小间距的趋势导致光源负载成倍增长，驱动芯片将面临提高单片带载能力从而简洁控制电路，需要解决多通道、高分时扫描专用驱动技术。当前专用驱动芯片支持 1~32 分时扫描技术，今后将逐步发展到 64 乃至 128 分时扫描技术，同时不降低刷新频率和灰阶等级。

高动态范围与对比度：当前驱动 IC 由于采用板级传输灰度时钟，PWM 精度受限至 14bit，在面向 Micro-LED 驱动 IC 中，将采用芯片内部集成灰度时钟再生、倍频等技术，使得 PWM 精度达到了 16bit 以上，满足 HDR10 的规范要求。

色域表现和快速响应：当前驱动 IC 的电流误差在 3%左右，在 Micro-LED 驱动 IC 中，可以通过纳米 CMOS Si 基器件、N 相位控制

及动态器件匹配等技术，将驱动电流误差控制到 1.5%以内，满足 BT.2020 的技术规范。同时，纳米 CMOS 器件快速开关特性匹配 Micro-LED 的快速响应，提升灰阶等级以及图像刷新性能。

智能图像处理驱动融合芯片，当前 LED 驱动 IC 和图像处理控制系统是分开的，Micro-LED 的兴起，将出现微型显示等应用。利用纳米 Si 基工艺，单片芯片集成图像处理、图像数据分包转包、恒流驱动等功能，也就是专用的图形处理器（GPU），势必将 Micro-LED 显示带入智能显示时代。

2.3.3 结论

与传统 LED 相比，Micro-LED 并没有呈现出更高的驱动复杂性，它只是较小版本的 LED。但 Micro-LED 技术的出现，将驱动新形式的显示终端。相应的，Micro-LED 驱动技术的进步将遵循以下规律路线：低成本高性能的 TFT 驱动技术、传统 CMOS 专用 IC 与 Micro-LED 融合、高刷新、高灰阶、广色域驱动产品也将被新应用因素促进，此外，随着 Micro-LED 增量应用终端的出现，融合处理与驱动乃至智能接口的驱动芯片产品也将涌现。

第 3 章 Micro-LED 应用

3.1 概述

Micro-LED 已经在显示、光通信、室内定位、生物和医疗领域获得了相关的应用。由于 Micro-LED 阵列可以达到超高密度像素并具备自发光特性，相比 OLED 和 LCD，有更高的发光效率、更长的寿命和更高的亮度，同时更具轻薄及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。未来，Micro-LED 将从平板显示扩展到空间显示、可穿戴/可植入光电器件、光通信/光互联、医疗探测等诸多领域。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)，是革命性下一代信息显示技术。

下面将针对 Micro-LED 的具体应用分章节进行介绍。在显示方面的应用，分成高 PPI 显示应用和低 PPI 显示应用，其中高密度显示包含 VR/AR 应用、投影显示等；低密度显示应用包含手表及穿戴式显示应用、车载显示应用、手机和平板电脑显示、智能电视、超大尺寸显示墙等。除了显示应用外，阵列照明、智能车灯、多彩阵列照明、光通信也是 Micro-LED 非常重要的应用分支。

3.2 VR/AR 的应用

3.2.1 概述

VR/AR 的快速发展推动了近眼显示的需求，而目前的近眼显示系统主要采用 LCoS（硅上液晶）和 OLEDDoS（硅上有机发光）两种微型显示技术。但是从显示器的技术特征来看，基于 Micro-LED 的微型显示技术（LEDDoS）由于具备了更好的显示特性，具有替代 LCoS 和 OLEDDoS 的可能。

VR/AR 头戴式装置屏幕对于显示器件有下述几大要求：

（1）像素密度：VR/AR 头戴式装置要求微显示器的像素密度大于 2000PPI，而基于 TFT 的普通显示器一般小于 800PPI，而基于硅基的微显示技术基本都能够满足这一要求，Micro-LED 由于驱动简单，高 PPI 的潜力更大。

（2）全彩化：OLEDDoS 的色彩能力非常优秀，LCoS 的色彩能力不如 OLEDDoS。对于 Micro-LED 微显示而言，目前的技术手段大多仍为单片单色，不利于 VR/AR 产品的推广，未来应向着单片全彩化的方向发展。全彩化目前是 Micro-LED 微显示器的技术瓶颈。

（3）响应速度：显示器上的像素从信号发生到被点亮的时间称为响应时间。若响应时间过长则会产生拖尾效应，使人产生眩晕感，影响用户体验。LCoS 的响应时间较长，具有拖影现象，OLEDDoS 和 Micro-LED 都属于电流驱动，其响应时间都为微秒/纳秒级，更容易满足 VR/AR 的要求。

（4）亮度：VR 对亮度要求不高，500cd/m² 已经可以满足大部分

应用，而 AR 设备将显示图像叠加在显示环境之上，尤其是在户外光照强度比较大的条件下，覆盖的图像要足够亮，可与环境光竞争。LCoS 亮度虽然足够高，但是功耗较大。Micro-LED 在亮度指标上，性能明显高于 OLED，具有较大优势，可同时适用于室内和室外场景。

（5）功耗/光效：对于 VR/AR 头戴式装置而言，功耗是非常重要的指标。LCoS 由于采用了被动发光的技术，其发光效率低，功耗较高。OLED 和 Micro-LED 的功耗一方面依赖于发光器件的光效，LED 是 OLED 的数倍，另一方面也依赖于驱动方式，数字驱动可以减小 Micro-LED 的功耗。

（6）灰阶：目前 LCoS、OLED、LED 等微显示器都采用了 8 位/色彩的方式，即 256 级灰阶，通过采用数字化的驱动或数模混合的驱动，可以达到更高的灰阶。

（7）寿命：LCoS 和 Micro-LED 微显示器的寿命都远大于 OLED 微显示器的寿命。

3.2.2 关键技术分析

3.2.2.1 像素密度

提高像素密度的关键是 Micro LED 的微缩制程技术，即将原来毫米级别的 LED 芯片微缩后达到 $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 等级左右。对于 VR/AR 用途的微显示器尺寸至少要做到 $5\mu\text{m}$ ，微缩制程技术的实现路径主要有三种：Chip Bonding（芯片焊接）、Wafer Bonding（晶片/晶圆焊接）、Thin Film Transfer（薄膜转移）。这三种技术路径各有优劣，对比如

下。

表 3-1 微缩制程技术实现的三种路径

制程种类	Chip Bonding	Wafer Bonding	Thin Film Transfer
描述	将 LED 直接切割成微米等级的 Micro-LED 芯片（含外延薄膜和基板），然后利用 SMT 技术或 COB 技术，将微米等级的 Micro-LED 芯片一颗颗键合于显示器的基板上。	在 LED 的外延薄膜层上用感应耦合等离子离子刻蚀（ICP），直接形成 Micro-LED 芯片（含外延薄膜和基板），此结构之间的固定间距即为像素间距。然后再将 LED 晶圆直接键合于含有驱动电路的显示器基板上，最后使用物理或者化学机制剥离基板，仅剩 Micro-LED 外延薄膜结构于驱动电路基板上形成显示像素。	方式 1: 使用物理或者化学机制剥离 LED 基板，以一暂时基板承载 LED 外延薄膜层，再利用感应耦合等离子离子刻蚀，形成微米级的 Micro-LED 外延薄膜结构； 方式 2: 先利用感应耦合等离子离子刻蚀，形成 Micro-LED 外延薄膜结构，再利用物理或者化学机制剥离 LED 基板，以一暂时基板承载 LED 外延薄膜层。最后，根据驱动电路基板上所需要的像素间距，利用具有选择性的转移工具，将 Micro-LED 外延薄膜结构进行批量转移，键接于驱动电路基板上形成像素。
显示像素种类	Micro-LED 芯片	Micro-LED 薄膜	Micro-LED 薄膜
显示基板尺寸	无尺寸限制	小尺寸	无尺寸限制
转移间距是否可调	可以	不可	可以
批量转移能力	不可以	可以	可以
EPI 一次利用率	低	中	高
EPI 多次利用率	无	中	高
成本	高	中	低

此外，高密度像素还受到 Micro-LED 的显示驱动基板所限制。基于单晶硅半导体集成电路的基板目前可达到的极限在 $1\mu\text{m}$ 以下。但是受到成本限制，目前性价比较高的显示驱动像素间距为 $5\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ ，但未来将会向更小的像素间距发展。

3.2.2.2 响应速度

响应速度对 VR/AR 等近眼显示设备是一个至关重要的指标。若

显示器响应速度过慢画面易出现拖尾效应，致使佩戴者产生眩晕感，直接影响用户体验。LCD 的响应速度为毫秒级别，OLED 的响应速度为微秒级别。Micro-LED 的响应速度为纳秒级别，可以为近眼显示系统的佩戴者提供优秀的佩戴体验。

3.2.2.3 高亮度、低功耗

高亮度对于应用在户外环境下的显示设备尤为重要。目前，Micro-LED 像素间距一般小于 $10\mu\text{m}$ ，微米等级的间距，每一点像素都能定址控制及单点驱动发光。与其他 LED 相比，Micro-LED 具有最高的发光效率和发光能量密度，且还有提升空间。可穿戴设备 80% 的能耗都在显示器上，发光效率的提升，有利于显示设备的节能，其功率消耗量约为 LCD 的 10%、OLED 的 50%；发光能量密度的提升则可以有效的节约显示设备有限的表面积，并部署更多的传感器。与 OLED 相比，Micro-LED 的亮度是前者的 30 倍左右；若达到同等显示器亮度，Micro-LED 只需前者 10% 左右的涂覆面积。

对于近眼显示设备中微显示器亮度的提高和功耗的降低，可以从 Micro-LED 制造工艺和驱动方式方向着手。

3.2.3 结论

LCD 显示经过多年发展，技术成熟，成本低廉，在 VR/AR 小尺寸显示设备中占据一部分市场。OLED 显示技术的出现使显示行业摆脱了传统 LCD 的背光源，开创了自发光显示的未来发展方向。OLED 显示具有画质优良、轻薄、功耗低、可柔性显示等优点，正在逐步代替 LCD 显示器。在相当一段时期内，LCD 和 OLED 仍将会共存于市

场中。Micro-LED 与 OLED 相比较有更好的颜色表现、更久的工作寿命、更高的亮度、更低的功耗等优势，更加适用于 VR/AR 头戴式近眼显示设备的应用场景。

Micro-LED 在显示性能上虽然存在各种优势，但其技术处于发展的初期阶段，存在多种技术路线，同时也还有很多的工程问题需要解决，仍然有待继续发展和进步。但在越来越多的显示企业及科研机构共同推动下，Micro-LED 显示技术在近年内将会有突破性进展。随着 5G 网络及工业 4.0 时代的到来，互联网+、物联网、人工智能、VR/AR 等新技术的出现及融合，对平板显示提出了更高的要求，这必将推动平板显示技术的快速发展和更加广泛的应用。

