

Micro LED当前面临的瓶颈及技术进展*

周佳^{1**}, 闫金健^{2,3**}, 刘志强^{2,3}, 江莹^{2,3}, 包洋^{2,3}, 黄凯^{2,3***},
李金钊^{2,3***}, 周德云⁴



作者简介:黄凯(1980—),男,厦门大学物理科学与技术学院教授、博导、副院长,兼任嘉庚创新实验室未来显示技术研究院执行院长,福建省高层次人才,厦门市双百人才;主要从事宽禁带半导体材料与器件研究。近5年来,在新型显示与战略性电子材料领域承担国家重点研发计划,国家自然科学基金等多个项目,发表高水平论文20余篇,授权专利8项。在显示用Micro LED和紫外光电探测器技术领域取得了一系列创新性成果。

(E-mail: k_huang@xmu.edu.cn)

(1. 西北工业大学 微电子学院,西安 710192;2. 厦门大学 物理科学与技术学院,福建厦门 361000;3. 厦门市未来显示技术研究院,福建厦门 361000;4. 西北工业大学 电子信息学院 空天电子信息感知与光电控制教育部重点实验室 智能空天电子系统技术工业和信息化部重点实验室,西安 710192)

摘要: Micro LED技术作为下一代显示技术的前沿研究领域,具备高亮度、高对比度和高能效等优势。回顾了Micro LED技术的发展历程,重点介绍了其技术难点以及当前的进展情况。技术难点包括外延结构设计、芯片制备中的尺寸效应、全彩化问题、Micro LED系统集成和可靠性研究。当前的进展涵盖了侧壁效应抑制、全彩化方案、巨量转移技术、氮化物红光技术、色转换技术、垂直堆叠技术、CMOS和TFT驱动、三维集成技术、透明显示以及纳米LED。最后展望了Micro LED技术的未来发展方向,包括解决技术难题、推动产业化进程和实现更广泛的应用。

关键词: 微缩矩阵化发光二极管;尺寸效应;全彩化;系统集成
文献标志码: A **文章编号:** 1005-488X(2023)02-0091-23

The Current Bottleneck and Technical Progress of Micro LED

ZHOU Jia, YAN Jinjian, LIU Zhiqiang, JIANG Ying, BAO Yang
HUANG Kai, LI Jinchai, ZHOU Deyun

(1. School of Microelectronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710192, CHN; 2. College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen Fujian 361000, CHN; 3. Xiamen Future Display Technology Research Institute, Xiamen Fujian 361000, CHN; 4. School of Electronic and Information, Key Labo-

收稿日期:2023-06-01

* 基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3600101);国家自然科学基金(62174141)

作者简介:周佳(1989—),女,博士研究生,专业方向为特种显示产品研发,长期从事Micro LED显示产品研发及制造;闫金健(1996—),男,博士研究生,专业为光电信息工程,主攻Micro LED器件物理;(E-mail: yanjinjian@stu.xmu.edu.cn)

李金钊(1979—),女,教授级高级工程师,厦门市未来显示技术研究院副院长。国家“十四五”规划专项指南专家,专业方向为III族氮化物半导体材料及器件的理论和实验研究。(E-mail: jinchaili@xmu.edu.cn)

** 共一作者

*** 通讯作者

ratory of Aerospace Electronic Information Perception and Optoelectronic Control, Ministry of Education, Key Laboratory of Intelligent Aerospace Electronic System Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710192, CHN)

Abstract: Micro LED technology, as a cutting-edge research field in next-generation display technology, has advantages such as high brightness, high contrast, and high energy efficiency. The development process of Micro LED technology has been reviewed, focusing on its technical difficulties and current progress. The technical difficulties include epitaxial structure design, size effects in chip preparation, full color issues, Micro LED system integration, and reliability research. The current progress covers sidewall effect suppression, full color scheme, massive transfer technology, nitride red light technology, color conversion, vertical stacking, CMOS and TFT driving, 3D integration, transparent display, and nano LED. Finally, an outlook on the future development direction of Micro LED technology has been proposed, including addressing technical challenges, promoting industrialization, and achieving wider applications.

Key words: Micro LED; size effect; full color; system integration

1 Micro LED 技术概述

1.1 Micro LED 概念及发展概述

显示技术经历了早期的CRT(冷阴极显像管)、PDP(等离子体显示面板),到当前市面上存在的LCD(液晶显示)、OLED(有机发光二极管)、Mini-LED/Micro LED(微缩矩阵化发光二极管)显示等。显示的价格、性能、应用场景都在不断地跃升,如图1所示。其中,LCD从20世纪70年代发展至现在,通过超过300倍的价格逃逸速度,占据了绝大部分显示市场^[1]。而自从2000年德州理工的江红星教授团队提出并制备Micro LED显示阵列器件后^[2],引起了显示技术领域的新一代革命。Micro LED因其

优异的性能、超低的功耗、多应用场景等多重叠加优势,被认为是当前阶段可预见的多显示场景中最新、最佳的应用技术^[3-15]。尤其是搭载5G+8K显示需求,将会迎来新一波研发及产业化浪潮。

虽然Micro LED被视为下一代自发光新兴显示技术,但目前尚未形成确切的行业标准。根据中国电子视像行业协会发布的《Mini LED背光液晶电视测试方法》,可以将单颗芯片(不含封装)短边尺寸在100 μm~300 μm范围内的芯片称为Mini LED。对于不同的应用场景、研究环境,不同的学者、专家对Micro LED的定义也有着不同的理解。显示应用场景是决定像素密度即Micro LED芯片大小及像素间距的主要因素。从大屏显终端使用视角看,芯片任

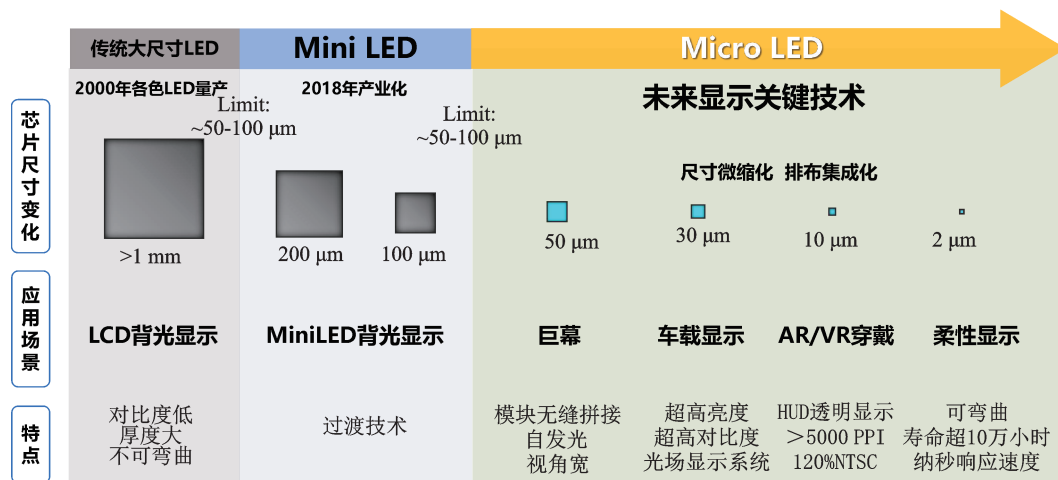


图1 Micro LED技术概述及优势

Fig.1 The overview and advantages of Micro LED

意两个维度尺寸小于 100 μm 的倒装 LED 可称为 Micro LED;从终端消费电子视角来看,对于 Micro LED 的定义应该基于观看距离和人眼的极限分辨率进行计算。例如,对于近眼 2.5 m 以下电视和其他显示产品,使用的芯片单边尺寸应小于 75 μm 甚至更小。而在虚拟现实(VR)/增强现实(AR)显示领域,芯片尺寸应在 10 μm 以下且无衬底^[16]。

在江教授团队之后 20 余年许多研究团队和企业开始对 Micro LED 投入了大量的基础研究、实验室研发和专利布局。产业方面,2012 年 Sony 第一款 Micro LED 产品 CLED(Crystal)亮相,随后几年又分别推出不同尺寸高清 Micro LED 产品;2018 三星于 CES 上展示了拼接的 4.87 m Micro LED 电视;同年,LG 展出 5.83 m Micro LED 电视原型机,2020 年及 2021 年陆续发布了 LG 4K Magnit 电视及 DV-LED Extreme Micro LED 家庭影院级电视,尺寸覆盖 3.6 m 到 10.8 m;2018 年三安光电与三星电子签

订了 Micro LED 芯片相关协议, Micro LED 国产化进程逐步加速,同年起三星陆续推出 Micro LED “The Wall”电视,由此可见 Micro LED 已经逐渐走上显示领域的舞台。Micro LED 显示应用前景虽然光明,但当前阶段不论是在技术路线以及商业化量产方面还存在很多的技术挑战有待解决。

1.2 与当前主流显示技术比较

1.2.1 结构比较

在 LCD 显示中,白光 LED 或蓝光 LED 被制作成背光板作为液晶显示屏的光源,通过偏光片、液晶分子层、滤光片等结构来进行全彩显示;OLED 以有机发光二极管作为光源,以 RGB 三色 OLED 组成像素进行直接全彩显示;Micro LED 由无机的第三代半导体材料制备的 RGB LED 发光芯片组成像素点进行全彩显示。从图 2 中,可以看出 Micro LED 结构更为简单,且更加轻薄。

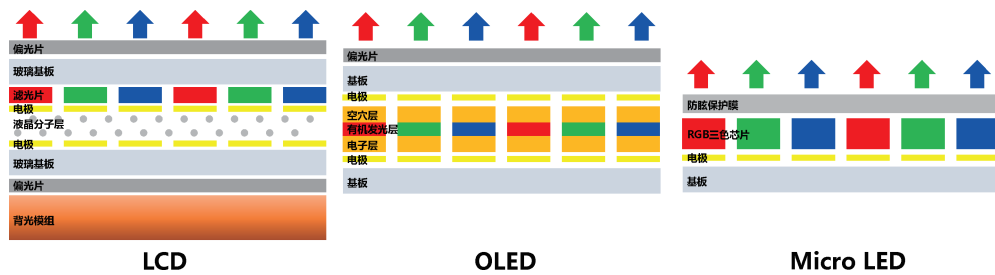


图2 LCD、OLED、Micro LED 显示屏发光结构

Fig.2 Luminous structure of LCD, OLED and Micro LED display screens

1.2.2 性能及功耗比较

亮度:Micro LED 因其直显特性、结构简单,峰值亮度可达上万尼特,高于常规 LCD 和 OLED 产品,满足高亮条件下的常态化使用。尤其是采用倒装封装技术的 Micro LED 发光面积增加,出光效率提高。

稳定性和响应速率:LCD 受液晶材质限制,在极限高低温和响应速率上存在限制;OLED 是直显,响应速度可达微秒级,但有机发光层易受水氧影响导致失效,环境限制较大。Micro LED 是无机直显发光,支持主动和被动驱动,具有纳秒级响应速度,同时在高低温和水氧抵抗方面有技术优势。在产品使用寿命方面,OLED 叠层结构 OLED 在 25 °C 下 LT80 仅 10 000 h,而 LCD 和 Micro LED 可达 20 000+h。OLED 亮度较低导致明亮环境下显示体验下降。综合其材质性能, Micro LED 对产品使用环境更匹配。

功耗:Micro LED 采用 RGB 芯片自发光显示,相比 LCD、OLED 功耗更低。当前 Micro LED 产品是使用键合工艺将 Micro LED 阵列转移到玻璃基板上生长的 TFT 驱动背板上,散热更好,且正在从非晶硅(α -Si)向

低温多晶硅(LTPS)、铟镓锌氧化物(IGZO)发展,电子迁移率更高、响应速度更快,功耗会进一步降低。

像素密度、对比度、色域:Micro LED 可以实现 5 000 ppi+ 的高画质和高像素密度显示,支撑目前主流的车载高清分辨率游刃有余。其 HDR 性能突出,具备超过 OLED 的百万级对比度。自发光原理使其色域覆盖率和广视角显示效果优秀,可为各种应用场景提供极致的画质享受,显示效果如图 3 所示。



对比度: 100 000:1 对比度: 600:1~3 000:1
亮度: >5 000 nit 亮度: 500~1 000 nit

图3 LCD、Micro LED 显示屏画面对比

Fig.3 Comparison of LCD and Micro LED display screens

自由形态及拼接:相较于 LCD 和 OLED 的经济切割以及玻璃基板尺寸限制, Micro LED 可以通过无边框拼接技术实现更为自由的产品尺寸、长宽比设

计,包含曲面、异形产品形态,为类似于智能座舱等场景提供更为匹配的外形设计。Micro LED 同样可

以采用类似于 OLED 的柔性基板,实现更大弧度的曲面和折叠、卷曲等形态,探索全新的车载应用场景。

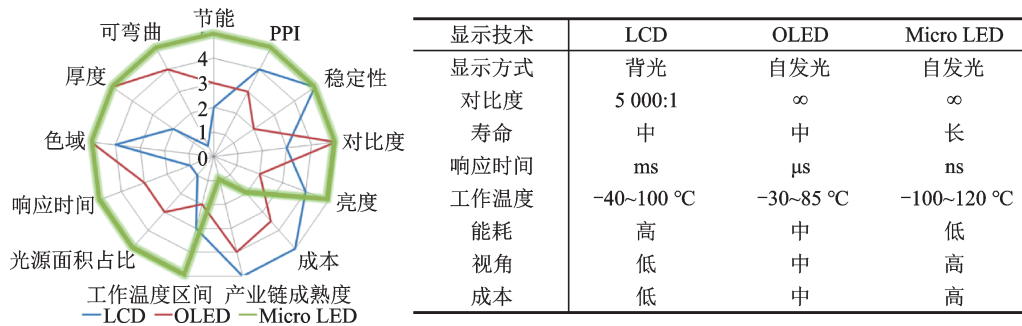


图 4 LCD、OLED、Micro LED 显示技术性能对比^[6-10]

Fig.4 Comparison of LCD, OLED, and Micro LED display technology performance^[6-10]

2 技术难点及当前研究进展

当前阶段, Micro LED 产品制造工艺流程主要包含 Micro LED 外延和蓝宝石衬底上 Micro LED 阵列制备。随后进行衬底剥离,并通过转移技术将

RGB 芯片转移到新基板上。为了实现 Micro LED 技术的产业化,外延生长、巨量转移技术、驱动技术以及全彩显示等四大关键技术至关重要,如图 5 所示。这些技术的发展和突破对于实现 Micro LED 的商业化应用具有重要意义。

