

面向显示应用的微米 LED 外延和芯片关键技术综述*

潘祚坚¹⁾ 陈志忠^{1)†} 焦飞¹⁾²⁾ 詹景麟¹⁾ 陈毅勇¹⁾ 陈怡帆¹⁾ 聂靖昕¹⁾ 赵彤阳¹⁾

邓楚涵¹⁾ 康香宁¹⁾ 李顺峰³⁾ 王琦³⁾ 张国义¹⁾³⁾ 沈波¹⁾

1) (北京大学物理学院, 人工微结构与介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

2) (北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

3) (北京大学东莞光电研究院, 广东东莞, 523808)

摘要

随着显示技术的不断发展, 高度微型化和集成化成为显示领域主要的发展趋势。微米 LED 显示是一种由微米级半导体发光单元组成的阵列显示技术, 在亮度、分辨率、对比度、能耗、使用寿命、响应速度和稳定性等方面相比于液晶显示(LCD)和有机发光显示(OLED)均具有巨大的优势, 应用前景十分广阔, 同时也被视为下一代显示技术。目前商用的 5G 通信技术与显示领域的虚拟现实、增强现实和超高清视频等技术的结合, 将进一步推动微米 LED 显示产业的发展。在面临发展机遇的同时, 微米 LED 显示领域也存在着一些基础科学技术问题需要解决。本文主要总结了微米 LED 显示从 2000 年以来的一些研究进展, 重点介绍了微米 LED 显示在外延生长和芯片工艺两方面存在的主要问题和可能的解决方案。在外延生长方面主要介绍了缺陷控制、极化电场控制和波长均匀性等研究进展, 芯片工艺方面主要介绍了全彩色显示、巨量转移和检测技术等进展情况, 并对微米 LED 显示在这两方面的发展趋势进行了讨论。

关键词: 微米 LED; 显示; 外延; 芯片; 检测

PACS: 85.60.Jb, 42.79.Kr, 78.55.Cr

基金: 国家重点研发专项 (批准号: 2016YFB0400602)、国家自然科学基金 (批准号: 61674005)、广东省重点科技计划项目 (批准号: 2016B010111001) 和河南省科技项目 (批准号: 161100210200) 资助的课题

† 通讯作者. E-mail: zzchen@pku.edu.cn

第一作者. E-mail: panzj@pku.edu.cn

1、引言

显示技术是支撑现代信息社会的基础技术, 从简单的交通信号灯、数码管显示到复杂的图像、电视放送, 再到虚拟现实 (virtual reality, VR)、增强现实 (augmented reality, AR), 渗透到社会生产和人民生活的各个方面。近一个世纪以

来，电子图像显示技术经历了阴极射线管(cathode ray tube, CRT)显示、液晶显示(liquid crystal display, LCD)、发光二极管(light-emitting diode, LED)显示以及激光(laser diode, LD)显示技术等，目前仍在不断地进步革新。如今 CRT 显示器由于不满足低功耗、高分辨率等显示需求逐渐退出市场。LCD 液晶显示由于具有成本低、分辨率较高、对比度较高和寿命较长等优点成为了目前主流的显示技术。传统 LED 显示屏因其高亮度和高稳定性等优势，被广泛用于室内外大型显示场所。有机发光二极管(organic light-emitting diode, OLED)也由于它独特的柔性特点、低功耗、广视角和高响应速度等优势在移动设备小屏显示领域占据重要地位，而激光显示则在宽广色域、高亮度等方面展示其优异的特性。