3.3 投影显示

投影显示主要由光源、照明引擎、光阀控制芯片、投影镜头等几部分组成，只有各部分参数匹配设计才能达到高光效、高画质、高可靠性的显示效果，以光阀控制芯片类型（DMD、LCOS、LCD）和尺寸为主线，以亮度为核心指标，涉及到的产品包括微投影、大投影、高亮投影等。

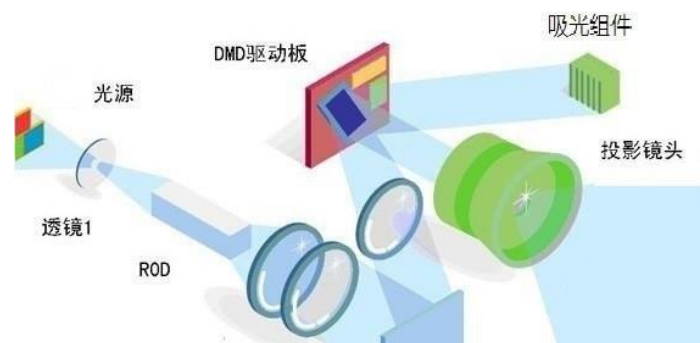


图 3-1 投影显示技术示意图

Micro-LED 每一点像素都能定址控制及单点驱动发光，应用到平

面显示技术上具有高亮度、低功耗、超高解析度与色彩饱和度等优点。其作为投影光源的优缺点主要表现为如下：

（1）光源亮度：单点芯径小，模块后的阵列 Micro-LED 的光源亮度较普通 LED 高；

（2）光谱稳定性：色飘较小，具有较高的光谱稳定性；

（3）寿命：光衰小，寿命可达 3 万小时以上；

（4）光谱带宽：光谱带宽较窄，色彩饱和度高；

（5）成本：作为投影光源时，对缺陷的容忍度较大，具有较好的成本优势；

（6）光源综合效率：具有较高的电光转换效率，特别是绿光 Micro-LED 与现有的 LED 相比，直接出绿光，而不是采用蓝光激发荧光粉产生绿光的机制，体模量较低，光源综合效率比现有的 LED 更高。

综上所述，Micro-LED 作为投影光源应优于现有的 LED，但目前 Micro-LED 在平板显示中为小电流驱动方式，而在投影上应用则需大电流驱动，阵列 Micro-LED 在大电流驱动下的表现及其配套的封装散热机制还有待进一步开发研究。

3.4 小尺寸穿戴式显示

3.4.1 概述

主流穿戴式电子设备主要包括智能手环和手表等，要求其显示屏体在室内外各种环境下可靠显示，且可以在电池供电条件下长时间工作。因此，屏体亮度高，功耗低，重量轻，可靠性好是主要技术需求。

目前市场主流穿戴产品普遍具有类似的显示性能指标：1 英寸~1.7 英寸显示屏体，280PPI~330PPI 分辨率，400nit 或更高亮度。Micro-LED 显示屏体需要在主要指标上媲美既有产品，方可取得市场认可。

3.4.2 关键技术分析

芯片尺寸：由于穿戴屏体的尺寸较小，大尺寸 LED 晶圆的外延生长均匀性问题对穿戴屏体显示画质的影响较小。然而，穿戴产品要求 Micro-LED 像素芯片尺寸不超过 30 μm ，甚至小于 20 μm 。小尺寸的 LED 芯片受表面晶格缺陷影响，存在较大比例的载流子非辐射复合，导致发光效率偏低。LED 加工厂商需要改进工艺以解决这个问题。

驱动技术：LED 芯片在不同电流密度下的发光效率变化较大，导致传统平板显示驱动电路难以满足其显示亮度灰阶展开的要求。因此，需要开发脉宽调制（PWM）模式驱动电路及其配套 IC，以改善灰阶显示效果。

转移技术：穿戴产品的屏体尺寸较小，可由较小尺寸的转移机台实现 LED 批量拾取，转移和键合操作，这有助于降低转移设备成本。但高 PPI 对巨量转移精度的要求更为苛刻，转移和修复技术难度均较大。尤其是选择性转移工艺（如静电或电磁转移方式）的转移头设计面临更大难题。非选择性印章转移（如范德华力转移方式）难度相对较低。而其综合良率可以通过在 LED 晶圆上分区检测和拾取来改善。

色彩转换技术：高分辨率屏体的彩色化技术面临诸多挑战。喷墨打印量子点墨水（QD ink）的方案受制于打印精度，暂时无法实现超

过 300PPI 的分辨率。量子点光刻胶（QD PR）采用光刻工艺可以实现所需的图案精度。但量子点在光刻胶内的掺杂浓度有限，加厚胶层至 10 μ m 以上也会带来曝光困难的问题。因此，量子点彩膜的显示色域目前仍是瓶颈。此外，量子点在胶层内的光转换效率降低，化学稳定性和曝光稳定性不佳的问题也有待解决。为了回避量子点彩膜面临的诸多问题，R/G/B 三色 LED 分次巨量转移的方案是另一可能途径，但多次巨量转移的工艺难度较单次转移更大。

3.4.3 结论

穿戴产品面向户外便携应用场景，要求显示屏体具备高亮度，低功耗的优点。上述既有产品的 450nit 屏体亮度在实用中仍略显不足。这是由于传统 LCD 和 OLED 显示技术的固有短板，亮度-功耗-可靠性指标始终难以兼顾。Micro-LED 芯片发光效率较 LCD 和 OLED 更高，因此有望在相似功耗下实现 1000nit 甚至更高亮度，更好满足户外使用需求。

此外，户外应用的穿戴屏体要求对紫外线直射、水汽侵蚀和温度波动的耐受能力较好。传统 LCD 和 OLED 器件基于有机材料，在外界环境影响下的稳定性较差是其硬伤。而 Micro-LED 屏体使用无机物材料，在户外使用环境的长期稳定性更好，使用寿命更长。

Micro-LED 在穿戴产品领域面临的主要挑战在于生产成本。穿戴类产品的价格普遍低于同时代的手机、平板电脑或台式显示器，因此对显示屏体成本控制的要求也更加苛刻。

综上所述，Micro-LED 屏体具有高亮度、低功耗、长期稳定性、

寿命长等显著优势，这些特点决定其比传统的 LCD 和 OLED 显示技术更适合于小尺寸穿戴显示应用，而控制生产成本是 Micro-LED 技术能否实现商业化的关键因素。Micro-LED 穿戴产品将在 2020-2021 年迎来快速增长。

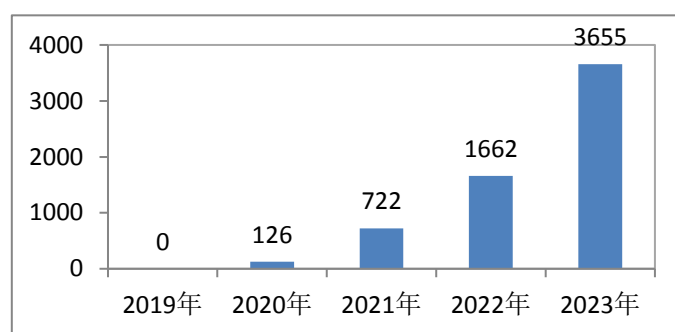


图 3-2 未来五年预期穿戴式 Micro-LED 显示屏体产量 (千台)

数据来源: LEDinside

3.5 手机和平板电脑显示

3.5.1 概述

目前主流手机采用的屏幕，从大范围上讲都可以归类为 LCD 与 OLED。平板电脑基本上还都是采用 LCD。但是手机和平板电脑在产品性能、形态方面都有采用 Micro-LED 的驱动力。

(1) **实现超高亮度显示。**理论上，Micro-LED 亮度可以达到 100,000nit，远高于 LCD 的 3,000nit 和 OLED 的 1,500nit 的水平。Micro-LED 的高亮度特点，使消费者在光照较强的环境中也能很容易看清屏幕，因此特别适合于经常在户外使用的产品。

(2) **实现更高分辨率。**Micro-LED 显示屏其像素密度可以做到 1500 PPI 以上，远高于 LCD 的 800PPI 和 OLED 的 400PPI 左右的水平。

(3) **实现低功耗长续航时间显示。**对于 Micro-LED 显示，由于

其采用三原色子像素自发光的结构，其光效率理论上可以达到 95%。与使用有机材料的 OLED 相比，无机材料发光效率更高，功耗更低。Micro-LED 功耗要明显低于 LCD 和 OLED，显示相同的画面、相同亮度，其功耗大约只有 LCD 的 10%，OLED 的 50%。显示屏幕功耗的降低将明显改善移动产品使用的续航时间。以智能手机为例，目前 LCD 屏幕的耗电量普遍占到智能手机耗电量的 50%以上，若手机采用 Micro-LED 的显示屏，将显著降低智能手机的功耗、提升续航时间，极大地改善消费者体验。

（4）实现高对比度、高色域、更大视角的显示。由于每个像素的发光点尺寸可以做的更小，所以可以利用部分区域做黑底以提高对比度，而且像素不发光时是直接熄灭像素，所以容易实现更高的对比度。不管是 Micro-LED 采用量子点实现彩色化还是采用 R/G/B 三色 LED 实现彩色化，都可以实现比现在的显示屏幕更宽的色域，使得显示画面更加细腻、色彩更丰富绚丽。

由于 Micro-LED 晶片尺寸更小，光学设计上可以使得可视角度更开阔。除了上述四个主要驱动力，Micro-LED 还可以满足手机和平板电脑产品对于响应速度快、可以实现部分区域透明显示，易于实现屏下指纹、屏下摄像头、In-cell 触控等功能的融合。

3.5.2 需求分析

预计 Micro-LED 在 2023 年切入手机市场。预计 2023-2026 年，智能手机领域 Micro-LED 4 英寸外延片潜在的规模空间分别为 102 万片、291 万片、695 万片和 1019 万片。

表 3-2 Micro-LED 在智能手机领域潜在的市场空间预测

类别	2023 年	2024 年	2025 年	2026 年
智能手机出货量 (百万部)	1405	1475	1565	1560
单机尺寸 (英寸)	5.50	5.50	5.50	5.50
分辨率	1920*1080	1920*1080	1920*1080	1920*1080
总像素需求 (百万)	2913408000	3058560000	4288882500	4275180000
红绿蓝像素总需求 (百万)	8740224000	9175680000	12866647500	12825540000
LED Size (μm)	5	5	5	5
4 英寸外延片可切割像素 (百万)	324.13	324.13	324.13	324.13
切割效率	97%	97%	97%	97%
渗透率	4%	10%	17%	25%
4 英寸外延片需求 (百万)	1.02	2.91	6.95	10.19

数据来源: Trendforce

预计 Micro-LED 在 2022 年切入平板电脑应用市场, 以后四年渗透率为 5%、10%、15%、20% 的高端市场 (表 3-3 所示)。预计 2022-2025, 平板电脑领域 Micro-LED 4 英寸外延片潜在的规模空间分别为 2000 万片、3970 万片、8790 万片和 11720 万片。

