

## 激光与光电子学进展

## 微型发光二极管全彩色显示研究进展(特邀)

黄丽香<sup>1†</sup>, 韩冰<sup>1†</sup>, 闫龙<sup>1</sup>, 赵项杰<sup>1</sup>, 朱酉良<sup>1,2</sup>, 林肖<sup>1,2</sup>, 李梓维<sup>1\*</sup>, 潘安练<sup>1\*\*</sup><sup>1</sup>湖南大学材料科学与工程学院, 湖南光电集成创新研究院, 湖南 长沙 410082;<sup>2</sup>诺视科技(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215011

**摘要** 基于发光二极管的显示技术在电视、电脑、手机等终端产品上获得了广泛应用。与传统液晶显示器和有机发光二极管屏幕相比,微型发光二极管(Micro-LED)显示器件在尺寸、性能、功耗、使用寿命等方面均具有显著优势。总结了 Micro-LED 全彩色显示的技术类别和产品应用场景,综述了实现 Micro-LED 全彩色显示的最新研究进展,包括巨量转移技术、色转换层集成技术和外延芯片单片集成技术,并进一步比较分析这些技术的优缺点,展望了 Micro-LED 全彩色显示技术的未来发展。

**关键词** 发光二极管; 显示技术; 单片集成; 巨量转移; 氮化镓

中图分类号 TN312+.8

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232583

## Research Progress in Full-Color Display of Micro-Light-Emitting Diode(Invited)

Huang Lixiang<sup>1†</sup>, Han Bing<sup>1†</sup>, Yan Long<sup>1</sup>, Zhao Xiangjie<sup>1</sup>, Zhu Youliang<sup>1,2</sup>,  
Lin Xiao<sup>1,2</sup>, Li Ziwei<sup>1\*</sup>, Pan Anlian<sup>1\*\*</sup><sup>1</sup>Hunan Institute of Optoelectronic Integration, College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;<sup>2</sup>Innovision Technology (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215011, Jiangsu, China

**Abstract** Display technology that uses light-emitting diodes is extensively used in devices such as televisions, computers, and mobile phones. Compared to traditional liquid crystal displays and organic light-emitting diode screens, the micro-light-emitting diode (Micro-LED) displays offer notable benefits in size, performance, power efficiency, and lifespan. We provide an overview of the technology types and application scenarios of full-color Micro-LED displays, describe the latest research in creating full-color displays using Micro-LED, including massive transfer technology, color conversion layer integration technology, and epitaxial chip monolithic integration technology. Furthermore, we compare the strengths and weaknesses of these technologies and look ahead the future evolution of Micro-LED-based full-color display technology.

**Key words** light-emitting diode; display technique; monolithic integration; massive transfer; gallium nitride

## 1 引言

从最早的阴极射线成像(CRI)显示技术、等离子体显示技术到液晶(LCD)显示技术和发光二极管(LED)显示技术,显示技术发生了多次重要的技术变革,显示技术的发展改善了人们的生活品质,提升了学习和工作效率。随着大尺寸超高清显示、柔性或可穿

戴显示、增强现实/虚拟现实(AR/VR)显示等新业态显示技术的发展,对新型显示技术的高分辨率、高稳定性、小尺寸等性能方面提出新的需求。由于液晶显示器存在视角狭窄、能耗高以及需要背光照明等问题,有机发光二极管(OLED)存在视角狭窄、环境稳定性差、性能衰减严重等问题,因此,传统的液晶显示器或有机发光二极管显示技术并不适用此类应用场景。近年

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2023-12-12; 录用日期: 2023-12-15; 网络首发日期: 2023-12-25

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFA1204300, 2022YFA1203801)、国家自然科学基金(62275076, 92163135, 52221001, 62090035, U19A2090)、湖南省科学技术厅项目(2023RC3093, 2019XK2001, 2020XK2001)、湖南省重点研究和发展计划(2023GK2012)、中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所开放课题(22ZS01)、武汉光电研究中心开放课题(2022WNL0KF003)

通信作者: \*ziwei\_li@hnu.edu.cn; \*\*anlian.pan@hnu.edu.cn

† 共同第一作者

来,微型发光二极管(Micro-LED)发光显示在工艺和技术上取得了进一步的发展,有望成为下一代显示技术的核心和关键技术,引起了学术界和行业研究人员的重视<sup>[1]</sup>。

近年来,基于氮化镓(GaN)的迷你/微型发光二极管(Mini/Micro-LED)广泛用于新型显示器的开发。尺寸在100~200 μm之间的LED通常被称为Mini-LED,而尺寸小于100 μm的被称为Micro-LED。Micro-LED具有微米尺度的发光器件,其可被驱动电压独立控制也可称为发光像元。Micro-LED比传统LED具有更高的光提取效率、更好的电流扩散能力以及更低的自加热效应,在小尺寸、高分辨率、高亮度、低功耗显示等性能方面具有显著优势<sup>[2-3]</sup>。最重要的是,由于GaN外延片是无机发光材料,Micro-LED显示技术相比其他技术具有超过10年的极长寿命和优越的环境稳定性。因此,Micro-LED将会被广泛应用于许多领域,产品涵盖超大尺寸高清面板显示、汽车数字车灯、微投影、VR/AR眼镜等。

索尼集团在2012年国际消费电子展(CES)上推出了世界上第一个Micro-LED显示屏,该显示屏分辨率为1920 pixel×1080 pixel,且具有优异的显示色域、响应速度和高对比度<sup>[4]</sup>,随后在2016年CES上推出一款名为水晶LED显示系统(CLEDIS)的Micro-LED显示屏,具有4K的高分辨率,显示屏由144个模块组成,每颗Micro-LED的尺寸在30 μm×30 μm以内<sup>[5]</sup>。2018年,韩国三星电子公司展示了全球首款146 inch(370.84 cm) Micro-LED电视“the Wall”<sup>[6]</sup>,美国X-Celeprint公司展示了5.1 inch(12.954 cm)的Micro-LED全彩显示屏。同年,韩国LG集团也推出了175 inch(444.5 cm)的Micro-LED显示屏。2020年,一些科技公司陆续推出微小尺寸的Micro-LED微显示屏,如上海显耀显示科技有限公司、Plessey、PlayNiride等<sup>[4]</sup>。2021年,苏州镭昱光电科技有限公司、湖南大学和苏州诺视科技有限公司先后报道了0.39 inch(0.9906 cm)的Micro-LED单色显示屏点亮,后续并持续优化工艺,不断实现最高亮度极限的突破。2023年,包括西安赛富乐斯半导体科技有限公司、南京芯视元电子有限公司在内的几个半导体公司陆续报道并展示了全彩色Micro-LED微显示产品。2023年10月,基于红绿蓝(RGB)Micro-LED微显示屏与光波导的耦合集成技术,深圳雷鸟创新技术有限公司正式售卖全球首款可量产的全彩Micro-LED光波导AR眼镜,Micro-LED显示产品正逐渐走入大众视野,走上显示领域的新舞台。

尽管Micro-LED在性能上具有很大的优势,但将Micro-LED商业化仍有很多待解决的难题。其中,Micro-LED的RGB像素集成与全彩色显示是一大难点。Micro-LED彩色化技术的实现方式主要有巨量转移技术<sup>[7-11]</sup>、单片集成技术<sup>[12-13]</sup>和色转换技术<sup>[14-18]</sup>。面