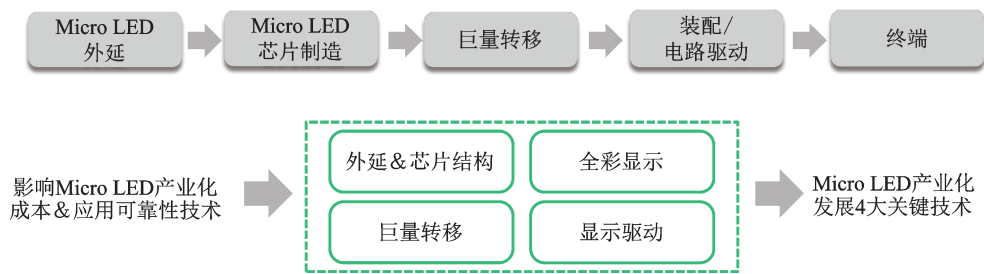


图 5 Micro LED 制备主要工艺流程

Fig.5 Main process flow of Micro LED manufacturing

2.1 外延结构设计

由于 Micro LED 器件的性能高度依赖外延技术,随着发光芯片尺寸的减小,外延质量对性能的影响变得更加突显。首先,传统检测技术已无法满足产品质检和用户深度体验要求,在对外延波长的一致性、均匀性和位错密度的控制需要进一步优化。一般要求发光波长控制在 1 nm 以下,衬底的弯曲度应小于 50 μ m。其次,杂质粒子和缺陷问题需要通过进一步改善工艺来控制,以最大程度减少外延结构内的缺陷颗粒数量,其中,缺陷颗粒的数量应控制在 0.2/cm² 以下。另外, Micro LED 在小电流密度注入条件下存在光效率问题,因为缺陷导致其峰值效率通常低于 10%。而 Micro LED 通常需要匹配非常低的电流密度,这会导致较高的功耗比例,如图 6 所示。外延的波长均匀性和缺陷密度直接影响屏幕的色彩表现,从而影响到视觉感受,同时增加后续芯片排布和筛选的成本。

蓝宝石衬底是氮化物外延中最常用的材料,具备成熟的工艺和良好的稳定性。然而由于蓝宝石与氮化物之间存在较大的晶格失配和热失配问题,会对器件的性能产生影响。因此,在 Micro LED 技术的发展过程中,外延技术的改进和缺陷处理是至关重要的,这将直接影响到 Micro LED 器件的性能和可靠性。

2.1.1 量子阱优化设计

在原有技术中,多量子阱结构是 LED 芯片中重要的构建单元之一,多量子阱结构能够准确地控制能带的位置和结构,使电子空穴高效复合。然而在小电流密度注入条件下,多量子阱会出现载流子匹配不佳,辐射复合率降低的情况,从而降低发光效率。为解决该问题,近期研究发现减少量子阱对数,增加载流子匹配度,可提升出光效率。其中在小电流密度注入条件下,双量子阱因其良好的载流子匹配效果,具有最高的辐射复合率及光效^[17],如图 7 所示。

Micro LED 具有高的比表面积,其侧壁缺陷导

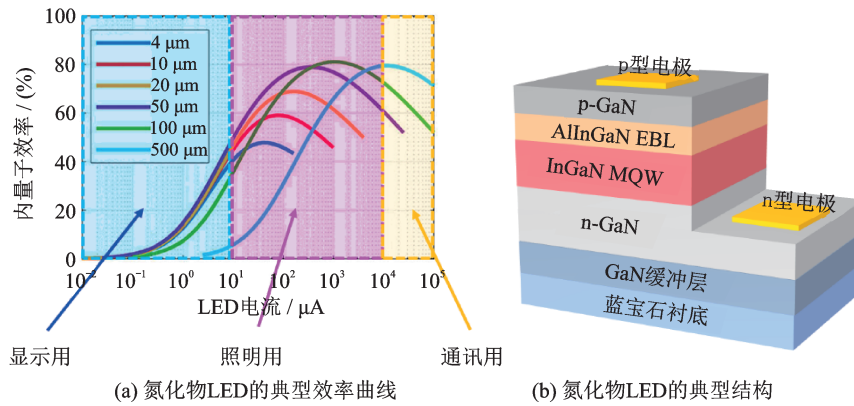


图6 氮化物LED的典型效率曲线及典型结构^[14]

Fig.6 Typical efficiency curves and structure of nitride LEDs^[14]

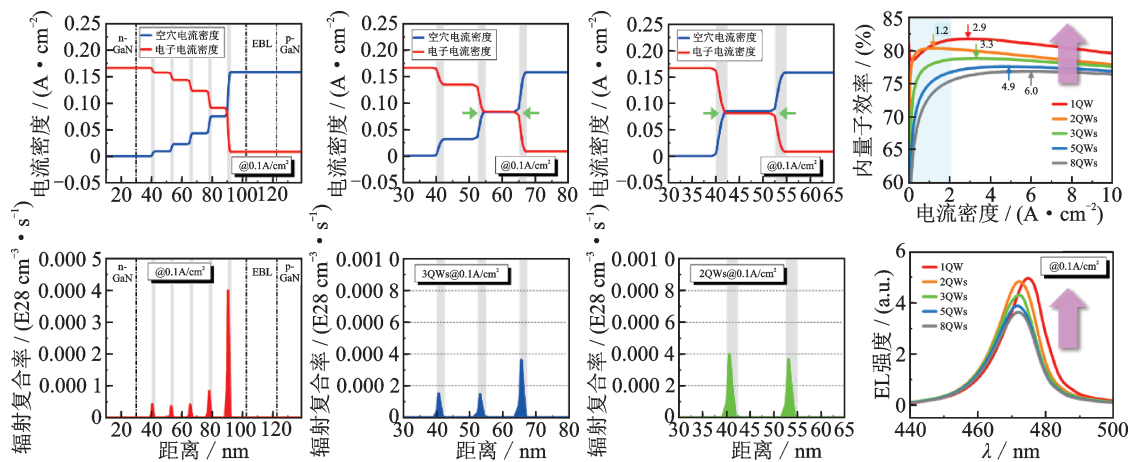


图7 小电流密度下量子阱数量与载流子匹配情况^[17]

Fig.7 Number of quantum wells and carrier matching under low current density^[17]

致的表面复合问题严重,并且随着芯片尺寸的减小,电流扩展也会相应增强,进一步限制了载流子注入并降低发光效率。一项研究表明可通过改变芯片外延结构,减小量子垒厚度来适当降低垂直电阻率,从而使电流更少地横向扩散到侧壁缺陷,降低侧壁缺陷处的非辐射复合率,如图8所示。因此,该方法使表面非辐射复合的方式消耗的载流子数目降低,可以更好地提高空穴注入效率^[18]。

2.1.2 电子阻挡层优化研究

在LED芯片中,电子阻挡层(EBL)通常放置在多量子阱和p型半导体层之间,以防止电子从多量子阱泄露到p型半导体层,减少在LED开关过程中产生的低效率复合等现象。

厦门大学研究团队发现,在小电流密度注入条件下,EBL因其较高的能量势垒阻碍了载流子的注入和运输,导致内量子效率(IQE)降低。因此取消EBL结构可有效增加导带势垒高度,同时减小价带势垒高度,这对促进空穴注入有大幅改善,有利于提升光效,如图9所示。

据报道,低空穴注入与IQE的下降、高正向电

压及载流子不匹配直接相关^[19-21]。因此Gewe Yan等人提出利用超晶格DBR结构作为p型EBL,Al-GaN/GaN SL DBR降低空穴阻挡层高度来促进空穴注入,并实现平衡的载流子注入。结果表明SL DBR器件具有更高的反射率和光提取效率(LEE)。特别是反射率和LEE随着DBR对数量的增加而增强^[22]。平衡载流子注入促进了辐射复合,增强了IQE,并使WPE提高了22.9%。

2.1.3 外延均匀性调控及激光改性研究

提高外延均匀性并减少缺陷颗粒数量是实现高质量Micro LED显示的关键手段。需要根据Micro LED实际制备需求,考量蓝宝石、硅(Si)、碳化硅(SiC)、砷化镓(GaAs)以及氮化镓(GaN)不同衬底的优缺点并选择不同的衬底。其次是对金属有机化学气相沉积(MOCVD)设备进行合适的参数选择。需选择适合的温度、气体流量、V族源流量与III族源流量比、压力等条件,以精准调控温场、流场、化学势场,提升外延结构性能,使其满足要求。从以往研究经验中可知温度场梯度控制难度大,影响外延片径

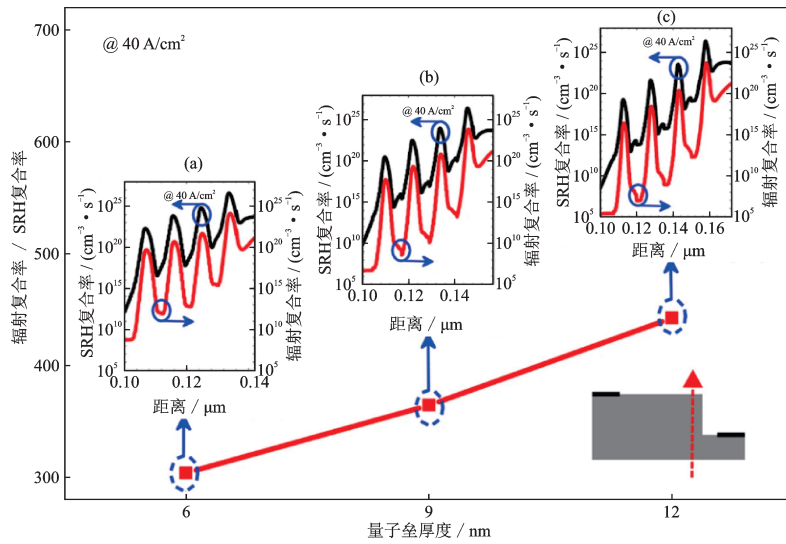
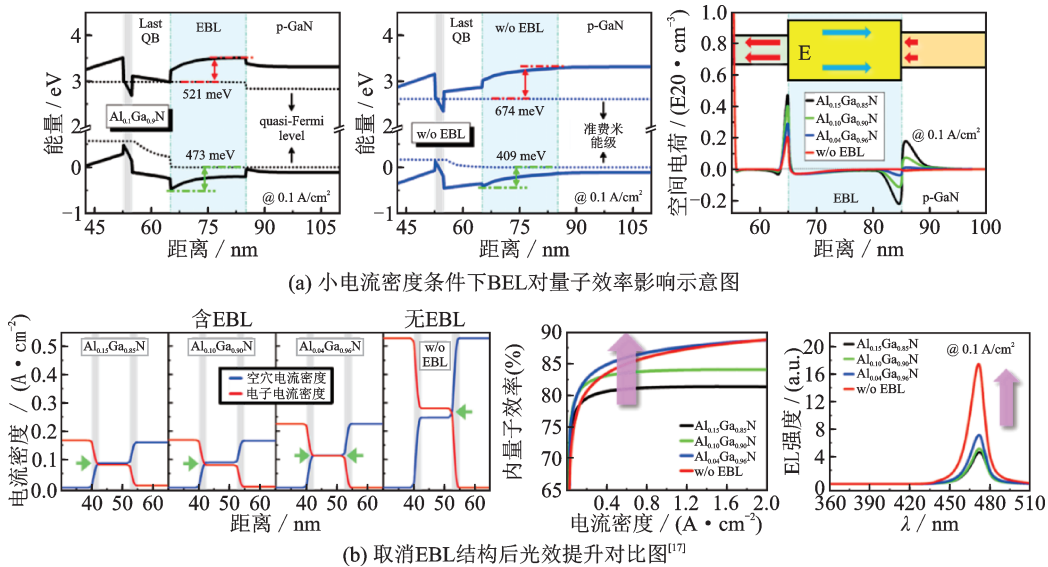


图 8 Micro LED A、B 和 C 的综合 SRH 复合速率和综合辐射复合速率的比率,插图(a)、(b)和(c)分别显示了 Micro LED A、B 和 C 在台面边缘的 SRH 复合速率和辐射复合速率的剖面^[18]

Fig.8 The ratio of the comprehensive SRH recombination rate and comprehensive radiation recombination rate of Micro LEDs A, B, and C, and the illustrations (a), (b), and (c) show the profiles of the SRH recombination rate and radiation recombination rate of Micro LEDs A, B, and C at the edge of the countertop, respectively^[18]



(a) 小电流密度条件下EBL对量子效率影响示意图

(b) 取消EBL结构后光效提升对比图^[17]

图 9 小电流密度下 EBL 对 Micro LED 性能的影响^[17]

Fig.9 Effect of EBL on Micro LED performance under low current density^[17]

向均匀性;气体流场复杂,影响外延片横向均匀性。湿场、流场调控在外延制造中需格外加以注意。

此外,使用激光衬底改性技术可以通过合理调节激光处理的功率、脉冲持续时间和扫描速度来影响外延片的纹理结构,改变衬底表面的粗糙度、浸润性和光学特性,从而调控衬底的预应力,实现高均匀性外延。具体的参数选择需要结合衬底材料的特性,并选择合适的参数和照射方式。

2.2 芯片制备中的尺寸效应研究

随着 LED 芯片尺寸的减小和表面积的减小,

ICP(Inductively Coupled Plasma)刻蚀损伤区域与有源区的比例增加,刻蚀过程中形成的缺陷也更多。这将导致非辐射 SRH(Shockley-Read-Hall,肖克利-里德-霍尔)复合率的增加,从而降低发光效率^[23],如图 10 所示。同时,侧壁损伤区域也存在漏电风险,进一步降低了芯片的可靠性^[24]。

为了解决这些问题,需要采取一系列的技术措施,如优化 ICP 刻蚀过程、改进外延生长工艺、增强侧壁保护等,以降低损伤和缺陷的形成,并提高发光效率和器件可靠性。这些技术措施对于实现高质量的 Micro LED 显示具有重要意义,并为 Micro

LED技术的进一步发展提供了指导和支持。

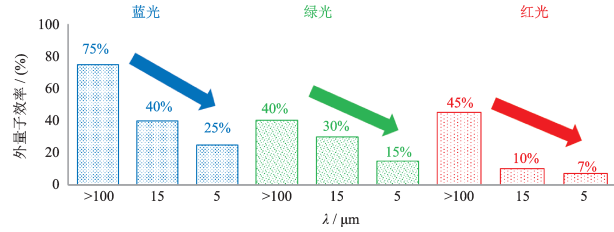


图10 RGB芯片尺寸减小与量子效率降低对照图

Fig.10 Comparison between RGB chip size reduction and quantum efficiency reduction

为进一步说明随着芯片尺寸缩小,芯片由于比表面积加大,大量表面缺陷诱导SRH复合系数增加,导致内量子效率的下降,可参照量子阱中载流子复合的ABC模型。

量子阱中电流计算公式如下:

$$I_{QW} = I_{SRH} + I_{rad} + I_{Auger} = qV_{active}(An + Bn^2 + Cn^3) \quad (1)$$