表 3-3 Micro-LED 在平板电脑领域潜在的市场空间预测

类别	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年
智能手机出货量 (百万部)	155	154	153	153
单机尺寸 (英寸)	9.50	9.50	9.50	9.50
分辨率	2732*2048	2732*2048	2732*2048	2732*2048
总像素需求 (百万)	867246080	861650944	1269043200	1269043200
红绿蓝像素总需求 (百万)	2601738240	2584952832	3807129600	3807129600
LED Size (μm)	10	10	10	10
4 英寸外延片可切割像素 (百万)	66.97	66.97	66.97	66.97
切割效率	97%	97%	97%	97%
渗透率	5%	10%	15%	20%
4 英寸外延片需求 (百万)	2.00	3.97	8.79	11.72

数据来源: Trendforce

Micro-LED 作为新型显示技术，面临着成本高、良品率低、批量生产等一系列亟待解决的问题。Micro-LED 彩色化的技术突破，阵列化的 LED 技术如何柔性化，可折叠也是该技术要和 OLED 面板竞争要解决的技术问题之一。以上主要需要通过解决巨量转移、检测与修复等技术来实现成本的降低。作为平板电脑和手机背光的应用，同样成本都是最大的问题。需要靠 Micro-LED 成本的降低、驱动电路的简化来实现。

从显示画质的亮度、对比度、色域、清晰度，到功耗、寿命、工作环境、形态等各方面来讲，Micro-LED 不仅能够在各种应用场景下（含户外）都实现好的画质显示，而且能够达成超长的续航能力，还能够满足集成 In-cell 触控、人脸识别等传感器，是手机和平板电脑等移动设备最好的显示技术。

3.6 电视显示

3.6.1 概述

近年来，由于超高清电视的普及和 8K 电视的逐渐推广，对传统的 LED 显示屏也提出了更高解析度的需求，由于传统的 LED 显示屏采用电源管理（PM）驱动和 PCB 基板，目前其主要应用在像素间距大于 1mm 以上的显示应用中，随着像素间距的减小，采用的 PCB 基板的层数增加，单位面积的 LED 成本和驱动成本呈现指数级的增长，大大限制了 LED 在中大尺寸室内显示和 TV 显示中的应用。

目前小间距 LED 主要应用于公共服务、政府部门、工商业及交通系统、广电传媒以及电力能源等。在 TV 应用领域，由于 pitch 间

距为 0.1mm-1mm 之间，传统的微米 LED 灯珠尺寸无法满足应用需要，这为 Micro-LED 提供了广阔的应用空间。

由于采用 TFT 玻璃基板取代传统的 PCB 电路板，可以有效的降低 Micro-LED 在中大尺寸室内显示和 TV 显示应用中背板和驱动部分的成本，尤其是 pitch=0.1mm-2.5mm 的中大尺寸应用。

3.6.2 关键技术分析

3.6.2.1 大尺寸 Micro-LED 技术

（1）发展趋势

目前有两种技术路线：其一是采用直接大尺寸转移方式；其二则是通过模块化无缝拼接方式。

由于转移与 bonding 机台尺寸与精度问题以及大面积的检修效率问题，目前很难直接实现大尺寸 Micro-LED 的转移和 bonding。模块化无缝拼接技术部分则需要克服 TFT 玻璃基板驱动电路如何隐藏于显示区后面的问题。此外，由于采用模块化无缝拼接技术，与传统的 LCD 显示屏相比，可以用低世代线 TFT 生产线即可实现大尺寸拼接显示，可降低对高世代线 TFT 生产线的需求；用低世代线进行前期 Micro-LED 中大尺寸生产可降低生产成本。

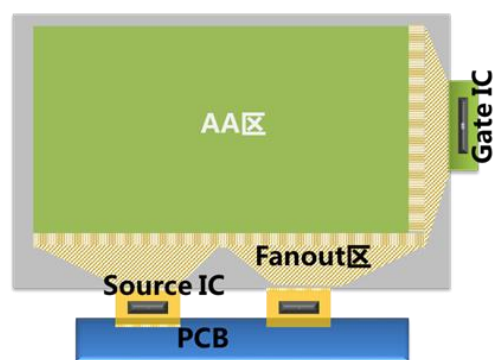


图 3-3 传统 TFT 玻璃显示面板示意图

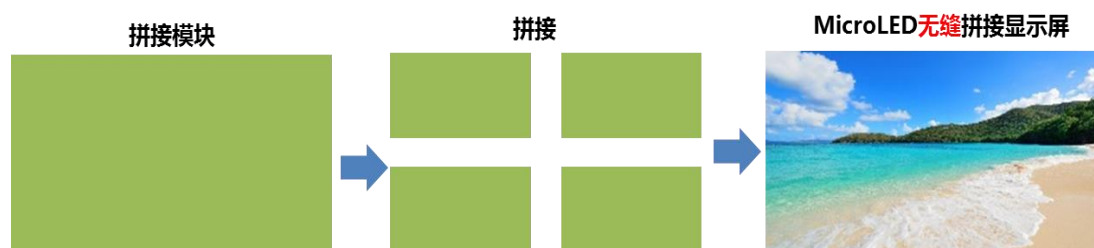


图 3-4 Micro-LED 无缝拼接显示屏示意图

（2）问题及挑战

由于 TFT 基板实现无缝拼接，需要克服 fanout 与驱动元件隐藏于 AA 区（显示区域），对于如何实现大尺寸高透明 Micro-LED 显示提出了挑战。

TFT 玻璃基板无缝拼接需要克服背板可靠性问题，尤其是采用色转换的大尺寸拼接显示器件。

3.6.2.2 背板技术

（1）中大尺寸 Micro-LED 需具有无缝拼接，亮度高，可靠性以及高解析度要求，需较高迁移率的氧化物半导体或 LTPS 的 TFT 方可应对，开发低成本，高迁移率，高稳定性的氧化物半导体材料是目前氧化物半导体技术开发趋势。

（2）在前期的中大尺寸 Micro-LED 显示中，预计背板技术将会以现有成熟的 IGZO 或 LTPS 进行导入。

3.7 超大显示墙

大尺寸及超大尺寸一般是指有效显示对角线尺寸不低于 75 英寸。这里有两种定义方式可供参考：第一种是大于最高世代面板产线的最大经济切割尺寸，比如 TFT-LCD 10.5 代线经济切割尺寸分别为 65 英寸和 75 英寸，定义大于 75 英寸的产品为大尺寸或超大尺寸；第二种是大于当前市场主流产品尺寸的 2 倍或显示面积大于 4 倍，即大于 4 块该产品的拼接尺寸，比如目前的 43 英寸和 55 英寸分别对应 86 英

寸和 110 英寸，定义大于 86 英寸的产品为大尺寸或超大尺寸。

在当前显示行业，TFT-LCD 产品依然占据市场主导地位，决定着市场的价格波动和趋势演变。一是近两年来各主要尺寸 TFT-LCD 面板的全球出货量数据对比。虽然在低端市场 32 英寸依然占据全球最大出货量，但在中尺寸市场 43 英寸、55 英寸以及 65 英寸的出货量有明显的上量和市占率。在大尺寸市场方面，82 英寸、85 英寸以及 86 英寸虽不及前述尺寸出货量等级，但存在一定的市场需求，且呈快速上扬之势。这意味着市场朝着大尺寸方向不断演变和发展。

大尺寸显示方案若从产品形态分类存在两种方案：一是单片方案，是指整个显示屏幕由一整块完整的屏幕构成；二是模块化拼接方案，是指最终显示屏幕由一个个子屏幕拼接而成，不同技术方案拼接缝隙大小不同。

相比 TFT-LCD 或 OLED 显示技术，Micro-LED 显示同样需要 TFT 背板作为像素开关和驱动电路，不同点在于 Micro-LED 芯片不是直接生长在玻璃基板上，而是把生长在不同衬底外延层上的 R/G/B LED 芯片经切割转移焊接到 TFT 背板对应像素位置上作为光源。根据其产品形态和技术构成，Micro-LED 核心技术可以归纳为：LED 芯片的微型化、新一代 TFT 背板驱动、巨量转移与焊接、Micro-LED 全彩化以及 Micro-LED 的系统驱动。在大型化方面，Micro-LED 凭借模块化拼接方案，具有不受显示屏物理尺寸的限制优点，且可以实现无缝拼接效果。

表 3-4 各种显示技术的优劣比较

项目	TFT-LCD	OLED	投影	Micro-LED
发光方式	被动	主动	被动	主动
亮度	中等	中等	低亮	高亮
视角	差	好	好	好
色彩	中等	好	一般	最好
响应时间	毫秒级	微秒级	毫秒	纳秒
对比度	中等	百万级	一般	百万级
可靠性	中等	一般	中等	最高
寿命	数万小时	数千小时	数千小时	数万小时
大尺寸	拼接、缝隙大	拼接、缝隙大	单片	拼接、无缝拼接
柔性	不能	可以	不能	可以
成本	低	高	高	最高
成熟度	非常成熟	较成熟	成熟	不成熟

资料整理：CASA Research

3.8 车载应用

3.8.1 概述

目前市面上的 TV、智能手机、车载显示等大多还是 LCD 屏，因为其发展时间最久，技术成熟度最高，成本最低，价格也为大众所接受。但随着生活水平的提高，消费大众逐渐开始对显示屏的对比度，色彩饱和度、清晰度、续航时间等有了更高要求，这就激励着终端厂商、面板厂商甚至上游材料及设备厂商积极开发新的显示技术，OLED、Micro-LED 技术应运而生。

车载显示主要包括仪表显示屏、中控显示屏、HUD、数字式后视镜、车内娱乐显示等部分。车载显示器的基本规格都必须提供防尘、抗震功能，在温度方面，要能够承受-30℃~+85℃、120℃的高低温差，例如液晶面板中的液晶会在低温的环境中，出现冻结的现象，而导致无法正常显示画面。

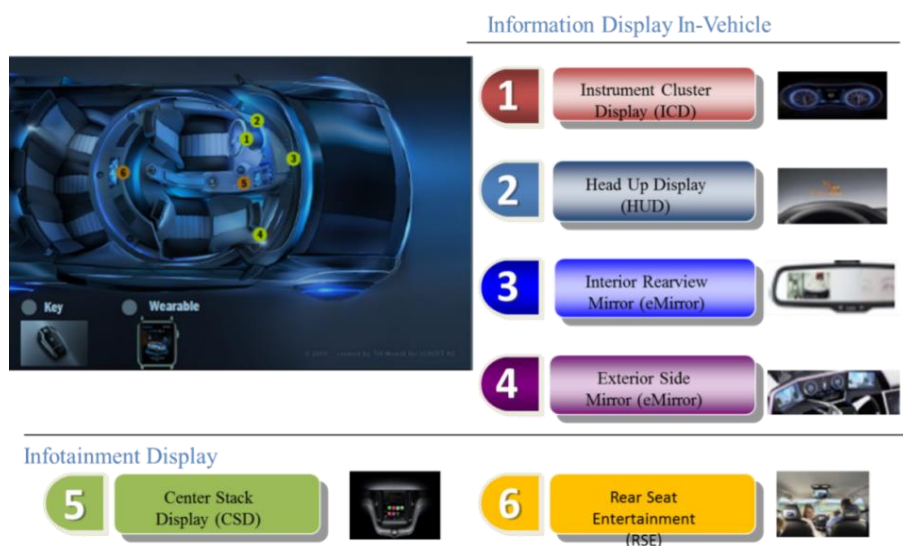


图 3-5 车载显示类型

此前，车载显示追求一体化设计，生命周期比较长，但现在分离屏设计越来越多，车载显示生命周期不断缩短，与消费类电子产品显示屏趋同，呈现出大屏化、高清化、交互化、多屏化、多形态化等五大发展趋势。