向大尺寸面板显示应用,实现全彩色Micro-LED显示器需要将RGB Micro-LED芯片选择性地从生长基板分离出来,大规模地转移RGB芯片到目标接收器基板上,巨量转移技术已被证明是能够克服组装Micro-LED芯片极端要求的有效解决方案。面向中小尺寸显示应用,可以利用半导体晶圆多层掺杂和可控外延生长,实现RGB发光层垂直堆叠的外延晶圆片,进一步结合半导体沉积、刻蚀等工艺实现发光像元的片上集成。面向微小尺寸显示应用,通常在蓝光发光晶圆制造出微小像元阵列,并选择性地批量集成量子点(QD)色转换层,实现蓝光对绿光和红光的颜色转换和RGB像元阵列集成。

本文总结归纳了Micro-LED全彩色显示的技术类别和产品应用场景。针对大尺寸高清面板显示应用,综述了将Micro-LED芯片巨量转移到目标基板上的创新方法,讨论了磁控、微流体自组装(FSA)、卷对卷转印等方法的优缺点及其良率提升方面的进展和突破;其次,介绍了基于多色发光芯片外延生长的单片集成技术,探讨了垂直堆叠技术在实现高性能Micro-LED全彩色显示方面的重要作用;最后,综述了基于量子点的全彩显示的颜色转换技术,以及实现量子点色转换层的高精度光刻、喷墨打印和微流控技术。深入了解Micro-LED全彩色显示技术的制造、转移和颜色转换,考量不断增长的市场规模、外延芯片制造商的生产率和显示单元的生产成本,预测实现Micro-LED全彩色显示器件工业化生产的可能性。

## 2 巨量转移技术

开发Micro-LED大尺寸显示器件面临的主要挑战之一是缺乏高良率的大规模转移技术。目前,巨量转移技术主要基于拾取转移和流体自组装。拾取转移技术通过移动臂拾取单个芯片或芯片阵列,并将其重新定位到目标基底上。然而,随着LED尺寸减小至微米级别,Micro-LED的转移更具挑战性。流体自组装是一种利用流体流动和元器件重力在基板上组装微结构的方法,在提高转移良率方面逐渐展现出新的优势<sup>[8]</sup>。

### 2.1 拾取转移技术

拾取转移技术起源于传统的弹性印章转印方法,主要通过对有机物印章进行图案化处理,利用印章与材料之间的界面黏结力,将Micro-LED器件从生长衬底转移到目标基板<sup>[19-21]</sup>。据报道,Park等<sup>[21]</sup>较早地实现了拾取转移技术,将LED转移到目标基板上并激活显示单元。通过金属有机化学气相沉积在砷化铝(AlAs)沉积的砷化镓(GaAs)基板上制备了由AlInGaP量子阱组成的红色LED。使用聚二甲基硅氧烷(PDMS)印章将接触的Micro-LED从供体基板上剥离并通过控制剥离速度将其转移到接收基板上,就可以成功制备一个激活的显示单元,验证了“弹性体印章转移”方法的适用性。该团队进一步改进了弹性体印

章方法,采用一种独特的粘接表面用于确定性组装微结构,发明了一种具有微触点表面的弹性体印章,它具有坚固、可重复使用且易于清洁的优点。该印章由四个弹性塔形浮雕组成,位于方形表面的角落处。当受到足够的施加力时,塔形浮雕会暂时坍塌以捡起器件。将印章移动到目标基板上后,通过放松浮雕来释放器件至目标基底<sup>[22]</sup>。

大多数讨论的 PDMS 印章是具有平面界面结构的方形印章,由于 PDMS 是一种可变形材料,可以在保持其压印性能的同时制作出各种形状。因此,研究人员使用曲面测试弹性体印章转移方法的性能。这种方法具有低成本和高效率的优点,被称为“卷对卷”转移技术<sup>[23]</sup>。图 1(a)展示了连续印章转印的方法,即“卷对卷”转移技术。弹性体滚轮通过精确对齐来控制尺寸和均匀性,从供体基板上取下器件并将其放置到

接收基板上。2017年,韩国机械与材料研究院提出了一种用于 Micro-LED 的卷对卷转移技术,将一系列 Micro-LED 和硅薄膜晶体管(Si-TFT)从供体基板转移到单个目标基板上,用于 TFT 驱动的矩阵 Micro-LED 显示器。卷对卷自动转移机器的对准精度为  $3\ \mu\text{m}$ ,最高转移产率高达 99.9%。转移后的 Si-TFT 表现出良好的特性,具有高的开/关比( $>10^6$ )、0.1 V 的阈值电压、0.14 V/dec 的亚阈摆幅、 $750\ \text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  的场效应和  $590\ \text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  的饱和迁移率。此外,转移后的 Micro-LED 在低电压范围( $<4\ \text{V}$ )内表现出较高的稳定性,发光波长与转移前芯片发出的红光波长相近<sup>[24]</sup>。这些结果表明,卷对卷转移方法可以在保证器件使用前后性能的稳定性的同时具备转移速度快、转移产量高、扩展性和可靠性良好等优势,是下一代转移方法的更优选择<sup>[25-26]</sup>。

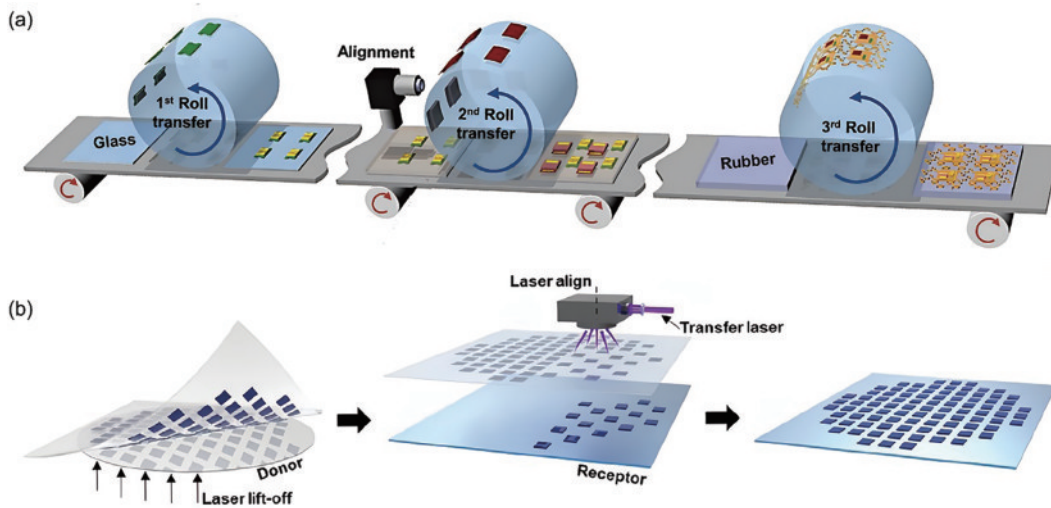


图 1 大规模拾取转移方法示意图。(a)三辊转印法<sup>[24]</sup>; (b)激光辅助转移法<sup>[27]</sup>

Fig. 1 Schematics of massive pick-up transfer methods. (a) Triple roll-transfer method<sup>[24]</sup>; (b) laser-assisted transfer method<sup>[27]</sup>