其中:

q :电子电荷量

V_{active} :有源层的有效复合体积

n :量子阱中的载流子浓度

A 、 B 和 C 分别为SRH复合、辐射复合和俄歇复合系数

I_{QW} :量子阱内总电流

I_{SRH} :缺陷复合电流

I_{rad} :辐射复合电流

I_{Auger} :俄歇复合电流

$$\eta_{IQE} = \frac{qV_{active}Bn^2}{I_{QW} + aI_{QW}^m} = \frac{\eta_{inj}Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3} \quad (2)$$

η_{IQE} :内量子效率

η_{inj} :注入效率

以上模型及图10、图11解释了尺寸缩小,电流密度增加,大量表面缺陷导致SRH复合系数增加,

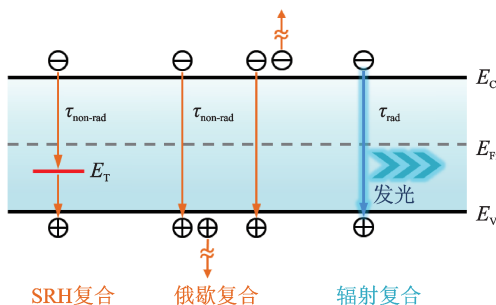


图11 LED电流组成部分与内量子效率关系示意图

Fig.11 Schematic diagram of the relationship between LED current components and internal quantum efficiency

从而致使内量子效率下降的情况。

纯干法刻蚀会对Micro LED表面造成损伤,而纯湿法刻蚀会产生较大的侧壁刻蚀。基于刻蚀工艺引入大量表面缺陷及侧壁刻蚀损伤,侧壁的刻蚀损伤及载流子迁移效应使芯片边缘形成死区,这会导致发光效率下降以及发光特性不稳定。为得到高品质Micro LED器件,通常需要将干法刻蚀和湿法刻蚀两种刻蚀工艺相结合,来改善侧壁表面品质。

2.2.1 侧壁效应抑制研究——湿法刻蚀

等离子体辅助干法刻蚀设备主要有RIE(反应离子刻蚀)和ICP(感应耦合等离子体刻蚀),在定义芯片MESA时,采用干法刻蚀技术会在侧壁引入大量非晶、杂质等晶体缺陷,导致器件性能下降^[25-27]。侧壁刻蚀损伤的修复对Micro LED的性能具有重要意义。湿法刻蚀有利于消除侧壁刻蚀损伤区域,大幅减少侧壁死区的晶体缺陷和非辐射复合中心,减小漏电流增强发光,且增强产品的散热性能。研究表明,通过KOH(氢氧化钾)或TMAH(四甲基氢氧化铵)溶液对GaN器件干法刻蚀后进行湿法刻蚀,可使光效得到大幅提升^[28-32],如图12所示。

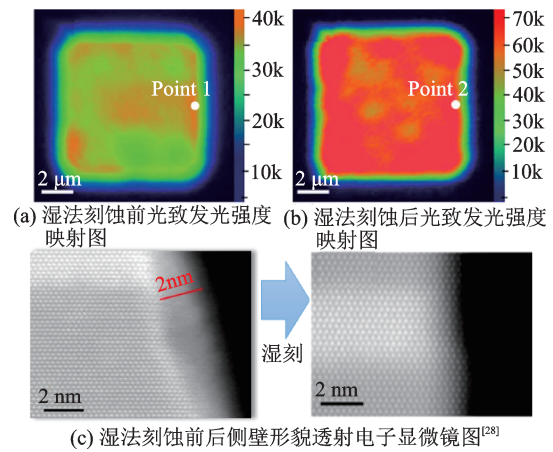


图12 湿法刻蚀前后边缘损伤区域改善情况

Fig.12 Improvement of edge damage areas before and after wet etching

2.2.2 侧壁效应抑制研究——包覆层钝化

(一) 双层包覆,减小漏电流

在传统工艺中,采用PECVD(等离子体增强化学气相沉积)对SiO₂钝化层进行低温、快速沉积。然而,这种方法下SiO₂薄膜的均匀性无法达到预期,并且在SiO₂沉积过程中形成的晶粒尺寸较大,难以在器件侧壁形成良好的结合界面。为了改进该问题,目前的研究在现有基础上采用了ALD(原子层沉积)技术,结合新型功能半导体材料AlN^[33]或Al₂O₃^[34-36]作为钝化层,提供更良好的钝化界面,通过双层包覆

工艺提升了钝化效果。该工艺在 MESA 侧壁上沉积绝缘钝化层,可以实现侧壁悬挂键的饱和,有效地减

少侧壁的漏电通道和非辐射复合中心,从而显著修复损伤,提升器件性能如图 13、图 14 所示。

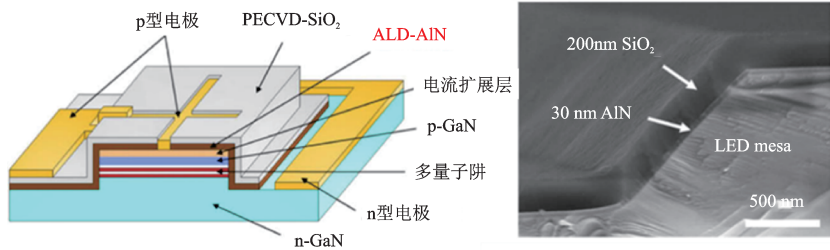


图 13 ALD-AIN 钝化层结构示意图及侧壁沉积绝缘钝化层^[33]

Fig.13 Schematic diagram of ALD-AIN passivation layer structure and side wall deposition insulation passivation layer^[33]

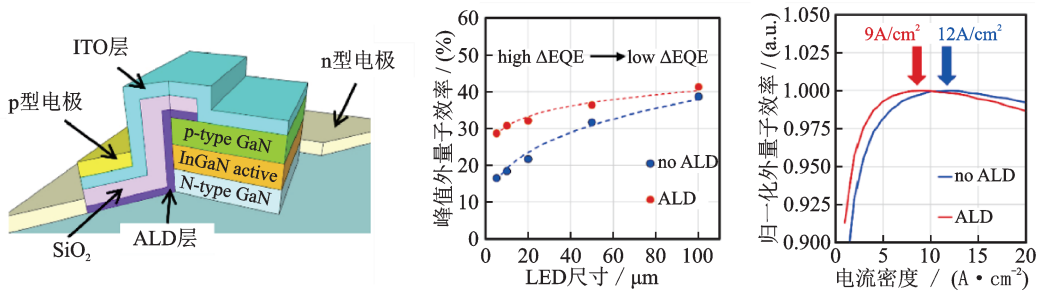


图 14 含 ALD 钝化层的 Micro LED 结构示意图及性能提升^[35]

Fig.14 Structure diagram and performance improvement of Micro LED with ALD passivation layer^[35]

(二) 溶胶-凝胶法

干法刻蚀会在侧壁引入大量悬挂键和各种缺陷,表面钝化是减少缺陷态从而提高 EQE 的有效途径,采用传统钝化方式例如化学气相沉积或 ALD 沉积,由于侧壁暴露在热能、等离子体和原子反应中,钝化过程中会引入新的缺陷。为了克服尺寸效应,有研究者通过溶胶-凝胶法合成钝化层,该方法有效抑制点缺陷的形成。这归因于 SiO₂凝胶具有多孔洞、高比表面积和良好的介电特性。SiO₂凝胶的纳米颗粒可以轻易吸附在 GaN 表面上,从而最小化原子间的相互作用。相比传统的 PECVD 工艺,采用溶胶-凝胶工艺可以避免非晶态损伤,并减小侧壁的漏电流,从而增强发光效率。这项技术在纳米级 LED 中实现了高达 20.2±0.6% 的外量子效率,为 Micro LED 的研究和开发提供了新的可能性,并有望在 Micro LED 技术中发挥重要作用^[37],如图 15、图 16 所示。

(三) 综合湿法刻蚀及包覆层钝化

在解决 Micro LED 尺寸效应的过程中,需综合考虑湿法刻蚀消除侧壁非晶、缺陷杂质作用,以及沉积包覆层钝化悬挂键带来的光电性能提升,因此湿法刻蚀与包覆层钝化的结合是克服干法刻蚀劣化器件侧壁的重要方案^[38, 39]。

南京大学研究团队通过结合酸碱两步湿法刻

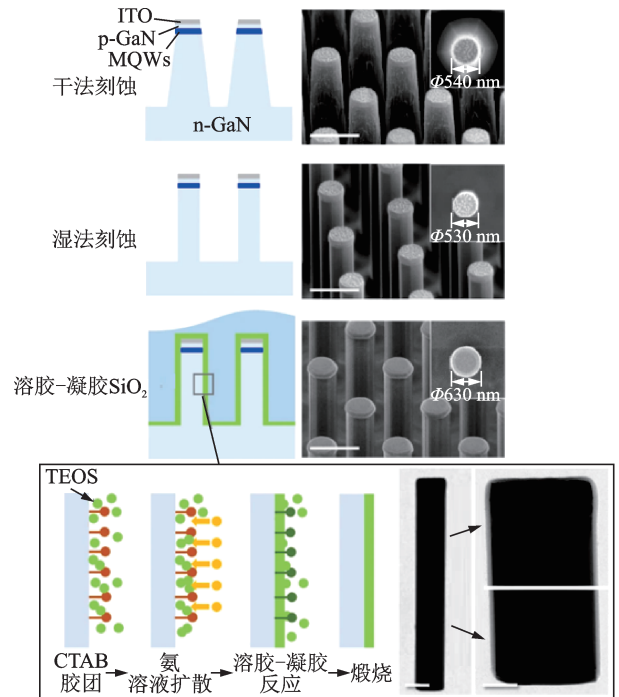


图 15 具有溶胶-凝胶 SiO₂钝化的 Micro LED 制备示意图和扫描电子显微镜图像,插图为 GaN LED 纳米棒上溶胶-凝胶反应的示意图^[37]

Fig.15 Schematic diagram and scanning electron microscope image of Micro LED with sol-gel SiO₂ passivation, with the illustration showing the schematic diagram of the sol-gel reaction on GaN LED nanorods^[37]

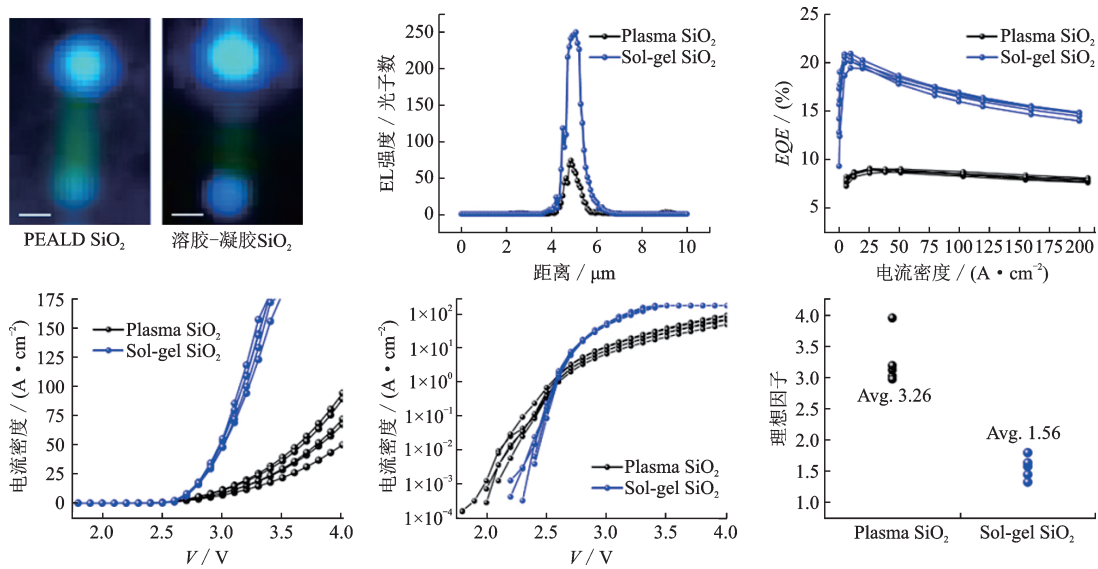


图16 不同表面钝化方法的纳米棒LED的发光图像及电学性能^[37]

Fig.16 Luminous images and electrical properties of nanorod LEDs with different surface passivation methods^[37]

蚀以及包覆层钝化技术,利用综合修复方案修复Micro LED器件侧壁,如图17、图18所示。经由侧壁修复及钝化,5×5 μm²蓝光Micro LED的IQE增加约50%,由18.3%提高至26.9%^[40],为Micro LED侧壁修复提供了技术方案。

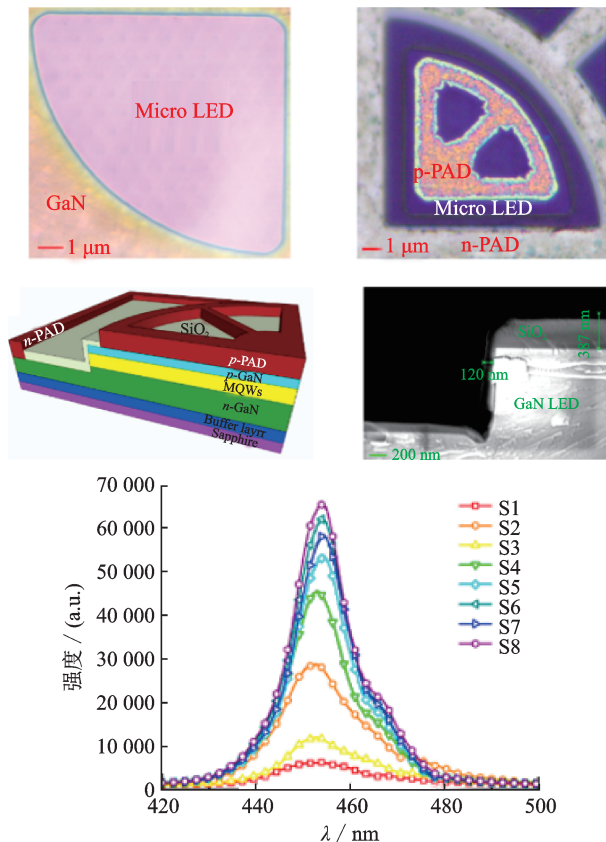


图17 Micro LED的器件结构及光致发光(PL)光谱^[40]

Fig.17 Device structure and photoluminescence (PL) spectrum of Micro LED^[40]