（1）大屏化

大屏化成为车载显示的一大趋势。北汽车联网平台架构师褚景尧指出，随着智能驾驶技术的不断发展，汽车将从“四个轮子+四个沙发”向“四个轮子+一部手机”演进，届时，车载显示屏的尺寸就像手机屏一样变得越来越大。而且在车内屏幕可以进行横向和纵向扩展，为大屏提供展示空间。实际上，现在已经有不少汽车开始搭载超大屏。

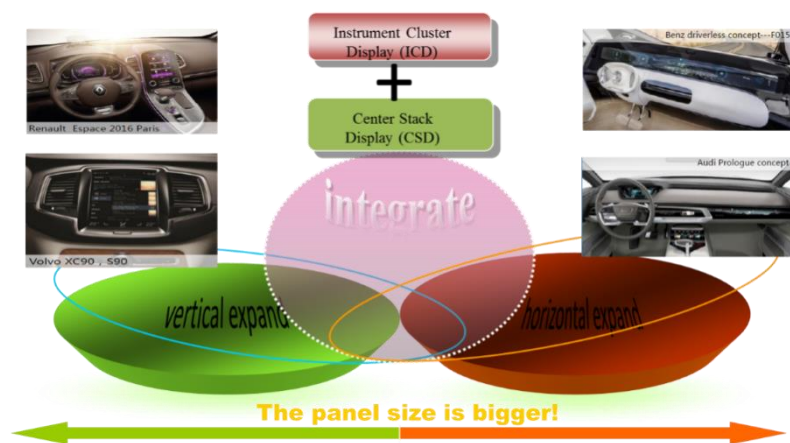


图 3-6 车载显示趋势

(2) 高清化

在手机屏的教育下，消费者对车载显示分辨率提供更高的要求。低分辨率的显示屏已经满足不了当前消费者的需求，车载显示朝着更高分辨率的方向发展。IHS Markit 指出，低温多晶硅液晶显示（LTPS-LCD）电子迁移率比 a-Si LCD 更高，能够满足更高分辨率的要求，而且 LTPS 具有窄边框、高亮度、In-cell 优势，LTPS 将被越来越多的车厂采用。群智咨询指出，JDI 和群创最早量产 LTPS，现在天马、LGD、友达都已进入，而且从 2017 年开始以 JDI 为首的面板厂商开始向车厂大力推 LTPS，2017 年 LTPS 在车载显示市场份额达到 2%。实际上，除了分辨率之外，车载显示高清化还对对比度、视场角、光学指标、响应速度等提出了更高的要求。



图 3-7 技术效果对比图

（3）交互化

与智能手机类似，触控可能成为车载显示的标配。车载显示对触控拥有更高的要求，需要更加灵敏、更加轻便。当前，车载显示大量导入电容式触控应用，敦泰电子指出，2017 年 TP 搭载率达到 22%，到 2020 年将达到 58%。

除了触控技术之外，车载显示还有更多的交互技术待导入，例如，语音识别、手势识别、生物识别技术等。交互方式不断完善让用户能够进行本能的交互，使车载系统更加人性化，让车载系统变成像机器人一样有情感交互和智能交互。



图 3-8 触控技术



图 3-9 空气触控技术

（4）多屏化

除了仪表盘、中控显示，车载显示还有更大的想象空间。天马认为，多屏化可以从两个角度来看，第一是从 0 到 1，之前没有屏的地方是不是可以搭载屏，例如后座控制显示屏、车钥匙显示屏等，第二是从 1 到 n，HUD 和 Mirror 以前都是高端汽车才能配备，一方面是为了安全，另一方面是 AR 技术的加入，带动了 HUD 的发展，Mirror 也在逐渐普及，HUD 和 Mirror 都将逐渐发展起来。

多屏化将带来 ECU(Electronic Control Unit)电子控制单元的整合化。就像 PC 一台主机配备多台显示器一样，车载显示也会出现一机

多屏的现象。这样的好处是减少 100-200 美元的成本，减轻重量和油耗。现在已经有不少车厂在做这样的整合，它们的内部组织架构也在进行调整。



图 3-10 未来多屏化形式

(5) 多形态化

与平面显示不同，柔性显示将给车内设计带来更大的想象空间。异性屏、柔性屏和透明屏将打开个性化设计的空间。这对于车内空间布局和设计留下了更广的思考空间，能给用户带来更高的科技感。



图 3-11 天马-车载曲面屏-2017CES

图 3-12 柔宇-仪表盘-2016CES

3.8.2 关键技术

要将 Micro-LED 技术应用到车载领域并实现量产，如图 3-13 所

示，从上游的 LED 芯片制备、键合材料的开发、转移技术及设备的创新设计、驱动 IC 的开发，到中游面板厂商的驱动电路提升，都需要产业链各环节厂商及技术人员的通力合作。



图 3-13 车载应用的相关技术要求

3.9 可见光通信

3.9.1 概述

近年来，可见光通信技术（VLC）发展迅速，传输速率不断提高，目前已经突破 40Gbps，单颗 Micro-LED 达到 11.74Gbps，并且还在不断提高。目前可见光通信常用的发射器件有以下几种：荧光粉 LED、R/G/B LED、Micro-LED、激光器（LD）。其中，Micro-LED 功耗低，调制带宽高，可以与显示耦合，实现高密度并行通信，达到较高速率，在可见光通信系统中有巨大的应用潜力。

可见光通信的主要成本在于发射器件、接收器件、附属驱动电路、

用于可见光通信的专用芯片等，价格成为限制可见光通信发展的重要问题之一。为此，需要不断改进工艺，控制生产成本，才能使可见光通信得以大规模推广；同时，以市场驱动技术发展，通过规模化生产降低成本，促进可见光通信成本的降低。

3.9.2 关键技术

3.9.2.1 高速通信

随着 GaN LED 在可见范围内的发展和广泛应用，VLC 能够克服 RF 频段有限和受各国政府管制的困境。目前的商用 GaN LED 通常用于照明或显示应用，单个芯片的设计旨在优化效率、输出功率和成本等参数，而不是针对 VLC 重要的参数（如调制）带宽。选择大尺寸 LED，部分是为了减轻"效率下降"现象的影响，即 GaN LED 的内量子效率（IQE）在电流密度（几十到数百 A/cm²）下达到峰值，增加面积允许器件在其工作电流范围内运行，而在 IQE 保持相对较高，大面积也可缓解散热方面的工程挑战。但是大面积会导致 LED 的调制带宽最终受其电阻-电容（RC）时间常数的限制，表 3-5 中概述的各种方法增加调制带宽。

表 3-5 Overview of approaches to increase the modulation bandwidth of GaN LEDs

LED technology	Maturity	Bandwidth (MHz)
High Power Broad area LEDs	Commercial mass production	20
GaN RCLEDs	Academic prototypes	200
Semi/non-polar GaN LEDs	Academic and industrial research on epitaxial growth	Prospect for 1000 MHz
Bespoke GaN epitaxial structures	Purely academic research	120
GaN Nano-wire LEDs	Purely academic research	1100
GaN Micro-LEDs	Early stage of commercialization (targeting niche-markets)	>400
Plasmonic LEDs	Academic prototypes	200

资料整理：CASA Research

商用照明 LED 的调制带宽仅为 5-20 MHz，难以满足高速通信的要求。与传统 LED 相比，Micro-LED 的尺寸小得多，具有较小的电阻-电容时间常数和较高的工作电流密度等优势，其调制带宽可达 1 GHz 以上，与 QAM、PAM、OFDM 等调制技术结合，基于 Micro-LED 的可见光通信系统可满足 10 Gbps 以上的高速数据传输，使用多颗 Micro-LED 进行并行通信，则传输的速率会更快。通过不同的系统设计，基于 Micro-LED 的可见光通信系统可以应用于自由空间、水下等场景，尤其是在室内通信方面具有广阔应用前景。另外基于 Micro-LED 的塑料光纤（Plastic Optical Fibre, POF）可见光通信系统可以获得相较于自由空间更高的传输速率。

3.9.2.2 并行传输

单个 Micro-LED 的光功率较小，不能满足高速可靠性要求。基于 MIMO 技术，采用 Micro-LED 阵列可以实现高速并行通信，能够数倍提升数据传输速率，并且利用 CMOS、TFT 技术可以控制 Micro-LED 阵列并进行独立调制，完善光学设计和电学设计后，可以有效降低阵列中不同 Micro-LED 的相互干扰。

3.9.2.3 可同时做高速探测器

Micro-LED 的有源区可以吸收特定波长可见光转化为电信号，这种特性使得 Micro-LED 可以用作光电探测器。通过一定光学设计和电学设计，Micro-LED 可以形成集发送和接收为一体的器件，这为实现双向通信提供了技术基础。

3.9.2.4 智能显示

Micro-LED 显示与可见光通信结合是未来智能显示的发展方向之一。Micro-LED 显示具有高分辨率、高对比度、高亮度等优点，随着转移打印等技术的完善，Micro-LED 显示有望成为下一代显示的核心技术。由于 Micro-LED 具有优良的调制性能，Micro-LED 显示与可见光通信结合目前技术上已经可以实现，将通信和显示集于一体的智能显示技术符合未来智能城市的发展潮流。例如利用 PWM 叠加 OOK 调制和 CMOS 像素驱动单元，同时实现了灰度控制和 VLC 控制，获得了同步的显示和通信功能，改进的驱动程序、更先进的编码和调制方案可以进一步提高 VLC 的数据速率。

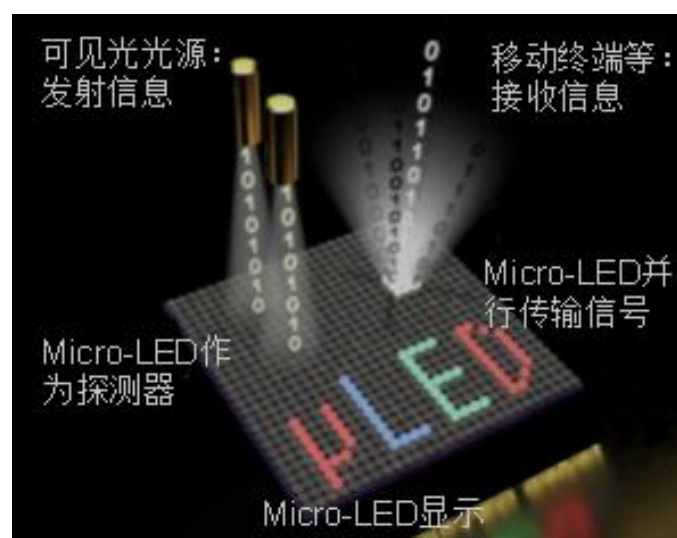


图 3-14 智能 Micro-LED 显示芯片示意图：具备显示信息、发射信息和接受信息的功能

资料来源：复旦大学

基于 R/G/B 巨量转移制备的全彩色 Micro-LED 显示是利用红绿蓝三种 Micro-LED 集成在一个像素点内，从而混色形成全彩色显示，具有高亮度、高对比度、低能耗等优点，相关 Micro-LED 本身具备高速显示和收发信息为一体的功能，同时需要设计相关适用于显示和可