激光诱导转移技术主要将脉冲高能激光照射在附着特殊吸收薄层的透明衬底上,可以控制激光光强瞬间加热或烧蚀吸收薄层,使吸收材料上待转移的 Micro-LED 器件与透明衬底实现可控分离,并将它们放置在目标衬底上,如图 1(b)<sup>[27]</sup>所示。2018年报道了一种名为“MPLET(Massively parallel laser-enabled transfer)”的技术,通过应用激光诱导转移技术实现 Micro-LED 的大规模转移<sup>[28]</sup>。Micro-LED 被转移到玻璃衬底上,并覆盖动态释放层材料,当紫外激光透过玻璃衬底照射动态释放层的特定区域时,在玻璃和材料之间的界面产生气泡,照射区域内的 Micro-LED 被转移到目标衬底上。微器件的可转移尺寸和间距取决于紫外激光的光束大小和分辨率。随机存取图案化激光剥离(RAP-LLO)技术通过使用光学衍射元件将单个激光束衍射成多个子光束,可以同时实现 Micro-LED 阵列的转移。该技术能够以每秒 10000 个芯片的速度转移选定的芯片。Micro-LED 芯片附着在聚酰亚胺类

型的释放层上,然后通过激光照射实现可控剥离,芯片被选择性地转移到目标基底。此技术方法需要精确控制激光功率和聚焦状态,以及选择具有合适的吸收系数的材料,此技术在大规模生产应用中仍存在挑战。

类似于激光诱导转移技术,静电力或电磁也同样可以提供吸引和排斥力来拾取和释放 Micro-LED 器件。2012年,美国 Apple 公司旗下的 LuxVue 公司较早地提出了静电转移方法,对静电转移头施加电压,静电转移头阵列通过电荷吸附力从主体衬底上拾取微器件阵列。然后,消除施加在静电转移头上的电压,从而将微器件阵列释放到接收基板上<sup>[29]</sup>。2017年,工业技术研究所实现了电磁拾取转移。使用激光剥离(LLO)技术将 Micro-LED 阵列转移到具有键合层的临时衬底上,再通过电磁力控制电磁转移头将 Micro-LED 从供体衬底上分离出来并实现转移<sup>[30]</sup>。上述讨论的拾取转移方法都有相同的缺点,并且存在成本效益低、对准过程困难等问题。需要增加使用弹性体印章或传输头

阵列的传输单元的面积,大的传输单元的面积可以减少操作时间和传输周期,同时也会导致可靠性降低,在保证高精度对准的过程中会显著增加生产时间和成本。

## 2.2 微流体与自组装技术

相比拾取转移,自组装转移方法具有一定的优势,其主要技术难点包括微结构的自组装和目标基板键合。流体自组装转移技术是一种利用流体流动和元器件重力在基板上组装微结构的方法。1994年, Yeh 等<sup>[31]</sup>提出了流体自组装转移技术的理念,将具有梯形结构的 GaAs 基 Micro-LED 器件放置于流动的液体环境,梯形 Micro-LED 器件在流动的液体中受到重力作用会发生下沉和反转,从而被捕获并填充在具有倒梯形缺位结构的硅衬底上,通过电极材料设计金属化成键进一步实现自组装转移集成。2007年, Saeedi 等<sup>[7]</sup>

提出了通过使用流体自组装将 Micro-LED 集成到目标基板以构建微型显示器的方法。使用自组装转移方法制备了尺寸为 12.3 inch (31.242 cm)、像素密度为 42 PPI、亮度为  $1000 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  的 Micro-LED 全彩显示单元,其转移过程仅需要 15 min。2023年, Chang 等<sup>[32]</sup>提出了一种磁力辅助的介电电泳自组装技术,它结合了磁力和介电电泳力,在 15 min 内实现了 RGB-Micro-LED 同时转移,组装成功率高达 99.99%。如图 2(a) 所示,在 Micro-LED 中嵌入含镍的铁磁性材料,使用磁铁来控制驱动并有效地被捕获于组装部位。同年, Lee 等<sup>[33]</sup>展示了用于 GaN-Micro-LED 的高产能的流体组装技术。如图 2(b) 所示,在组装溶液中加入少量化学试剂可以增加其液体粘度,通过简单的搅拌以及液体表面张力的驱动使 Micro-LED 完成流体自组装,在 60 s 内组装完的成品率高达 99.88%。

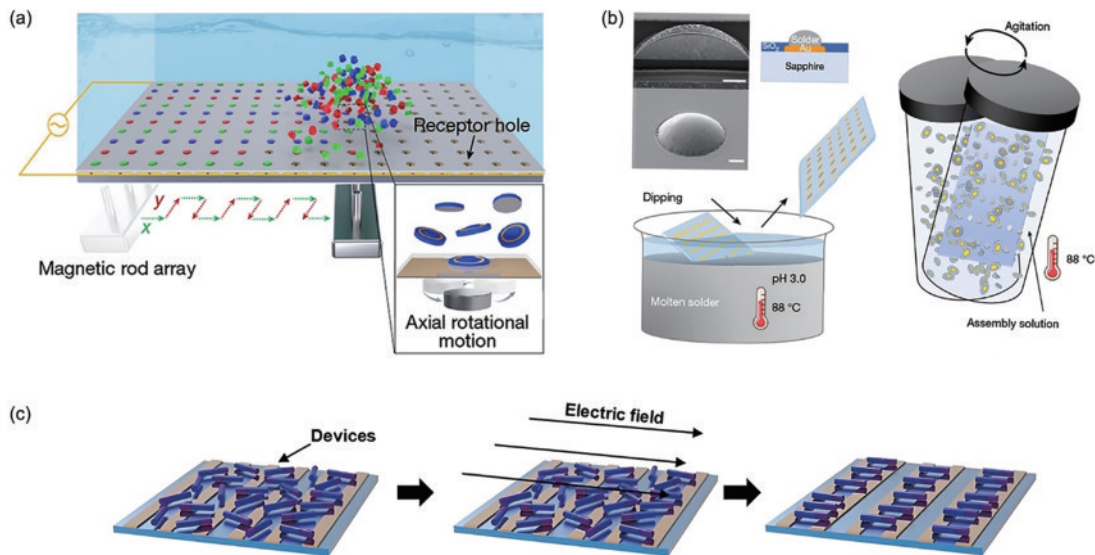


图 2 微流体与自组装技术。(a)磁力辅助的流体自组装过程示意图<sup>[32]</sup>; (b)粘附力改进的流体自组装技术<sup>[33]</sup>; (c)电磁自对准转移法<sup>[27]</sup>

Fig. 2 Microfluidics and self-aligning transfer technologies. (a) Schematic diagram of magnetic-force-assisted fluidic assembly process<sup>[32]</sup>; (b) adhesion-force-improved fluid self-assembly technology<sup>[33]</sup>; (c) electromagnetic self-align transfer method<sup>[27]</sup>

电场辅助转移技术是基于介电电泳的自组装技术,该技术利用对电极施加电压产生的介电电泳力,将悬浮在液体中的微米或纳米粒子组装起来。介电电泳发生在非均匀电场中的中性粒子中,粒子感受到由极化效应引起的平移力从而进行自组装,如图 2(c)<sup>[27]</sup>所示。2016年, Do 教授团队<sup>[34]</sup>应用了电场辅助组装技术来转移 Micro-LED,提出了一种采用电场辅助自组装纳米棒 Micro-LED 的方法。将制备的纳米棒 Micro-LED 从生长基底分离出来,放置在一个预先设计好的间隔电极图案化玻璃衬底上。将一些含有纳米棒 Micro-LED 的丙酮液滴分散到目标电极,通过施加不同正弦电压和频率的电场来实现器件对齐。此方法成功组装了尺寸为  $0.7 \text{ cm}\times 0.6 \text{ cm}$  的发光器件,器件最大亮度为  $2130 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 、电流效率为  $1.65 \text{ cd}\cdot\text{A}^{-1}$ 、功率