2.2.3 侧壁效应抑制研究——选择性区域生长

除干法刻蚀的“自上而下”方法制备Micro LED器件外,选择性区域外延的“自下而上”方法近年来也成为了研究热点。

谢菲尔德大学研究团队在制备Micro LED芯片时,使用MOCVD进行InGaN材料的生长,在具有特定晶向和晶格参数的衬底生长特定晶向的材料。通过制作生长模板,将选择性过度生长方法与嵌入的外延晶格匹配分布式布拉格反射器(DBR)组合,成功实现了选区外延来避免后续的MESA刻蚀工艺,并极大地增强了光效,并减小了芯片间距。实现直径为3.6 μm、间距为2 μm的Micro LED阵列的制备,如图19所示。由于选区外延避免干法刻蚀的特点,从器件制备角度避免侧壁刻蚀损伤,实现了在500 nm处表现出9%的超高EQE^[41]。这对于光学显示和照明应用中的颜色纯度和色彩再现性非常重要。

随后该课题组使用微孔图案模板进行选择性外延生长,提高有源区In组分并同时显著增强应变松弛,实现了尺寸为2 μm的红光Micro LED(发射波长为642 nm)发光,其具有3.5×10⁷ cd/m²的高亮度和1.75%的峰值外量子效率,如图20所示。该方法为实现长波长、小尺寸高效发光器件提供了一个简单的解决方案^[42]。

2.2.4 侧壁效应抑制研究——离子注入

(一) 选择性重离子注入

离子注入可以改变材料特性,合理使用离子注入可在Micro LED芯片中实现定制化电学隔离。

先前一项研究中使用定制离子注入(TIIP)来

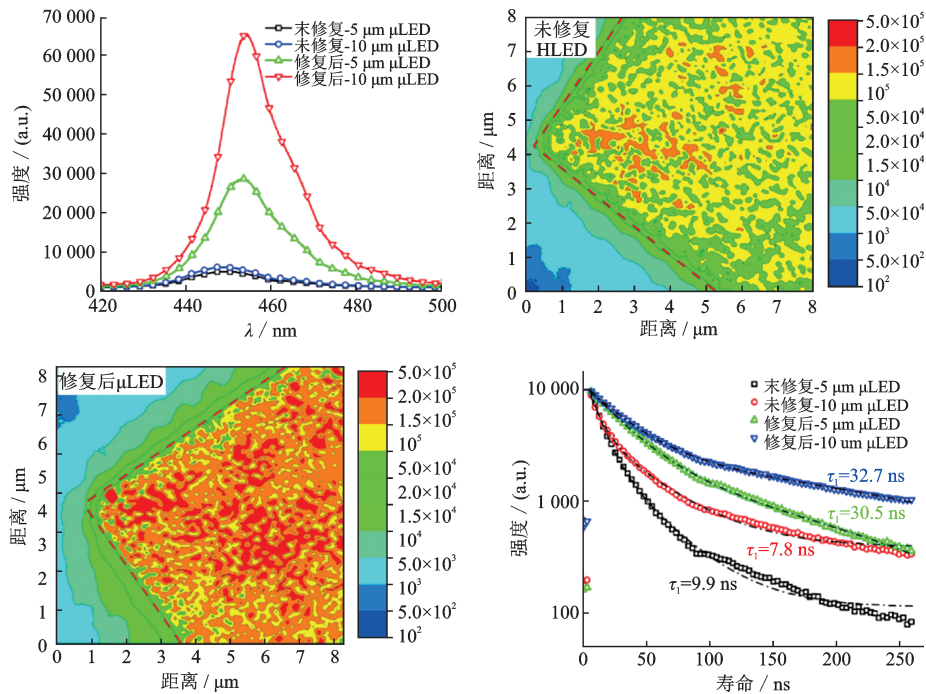


图 18 不同修复方案的 Micro LED 光学性能表征^[40]

Fig.18 Optical performance characterization of Micro LED with different repair schemes^[40]

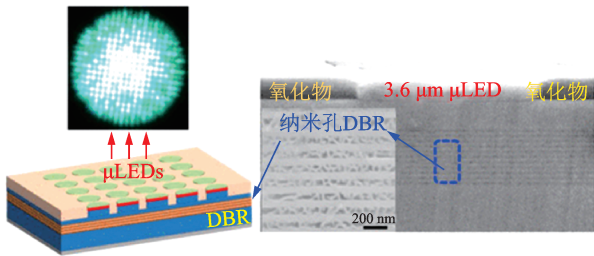


图 19 选择区域生长原理图、横截面 SEM 图^[41]

Fig.19 Schematic diagram of selected region growth and cross-sectional SEM image^[41]

制造亚微米级的高效电驱动像素化 InGaN 基 Micro LED, 如图 21, 22 所示。通过在每个像素周围创建一个横向限制的非辐射区域, 适用于亚微米大小的像素。此外, 由于其平面几何结构, TIIP 像素化具有卓越的集成能力, 进而实现了与薄膜晶体管像素电路单体集成的 2 000 ppi 超高分辨率 Micro LED 显示器。通过定制离子注入, 阻隔特定区域电流, 理论像素密度可高达 8 500 ppi^[43]。该方法有望为

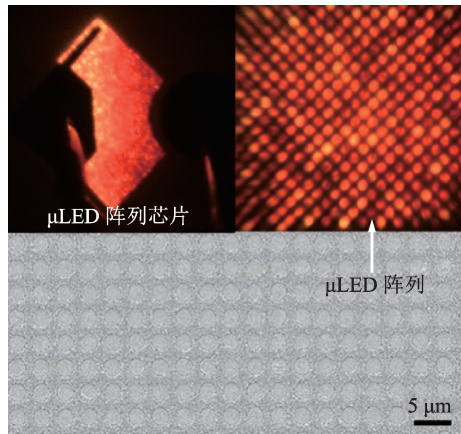


图 20 Micro LED 器件阵列的发射图像以及 Micro LED 阵列外延片的 SEM 图像, 器件直径为 2 μm, 间距为 1.5 μm^[42]

Fig.20 The emission image of the Micro LED device array and the SEM image of the epitaxial wafer of the Micro LED array, with a device diameter of 2 μm and a spacing of 1.5 μm^[42]

无缝增强现实 (AR) 眼镜的高性能 Micro LED 显示器铺平道路。

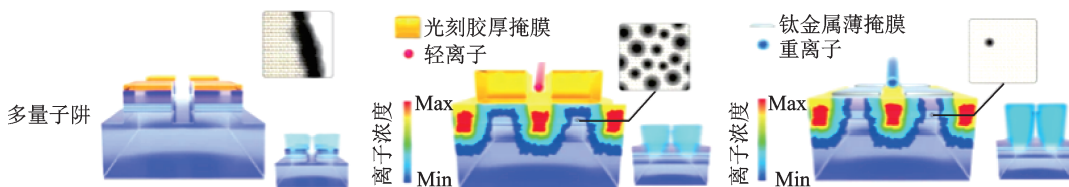


图 21 通过台面刻蚀和 TIIP 实现的 InGaN LED 亚微米级像素化的示意图^[43]

Fig.21 Schematic diagram of InGaN LED sub micron level pixelization achieved through mesa etching and TIIP^[43]

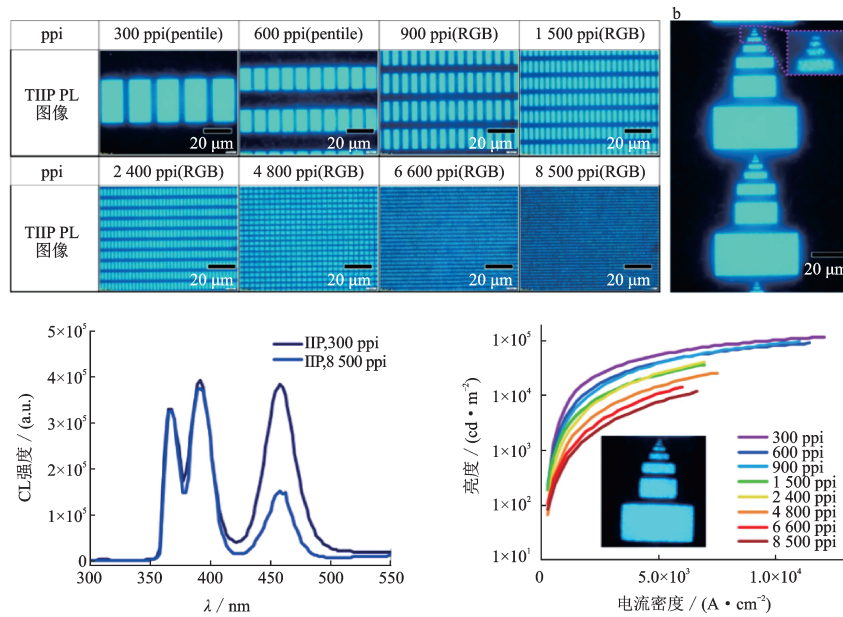


图 22 TIIIP 像素化显示阵列 PL 图像及光电性能^[43]

Fig.22 TIIIP pixelated display array PL images and optoelectronic performance^[43]

(二) 选择性离子注入

与重离子注入形成电学隔离的方式不同,庄喆等人对 p-GaN 区域使用 H₂ 等离子体处理进行选择性有意钝化实现像素化发光。研究中通过使用图案化 ITO 层作为发光区域的掩模,利用 H₂ 等离子体钝化暴露的 p-GaN 区域使其成为电学隔离区以防止电流注入到下方的 InGaN 量子阱中,用作电隔离区域。成功制备了多种绿光 Micro LED 阵列。与台面刻蚀制备的 98×98 μm² Micro LED 相比,从 5 μm 方形到 2.7 μm 圆形, Micro LED 的光输出功率密度和外量子效率提高了 10%~20%。如图 23,阵列中的每

个 Micro LED 像素都可以被清晰地观察到,表明 H₂ 等离子体处理是钝化 p-GaN 和实现超小 Micro LED 单色或全彩像素化的一种可行方法^[44-45]。

2.2.5 侧壁效应抑制研究——调整芯片结构

为增强载流子限域效应,不仅可以调整外延结构进行改善,还可以通过设计新型芯片结构以增强电流限域。

有研究提出了具有浅刻蚀氧化层再填充电流孔 Micro LED 的几何形状和芯片尺寸控制的设计,如图 24。它结合了 ITO 层和氧化物限制的电流通孔结构,不仅具有均匀的电流分布,还增强了电流

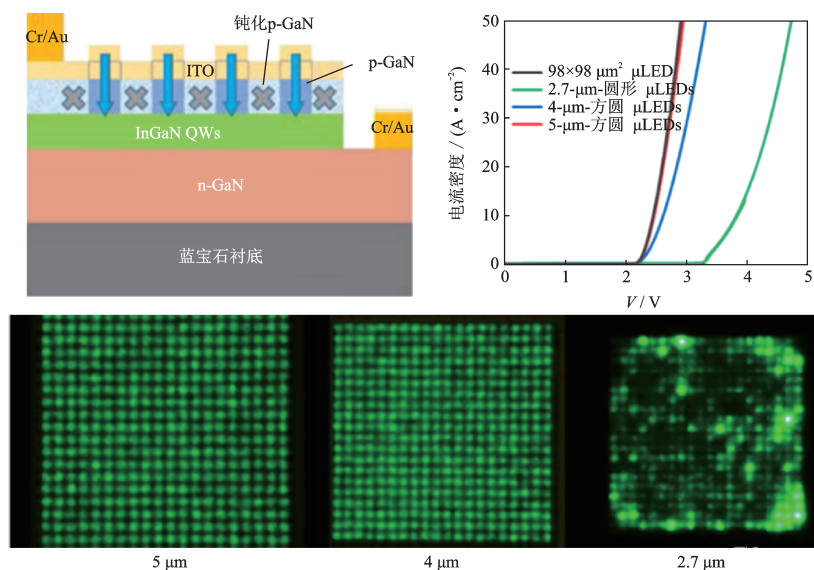


图 23 通过 p-GaN 钝化处理的 Micro LED 示意图、电学性能及 EL 发光图像^[44]

Fig.23 Schematic diagram, electrical performance, and EL emission image of Micro LED treated with p-GaN passivation^[44]

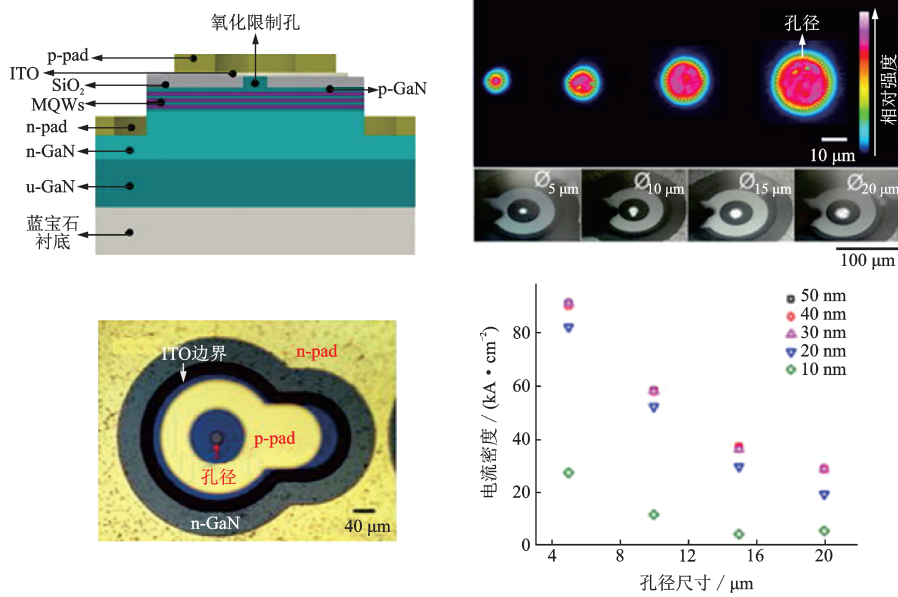


图 24 电流孔结构、Micro LED 器件结构、PL 图像及最大电流密度^[46]

Fig.24 Current hole structure, Micro LED device structure, PL image, and maximum current density^[46]

限域。在 5 μm 孔径的微型 LED 中实现了超过 90 kA/cm² 的超高注入水平^[46]。

为克服由于表面积比的增加,侧壁缺陷引起的表面非辐射复合降低 GaN 基 Micro LED 的 EQE 的问题。有研究团队选择性地去除芯片外围的 p⁺-GaN 层,以便在台面边缘形成电阻性的 ITO/p-GaN 结,如图 25 所示。最终发现对于小尺寸 Micro LED,这种电阻性 ITO/p-GaN 结可以有效地阻止空穴到达侧壁。同时这种对注入电流的限制也有利于空穴注入到有源区。因此可以抑制表面刻蚀缺陷引起的台面边缘的非辐射复合及漏电流。该结构的 EQE 和光输出功率的测量和计算都得到了提高^[47]。