见光通信的 CMOS 或者 TFT 驱动电路。

对于基于量子点转换全彩色 Micro-LED 显示系统，量子点的调制速率成为限制这类 Micro-LED 通信速率的关键因素，需要选取调制速率较快的量子点材料。

3.9.3 挑战与趋势

目前可见光通信还存在一些挑战，包括技术、应用、芯片、标准等方面：

（1）技术：在高速传输方面，可见光频段带宽 400THz，现有 LED 照明器件可用调制带宽最高只到 200MHz 左右，所以需要不断优化 LED 及其驱动电路，提升信息传输能力；在系统集成方面，涉及上下行链路的设计，与现有网络融合等，此外还存在通信距离与覆盖范围扩展问题；同时还有其它相关问题：作用距离、覆盖范围、低成本、方向对准等问题。

（2）应用：无论国外还是国内，对于可见光通信的具体应用大多数处于实验室研究阶段，并未形成规模化的应用。

（3）芯片：芯片的研究处于整个产业链的核心部分，国内外暂时还没有成熟芯片组设计出现。

（4）标准：可见光通信最终的标准还未形成。

由于 Micro-LED 自发光，光学系统简单，可以减少整体系统的体积、重量、成本，同时兼顾低成本、快速响应、并行通信等特性，故可见光通信与 Micro-LED 显示、照明等系统结合是重要的发展趋势，关键是通过改进发射器件的外延结构、器件工艺、封装材料、封装结

构等来提高发射器件特别是 LED 器件的调制带宽、发光强度、发光效率等。

3.10 总结

Micro-LED 的实现将带来诸多革命性的应用，其中最受关注的是显示方面的应用。相比 OLED 和 LCD，有更高的发光效率、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 可实现 VR/AR 的微显示、中小尺寸（2-20 英寸）车载/机载显示、柔性、透明显示屏、大尺寸显示屏（>50 英寸）和超大尺寸显示墙。尽管 Micro-LED 在显示性能方面有独特的优势，但现阶段由于 LED 外延成本较高，巨量转移的速度和转移良率还没有达到可以量产的水平，中小尺寸 Micro-LED 显示屏的成本是现有 LCD 的 20 倍，市场接受率较低，但随着技术的快速进展，并在一些特殊的应用领域如对全天候户外环境的车载/机载显示屏、高透明高亮度显示、高附加值的超大尺寸超高分辨率显示墙。预计到 2025 年，Micro-LED 显示市场产值将超过 100 亿美元。Micro-LED 芯片由于尺寸在微米级，正常显示像素在几百微米级，发光的 LED 芯片面积只占像素面积的百分之一，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。除了在传统显示应用外，Micro-LED 在 VLC 通信、阵列照明（含 LCD 背光）、空间光场显示、生物医学等多个领域有其独特的应用。到 2030 年将实现基于 Micro-LED 阵列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半导体信息显示（HISID）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、移动通信之后的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（Rich Media）崭新产业，预计市场将超过万亿美元以上。

第 4 章 Micro-LED 专利分析

4.1 背景概述

4.1.1 文献检索和数据处理

本部分专利数据来自 INCOPAT、PATSNAP 全球专利数据库，检索时间截止日期为 2019 年 6 月 30 日。涉及技术方面的专利数量统计按项统计，简单同族合并后为项，涉及各个国家专利布局数量统计按件统计。涉及日期统计数据为优先权日，享有多个优先权的以最早优先权日为准，无优先权日的以申请日为准。

4.1.2 技术分解

本文所研究的对象是 Micro-LED。技术分解总体原则：尊重产业技术习惯、利于分类检索，具体的技术分解按照产业链上-中-下游的顺序如下表所示：

表 4-1 Micro-LED 技术分解表

一级分支	二级分支
Micro-LED	衬底与外延技术
	芯片技术
	封装技术
	驱动/控制技术
	应用

4.1.3 数据检索

涉及 Micro-LED 的申请在 IPC 分类中主要集中在 H 部的分类号，少部分在 B 部、F 部和 G 部。根据所划分的技术领域边界及关键技术，综合采用分类号、关键词等检索要素进行检索。每个分支内的

文献数量均为各个技术组成数量的逻辑合集。

文献范围包括在 116 个国家/地区，2 个组织的收录专利文献。

4.1.4 验证部分

查全验证样本尽量随机选取，使用完全不同于检索过程中使用的检索要素进行构建，例如以相关发明人、申请人为入口寻找相关专利文献样本，尽量涵盖 Micro-LED 的各个分支。将样本集与总量进行“与”运算，得到样本集与总量的子集，即为总量中有效样本 A，样本集中与总量非相交的非有效样本 B，则查全率为： $A / (A+B) * \%$ 。

查准验证样本选取原则：从总量中随机抽样来统计有效文献数量；从 2010 年-2019 年的文献中，按年份随机选取一定数量专利文献样本进行阅读分析，判断是否本技术领域相关，其中相关样本为 A，不相关样本为 B，则查准率为： $A / (A+B) * \%$ 。

4.2 Micro-LED 技术全球专利态势分析

为了解 Micro-LED 技术专利申请的整体态势，本部分重点研究了全球范围内 Micro-LED 技术专利申请的趋势、专利的区域分布、主要申请人、IPC 技术分类以及主要地区和重要相关专利。

4.2.1 全球专利申请趋势

如图 4-1 为 Micro-LED 技术近 20 年全球专利申请趋势。Micro-LED 技术全球专利申请量呈增长态势。Micro-LED 技术在 21 世纪初开始出现，2000 年的专利年申请量为 15 项，此后年申请量持续下降。至 2012 年专利年申请量大幅度增长，2017 年专利年申请量达到 190 项，增长幅度达 10 倍以上，说明该领域开始受到持续关注。2018 年

-2019 年度专利申请数据尚未全部公开，初步预测仍然会呈现大幅增长趋势。

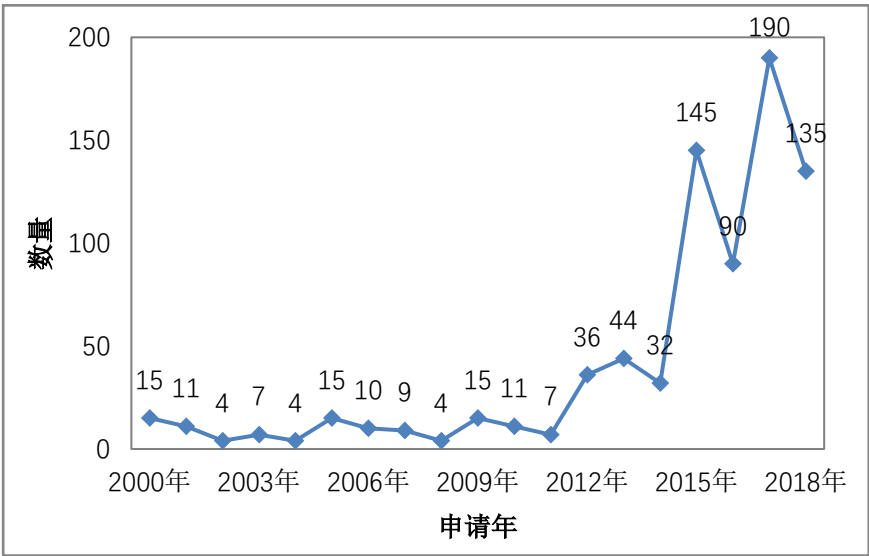


图 4-1 Micro-LED 技术全球专利申请趋势

资料来源：华创智道，incopat

如图 4-2 所示，选取了近 20 年全球专利申请量处于波动增长期的范围，图中绿色表示申请趋势，黄色表示授权趋势。可以看到，近些年来，该领域专利年授权率平均值在 50%左右波动，相对较高，说明 Micro-LED 技术仍处于技术创新上升期。

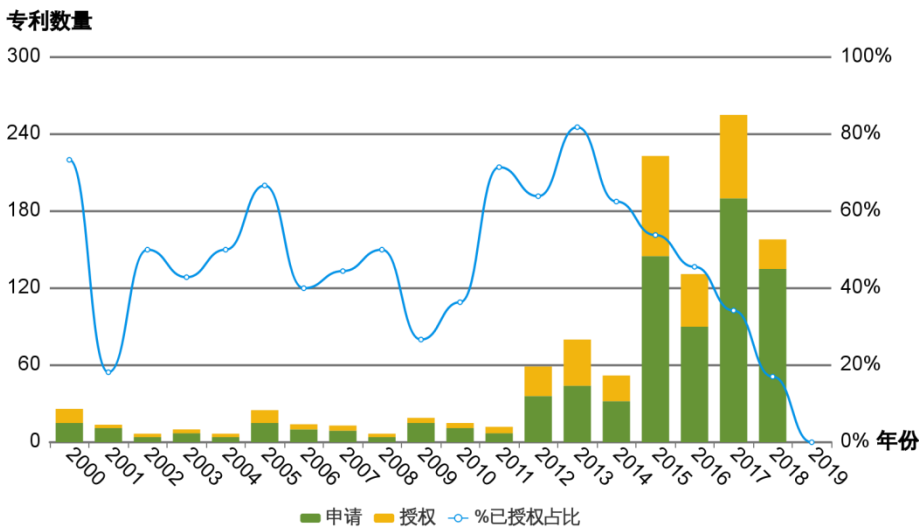


图 4-2 Micro-LED 技术专利趋势图

资料来源：华创智道，patsnap

4.2.2 全球专利区域分布

截止 2019 年 6 月 30，检索全球范围内相关专利申请共 789 项，通过全球专利区域分布的情况，有助于了解该领域全球研究的前沿地区和在不同国家区域的发展状况。