效率为  $0.95 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ 。2017年,该团队进一步探究电场辅助转移的组装机制并增加正向排列的纳米棒 LED 器件的数量。随着正向排列的纳米棒 LED 数量的增加,LED 器件在正向偏置下的发光强度增加,证明此类自组装方法可成功应用于纳米或微米尺寸的 LED 阵列制造<sup>[35]</sup>。

目前,转移技术面临着重大挑战,如成本高、转移产量低、速度缓慢以及转移精度低等。尽管转移技术实现的 Micro-LED 全彩显示屏最终已经上市,但将转移技术应用到批量生产过程的工艺仍需要完善。相比之下,自组装技术能够有效克服这些缺点,其由于具有较高的转移速率与经过优化的转移良率和精度,有望成为未来大尺寸 Micro-LED 器件的理想转移方法之一。

### 3 晶圆外延单片集成技术

通常情况下, Micro-LED 是在蓝宝石、硅晶圆上通过外延生长缓冲层、量子阱发光层、n 型和 p 型载流子注入层构筑晶圆级的外延片薄膜, 并进一步通过微纳加工技术对外延片薄膜进行刻蚀来制造孤立的发光像元。这种通过外延生长实现 Micro-LED 全彩色显示的技术可定义为单片集成技术<sup>[36]</sup>。

#### 3.1 多色发光层外延生长

2011 年, Hong 等<sup>[37]</sup>使用了多面 GaN 纳米棒阵列, 在纳米棒的尖端和侧壁上各向异性地生长 InGaN/GaN 多量子阱(MQW)结构, 实现了单片、全彩、可调谐 Micro-LED 的制造, 可以通过调节外部电偏压将 Micro-LED 的电致发光颜色从红色连续调谐到蓝色, 如图 3(a) 所示。2014 年, Wang 等<sup>[38]</sup>通过蓝色、绿色/黄色和橙色/红色 InGaN 纳米线 LED 的单片集成产生可控和可调谐的全

彩色发光。2016 年, 进一步将 RGB InGaN/GaN 纳米线 LED 阵列通过选择性区域生长技术横向制备在硅和蓝宝石晶圆上。通过改变纳米线的尺寸或成分, 成功在单个硅晶片上实现整个可见光谱范围(450~700 nm)的可调发射<sup>[39]</sup>。2019 年, Bui 等<sup>[40]</sup>利用分子束外延技术, 通过控制器件有源区的组分, 制备了波长从蓝到红可调的 InGaN/AlGaIn 核壳纳米线 Micro-LED 阵列, 实现了基于纳米线异质结、RGB 三基色集成的全彩色 Micro-LED。2020 年, Liu 等<sup>[41]</sup>利用分子束外延技术, 展示了一种自下而上的方法来构建最小尺寸为 150 nm 的 Micro-LED, 实现了发光光谱从蓝色到红色区域可调发光。在外延层垂直堆叠生长方面, Damilano 等<sup>[42]</sup>在 (Ga, In)N/GaN 量子阱外延片上生长蓝光外延层, 在电注入下发射的蓝色光子部分被位于底部的 (Ga, In)N/GaN 量子阱吸收, 发出黄绿色光, 蓝色和黄绿色成分的结合可以实现全彩显示甚至产生白光发射, 如图 3(b) 所示。

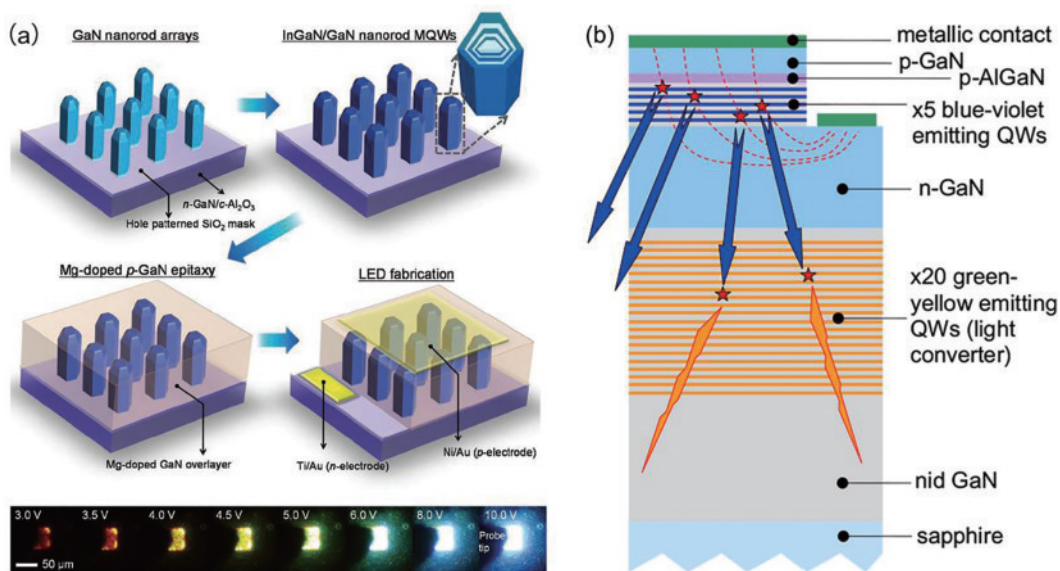


图 3 晶圆级外延生长实现全彩色 Micro-LED。(a) 外延生长多层氮化镓纳米结构和颜色可调 Micro-LED 的制备<sup>[37]</sup>; (b) 在黄光 LED 结构上外延生长蓝光 LED 实现多色混光集成<sup>[42]</sup>

Fig. 3 Wafer level epitaxial growth for full-color Micro-LED. (a) Epitaxial growth of multilayer GaN nanostructures and fabrication of color tunable Micro-LED<sup>[37]</sup>; (b) epitaxial growth of blue LED on yellow LED structure for multi-color mixed light integration<sup>[42]</sup>

#### 3.2 垂直堆叠集成

早期研究报道, 在垂直堆叠集成的 LED 显示器件方面的工作开始于 MiniLED 的全彩集成。2014 年, Chun 等<sup>[43]</sup>报道一种使用外延键合和激光剥离工艺进行转移制备垂直堆叠、可调颜色的 MiniLED 阵列。发现键合层中 In、O 和 Ga 等元素的互扩散使异质光电材料强烈键合, 并在单一衬底上集成两种不同颜色的 LED。通过调节蓝色和黄色发射的个体强度, 成功演示了垂直堆叠 LED 的颜色坐标的有效控制。2021 年, Mun 等<sup>[44]</sup>首先将红、绿、蓝发光薄膜外延生长在各自的衬底上, 后使用键合技术将其集成在同一衬底上。经过多重键合之后, 器件仍然保持高的发光效率, 性能不受影响。

2022 年, Shin 等<sup>[45]</sup>利用二维材料辅助的层转移技术, 通过远程或范德华外延、机械转移、释放与集成堆叠, 成功制备出 RGB 像素垂直堆叠的全彩色 Micro-LED。图 4(a) 为层转移工艺与器件的结构表征图, 研究工作实现了像素密度为 5100 PPI (pixel/inch) 的高密度阵列集成, 发光像元尺寸仅为 4 μm。香港科技大学 Li 等<sup>[46]</sup>通过键合 InGaIn 蓝/绿双波长 Micro-LED 阵列和 AlGaInP 红色 Micro-LED 阵列, 成功实现全彩微显示器, 每个像素由 40 μm × 120 μm 的 RGB 发光单元组成。如图 4(b) 所示, Hwangbo 等<sup>[36]</sup>在外延片上直接合成二硫化钼薄膜以形成 TFT 阵列。随后, 将 TFT 与 Micro-LED 器件互联集成, 制成有源矩阵的 Micro-LED 显示屏。通过在蓝色 Micro-LED 上垂直