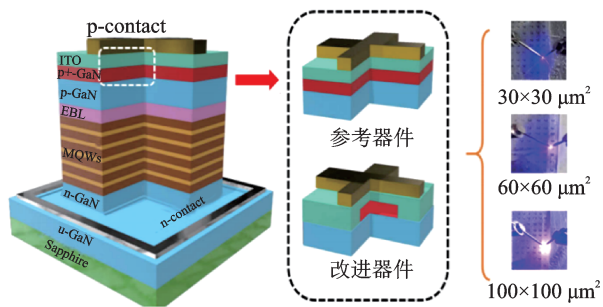


图 25 参考器件和改进器件示意图,插图为改进器件在 8 V 电压下的 EL 图像^[47]

Fig.25 Schematic diagram of reference device and improved device, with the illustration showing the EL image of the improved device at 8 V voltage^[47]

2.3 全彩化研究

2.3.1 当前阶段的全彩化方案

目前 LED 晶圆厂以 GaN 半导体材料生产蓝绿

光 LED 芯片,以 AlGaInP 半导体材料生产红光 LED 芯片。在 Micro LED 直显市场,仍以上述方案为主流,即先以 AlGaInP 和 GaN 材料生产 RGB 三色 Micro LED 芯片,再采用巨量转移技术将 Micro LED 芯片转移至驱动基板,实现单色或 RGB 全彩显示。

小尺寸穿戴式 Micro LED 应用领域对显示分辨率的要求较高,需将 LED 的尺寸进一步缩小,这对于 Micro LED 芯片制程以及巨量转移工艺提出一定的挑战,故现阶段多数样品采用的是单色 Micro LED 显示,或通过全彩化方案实现全彩显示。

单基色 Micro LED 实现全彩化的方案主要有两种,一种是通过光学透镜合成,采用透镜与控制板连接,将不同单基色 RGB 显示屏的子画面合成,然后利用驱动面板进行图片信号的传输,进而对三色 Micro-LED 阵列的亮度进行调整以实现彩色化,并与光学投影镜头连接,以此实现微投影^[48-50],原理

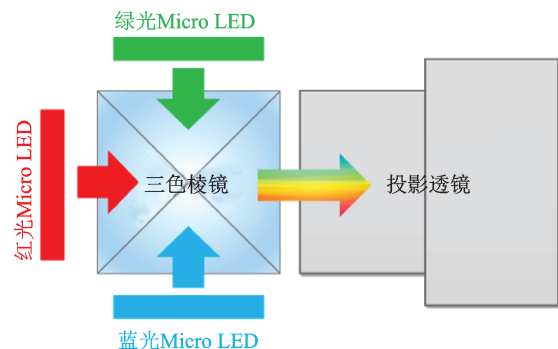


图 26 光学透镜合成法原理图^[48]

Fig.26 Schematic diagram of optical lens synthesis method^[48]

图见图 26。光学透镜合成法只需要转移单基色 Micro LED,不涉及 RGB LED 巨量转移的选择性转移问题,理论而言实现更简单,但光学透镜合成法光路系统复杂,且无法集成在手机、可穿戴设备的显示屏上,现阶段只适合于投影显示等。

另一种单基色 Micro LED 全彩化是通过色彩转换法采用短波长 Micro LED(紫外或蓝光)加发光介质的方法来实现全彩化。发光介质大致有两类:量子点、荧光粉。其中,荧光粉简单易用,但是由于荧光粉颗粒的尺寸较大(一般为数微米至数十微米),受激发射的光谱半峰宽较大,影响显示产品的显示色彩,且荧光粉性质不稳定,因此在 Micro LED 显示产品中使用较少。相较于荧光粉的不足,量子点凭借其优异的光学特性有了大放异彩的机会。量子点是一种纳米级尺寸的纳米晶,如硫化镉(CdS)量子点和硒化镉(CdSe)量子点等,通过控制量子点的尺寸使其对应发出不同波长的光,因此量子点发射光谱范围覆盖较广,且量子点发射光谱的半峰宽较窄,可有效提升显示屏的色彩饱和度。因

此,量子点 Micro LED 显示技术也成为行业(特别是穿戴式 Micro LED 显示领域)研究的热点^[51-53]。

2.3.2 巨量转移技术难点、分类及功能对照

实现 Micro LED 与电路驱动结合的显示阵列,需要对 Micro LED 芯片进行多次巨量转移(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 精确度要求高^[54]。

对于 RGB 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 R/G/B 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。

Micro LED 芯片的厚度仅为几微米,将其精确地放置在目标衬底上的难度极高,且芯片尺寸及芯片间距都很小,要将芯片连上电路也是一个巨大的挑战^[55-57]。目前主流巨量转移技术主要有静电力印章^[58, 59]、磁力印章^[60, 61]、弹性印章^[62-65]、激光辅助转移^[66-68]、流体自组装^[69]、滚轮转印^[70, 71]等方式。其中弹性印章转移经由众多研究者努力已发展为较为成熟的转移技术,如图 27。

巨转技术	静电力印章	磁力印章	弹性印章	激光转移	流体自组装	滚轮转印
原理图						
核心技术	静电力	磁力材料	可拉伸胶膜	动态剥离层	悬浮液	转移滚轮
转移速度	★	★	★	★★★	★	★★★
转移良率	★	★★	★★	★★★	★	★
技术成熟度	★	★	★★★	★	★★	★

图 27 主流巨量转移技术方案对照^[15,54,58,65,70]

Fig.27 Comparison of mainstream mass transfer technology scenarios^[15,54,58,65,70]

激光辅助转移技术难度大,工艺制程要求更为严苛,其转移良率高、速度快等特点吸引了大量产业界学术界研究者的目光,被认为是最具商业化潜力的转移技术。近日厦门大学建成全球首条对角线 60 cm(G2.5, 370 mm×470 mm)Micro LED 激光巨量转移工艺示范线,如图 28 所示,极大地推动了激光巨量转移技术在 Micro LED 产业界的发展^[72]。

在最新的研究中, LG 开发出一种基于流体自组装(FSA)技术的新转移方法,称为磁力辅助介电泳自组装技术(MDSAT),它结合了磁力和介电泳(DEP)力,可在 15 分钟内完成 RGB 三色 LED 的转移,转移良率达 99.99%。该方法通过在 Micro LED

中嵌入可由磁铁控制的镍,并以受体孔为中心施加局部介电泳(DEP)力,因此 Micro LED 可被有效地抓取并组装在受体位点^[73],见图 29。

2.3.3 氮化物红光 Micro LED 技术

不同于蓝绿光的 GaN 材料,现阶段红光一般采用 AlInGaP 材料,与氮化物蓝绿光芯片工艺制程不兼容,机械稳定性差,需要单独开发电极、巨量转移等工艺,导致制作成本高、可靠性低。同时 AlInGaP 材料也存在一定的瓶颈问题,其发光属于朗伯模式,与 In-GaN 蓝绿光芯片远场辐射不同,RGB 芯片光场不同导致在显示应用中体验感较差^[74]。磷化物半导体载流子扩散长度长,使磷化物红光 Micro LED 尺寸效应更

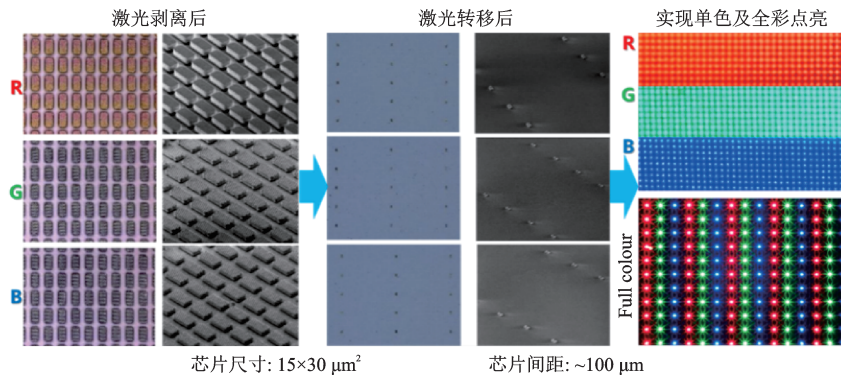


图 28 激光巨量转移制作 Micro LED 显示阵列
Fig.28 Laser assisted mass-transfer fabrication of Micro LED display array

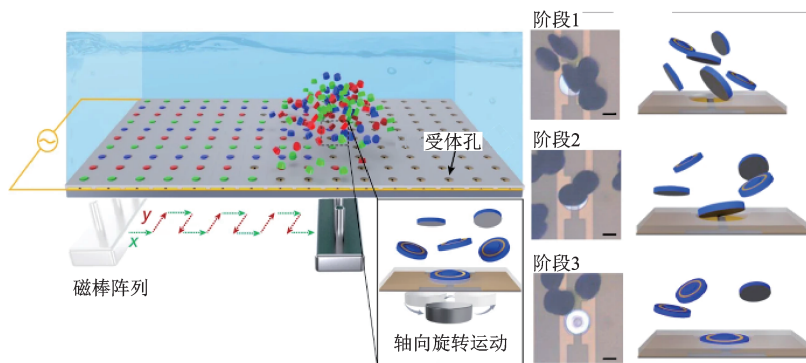


图 29 MDSAT 流体装配过程及拍摄图^[73]
Fig.29 MDSAT fluid assembly process and shooting diagram^[73]

为明显,导致小尺寸红光芯片发光效率低^[75, 76],如图 30 所示。在实际应用中,AlInGaP 芯片发光效率的温度稳定性差,在 85 °C 时相比室温发光效率衰减约 75%,故发展氮化物基全彩显示技术是大势所趋^[77]。

为了制备高效红光器件,需要在应变弛豫的 InGaP 底层中引入合适的 In 含量。然而,GaN 与 InN 之间的晶格失配度高达 11%,高 In 含量的掺入导致

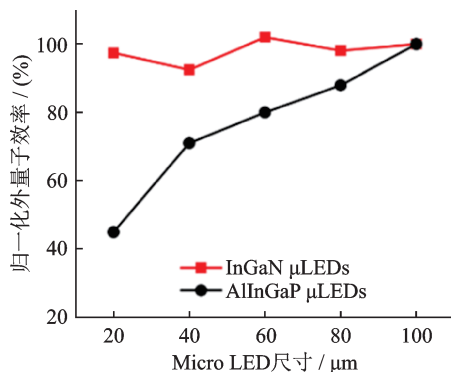


图 30 InGaP 基与 AlGaInP 基红光 Micro LED 尺寸效应对比^[75]

Fig.30 Comparison of size effects of InGaP based red Micro LED and AlGaInP based red Micro LED^[75]

InGaP 有源区的晶体质量显著降低。为了解决这个问题,需要减少底层和 InGaP 量子阱之间的晶格失配。一种解决方案是通过外延生长微纳结构,通过边缘使应力松弛并实现低位错密度、高 In 组分量子阱的生长。

南昌大学江风益院士团队通过降低外延温度并调整外延结构,在硅(111)衬底上制造了高晶体质量 InGaP 橙光 LED,V 型坑结构在外延过程中可以减少压应变并增强了空穴注入,如图 31 所示。最终在 0.8 A/cm² 电流密度、608 nm 峰值波长下,实现了 24.0% 的创纪录的 WPE^[78]。

还有的方案是使用晶格参数更接近 InGaP 量子阱的 GaN 衬底来减小 LED 结构有源区中的应力。此前,Soitec 通过 Smart CutTM 技术制备了 InGaP 衬底,通过不同的热处理条件获得弛豫的 InGaP 层^[79]。近年来,多孔 GaN 由于较低的机械刚度也被用于制备这种衬底^[80]。2021 年,Shubhra S. Pasayat 等人通过采用 InGaP-on-porous GaN 的衬底技术,对覆盖了 200 nm 的 In_xGa_{1-x}N 层的 800 nm 的 n-GaN 层进行电化学阳极氧化,使其多孔化,很好地弛豫了 InGaP 层中的应力,实现了尺寸为 6 μm × 6 μm 的发

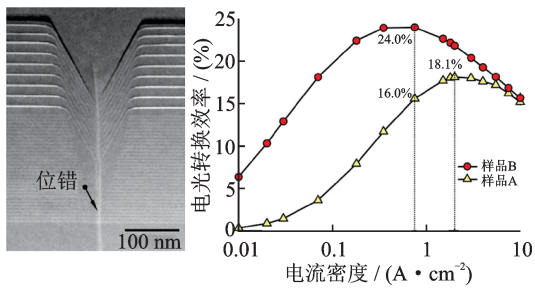


图31 优化外延结构的V坑结构LED的形貌及电学性能^[78]
Fig.31 Morphology and electrical performance of V-pit structured LED with optimized epitaxial structure^[78]

射波长为 632 nm 的 Micro LED^[81]。此外,他们使用 GaN-on-porous GaN 衬底也改善了后续生长的 In-GaN 层的晶体质量,使 In 含量为 0.12 的 100 nm 厚 InGaN 层应变弛豫程度达到 65%^[82],其结构及 EL 图像见图 32 所示,为红光氮化物 Micro LED 的发展提供了方案与思路。

2.3.4 量子点色转换技术

量子点色转换技术通过使用半导体量子点作为发光材料,将 LED 发出的蓝光转换为长波长的红光和绿光。通过控制量子点的材料成分和大小,可以实现对发光波长的精确控制,从而实现准确的色彩再现。因此量子点色转换成为了 Micro LED 全彩化的方案之一。

台湾新竹交通大学研究团队将红、绿和蓝光的胶体量子点与 Micro LED 阵列相结合实现全彩化,

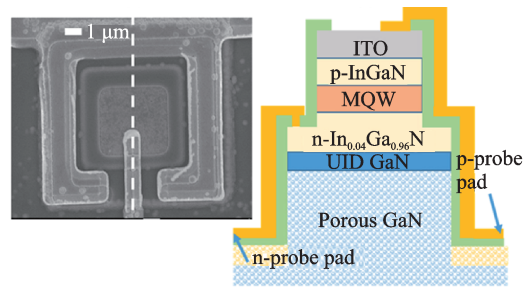


图32 使用多孔 GaN 模板的 InGaN Micro LED 结构示意图及 EL 图像^[82]

Fig.32 Schematic diagram and EL image of InGaN Micro LED structure using porous GaN template^[82]

展示了未来显示技术的可行选择。Micro LED 阵列的间距为 40 μm,足以满足高分辨率屏幕应用。开发了气溶胶喷射技术,将其用于微纳尺度喷涂量子点,该技术使用雾化器和气流控制来获得均匀且受控的量子点。为了提高激发光的利用率,在设备上放置了一层分布式布拉格反射器,以将大部分泄漏的激发光反射回量子点层,如图 33 所示。通过这种机制,相比没有反射器的样品,增强的光通量为 194%(蓝光),173%(绿光)和 183%(红光),并记录了 165 lm/Watt 的光效率^[83],见图 34。