4.2.2.1 国家地区分布

如图 4-3 所示，为该领域全球范围内专利申请国家的分布情况，可以看出，专利申请的涉及国家或地区较为广泛，主要是中、美、欧、日、韩等。

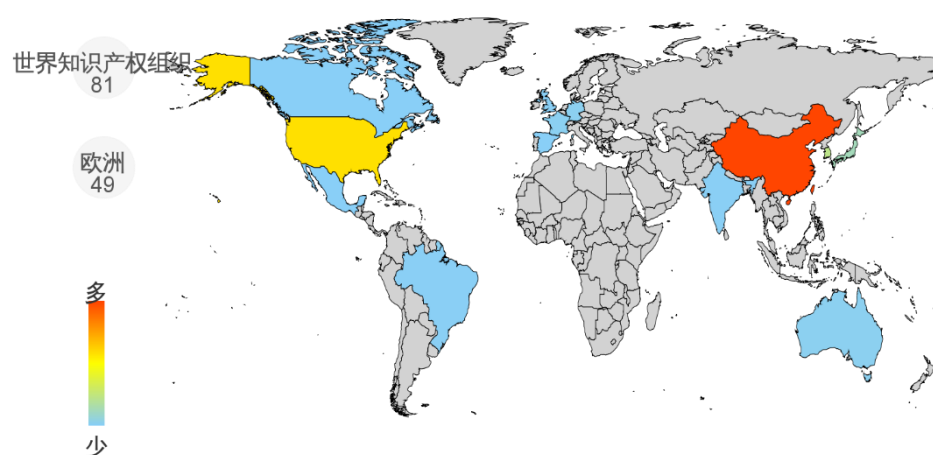


图 4-3 全球专利申请国家分布

资料来源：华创智道，incopat

如图 4-4 示出该领域全球专利主要国家专利申请量排名及其占百分比。Micro-LED 技术全球专利申请主要集中在 中国、美国、韩国、日本等国家。

中国的专利申请量遥遥领先，占总申请量的 36.34%，申请量是排名第二美国申请量的 1.7 倍，是排在第十法国申请量的 57 倍之多，可以看出，中国是专利布局的重要目标市场之一。美国的申请量次之，

占总申请量的 21.22%，韩国占总申请量的 7.21%。

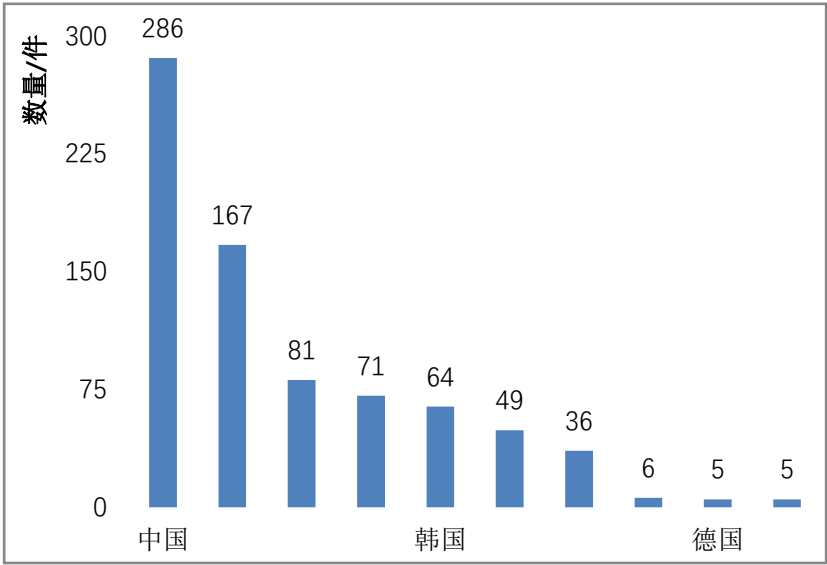


图 4-4 全球专利主要申请国家排名（前 10）

资料来源：华创智道，incopat

4.2.2.2 中国省市分布

如图 4-5 所示，为 Micro-LED 技术国内各省市(前 10)专利申请量情况，其中广东在所有省市中的专利申请量排名第一，其申请量达到了 65 件。

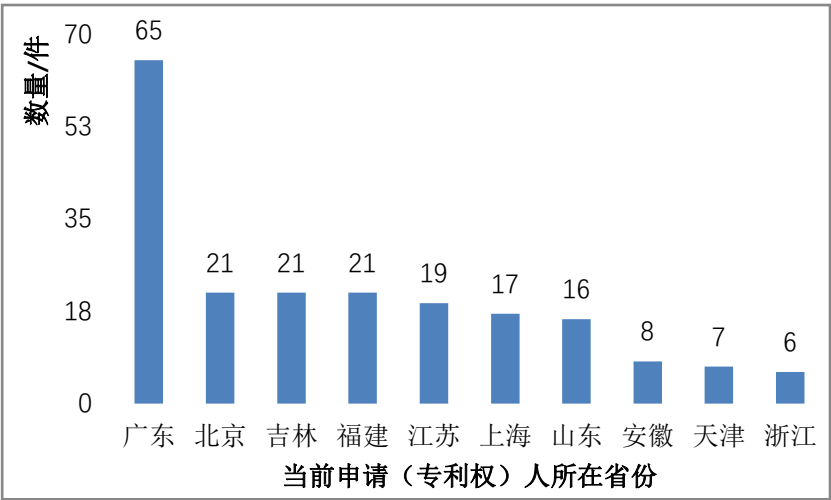


图 4-5 中国各省市专利申请量排名（前 10）

资料来源：华创智道，incopat

4.2.3 全球申请人排名

4.2.3.1 国外主要申请人

图 4-6 示出了 Micro-LED 技术国外专利申请人前 10 的排名情况。可以看出，国外申请人中 LG 与 X-Celeprint 在专利申请数量方面占据第一、第二名。

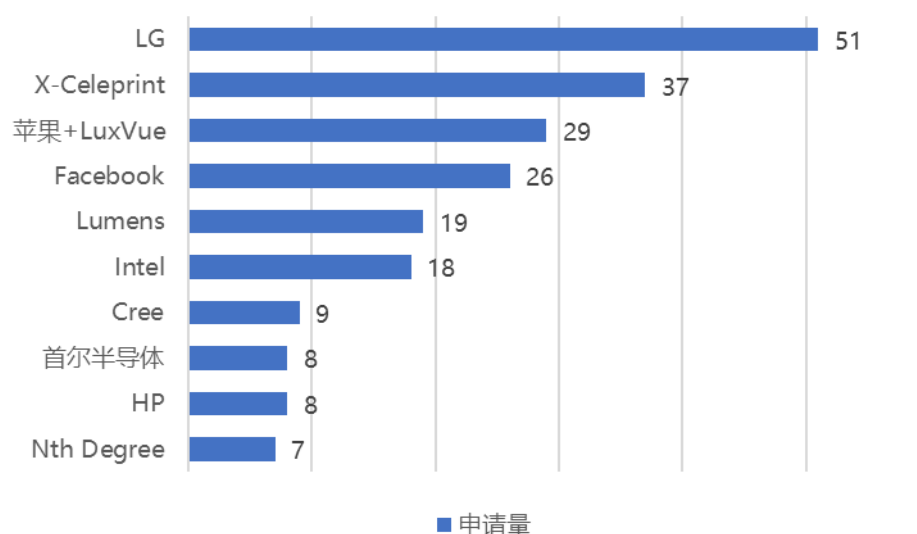


图 4-6 国外主要申请人排名（前 10）

资料来源：华创智道，incopat

4.2.3.2 国内主要申请人

图 4-7 示出了 Micro-LED 技术国内专利申请人前 10 的排名情况。可以看出，专利申请数量排名前三的有：歌尔股份、华星光电、京东方，比其他申请人的数量要高出一倍。

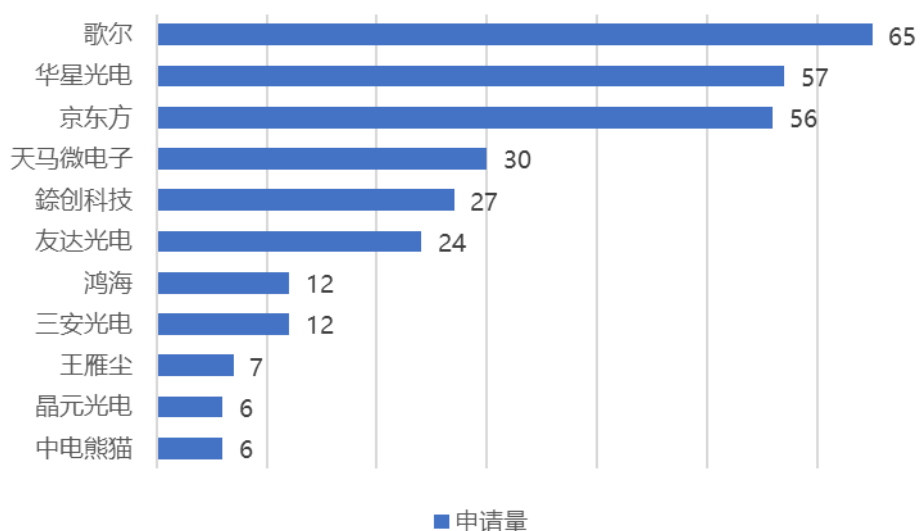


图 4-7 国内主要申请人排名（前 10）

资料来源：华创智道，incopat

4.2.4 专利技术领域分布

4.2.4.1 专利 IPC 技术分类

发明和实用新型专利申请的专利分类号是采用 IPC 国际专利分类表对进行标识。IPC 技术分类法采用了功能和应用相结合，以功能性为主、应用性为辅的分类原则。同一件专利可能具有多个 IPC 分类号。

如图 4-8 为 Micro-LED 技术的 IPC 分类排名（前 10）。可以看到，主要涉及 IPC 分类号为：H01L33/00、H01L25/075、H01L27/15 等。



图 4-8 IPC 分类排名（前 10）

资料来源：华创智道

4.2.4.2 技术领域构成

各二级技术分支的构成占比情况如图 4-9 所示, 可以看出当前 79% 的专利技术都集中在位于产业中游的封装技术, 上游的芯片技术、衬底与外延技术分别占总体的 10% 和 7%, 驱动/控制技术与应用技术占比都不足 5%。

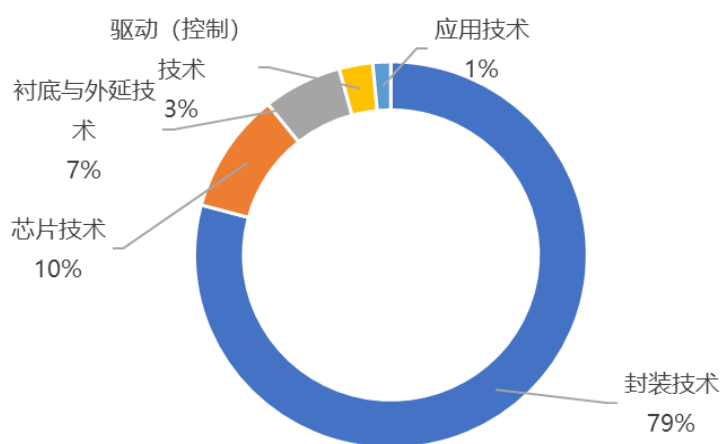


图 4-9 一级技术分支构成占比

资料来源：华创智道，incopat

4.2.5 重要相关专利

通过统计 Micro-LED 技术全球范围内专利申请被引用次数、权

利要求的数量和同族数量，综合这三个维度数据筛选出重要相关专利。

4.2.5.1 全球重要相关专利

如图 4-10，显示了全球范围内被引用次数最多的前 10 项专利。表明这些专利受到广泛关注，是后续很多专利申请技术创新和改进的基础，属于本领域内基础专利，这些专利在行业内具有较高的影响力，是本领域的核心技术创新的源头之一。