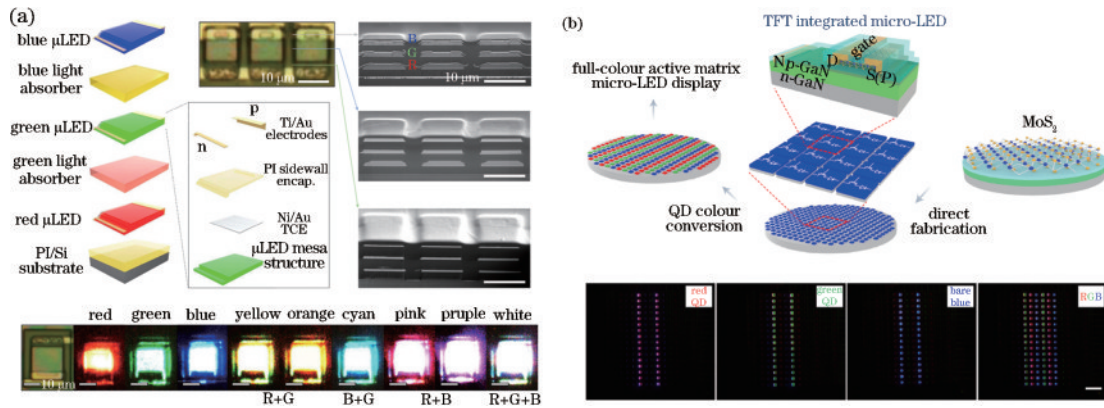


图 4 垂直堆叠实现 Micro-LED 全彩化集成。(a) 二维材料辅助的转移技术实现垂直堆叠 Micro-LED 全彩色集成<sup>[45]</sup>；(b) 二维材料集成电路驱动实现晶圆级的全彩色 Micro-LED 发光阵列<sup>[36]</sup>

Fig. 4 Vertical stacking for full color integration of Micro-LED. (a) Two-dimensional material-assisted transfer technology for vertical stacking Micro-LED full color integration<sup>[45]</sup>; (b) wafer-scale full color Micro-LED arrays driven by two-dimensional material integrated circuit<sup>[36]</sup>

堆叠集成红色和绿色 Micro-LED 发光单元,从而实现全彩显示。2023 年, Qi 等<sup>[47]</sup>采用 InGaN/AlGaInP 异质集成技术,制备了像素密度为 391 PPI 的全彩色有源矩阵的 Micro-LED 微显示样机。外延生长的 InGaN 蓝/绿双色 Micro-LED 和 AlGaInP 红色 Micro-LED 阵列通过倒装键合技术集成到驱动背板上,成功地制备了大色域和高亮度的全彩色显示器件。

在 GaN 和 InGaN 等常见的外延晶圆材料体系里,蓝色和绿色发光器件的性能已能满足产品终端的使用需求,但红色发光器件目前普遍存在外量子效率低、色彩稳定性差、可靠性低等问题,离产业化仍有一定差距。红光发光器件通过元素掺杂实现发光带隙调制,元素掺杂又不可避免地影响材料的晶体质量,导致缺陷富集,因此亟需解决红光 Micro-LED 的界面钝化、光量子效率提升等问题<sup>[48]</sup>。在单片集成技术方面,逐层外延技术在横向方向实现 RGB 发光像元的集成排列,此方法会增加后续驱动集成的难度。辅助转移方法实现的垂直堆叠器件在空间上可提升像元集成密度,但是发光器件叠加会导致发光颜色失真。面对未来产业技术生产需求,晶圆外延单片集成技术仍需要进一步验证。

## 4 色转化层集成技术

在传统液晶、LED 显示器上,通过集成荧光粉来实现颜色转换是常见的技术方法,利用光致荧光效应,蓝色发光芯片上集成绿色和红色的色转换层可实现彩色的图案显示。然而,传统荧光粉由于颗粒尺寸偏大,色转换集成在 Micro-LED 器件上并不能表现较好的均匀性。相反,量子点材料具有纳米级的颗粒尺寸和更优异的光量子效率,在色转换技术实现的 Micro-LED 全彩色显示方面具有不可取代的关键作用<sup>[49]</sup>。通过光刻、喷墨打印、转印、微流体等工艺可以实现 Micro-LED 发光像元高密度集成<sup>[50-53]</sup>。

### 4.1 光刻技术

随着 Micro-LED 像素尺寸的进一步缩小,微小尺寸的量子点色转换像素的制备尤为重要。量子点像素制备通常需要兼顾光刻工艺的加工精度和光转化效率等问题,具有微米尺度边长的量子点色转换结构很难保证有足够的层厚度,此时蓝光泄露、像素发光色串扰等问题较为显著<sup>[54-55]</sup>。前期研究成果表明,通过光刻黑胶矩阵结构可以缓解上述问题。基于黑胶矩阵结构, Kim 等<sup>[56]</sup>在 2019 年报道合成了丙二醇甲醚醋酸酯作为主要溶剂的量子点光刻胶,并利用光刻技术实现 10 μm 量子点光刻胶像元集成的有源全彩色 Micro-LED 显示器。2020 年, Chen 等<sup>[57]</sup>将量子点色转换层光刻在半极性晶圆上制备了全彩色 Micro-LED 像元,器件表现出稳定的发光峰(3.2 nm 移动)和较宽的 NTSC (National television standards committee) 色域(114.4%)。2020 年, Tian 等<sup>[58]</sup>详细介绍了量子点光刻技术,提出了色转换层并在黑色矩阵厚度为(12±1) μm 时可有效降低子像素之间的光串扰。红光和绿光转换效率分别达到 78.1% 和 296.5%, NTSC 色域可达到 98.8%。

2021 年, Zhang 等<sup>[59]</sup>通过在硅基 GaN 外延片上制备 64 pixel × 36 pixel 的蓝色 Micro-LED 阵列,并利用两步法分别制备红、绿滤色材料和量子点光刻胶叠层,实现像素密度为 317 PPI 的单片有源矩阵 Micro-LED 全彩显示屏,如图 5(a) 所示。类似地,该团队<sup>[60]</sup>也报道了一种 40 pixel × 40 pixel 的无源矩阵全彩色 Micro-LED 显示器,此器件的蓝、绿光像元采用外延层发光,红光像元采用红色量子点光刻集成,如图 5(b) 所示。2023 年,湖南大学潘教授团队<sup>[61-62]</sup>制备了壳核结构的钙钛矿量子点及其光刻胶,通过对硅基 GaN 蓝光外延片的表面进行特殊处理,解决了亚 5 μm 以下量子点像元光刻工艺中的掉胶问题。5 μm 以上量子点光刻胶像素与芯片集成主要依靠表界面的范德华力,但随着