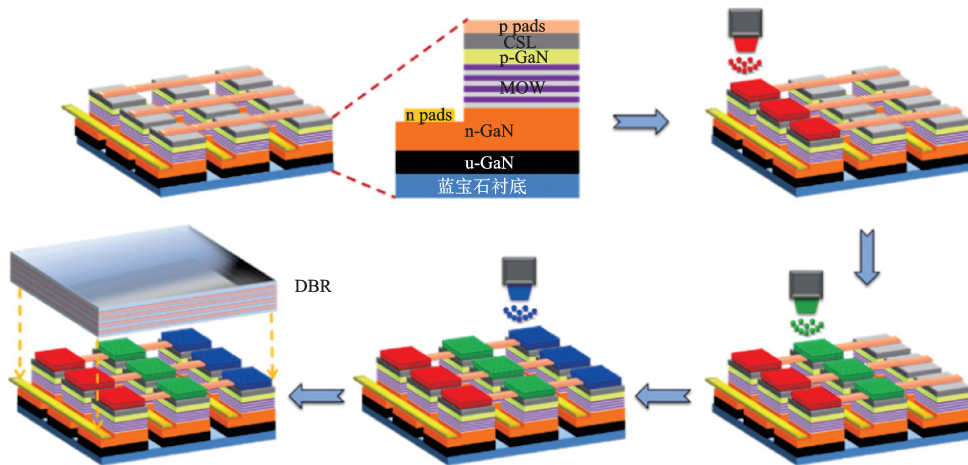


图33 基于量子点的全彩 Micro LED 显示器制备工艺流程^[83]

Fig.33 Manufacturing process flow of full color Micro LED display based on quantum dots^[83]

2.3.5 垂直堆叠全彩化技术

由于巨量转移技术难度大,制程精度要求高,同时量子点色转换技术存在寿命短、光串扰等问题,一些研究者尝试通过 RGB 芯片堆叠的方式实现

全彩化显示。2020 年,清华大学开发了一种基于叠层式 Micro LED 器件阵列设计,可用于全彩色照明和显示,如图 35。通过剥离和转印对 Micro LED 进行垂直组装,并将具有光学滤波性的光学薄膜作为

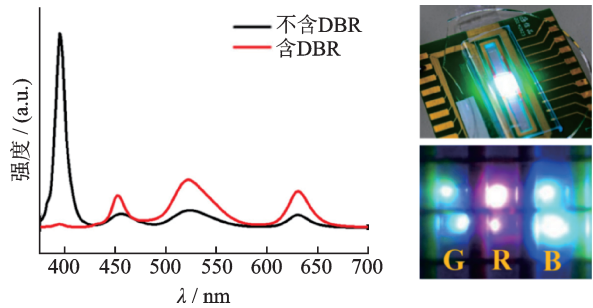


图 34 DBR 结构对色转换 LED 性能的改善及 Micro LED 显示装置全彩像素图像^[83]

Fig.34 Improvement of color conversion LED performance by DBR structure and full color pixel image of Micro LED display device^[83]

Micro LED 之间的波长选择性界面,提高了器件的发光效率^[84]。

2023 年,麻省理工研究人员通过在二维材料涂层的基板上外延 RGB LED,基于二维材料的层转移技术进行聚合物基板垂直堆叠,配合滤光膜实现垂直堆叠全彩 Micro LED,如图 36 所示,最高阵列密度达到 5 100 ppi,最终可在更小的显示器面积上

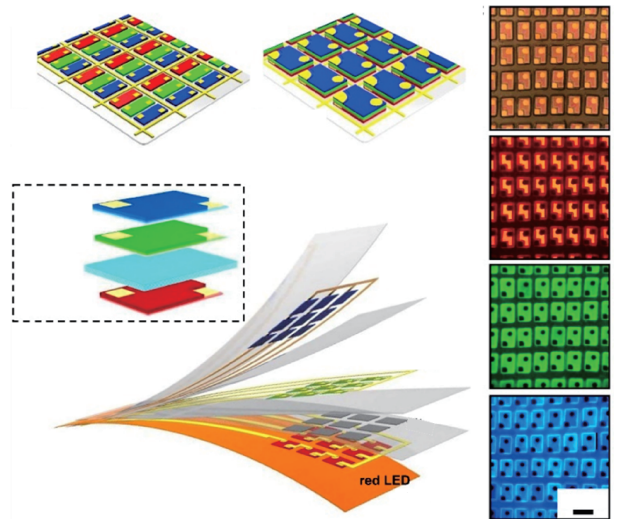


图 35 通过转印法组装的串联 RGB 薄膜微型 LED 和器件阵列的示意图和荧光图像^[84]

Fig.35 Schematic diagram and fluorescence images of a serial RGB thin film Micro LED and device array assembled by transfer printing method^[84]

实现更高分辨率^[85]。这些方案和结果为下一代基于 Micro LED 的先进照明和显示系统提供了新道路。

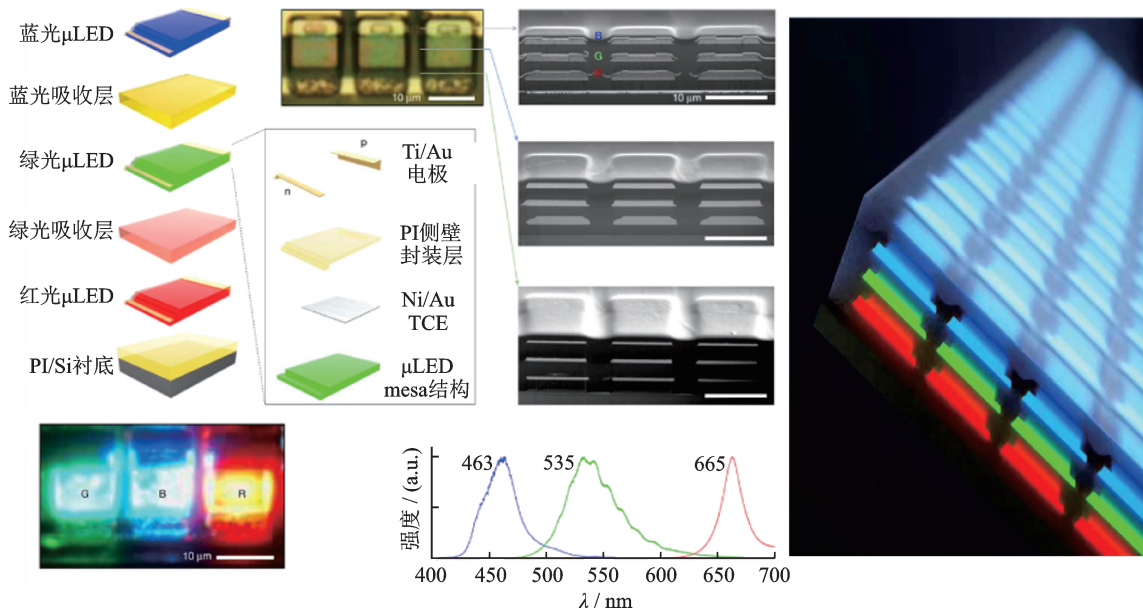


图 36 由二维材料的层转移技术实现的垂直堆叠全彩 Micro LED^[85]

Fig.36 Vertically stacked full-color Micro LED enabled by layer transfer technology of 2D material^[85]

2.4 系统集成研究

Micro LED 是电流驱动型发光器件,其驱动方式一般有两种模式,无源选址驱动(PM:Passive Matrix, 又称无源寻址、被动寻址、无源驱动等)与有源选址驱动(AM:Active Matrix, 又称有源寻址、主动寻址、有源驱动等)。想要匹配 Micro LED 芯片达到更好出光效

果,需要设计相应驱动电路并集成在一起,才能实施独立驱动^[86],Micro LED 应用场景与驱动方式匹配关系如图 37 所示。从产业化及成本角度考虑,开发适合的 TFT 以匹配 Micro LED 是当前阶段较为可行的方案。

2.4.1 CMOS 驱动与 TFT 驱动

TFT(薄膜晶体管)作为传统显示设备的重要部件,具有产业成熟度高、技术完善等特点,被广泛

地用于驱动LCD显示器和OLED显示器。TFT驱动电路简单,显示屏幕可扩展性大以及具有较好的色彩表现。其低成本特性使其在大屏显示、巨幕显示及透明显示中具有巨大优势,也是大屏Micro LED显示的最佳选择^[87-89]。但由于TFT的电流驱动性较弱及响应速度慢,同时难以满足高ppi的要求,因此不适合用于驱动大电流、高刷新率以及超高分辨率的微显示屏幕,如AR、VR等。

CMOS(互补金属氧化物半导体)驱动具有集成

电路超高集成度的特性,通过将Micro LED与CMOS进行集成可大幅减小电路尺寸与体积,发挥出Micro LED超小尺寸、超高分辨率的优势。CMOS的高速驱动特性适用于高速视频和动态内容播放设备,同时其低功耗特性对于便携式设备至关重要。因此CMOS驱动在小尺寸、高速驱动和低功耗方面具有优势,适用于微显设备。目前集成主动式驱动CMOS方案已经得到了大量研究与完善,对于小尺寸、高ppi的应用场景,其也是最接近商业化的技术方案^[90-96]。

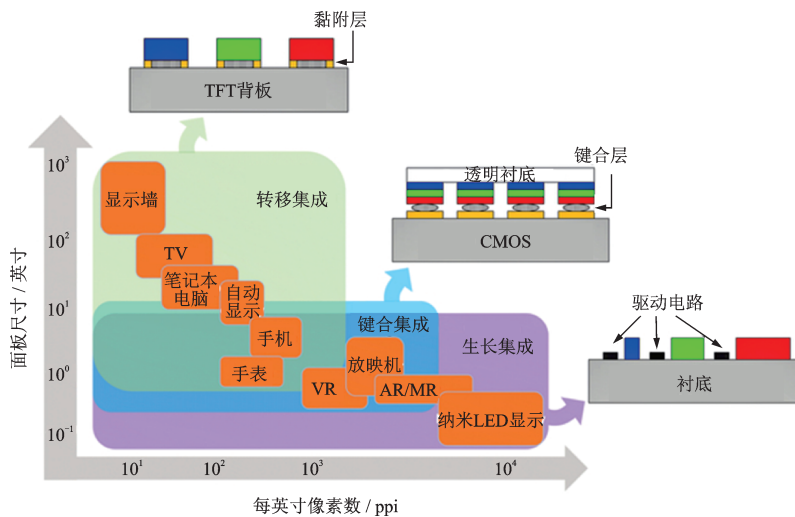


图 37 Micro LED显示屏的主要应用场景、显示面积、像素密度及最佳驱动方式^[86]

Fig.37 Main application scenarios, display area, pixel density and optimal driving mode of Micro LED display^[86]

2.4.2 三维集成技术

除CMOS驱动与TFT驱动等驱动方式外,三维集成技术也是一种可行的驱动技术,近年来成为了研究热点。

2021年,南京大学研究团队在蓝宝石衬底上实现晶圆级二硫化钼(MoS₂)单晶的外延生长,并实现大面积MoS₂TFT与GaN基Micro LED和高分辨率显示器的单片三维集成。该工艺完全单片化,可扩展,与微电子加工兼容^[97],如图38所示。

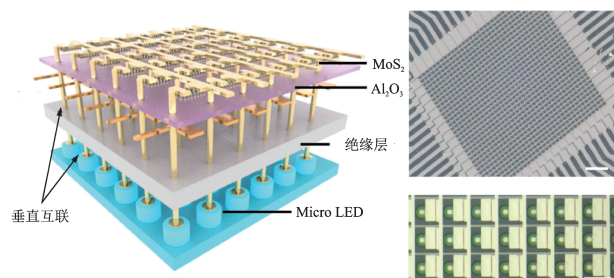


图 38 MoS₂ TFT与Micro LED的单片集成^[97]

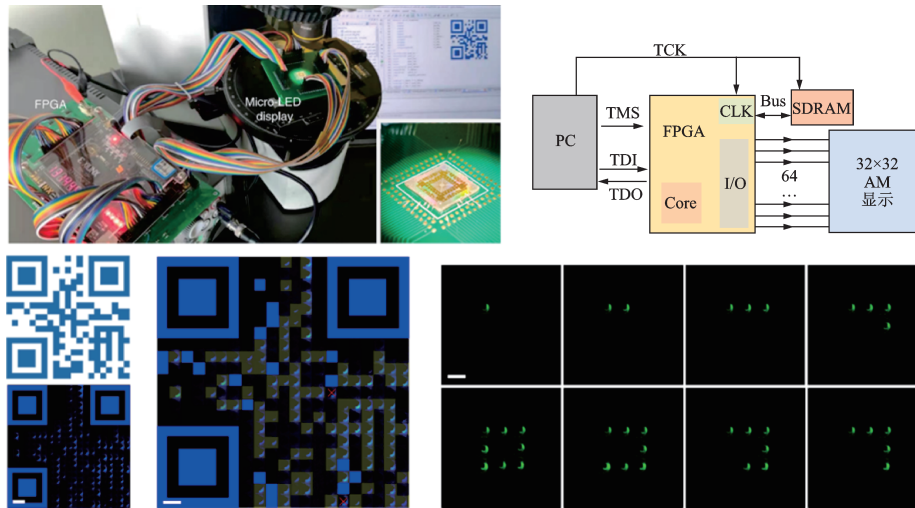
Fig.38 Monolithic integration of MoS₂ TFTs with Micro LED^[97]

同时该研究团队开发了一种低温、超净的BE-OL工艺,消除了MoS₂对聚合物、有机溶剂和离子的伤害,这使得晶体管的性能和均匀性比传统的制造工艺有大幅改善。合成的MoS₂晶体管表现出210 μA/μm的大驱动电流和出色的均匀性,在8 V驱动电压下使Micro LED实现了7×10⁷ cd/m²的亮度和几百纳秒的延迟时间。这些度量指标满足目前所有主要显示应用的要求。

该团队基于MoS₂晶体管与Micro LED芯片制作了32×32有源矩阵(AM)显示器,像素密度为1 270 ppi,并演示了单个像素和高分辨率二维码图像的寻址,如图39。该研究展示了二维材料新技术与Micro LED三维集成的巨大潜力,并为未来Micro LED三维集成技术的发展提供了新思路。

2.4.3 透明显示

与标准的非透明显示器相比,透明显示可提供更加自然无干扰的视觉体验;加强增强现实(AR)的效果体验;提升信息传递效果等作用。Micro LED凭借其独特的微小结构以及透明基板的特性,可应用于透明显示领域^[98-100]。

图 39 高分辨率 AM Micro LED 显示器及显示图像^[97]Fig.39 High resolution AM Micro LED display and display images^[97]