可以看到图中几乎全部是美国专利，说明美国专利的专利质量很高，领头羊效应明显。排名前 10 的专利被引次数均超过 50 次。专利 US6410942 被引用次数排名第一，被引用了 500 余次，该专利主要通过使用微型 LED 阵列提高发光效率。

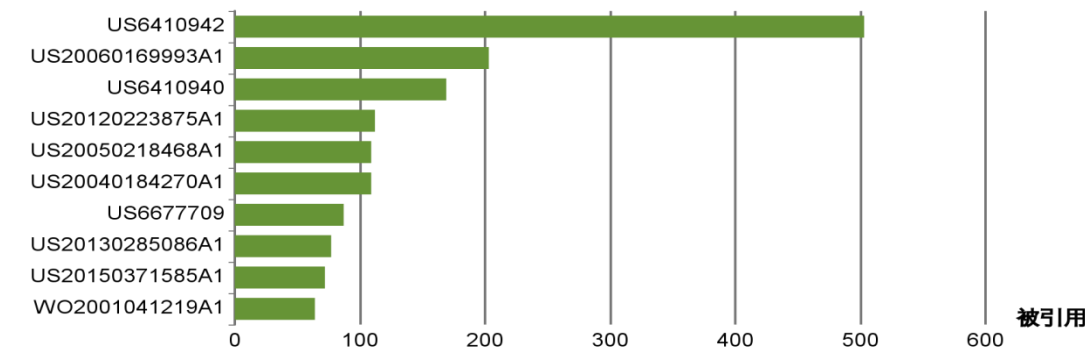


图 4-10 全球专利被引次数最多专利（前 10）

资料来源：华创智道，patsnap

如图 4-11，显示了全球范围内项权利要求数量前 10 的专利。这些权利要求数量最多的专利，其受到保护的技术方案数量最多。可以看到，前 10 的专利权利要求数量全部超过了 30 项。

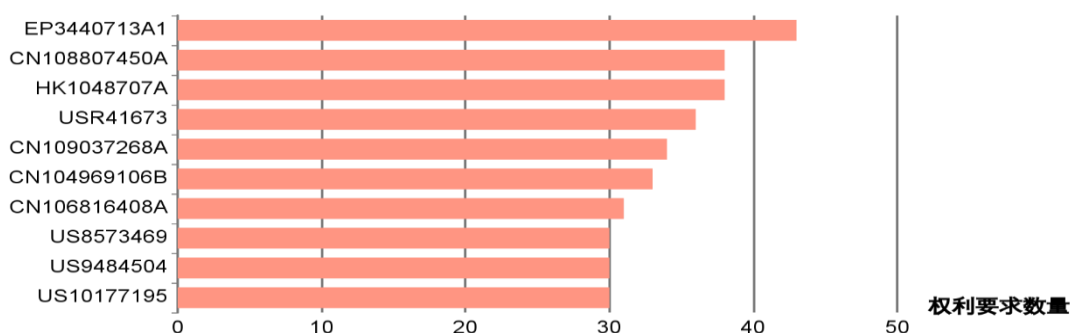


图 4-11 全球专利权利要求数量最多专利（前 10）

资料来源：华创智道，patsnap

4.2.5.2 全球重要专利家族

如图 4-12，显示了全球范围内专利同族数量最多的 10 项专利，艾克斯瑟乐普林特有限公司(X CELEPRINT)的专利 JP2019024108A，其专利家族成员有 130 余件扩展同族专利。

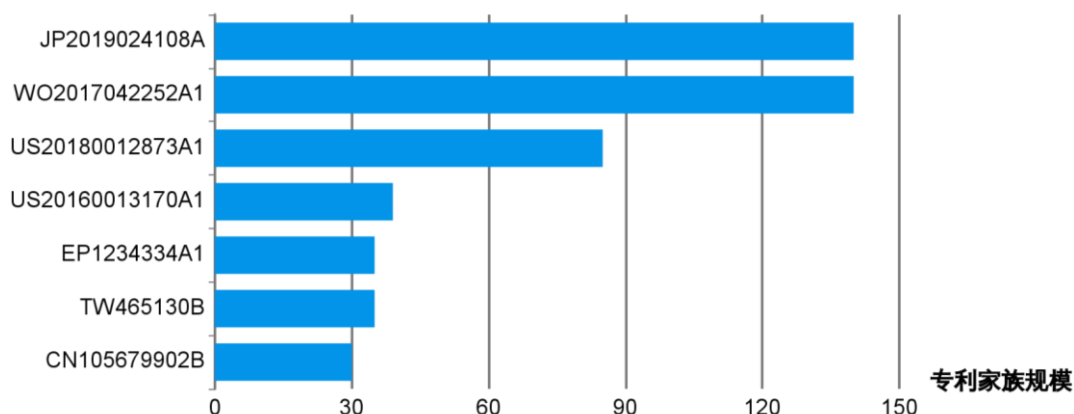


图 4-12 全球专利最大专利家族专利（前 10）

资料来源：华创智道，incopat

4.3 主要结论

4.3.1 行业知识产权环境特点

从整体上看，Micro-LED 行业属于新兴行业，目前没有太多的相关诉讼。LED 领域已发生的知识产权诉讼情况可以做为重要参考。

LED 领域诉讼从竞争对手看，发起诉讼的公司相对集中，主要有

松下、东芝、夏普、科锐、飞利浦、欧司朗、三星等。在 1996-2014 年间，飞利浦共发起专利诉讼 20 次、欧司朗 11 次，科锐 9 次，这类企业熟悉全球各个主要目标市场的知识产权法律法规，通过专利诉讼维护专利权并提高市场竞争力是其常见做法。从地域上看，美国、韩国是主要诉讼发生地，美国、欧洲、日本、韩国是主要专利布局国家或地区。因此，国内企业今后在增加专利申请的数量上提升专利申请质量，加强在美、韩、欧、日等重点国家或地区的专利布局，提升在目标市场国家或地区的知识产权竞争力。

4.3.2 行业技术专利布局热点、空白点

Micro-LED 行业重要技术分布进行技术分布分析时，采用 IPC 分类号进行技术领域区分。根据每个 IPC 号出现的频次占累计 LED 重要技术分布在进行技术分布分析时，采用 IPC 分类号进行技术领域区分。具体领域包括 H01L(半导体器件) 、F21V(照明装置或其系统的功能特征或零部件) 、H01J(放电管或放电灯) 、G02B(光学元件、系统或仪器) 、G02F(用于控制光的强度、颜色、相位、偏振或方向的器件或装置) 、F21Y(光源构成) 和 H04N(图像通信) 。

对于 Micro-LED 近年来的专利申请及行业发展趋势上来看，涉及巨量转移技术的专利呈波动上升态势，预计巨量转移技术相关专利申请会成为专利申请数量增长最快的领域。目前针对巨量转移工艺改进方向有如电磁力吸附、范德华力吸附、流体自组装等，受工艺难度和成本等多因素制约，相关专利未来布局的情况值得关注。

对于 Micro-LED 的其他技术分支中，全彩化显示方面的专利申

请占比在近几年内明显提高，反应了目前这一方面都属于研发热点，显示基板方面的专利申请占比在近几年保持相对稳定并处在较高的数量，其作为与下游的新型应用领域关系密切的一环也值得关注。驱动相关的专利申请虽然总量较小，但在近两三年的时间里占比大幅度的增长，需要引起重视。

专利申请量排名靠前的企业在相关技术上的布局情况各有特点，比如，X-Celeprint 的专利申请中涉及驱动和显示芯片制造方面的专利相对较多，苹果的专利申请涉及最多的是芯片及下游应用的技术，其次在转移工艺和测试方面也有较多的申请。

4.3.3 行业知识产权趋势

从专利申请趋势上来看，中国无论是作为申请的来源地区或目标地区，在数量上都位列世界之首，并在近期保持着较快的增长。

在技术领域方面，国内企业主要申请的方向还集中于产业中游的封装技术，对于上游的外延、芯片技术攻关以及下游应用领域的拓展力度不够。国内企业需要尽快解决如何使产业向上、下两端持续延伸布局相关专利，使整个产业配套更加完善这一关键性问题。

在全球专利布局方面，中国企业弱势明显，仅有少量的企业在部分国家开展了专利布局，在全球范围内的知识产权竞争力与先进国家存在较大差距。国内企业应当加强在美、欧、日、韩等全球主要目标市场国家或地区的专利布局。

从技术发展方向上看，部分企业在兼具柔性和透明特性的 Mini LED 与 Micro-LED 技术上也有了少量的专利布局，可能代表了未来

发展的一个新方向，因此从业者有必要对这一类新兴技术改进方向进行关注与跟进。

结 语

Micro-LED 主要包括上游 LED 外延与芯片制造、中游显示面板或显示阵列（用于微投影）制造，以及下游应用。目前 Micro-LED 技术处于开发初期论证阶段，上游与中游均缺乏相应的配套技术。开发 Micro-LED 技术必须整合产业链进行合作开发，而未来 Micro-LED 的发展不单只涉及到与竞品技术的竞争，也牵涉到产业链与生态的竞争。我国在许多关键材料技术上仍然受制于人，包括高质量材料生长、检测、掺杂、核心装备制造等方面。究其原因，和我国在微电子与光电子关键材料领域长期投入不足、未形成重大技术突破、缺乏具有世界影响的半导体材料与器件公司等有关。但在以 Micro-LED 技术为代表的下一代高集成度新型信息显示技术领域，由于西方也处于尚未实现产业的阶段，从某种意义上说全世界处于同一起跑线上。目前，中国已经成为全球最大的 LED 和 LCD 生产基地，在 Micro-LED 产业链上配套也比较完整，因此，中国具备在 Micro-LED 领域产业链协同配合的条件。充分发挥我国 LED 的产业优势，有望通过 Micro-LED 实现我国在高端信息显示产业的世界话语权。

衬底及外延材料方面：突破关键材料的限制是现阶段 Micro-LED 亟待解决的问题。Micro-LED 的发光像素是由氮化镓等化合物半导体材料制备而成，其彩色化显示则通过红绿蓝三种化合物半导体发光材料，或通过纳米结构材料，或通过集成量子点及其他荧光材料来实现。外延技术主要的发展趋势是提高晶圆尺寸，降低晶体缺陷和表面颗粒

缺陷，同时大幅提高波长均匀性，改善亚阈值区一致性以及小电流密度下的 Droop 效应、峰值效率等电学性能的均匀性。从超高清平板显示应用需求出发，Micro-LED 具有超小尺寸、超低工作电流密度的特性，由此带来对关键材料与器件有别于常规 LED 的新需求，即 1) 解决基础材料与器件科学问题的需求；2) 解决材料与器件产业化的需求。