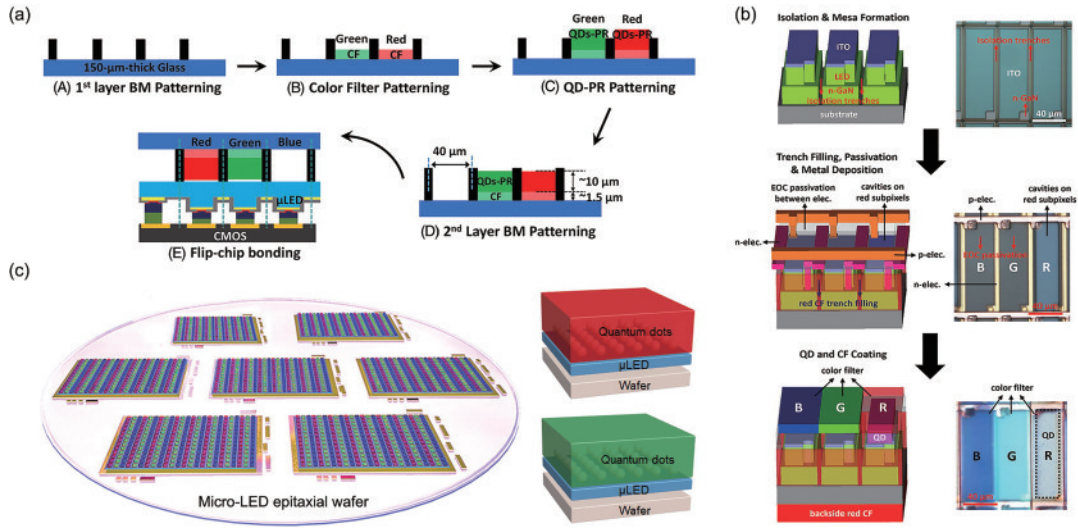


图 5 光刻技术制备量子点色转换发光像元。(a)红、绿光滤色材料/量子点光刻胶叠层实现全彩 Micro-LED<sup>[59]</sup>; (b)红光量子点色转换像元实现全彩 Micro-LED<sup>[60]</sup>; (c)亚 5 μm 的红、绿量子点光刻像元实现全彩 Micro-LED<sup>[63]</sup>

Fig. 5 Preparation of QD color conversion pixels using photolithography technology. (a) Full color Micro-LED achieved by red and green color filter material/quantum dot photoresist laminates<sup>[59]</sup>; (b) full color Micro-LED achieved by red color QD color conversion pixel<sup>[60]</sup>; (c) full color Micro-LED achieved by red and green QD photoetching pixels within sub-5 μm<sup>[63]</sup>

量子点像素面积减小,光刻后量子点像素的掉胶问题也逐渐显著。该团队设计里界面化学成键工艺可以实现最小 1 μm 量子点光刻胶像元的高密度集成。图 5(c)为小尺寸量子点光刻胶像元的单片集成示意图。

#### 4.2 其他量子点像元制备技术

模板和转印技术被广泛应用于材料生长和结构制备。2022年,Liang等<sup>[64]</sup>报道了通过预设材料生长模板结构,通用丝网套印技术实现了RGB钙钛矿微盘阵

列。此方法可以在同一衬底上制备高精确定位和特定尺寸的钙钛矿色转换图案,如图 6(a)所示。Bea等<sup>[62]</sup>利用晶圆级脱模转移和芯片预键合技术,转移制备了基于 5 μm 的量子点色转换的 Micro-LED 阵列。弹性掩模实现了无溶剂的量子点像素图形化制造,所报道的显示器件像素密度高达 1270 PPI,远超人类视网膜的极限,如图 6(b)所示。Sun等<sup>[65]</sup>报道了一种微孔模板填充方法,借助光刻制造的微孔模具,结合 QD 填充和表面抛光两个关键步骤,可以实现 2~100 μm 钙钛

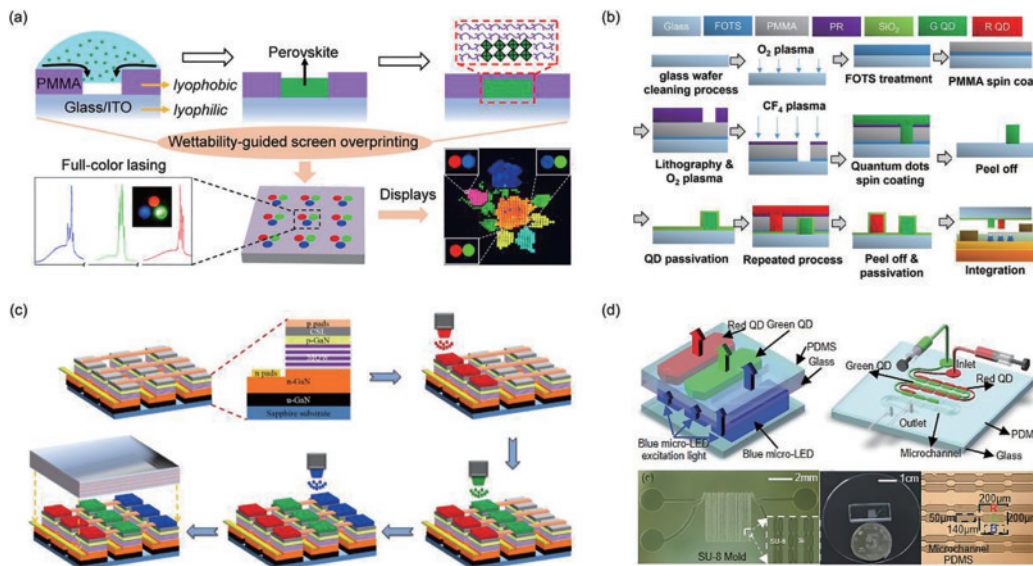


图 6 量子点像元制备技术。(a)限域生长实现钙钛矿量子点像元制备<sup>[64]</sup>; (b)使用柔性模板辅助转印实现图案化的量子点薄膜<sup>[52]</sup>; (c)喷墨打印技术实现量子点色转换层制备<sup>[66]</sup>; (d)微流体技术制备量子点色转换像元<sup>[67]</sup>

Fig. 6 Manufacturing technology for QD pixels. (a) Preparation of perovskite QD pixels through restricted growth<sup>[64]</sup>; (b) flexible template-assisted transfer printing for patterned QD films<sup>[52]</sup>; (c) preparation of QD color conversion layer using inkjet printing technology<sup>[66]</sup>; (d) microfluidic technology for QD color conversion pixels<sup>[67]</sup>

矿量子点像元的制备,此过程不需要任何复杂的方法或接触任何化学溶剂。

喷墨打印技术也是大面积量子点图案化制备的主要方法之一。2015年,Han等<sup>[66]</sup>利用气溶胶喷射技术制备了量子点色转换层,使用雾化器和气体流量控制来获得均匀和小尺寸的像素点。蓝光LED激发顶部红、绿、蓝量子点实现色转换,部分泄漏的蓝光通过布拉格反射结构被反射至器件内部,从而提高颜色纯度和色域。在此机制下,光通量分别提高194%(蓝色)、173%(绿色)和183%(红色),辐射光效为165 lm/W,如图6(c)所示。2020年,Qin等<sup>[68]</sup>在蓝光Micro-LED芯片上利用喷墨打印技术制备了红色和绿色量子点色转换层。显示器件的像素密度为228 PPI,尺寸为1.11 inch(2.8194 cm),NTSC色域为107.53%。相似地,Yin等<sup>[69]</sup>利用喷墨打印制备了CsPbBr<sub>3</sub>钙钛矿(绿色)和CdSe量子点(红色)色转换层,报道的全彩Micro-LED显示器样机NTSC色域为129%。