2020年,北京大学深圳研究院的研究人员通过铜镓锌氧化物(IGZO)薄膜晶体管(TFT)背板制造了20 cm柔性Mini LED显示器,像素间距为0.55 mm,像素密度达46 ppi。同时以无色聚酰亚胺(CPI)为衬底,透射率超过60%,展示了世界上第一个带IGZO-TFT背板的20 cm全彩柔性Mini LED^[101]。

南京大学研究团队制造了基于GaN的Micro LED显示器,其整个显示区域的光学透射率可高达80%,如图40。制作的显示器分辨率为254 ppi,亮度可达25 000 nit,满足户外环境下的显示应用需求,推动了透明显示技术在AR、智能眼镜等新领域的应用,激发行业合作与创新^[102]。

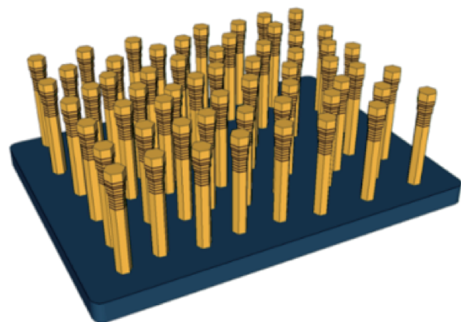
图 40 5 cm 绿光 Micro LED 透明显示屏及透明显示图像^[102]Fig.40 5 cm green Micro LED transparent display screen and transparent display image^[102]

2.5 纳米 LED 研究

2.5.1 纳米线

不同于传统概念的LED,纳米线LED由于应变释放,发光特性提升,具备更好的异质结构和更高的光提取效率,具有体积小、位错密度低、波长精确可调(380 nm~600 nm)、制备成本低且发光特性好的优点,可规避多项尺寸效应问题,因此成为了研究热点之一。

采用MBE、MOCVD或HVPE,可以选择区域进行纳米线制备,并实现多色集成。但随着芯片尺寸减小,驱动电路与LED阵列集成面临较大问题。如图41,2019年Hartensveld课题组研究了GaN基纳米线FET(场效应晶体管),与“自上而下”的纳米

图 41 典型的选区生长技术示意图^[103]Fig.41 Schematic diagram of typical selection growth techniques^[103]

线LED集成,为后续控制系统集成积累了经验^[103]。

在2022年最新的研究中,报道了一种在可见光

范围内工作的N极性红光InGaN/GaN纳米线。还采用原位退火工艺提高了InGaN有源区发光效率,进而减少了缺陷的形成。研究团队制备了横向尺寸仅为0.75 μm的InGaNLED,每个LED由大约5根InGaN纳米线组成。在未封装器件上测得最大EQE为1.2%,与传统InGaN量子阱橙红Micro LED相当,但其表面积却小了三个到五个数量级。这项研究的重要之处在于其创新性设计和在纳米尺度上的制备,为实现高效小尺寸光电子器件提供了新的可能性^[104]。

2.5.2 核壳结构

有研究者通过MOCVD自下而上制备了同轴GaInN/GaN多量子壳(MQS)纳米线(NWS)并对p-GaN形貌和结晶质量进行了深入研究,如图43。通过调整TMG(三甲基镓)流量、镁掺杂和生长温度等参数可以形成均匀p-GaN外壳的金字塔型纳米线

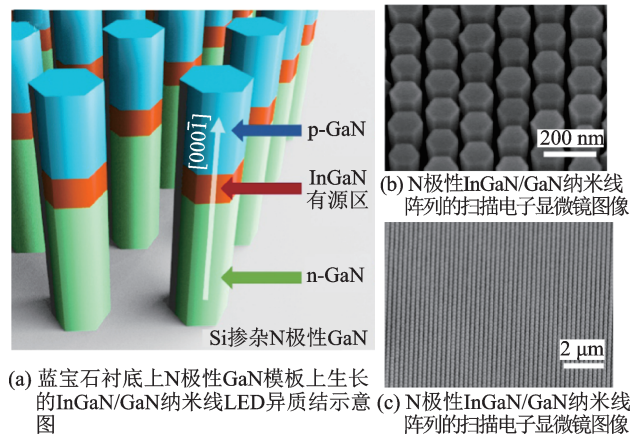


图42 纳米线LED阵列结构^[104]
Fig.42 Nanowire LED array structure^[104]

结构,其中三甲基镓流量最为关键。该核壳结构纳米LED表现出了较高的晶体质量和量子效率^[105]。

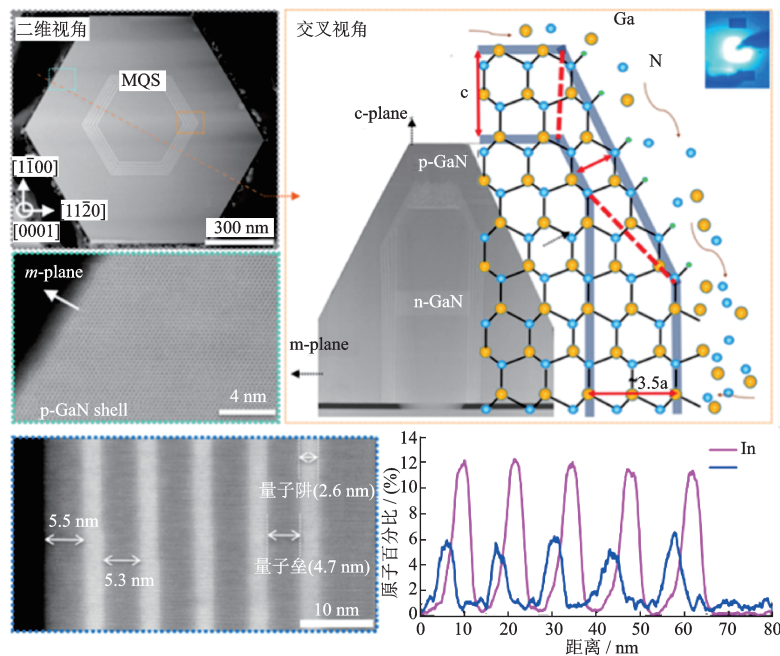


图43 核壳纳米线LED形貌及表征^[105]

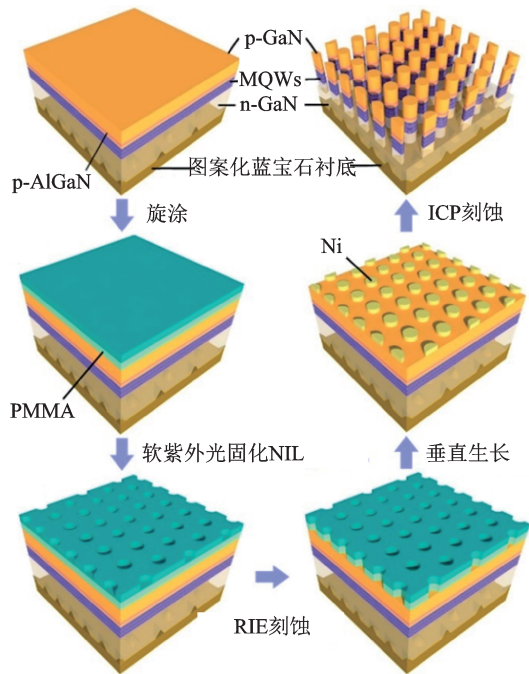
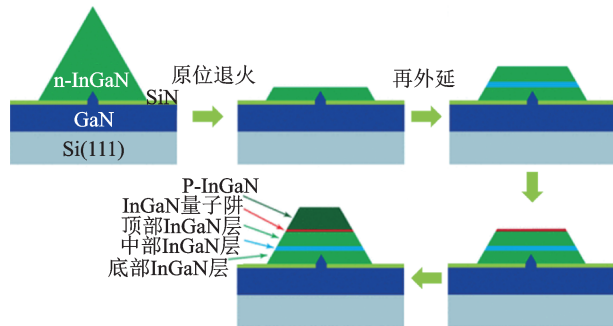
Fig.43 Morphology and characterization of core-shell nanowire LED^[105]

2.5.3 纳米压印

庄喆等人通过软紫外光固化纳米压印技术在晶片上制备了高度有序的c平面InGaN/GaN椭圆形纳米棒(NR)阵列^[106]。与室温下相应生长样品相比,自贴合技术规避缺陷带来的影响提高了模板的重复利用效率。NR样品的光致发光(PL)积分强度显示出高达两个数量级的显著增强。除了规避缺陷,应力松弛和光波导效应的存在也增强了发光性能。最终实现了绿色NR发光二极管,具有良好的电流-电压性能和均匀的发光^[107, 108],制备流程见图44。

2.5.4 纳米金字塔

微纳结构光电子器件研究中,隆德大学研究团队提出了一种通过选择性区域外延,加上将金字塔形状转变为c取向平面的重组工艺步骤来合成InGaN纳米结构阵列的方法。这种InGaN薄片阵列是通过退火六方InGaN金字塔和随后的InGaN再生长制备的。InGaN薄片具有高质量c平面和单个双层台阶,并显示出良好的光学特性。该模板为长波长氮化物LED提供了延伸几百纳米的高质量c平面^[109],如图45。在随后的研究中,该团队通过对

图 44 纳米棒 LED 器件制造流程示意图^[107]Fig.44 Schematic diagram of NR LED device manufacturing process^[107]图 45 原位退火及再生长制备 InGaIn 片晶和 LED 结构的过程^[109]Fig.45 The process of preparing InGaIn wafer and LED structure by in-situ annealing and regrowth^[109]

InGaIn 金字塔顶部进行机械化学抛光和二次外延制备了红光 InGaIn 生长模板,该模板中 In 含量高达 18%,没有位错并提供光滑的顶部 c 平面,可用作高效红光 InGaIn 基 Micro LED 的制备^[110]。

3 总结及展望

“电芯屏端网”一直是电子信息产业发展的核心,光电显示是人机交换信息的窗口,而 Micro LED 基于第三代半导体材料 GaN 具有多重显示优良特性,被认为是新一代新型显示技术。但在产业化进程中仍面临诸多技术瓶颈问题及成本问题。

一是 Micro LED 在芯片制备、驱动、检测维修等方面还存在一定瓶颈问题,需要协同研发创新。In 组分的变化引起 LED 发光波长变化,在外延片上精确控制 In 组分需要进一步开展研究。另外,红光的量子效率还需进一步通过优化设计、生长及器件工艺技术来进行提升,再者,匹配不同终端产品的封装转移工艺、材料也需引起关注和重视。

二是为进一步加快 Micro LED 产业化进程,可持续对瓶颈技术进行攻关并分阶段进行产业化发展。推进特种显示应用细分市场发展,让一部分 Micro LED 产品先用起来,提振研发及产业信心。另外,还要创新研发机构合作形式,抓住联合研发机构发展“东风”,将产、学、研、用更有机的结合起来,产出更多有效成果。

参 考 文 献

- [1] Schadt M. Milestone in the history of field-effect liquid crystal displays and materials[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2009, 48(3issue3):03B001-03B001-9
- [2] Jin S X, Li J, Li J Z, et al. GaN microdisk light emitting diodes [J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(5): 631-633.
- [3] 田鹏飞. Micro LED 显示技术[M]. 上海:上海交通大学出版社,2021.
- [4] 潘祥坚,陈志忠,焦 飞,等. 面向显示应用的微米发光二极管外延和芯片关键技术综述[J]. 物理学报, 2020, 69(19): 198501-198524.
- [5] Jiang H X, Jin S X, Li J, et al. III-nitride blue microdisplays [J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(9): 1303-1305.
- [6] Chen Z, Yan S, Danesh C. Micro LED technologies and applications: Characteristics, fabrication, progress, and challenges [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(12): 123001.
- [7] Parbrook P J, Corbett B, Han J, et al. Micro-light emitting diode: From chips to applications [J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(5): 2000133.
- [8] Lin J Y, Jiang H X. Development of microLED [J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(10):100502.
- [9] Huang Y, Hsiang E L, Deng M Y, et al. Mini-LED, Micro LED and OLED displays: present status and future perspectives [J]. Light: Science & Applications, 2020, 9(1): 1-16.
- [10] Lee V W, Twu N, Kymissis I. Micro-LED Technologies and Applications[J]. Information Display, 2016, 32(6): 16-23.
- [11] Lee H E, Shin J H, Park J H, et al. Micro light-emitting diodes for display and flexible biomedical applications [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(24):1808075.
- [12] Wu T, Sher C W, Lin Y, et al. Mini-LED and Micro-LED: promising candidates for the next generation display technology [J]. Applied Sciences, 2018, 8(9):1557.
- [13] Miao W C, Hsiao F H, Sheng Y, et al. Microdisplays: Mini-LED, Micro-OLED, and Micro LED [J]. Advanced Optical