自上世纪 90 年代初氮化镓基蓝光 LED 发明以来^[1]，全彩的大屏幕 LED 显示已成为可能。早期的 LED 显示屏像素采用红绿蓝(RGB)三基色的 LED 结合而成，由于封装体尺寸较大，使得像素间距达到 20 mm (pixel pitch 20 mm, P20)左右。随着芯片尺寸缩小和封装水平提高，目前市场上像素间距 3 mm (P3)显示屏已经很常见。进一步地，芯片尺寸达到 100 μm 左右，工业上称之为 mini-LED，像素间距能够达到 0.2 mm (P.2)左右，mini-LED 尺寸基本达到目前 LED 常用生产技术的极限。在芯片尺寸和 OLED 可比的情况下，亮度、对比度和可靠性等方面 mini-LED 显示了巨大的优势。微米 LED (micro-LED)则进一步把芯片尺寸缩减至 50 μm 以下，由于 micro-LED 芯片尺寸小、集成度高和自发光等特点，在显示方面与 LCD、OLED 相比在亮度、分辨率、对比度、能耗、使用寿命、响应速度和热稳定性等方面具有更大的优势^[2]。

Micro-LED 的技术来源于 1992 年的美国贝尔实验室微盘激光器技术^[3]。2000 年美国堪萨斯州立大学江红星等人首次制备了基于 III 族氮化物的 micro-LED^[4]，

并在 2001 年报道了用于显示的芯片尺寸 12 μm 、10 \times 10 阵列的蓝光 micro-LED^[5]；2004 年英国思克莱德大学 M.D. Dawson 等人报道了芯片尺寸 20 μm 、64 \times 64 阵列的紫外(ultraviolet, UV) micro-LED^[6]；2013 年香港科技大学刘纪美和刘召军等人报道了芯片尺寸 50 μm 、图像分辨率 360 ppi 的紫外和 RGB micro-LED^[7]，其研究组在 2014 年报道了芯片尺寸 15 μm 、图像分辨率 1700 ppi 的蓝光 micro-LED^[8,9]；2015 年台湾交通大学郭浩中等人报道了采用紫外光激发量子点来实现颜色转换的方法制备得到了芯片尺寸 35 μm 的全彩 RGB micro-LED^[10]；2017 年法国 F. Templier 等人报道了基于硅衬底的芯片尺寸约 2 μm 的蓝光 micro-LED^[11]；2020 年英国谢菲尔德大学王涛等人报道了采用无需刻蚀的方法制备得到蓝宝石衬底上芯片尺寸为 3.6 μm 的绿光 micro-LED^[12]。Micro-LED 显示技术在不断地向前发展，表 1 为 2001 年至今 micro-LED 在显示应用上的部分研究进展。

表 1: 2001-2020 年 micro-LED 显示部分进展

Tab. 1 Some results of micro-LED display from 2001 to 2020

year	substrate	pixel size(μm)	pixel pitch(μm)	array	wavelength	group	reference
2001	sapphire	12	50	10 \times 10	Blue	H. X. Jiang et al	[5]
2004	sapphire	20	30	64 \times 64	UV	M. D. Dawson et al	[6]
2011	sapphire	12	15	640 \times 480	Green/Blue	H. X. Jiang et al	[13]
2013	sapphire	50	70	60 \times 60	RGB/UV	Z. J. Liu et al	[7]
2014	sapphire	15	~20	256 \times 192	Blue	K. M. Lau et al	[8]
2014	Si	45	100	10 \times 10	Blue	M. D. Dawson et al	[14]
2015	sapphire	35	40	128 \times 128	RGB	H.C. Kuo et al	[10]
2017	Si	2	3	—	Blue	F. Templier et al	[11]
2017	sapphire	5	10	873 \times 500	Green/Blue	F. Templier et al	[15]
2019	Si	—	40	64 \times 36	Blue	K.M. Lau et al	[16]
2019	sapphire	3 \times 10	—	—	RGB	H.C. Kuo et al	[17]
2020	sapphire	3.6	5.6	—	Green	T. Wang et al	[12]