近年来,微流体技术在传感检测、生物医药等研究领域发挥了重要作用。部分研究人员将量子点微流体技术应用于Micro-LED全彩色显示。2021年,Li等<sup>[67]</sup>利用微流体技术将红色和绿色钙钛矿量子点传导到像素阵列位置,成功制备了用于全彩Micro-LED显示屏的量子点色转换层。实现了全彩像素尺寸为200 μm×200 μm、亚像素尺寸为140 μm×50 μm的量子点色转换层,显示器件NTSC色域为131%,如图6(d)所示。使用微流体技术实现了像素间距为200 μm柔性量子点色转换层的进一步改进,该量子点色转换层在不同弯曲条件下均表现出良好的发光和显示性能<sup>[70]</sup>。此外,基于微流体静态液滴阵列技术,该团队最新报道成功制备了最小亚像素直径为20 μm全彩Micro-LED显示屏<sup>[53]</sup>。

## 5 结 论

Micro-LED有望成为下一代显示技术的关键元器件,Micro-LED全彩色微显示技术的商业化进程是技术发展的动力。针对不同类型的显示器件需求,分类总结了Micro-LED全彩色微显示技术,包括巨量转移、单片集成和色转换技术。首先,面向大尺寸面板显示应用,综述和讨论了将Micro-LED芯片转移到目标基板上的独特巨量转移技术,并评估了它们的特点;针对单片集成技术,综述了材料外延生长的典型方法,探讨了外延键合、激光剥离工艺、二维材料辅助的层转移技术及倒装键合等垂直堆叠技术;最后,介绍了基于量子点的全彩显示器的颜色转换技术,包括量子点材料及其集成方法的介绍。重点关注Micro-LED全彩色显示技术的工业与商业化进展和现状,并进一步比较和分析技术的优缺点,综述了近年来相关技术领域的重要进展。

## 参 考 文 献

- [1] Lee V W, Twu N, Kymissis I. Micro-LED technologies and applications[J]. *Information Display*, 2016, 32(6): 16-23.
- [2] Nie J Y, Zhang Z, Chen K J, et al. Systematic study on size and temporal dependence of micro-LED arrays for display applications[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(4): 549-557.
- [3] Liu X H, Sun Y, Malhotra Y, et al. N-polar InGaN nanowires: breaking the efficiency bottleneck of nano and micro LEDs[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(2): 587-593.
- [4] Wu Y F, Ma J S, Su P, et al. Full-color realization of micro-LED displays[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(12): 2482.
- [5] Kim D S, Kim S Y, Jung J H, et al. High-quality imaging micro-LED display based on quantum dot CSP technology[J]. *Electronic Imaging*, 2018, 30(16): 1851-1855.
- [6] Liu Z J, Lin C H, Hyun B R, et al. Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 83.
- [7] Saeedi E, Kim S S, Parviz B A. Self-assembled inorganic micro-display on plastic[C]//2007 IEEE 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), January 21-25, 2007, Hyogo, Japan. New York: IEEE Press, 2008: 755-758.
- [8] Park S C, Fang J, Biswas S, et al. A first implementation of an automated reel-to-reel fluidic self-assembly machine[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(34): 5942-5949.
- [9] Sharma B K, Jang B, Lee J E, et al. Load-controlled roll transfer of oxide transistors for stretchable electronics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(16): 2024-2032.
- [10] Mizuno T, Tomoda K, Oohata T. Method of transferring device: US8361268B2[P/OL]. 2012-03-25 [2023-11-26]. <https://patents.google.com/patent/US8361268B2>.
- [11] Chen F, Bian J, Hu J L, et al. Mass transfer techniques for large-scale and high-density microLED arrays[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2022, 4(4): 042005.
- [12] Damilano B, Dussaigne A, Brault J, et al. Monolithic white light emitting diodes using a (Ga, In)N/GaN multiple quantum well light converter[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(10): 101117.
- [13] Kang C M, Kang S J, Mun S H, et al. Monolithic integration of AlGaInP-based red and InGaN-based green LEDs via adhesive bonding for multicolor emission[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 10333.
- [14] Kim B H, Nam S, Oh N, et al. Multilayer transfer printing for pixelated, multicolor quantum dot light-emitting diodes[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(5): 4920-4925.
- [15] Gaurav A, Tsai C Y, Wang G W, et al. Ultrahigh-resolution full-color micro-LED array with enhanced



- efficiency based on a color conversion technique[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(6): 925.
- [16] Chen L N, Qin Z Y, Chen S M. Ultrahigh resolution pixelated top-emitting quantum-dot light-emitting diodes enabled by color-converting cavities[J]. *Small Methods*, 2022, 6(1): 2101090.
- [17] Baek G W, Kim Y J, Lee M, et al. Progress in the development of active-matrix quantum-dot light-emitting diodes driven by non-Si thin-film transistors[J]. *Materials*, 2022, 15(23): 8511.
- [18] Gou F W, Hsiang E L, Tan G J, et al. High performance color-converted micro-LED displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(4): 199-206.
- [19] Meitl M A, Zhu Z T, Kumar V, et al. Transfer printing by kinetic control of adhesion to an elastomeric stamp[J]. *Nature Materials*, 2006, 5(1): 33-38.
- [20] Miller R, Marinov V, Swenson O, et al. Noncontact selective laser-assisted placement of thinned semiconductor dice[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2012, 2(6): 971-978.
- [21] Park S I, Xiong Y J, Kim R H, et al. Printed assemblies of inorganic light-emitting diodes for deformable and semitransparent displays[J]. *Science*, 2009, 325(5943): 977-981.
- [22] Kim S, Wu J, Carlson A, et al. Microstructured elastomeric surfaces with reversible adhesion and examples of their use in deterministic assembly by transfer printing[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(40): 17095-17100.
- [23] Lee M H, Lim N, Ruebusch D J, et al. Roll-to-roll anodization and etching of aluminum foils for high-throughput surface nanotexturing[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(8): 3425-3430.
- [24] Choi M, Jang B, Lee W, et al. Stretchable active matrix inorganic light-emitting diode display enabled by overlay-aligned roll-transfer printing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(11): 1606005.
- [25] Park S C, Biswas S, Fang J, et al. Millimeter thin and rubber-like solid-state lighting modules fabricated using roll-to-roll fluidic self-assembly and lamination[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(24): 3661-3668.
- [26] Yang S Y, Carlson A, Cheng H Y, et al. Elastomer surfaces with directionally dependent adhesion strength and their use in transfer printing with continuous roll-to-roll applications[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(16): 2117-2122.
- [27] Ryu J E, Park S, Park Y, et al. Technological breakthroughs in chip fabrication, transfer, and color conversion for high-performance micro-LED displays[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(43): 2204947.
- [28] Marinov V R. 52-4: laser-enabled extremely-high rate technology for  $\mu$ LED assembly[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 692-695.
- [29] Bibl A, Higginson J A, Law H f S, et al. Method of transferring a micro device: US8333860B1[P/OL]. 2012-11-07[2023-11-26]. <https://patents.google.com/patent/US8333860B1>.
- [30] Hsien W M, Hsiang F Y, Hsin C C. Electric-programmable magnetic module and picking-up and placement process for electronic devices: US9607907B2 [P/OL]. 2015-11-30[2023-11-26]. <https://patents.google.com/patent/US9607907B2>.
- [31] Yeh H J J, Smith J S. Fluidic self-assembly for the integration of GaAs light-emitting diodes on Si substrates [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6(6): 706-708.
- [32] Chang W, Kim J, Kim M, et al. Concurrent self-assembly of RGB micro-LEDs for next-generation displays[J]. *Nature*, 2023, 617(7960): 287-291.
- [33] Lee D, Cho S, Park C, et al. Fluidic self-assembly for micro-LED displays by controlled viscosity[J]. *Nature*, 2023, 619(7971): 755-760.
- [34] Park H K, Yoon S W, Eo Y J, et al. Horizontally assembled green InGaN nanorod LEDs: scalable polarized surface emitting LEDs using electric-field assisted assembly[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28312.
- [35] Eo Y J, Yoo G Y, Kang H, et al. Enhanced DC-operated electroluminescence of forwardly aligned p/MQW/n InGaN nanorod LEDs via DC offset-AC dielectrophoresis [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(43): 37912-37920.
- [36] Hwangbo S, Hu L, Hoang A T, et al. Wafer-scale monolithic integration of full-colour micro-LED display using MoS<sub>2</sub> transistor[J]. *Nature Nanotechnology*, 2022, 17(5): 500-506.
- [37] Hong Y J, Lee C H, Yoon A, et al. Visible-color-tunable light-emitting diodes[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(29): 3284-3288.
- [38] Wang R J, Nguyen H P T, Connie A T, et al. Color-tunable, phosphor-free InGaN nanowire light-emitting diode arrays monolithically integrated on silicon[J]. *Optics Express*, 2014, 22(S7): A1768-A1775.
- [39] Wang R J, Ra Y H, Wu Y P, et al. Tunable, full-color nanowire light emitting diode arrays monolithically integrated on Si and sapphire[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9748: 97481S.
- [40] Bui H Q T, Velpula R T, Jain B, et al. Full-color InGaN/AlGaIn nanowire micro light-emitting diodes grown by molecular beam epitaxy: a promising candidate for next generation micro displays[J]. *Micromachines*, 2019, 10(8): 492.
- [41] Liu X H, Wu Y P, Malhotra Y, et al. Submicron full-color LED pixels for microdisplays and micro-LED main displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2020, 28(5): 410-417.
- [42] Damilano B, Demolon P, Brault J, et al. Blue-green and white color tuning of monolithic light emitting diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(7): 073115.
- [43] Chun J, Lee K J, Leem Y C, et al. Vertically stacked color tunable light-emitting diodes fabricated using wafer bonding and transfer printing[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(22): 19482-19487.