- Materials, 2023, 2300112.
- [14] Huang Y, Tan G, Gou F, et al. Prospects and challenges of mini-LED and micro-LED displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2019, 27(7): 387-401.
- [15] Behrman K, Kymissis I. Micro light-emitting diodes[J]. Nature Electronics, 2022, 5(9): 564-573.
- [16] 季洪雷,马 莉,周 佳,等. Mini/Micro LED显示产业白皮书[M]. 中国电子视像行业协会, 2022.
- [17] Lu S, Li J, Huang K, et al. Designs of InGaN Micro LED structure for improving quantum efficiency at low current density [J]. Nanoscale Research Letters, 2021, 16(1): 99.
- [18] Chang L, Yeh Y W, Hang S, et al. Alternative strategy to reduce surface recombination for InGaN/GaN Micro-light-Emitting diodes—Thinning the quantum barriers to manage the current spreading [J]. Nanoscale Research Letters, 2020, 15(1): 160.
- [19] Shim J I, Shin D S. Measuring the internal quantum efficiency of light-emitting diodes: Towards accurate and reliable room-temperature characterization[J]. Nanophotonics, 2018, 7(10): 1601-1615.
- [20] Kuritzky L Y, Weisbuch C, Speck J S. Prospects for 100% wall-plug efficient III-nitride LEDs[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16600-16608.
- [21] Bulashevich K A, Konoplev S S, Karpov S Y. Effect of die shape and size on performance of III-Nitride Micro LEDs: A modeling study[J]. Photonics, 2018, 5(4): 41.
- [22] Yan G, Hyun B R, Jiang F, et al. Exploring superlattice DBR effect on a micro-LED as an electron blocking layer[J]. Optics Express, 2021, 29(16): 26255-26264.
- [23] Kou J, Shen C C, Shao H, et al. Impact of the surface recombination on InGaN/GaN-based blue micro-light emitting diodes [J]. Optics Express, 2019, 27(12): A643.
- [24] 周 律,郑 华,张声浩,等. Micro LED显示及其驱动技术的研究进展[J]. 液晶与显示, 2022, 37(11): 1395-1410.
- [25] Qiu R, Lu H, Chen D, et al. Optimization of inductively coupled plasma deep etching of GaN and etching damage analysis [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(7): 2700-2706.
- [26] Kato M, Mikamo K, Ichimura M, et al. Characterization of plasma etching damage on p-type GaN using Schottky diodes [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(9): 093701.
- [27] Hwang D, Mughal A, Pynn C D, et al. Sustained high external quantum efficiency in ultrasmall blue III - nitride Micro-LEDs [J]. Applied Physics Express, 2017, 10(3): 032101.
- [28] Yang F, Xu Y, Li L, et al. Optical and microstructural characterization of Micro LED with sidewall treatment[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(43): 435103.
- [29] Wong M S, Lee C, Myers D J, et al. Size-independent peak efficiency of III-nitride micro-light-emitting-diodes using chemical treatment and sidewall passivation [J]. Applied Physics Express, 2019, 12(9): 097004.
- [30] Park J H, Pristovsek M, Cai W, et al. Interplay of sidewall damage and light extraction efficiency of micro-LEDs[J]. Optics Letters, 2022, 47(9): 2250-2253.
- [31] Yang Y, Cao X A. Removing plasma-induced sidewall damage in GaN-based light-emitting diodes by annealing and wet chemical treatments [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 2009, 27(6): 2337-2341.
- [32] Choi W H, You G, Abraham M, et al. Sidewall passivation for InGaN/GaN nanopillar light emitting diodes[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(1): 013103.
- [33] Chen D, Wang Z, Hu F C, et al. Improved electro-optical and photoelectric performance of GaN-based micro-LEDs with an atomic layer deposited AlN passivation layer [J]. Optics Express, 2021, 29(22): 36559.
- [34] 刘春辉. GaN基LED失效分析及抗湿性能改善研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2022.
- [35] Lee T Y, Huang Y M, Huang Y M, et al. Increase in the efficiency of III-nitride micro LEDs by atomic layer deposition [J]. Optics Express, 2022, 30(11): 18552-18561.
- [36] Huang H H, Huang S K, Tsai Y L, et al. Investigation on reliability of red micro-light emitting diodes with atomic layer deposition passivation layers [J]. Optics Express, 2020, 28(25): 38184-38195.
- [37] Sheen M, Ko Y, Kim D, et al. Highly efficient blue InGaN nanoscale light-emitting diodes [J]. Nature, 2022, 608(7921): 56-61.
- [38] Zhu Z, Tao T, Liu B, et al. Improved optical and electrical characteristics of GaN-Based Micro LEDs by optimized Sidewall Passivation[J]. Micromachines, 2023, 14(1): 10.
- [39] Wong M S, Kearns J A, Lee C, et al. Improved performance of AlGaInP red micro-light-emitting diodes with sidewall treatments [J]. Optics Express, 2020, 28(4): 5787.
- [40] Yu J, Tao T, Liu B, et al. Investigations of sidewall passivation technology on the optical performance for smaller size GaN-Based Micro LEDs [J]. Crystals, 2021, 11(4): 403.
- [41] Bai J, Cai Y, Feng P, et al. Ultrasmall, ultracompact and ultrahigh efficient InGa micro light emitting diodes (μ LEDs) with narrow spectral line width [J]. ACS Nano, 2020, 14(6): 6906-6911.
- [42] Feng P, Xu C, Bai J, et al. A simple approach to achieving ultrasmall III-Nitride micro-light-emitting diodes with red emission [J]. ACS Applied Electronic Materials, 2022, 4(6): 2787-2792.
- [43] Park J, Choi J H, Kong K, et al. Electrically driven mid-submicrometre pixelation of InGaN micro-light-emitting diode displays for augmented-reality glasses [J]. Nature Photonics, 2021, 15(6): 449-455.
- [44] Zhuang Z, Iida D, Velazquez-Rizo M, et al. Ultra-small InGaN green micro-light-emitting diodes fabricated by selective passivation of p-GaN [J]. Optics Letters, 2021, 46(20): 5092-5095.
- [45] Zhuang Z, Iida D, Ohkawa K. Ultrasmall and ultradense InGaN-based RGB monochromatic micro-light-emitting diode arrays by pixelation of conductive p-GaN [J]. Photonics Research, 2021, 9(12): 2429-2434.
- [46] Huang S C, Li H, Zhang Z H, et al. Superior characteristics of microscale light emitting diodes through tightly lateral oxide-confined scheme [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(2):

- 021108.
- [47] Hang S, Zhang M, Zhang Y, et al. Artificially formed resistive ITO/p-GaN junction to suppress the current spreading and decrease the surface recombination for GaN-based micro-light emitting diodes[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 31201.
- [48] Liu Z J, Chong W C, Wong K M, et al. A novel BLU-free full-color LED projector using LED on silicon micro-displays[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(23): 2267-2270.
- [49] Chong W C, Wong K M, Liu Z J, et al. A novel full-color 3LED projection system using R-G-B light emitting diodes on silicon (LEDoS) micro-displays[C]. In *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013: 838-841.
- [50] KGOntech. News: Wave Optics & Jade Bird Display Micro LED Partnership [EB]. 2021-08-25.
- [51] Chen K J, Chen H C, Tsai K A, et al. Resonant-enhanced full-color emission of quantum-dot-based display technology using a pulsed spray method [J]. *Advanced Functional Materials*, 2012, 22(24): 5138-5143.
- [52] Anwar A R, Sajjad M T, Johar M A, et al. Recent progress in Micro LED-based display technologies[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(6): 2100427.
- [53] Ma T, Chen J, Chen Z, et al. Progress in color conversion technology for Micro LED[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(1): 2200632.
- [54] Zhu G, Liu Y, Ming R, et al. Mass transfer, detection and repair technologies in micro-LED displays[J]. *Science China Materials*, 2022, 65(8): 2128-2153.
- [55] 孙宁宁, 杨 彪, 陈福荣, 等. 激光辅助Micro LED巨量转移技术进展[J]. *中国科学:技术科学*, 2022, 52(4): 513-528.
- [56] Wu Y, Ma J, Su P, et al. Full-color realization of Micro LED displays[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(12): 2482.
- [57] 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, 2204947.
- [58] Zhou X, Tian P, Sher C W, et al. Growth, transfer printing and colour conversion techniques towards full-colour micro-LED display[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2020, 71: 100263.
- [59] Bibl A, Higginson J A, Law H fai S, et al. Method of transferring a micro device: US8333860B1 [P]. 2012-12-18 [2023-06-05].
- [60] Micro device with stabilization post [P]. US9209348B2, 2015-12-08 [2023-06-05].
- [61] Wu M H, Fang Y H, Chao C H. Electric-programmable magnetic module and picking-up and placement process for electronic devices: US9607907B2 [P]. 2017-03-28 [2023-06-05].
- [62] Pan K, Sun J, Lin C, et al. Highly effective transfer of micro-LED pixels to the intermediate and rigid substrate with weak and tunable adhesion by thiol modification [J]. *Nanoscale*, 2023, 15(9): 4420-4428.
- [63] Park S I, Xiong Y, Kim R H, et al. Printed assemblies of inorganic light-emitting diodes for deformable and semitransparent displays[J]. *Science*, 2009, 325(5943): 977-981.
- [64] Meitl M, Radauscher E, Bonafede S, et al. 55-1: Invited paper: Passive matrix displays with transfer-printed microscale inorganic LEDs [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 743-746.
- [65] 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.
- [66] Bohandy J, Kim B F, Adrian F J. Metal deposition from a supported metal film using an excimer laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 60(4): 1538-1539.
- [67] 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.
- [68] Marinov V, Swenson O, Miller R, et al. Laser-enabled advanced packaging of ultrathin bare dice in flexible substrates[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2012, 2(4): 569-577.
- [69] Saeedi E, Kim S, Parviz B A. Self-assembled crystalline semiconductor optoelectronics on glass and plastic[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18(7): 075019.
- [70] 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.
- [71] Tavares L, Kjelstrup-Hansen J, Rubahn H G. Efficient roll-on transfer technique for well-aligned organic nanofibers [J]. *Small*, 2011, 7(17): 2460-2463.
- [72] 李 珂, 高 凌. 厦大建成全球首条23.5英寸Micro LED激光巨量转移示范线[N]. *福建日报*, 2023-06-02(03).
- [73] Chang W, Kim J, Kim M, et al. Concurrent self-assembly of RGB microLEDs for next-generation displays [J]. *Nature*, 2023, 617(7960): 287-291.
- [74] Gou F, Hsiang E L, Tan G, et al. Angular color shift of micro-LED displays[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): A746-A757.
- [75] Li P, Li H, Zhang H, et al. Size-independent peak external quantum efficiency (>2%) of InGaN red micro-light-emitting diodes with an emission wavelength over 600 nm[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(8): 081102.
- [76] 陈志忠, 康香宁, 陈伟华, 等. 高亮度Micro LED外延和芯片制备[J]. *微纳电子与智能制造*, 2021, 3(3): 8-22.
- [77] Zhuang Z, Iida D, Ohkawa K. InGaN-based red light-emitting diodes: from traditional to micro-LEDs[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2021, 61(SA): SA0809.
- [78] Zhang S, Zhang J, Gao J, et al. Efficient emission of InGaN-based light-emitting diodes: Toward orange and red[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(11): 11001671.
- [79] Even A, Laval G, Ledoux O, et al. Enhanced In incorporation in full InGaN heterostructure grown on relaxed InGaN pseudo-substrate [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(26): 262103.
- [80] 高庆学. GaN基薄膜阳极刻蚀及相关性质的研究[D]. 济南: 山东大学. 2017.

- [81] Pasayat S S, Gupta C, Wong M S, et al. Demonstration of ultra-small ($<10\ \mu\text{m}$) 632 nm red InGa N micro-LEDs with useful on-wafer external quantum efficiency ($>0.2\%$) for mini-displays[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 14(1): 011004.
- [82] Pasayat S S, Gupta C, Wong M S, et al. Growth of strain-relaxed InGa N on micrometer-sized patterned compliant Ga N pseudo-substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(11): 111101.
- [83] 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.
- [84] Li L, Tang G, Shi Z, et al. Transfer-printed, tandem microscale light-emitting diodes for full-color displays[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(18): e2023436118.
- [85] 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.
- [86] Chen D, Chen Y C, Zeng G, et al. Integration technology of Micro LED for next-generation display[J]. *Research*, 2023, 6: 0047.
- [87] Yang J, Park H, Kim B, et al. Active-matrix micro-light-emitting diode displays driven by monolithically integrated dual-gate oxide thin-film transistors [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(26): 9699-9706.
- [88] Um J G, Jeong D Y, Jung Y, et al. Active-matrix gan μ -led display using oxide thin-film transistor backplane and flip chip led bonding[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2019, 5(3): 1800617.
- [89] Jin T, Kim S, Han J H, et al. Demonstration of programmable light intensity of a micro-LED with a Hf-based ferroelectric ITZO TFT for Mura-free displays [J]. *Nanoscale Advances*, 2023, 5(5): 1316-1322.
- [90] Guo W, Tai J, Liu J, et al. Process optimization of passive matrix Ga N -Based Micro LED arrays for display applications[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2019, 48(8): 5195-5201.
- [91] Liou J C, Lin W D. Micro-device array LED processes on CMOS/MEMS substrate [J]. 2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2017: 776-779.
- [92] McKendry J J D, Massoubre D, Zhang S, et al. Visible-light communications using a CMOS-controlled Micro-light-emitting-Diode array[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(1): 61-67.
- [93] Zhang X, Yin L, Ren K, et al. Research on simulation design of MOS driver for Micro LED[J]. *Electronics*, 2022, 11(13): 2044.
- [94] Zhang S, McKendry J J D, Gong Z, et al. Directly color-tunable smart display based on a CMOS-controlled micro-LED array[J]. *IEEE Photonics Conference 2012*, 2012, 435-436.
- [95] Li P, Zhang X, Chong W C, et al. Monolithic thin film red LED active-matrix micro-display by flip-chip technology [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(12): 603-606.
- [96] Zhang X, Qi L, 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.
- [97] Meng W, Xu F, Yu Z, et al. Three-dimensional monolithic micro-LED display driven by atomically thin transistor matrix[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(11): 1231-1236.
- [98] Zhang K, Han T, Cho W K, et al. Investigation of enhanced ambient contrast ratio in novel Micro/Mini-LED displays [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(12): 3304.
- [99] Chang K P, Chien Y W, Wang P H, et al. Characteristics of high-power impulse magnetron sputtering ITO/Ag/ITO films for application in transparent Micro LED displays[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2023, 5(2): 905-912.
- [100] Peng D, Zhang K, Chao V S D, et al. Full-color pixelated-addressable light emitting diode on transparent substrate (LEDoTS) Micro-Displays by CoB [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(7): 742-746.
- [101] Sun Y, Fan J, Liu M, et al. Highly transparent, ultra-thin flexible, full-color mini-LED display with indium - gallium - zinc oxide thin-film transistor substrate[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2020, 28(12): 926-935.
- [102] Yu J, Xu F, Tao T, et al. Gallium Nitride blue/green Micro LEDs for high brightness and transparency display [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2023, 44(2): 281-284.
- [103] Hartensveld M, Zhang J. Monolithic integration of gan nanowire light-emitting diode with field effect transistor [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(3): 427-430.
- [104] Pandey A, Malhotra Y, Wang P, et al. N-polar InGa N /Ga N nanowires: Overcoming the efficiency cliff of red-emitting micro-LEDs[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(4): 1107.
- [105] Lu W, Nakayama N, Ito K, et al. Morphology control and crystalline quality of p-Type Ga N shells grown on coaxial GaIn N /Ga N multiple quantum shell nanowires[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(45): 54486-54496.
- [106] Zhuang Z, Guo X, Zhang G, et al. Large-scale fabrication and luminescence properties of Ga N nanostructures by a soft UV-curing nanoimprint lithography[J]. *Nanotechnology*, 2013, 24(40): 405303.
- [107] Zhuang Z, Guo X, Liu B, et al. Great enhancement in the excitonic recombination and light extraction of highly ordered InGa N /Ga N elliptic nanorod arrays on a wafer scale[J]. *Nanotechnology*, 2015, 27(1): 015301.
- [108] Zhuang Z, Guo X, Liu B, et al. High color rendering index hybrid III-Nitride/nanocrystals white light-emitting diodes[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(1): 36-43.
- [109] Bi Z, Lenrick F, Colvin J, et al. InGa N platelets: Synthesis and applications toward green and red light-emitting diodes[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(5): 2832-2839.
- [110] Bi Z, Lu T, Colvin J, et al. Realization of ultrahigh quality InGa N platelets to be used as relaxed templates for red Micro LEDs [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(15): 17845-17851.