芯片器件方面：未来十年的发展趋势主要是：1) 高密度显示器件采用垂直结构芯片，低密度显示器件依然可采用倒装结构芯片。2) 适应不同 PPI 显示和各种应用，芯片尺寸逐步根据市场需求进行分流，相应的结构设计工艺条件也会做出调整。3) 晶圆尺寸向 6 英寸以上推进，配套制成工艺全线升级。4) 外延、芯片、封装、应用上中下游相互配合、协同发展。

封装方面：最主要的挑战是巨量转移和检测/修复良品率问题。解决此问题的主要途径有两个，高 PPI 应用将以单芯片集成的方式实现，解决全彩化和键合的问题；低 PPI 应用将以巨量转移技术为主，针对 8K 等高分辨率显示应用，转移良率需要达到 99.9999% 以上才可以达到合理的修复成本。

驱动方面：驱动部分是基于硅基 CMOS 芯片、薄膜晶体管(TFT)或微米级 IC 等功能材料来制备，这些方式在像素密度逐步提高后都面临巨大挑战，微小电流一致性控制和高刷新率驱动实现将是未来需要解决的核心问题。

应用方面：可穿戴产品要求显示屏具有低功耗、高亮度、轻薄等

特点，为 Micro-LED 的导入创造了有利条件。预计 Micro-LED 穿戴产品将在 2020 至 2021 年切入应用市场；显示屏、电视等逐渐向大尺寸和小像素间距发展，Micro-LED 在采用 TFT 玻璃基板取代传统的 PCB 电路板的情况下，可以有效的降低 Micro-LED 在中大尺寸室内显示和 TV 显示应用中背板和驱动部分的成本，预计 Micro-LED 在 2021 年以后在豪华电视（非常小批量）上销售，在 2023 年开始在高端大电视上销售；以智能手机和平板电脑为代表的中小尺寸应用追求显示效果的同时致力于提高手机续航时间，引发面板的结构变动和品质提高，而 Micro-LED 节能效果更优于 LCD 和 OLED，引入 Micro-LED 显示的需求强烈，预计 Micro-LED 在 2022 年切入平板电脑应用市场，在 2023 年切入手机市场；VR/AR 的快速发展推动了近眼显示的需求，从显示器的技术特征来看，基于 Micro-LED 的微型显示技术（LEDoS）由于具备了更好的显示特性，如高亮度、高像素密度、高刷新率等，具有替代 LCoS 和 OLED 的可能。Micro-LED 可能从 2021 年开始导入市场，并快速增长；车载显示对显示屏的对比度，色彩饱和度、清晰度、续航时间等有了更高要求，这激励着终端厂商、面板厂商甚至上游材料及设备厂商积极开发新的显示技术，Micro-LED 在车载领域市场拥有很大的应用潜力，但是车载应用领域认证周期长等原因，汽车供应链更难进入，预计 Micro-LED 在 2024 年进入车载显示市场。Micro-LED 功耗低，调制带宽高，可以与显示耦合，实现高密度并行通信，达到较高速率，在可见光通信系统中有巨大的应用潜力。无论国外还是国内，对于可见光通信的具体应用大多数处

于实验室研究阶段，并未形成规模化的应用，预计 Micro-LED 在 2025 年以后导入光通信市场。

专利布局方面：中国国内无论是作为申请的来源地区或目标地区，Micro-LED 的专利申请量当前都位列全球之首，并在近几年保持着较快的增长。但国内企业专利申请的主要方向还集中于产业链中游的封装技术，对于上游的外延、芯片技术以及下游应用领域的拓展还存在一定的弱势，国内需要尽快解决如何使产业向上、下两端持续均衡延伸，从而使整个产业链发展的更加完善。

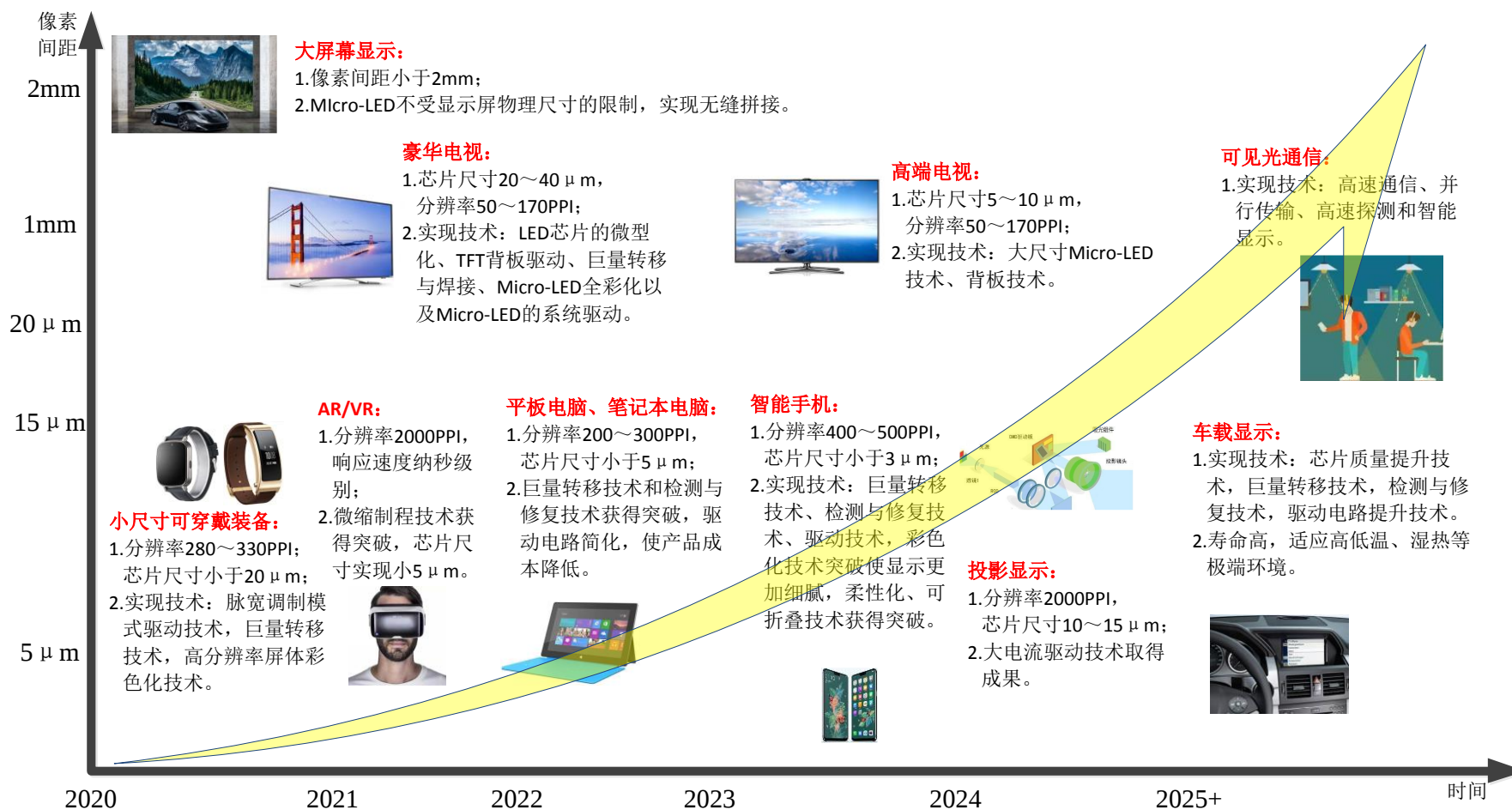


图 5-1 Micro-LED 技术路线图

中英文词条标注

发光二极管 LED: light emitting diode

有机发光二极管 OLED: organic light-emitting diode

液晶显示 LCD: liquid crystal display

薄膜晶体管液晶显示 TFT-LCD: thin film transistor liquid crystal display

主动矩阵有机发光二极管显示 AMOLED: active-matrix organic light-emitting diode

低温多晶硅 LTPS: low temperature poly-silicon

硅基液晶显示 LCOS: liquid crystal on silicon

电致发光 EL: electroluminescent

光致发光 PL: photoluminescence

硅上有机发光显示 OLED_{OS}: OLED on Silicon

空间三维光场显示 LFD: light field display

多彩照明 MCL: multi-color lighting

可见光通信 LiFi: light fidelity

抬头显示 HUD: head up display

增强现实 AR: augmented reality

虚拟现实 VR: virtual reality

混合现实 MR: mixed reality

薄膜晶体管 TFT: thin film transistor

非晶硅薄膜晶体管 a-Si:H TFT: amorphous silicon thin film transistor

多晶硅薄膜晶体管 Poly-Si TFT: polysilicon thin film transistor

低温多晶硅薄膜晶体管 LTPS TFT

有机薄膜晶体管 OTFT: organic thin film transistor

铟镓锌氧化物薄膜晶体管 IGZO-TFT

金属有机化学气相沉积 MOCVD: metal-organic chemical vapor deposition

分子束外延 MBE: molecular beam epitaxy

像素 Pixel

像素密度 PPI: pixels per inch

红/绿/蓝 R/G/B: red/green/blue

内量子效率 IQE: internal quantum efficiency

量子效率 quantum efficiency

量子限制斯塔克斯效应 QCSE: quantum-confined Stark effect

斯托克斯位移 stokes shift

脉宽调制 PWM: pulse width modulation

使能信号 enable signal

激光剥离 LLO: laser lift-off

可见光通信 VLC: visible light communication

集成电路 IC: Integrated Circuit

印刷电路板 PCB: printed circuit board

柔性电路板 FPC: flexible printed circuit

微机电系统 MEMS: micro-electro-mechanical system

高动态范围图像 HDR: high-dynamic range

量子点墨水 QD ink

量子点光刻胶 QD PR

微显示器 micro-display

高度集成半导体信息显示器 HISID: highly integrated semiconductor information display

空间精准定位 PSP: precise space positioning

复合年增长率 CAGR

光致发光影像检测 photoluminescence imaging detection

挑拣 sorting

分选 binning

干涉条纹 MURA

颗粒 particle

自动光学检测 AOI: automated optical inspection

焊膏检测 SPI: solder paste inspection

坐标测量机 CMM: coordinate measuring machine

波束定位 BAR

聚二甲基硅氧烷 PDMS: polydimethylsiloxane

图形处理器 GPU: graphics processing unit

芯片焊接 chip bonding

晶片/晶圆焊接 wafer bonding

薄膜转移 thin film transfer

塑料光纤 POF: plastic optical fibre

日本早稻田大学 Waseda University

韩国科学技术院 KAIST

韩国蔚山科学技术院 UNIST



共创、共建、共享、共赢

第三代半导体产业技术创新战略联盟(CASA)

CHINA ADVANCED SEMICONDUCTOR INDUSTRY INNOVATION ALLIANCE

地点：北京海淀区清华东路甲35号中科院半导体所5号楼5层（100083）

No.A35, QingHua East Road, Haidian District, Beijing P R China(10008)

Tel：86-010-82388680(CASA) 010-82387780(CSA)

E-mail：casa@casa-china.cn zhuhx@china-led.net

www.casa-china.cn

www.csa.china-led.net