- [44] Mun S H, Kang C M, Min J H, et al. Highly efficient full-color inorganic LEDs on a single wafer by using multiple adhesive bonding[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2021, 8(14): 2100300.
- [45] Shin J, Kim H, Sundaram S, et al. Vertical full-colour micro-LEDs via 2D materials-based layer transfer[J]. *Nature*, 2023, 614(7946): 81-87.
- [46] Li P A, Zhang X, Qi L H, et al. Full-color micro-display by heterogeneous integration of InGaN blue/green dual-wavelength and AlGaInP red LEDs[J]. *Optics Express*, 2022, 30(13): 23499-23510.
- [47] Qi L H, Li P A, Zhang X, et al. Monolithic full-color active-matrix micro-LED micro-display using InGaN/AlGaInP heterogeneous integration[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 258.
- [48] Zhuang Z, Iida D, Ohkawa K. InGaN-based red light-emitting diodes: from traditional to micro-LEDs[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022, 61(SA): SA0809.
- [49] Qi L H, Zhang X, Chong W C, et al. Monolithically integrated high-resolution full-color GaN-on-Si micro-LED microdisplay[J]. *Photonics Research*, 2022, 11(1): 109-120.
- [50] Huang Y M, Singh K J, Liu A C, et al. Advances in quantum-dot-based displays[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(7): 1327.
- [51] Chu S Y, Wang H Y, Lee C T, et al. Improved color purity of monolithic full color micro-LEDs using distributed Bragg reflector and blue light absorption material[J]. *Coatings*, 2020, 10(5): 436.
- [52] Bae J, Shin Y, Yoo H, et al. Quantum dot-integrated GaN light-emitting diodes with resolution beyond the retinal limit[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1862.
- [53] Zhu L C, Tao J, Li P Y, et al. Microfluidic static droplet generated quantum dot arrays as color conversion layers for full-color micro-LED displays[J]. *Nanoscale Advances*, 2023, 5(10): 2743-2747.
- [54] Quesnel E, Suhm A, Consonni M, et al. Experimental and theoretical investigation of 2D nanoplatelet-based conversion layers for color LED microdisplays[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 20498-20513.
- [55] Yin Y M, Hu Z P, Ali M U, et al. Alleviating the crosstalk effect via a fine-moulded light-blocking matrix for colour-converted micro-LED display with a 122% NTSC gamut[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(3): 36.
- [56] Kim H M, Ryu M, Cha J H J, et al. Ten micrometer pixel, quantum dots color conversion layer for high resolution and full color active matrix micro-LED display [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(6): 347-353.
- [57] Chen S W H, Huang Y M, Singh K J, et al. Full-color micro-LED display with high color stability using semipolar (20-21) InGaN LEDs and quantum-dot photoresist[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(5): 630-636.
- [58] Tian W Y, Dou L, Jin Z, et al. Full-color micro-LED displays with cadmium-free quantum dots patterned by photolithography technology[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(35): 11112-11122.
- [59] Zhang X, Qi L H, Chong W C, et al. Active matrix monolithic micro-LED full-color micro-display[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(1): 47-56.
- [60] Li P A, Zhang X, Li Y F, et al. Monolithic full-color microdisplay using patterned quantum dot photoresist on dual-wavelength LED epilayers[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(3): 157-165.
- [61] Yang L L, Huang J H, Xu Z Y, et al. Revealing atomic-level surface passivation of PbI<sub>2</sub>-reconditioned red perovskite quantum dots[J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(6): 2202561.
- [62] Li Z W, Wang Y J, Li L H, et al. Low thresholds and tunable modes in plasmon-assisted perovskite microlasers [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(12): 2102777.
- [63] Yang L L, Huang J H, Tan Y K, et al. All-inorganic lead halide perovskite nanocrystals applied in advanced display devices[J]. *Materials Horizons*, 2023, 10(6): 1969-1989.
- [64] Liang J, Wang K, Du Y X, et al. Screen-overprinted perovskite RGB microdisk arrays based on wet-solute-chemical dynamics for full-color laser displays[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(1): 1774-1782.
- [65] Sun W C, Li F, Tao J, et al. Micropore filling fabrication of high resolution patterned PQDs with a pixel size less than 5 μm[J]. *Nanoscale*, 2022, 14(16): 5994-5998.
- [66] Han H V, Lin H Y, Lin C C, et al. Resonant-enhanced full-color emission of quantum-dot-based micro LED display technology[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32504-32515.
- [67] Li Y, Tao J, Wang Q, et al. Microfluidics-based quantum dot color conversion layers for full-color micro-LED display[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(17): 173501.
- [68] Qin F, Liu C, Wu W H, et al. Inkjet printed quantum dots color conversion layers for full-color micro-led displays[J]. *Electronic Materials Letters*, 2022, 19: 19-28.
- [69] Yin Y M, Hu Z P, Ali M U, et al. Full-color micro-LED display with CsPbBr<sub>3</sub> perovskite and CdSe quantum dots as color conversion layers[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(8): 2000251.
- [70] Li P Y, Tao J, Zhao Y Z, et al. Flexible quantum-dot color-conversion layer based on microfluidics for full-color micro-LEDs[J]. *Micromachines*, 2022, 13(3): 448.