在 micro-LED 显示应用方面，索尼、三星等企业率先推出了 micro-LED 显

显示屏。索尼在 2012 年首次推出了 55 英寸的 micro-LED 显示屏“Crystal LED Display”，2018 年又推出了 780 英寸拼接成的“CLEDIS”16 K 的 micro-LED 显示屏。三星在 2018 年推出了 146 英寸的“The Wall”micro-LED 显示屏。国内也有不少企业在 micro-LED 显示应用上取得成果。2019 年 7 月雷曼光电推出了 324 英寸 8 K 的 micro-LED 显示屏，10 月底康佳公司推出了 236 英寸 8 K 的“Smart Wall”micro-LED 显示屏，11 月利亚德推出了 135 英寸 8 K 的“The Great Space”micro-LED 显示屏。伴随着 5G 技术逐渐开始商用，5G 技术与 VR、AR 和 8K 超高清视频等显示技术的结合将进一步推动 micro-LED 的发展。

随着芯片尺寸减少到 50 μm 以下，micro-LED 制备的技术困难也大量显现出来。Micro-LED 的外延生长，在应力、缺陷的控制和波长、亮度均匀性上比大尺寸芯片要求更高。整个外延片的波长均匀性甚至需要控制在 1nm 以内，电流密度在 1 A/cm² 以下仍需要保持较高的内量子效率。由于 micro-LED 芯片的横向尺寸一般小于外延衬底的厚度，因此对于分立的 RGB 芯片组成像素单元，垂直结构和倒装结构的 micro-LED 芯片都需要剥离衬底，这需要高效且无损的衬底剥离技术。而剥离技术与 micro-LED 芯片的外延和转移技术均相关，对于芯片的机械强度和结构完整性有重要影响。Micro-LED 芯片的巨量转移问题是目前显示应用的关键问题，不同于传统的大尺寸 LED 芯片，应用于显示的 micro-LED 芯片数量会达到数百万甚至上千万颗，而目前转移技术的时效性和准确度难以满足 micro-LED 芯片的巨量转移需求。Micro-LED 芯片的检测和修复同样面临挑战，传统的检测方法难以对微米尺寸且数量庞大的 micro-LED 芯片进行有效地检测，并且若安装在显示基板上的 micro-LED 芯片出现故障或损坏，将很难对其进行修复或替换。在 micro-LED 的驱动方面，由于芯片繁复的转移工艺和芯片间工作

电流区间的差异，现有的薄膜晶体管 (thin film transistor, TFT) 驱动和互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)驱动需要针对不同的应用做较大的改进。

Micro-LED 显示从诞生至今已近二十年，来自传统 LED、显示以及集成电路领域的力量汇集于此，预示着 micro-LED 显示方向光明的前景。近年来一些研究者已对 micro-LED 显示应用中存在的部分问题做出总结^[18-26]，2020 年加州大学圣芭芭拉分校 M. S. Wong 等人回顾了 micro-LED 在显示和可见光通讯领域的研究进程，并讨论了 micro-LED 的尺寸效应给应用带来的一些挑战^[24]；复旦大学田朋飞等人系统性地归纳了 micro-LED 显示在全彩化方面的关键问题，从多个角度介绍了 micro-LED 全彩色显示的各种可行方案^[25]；南方科技大学刘召军等人总结了量子点技术在 micro-LED 显示中的应用进展情况，讨论了基于量子点的 micro-LED 显示技术在未来的发展潜力^[26]。这些总结对 micro-LED 的基本技术了解具有较大的帮助，特别是结合作者本人的研究给出了许多有启发性的见解，但是目前很少有文献对 micro-LED 显示从外延到芯片的一系列核心问题做全面的阐述。本篇综述全面地对 micro-LED 显示应用目前面临的核心问题进行分析，关注 micro-LED 外延生长和芯片工艺两个方面。外延生长方面包括缺陷控制、极化电场控制和波长均匀性等问题，而芯片工艺方面包含全彩色显示、巨量转移和检测技术等主要问题，并且讨论了可能的解决方案和未来的发展趋势。

2、Micro-LED 材料及外延生长

Micro-LED 外延片的晶体质量会直接影响显示效果。与大尺寸的 LED 芯片相比，micro-LED 外延片缺陷、极化电场影响和波长均匀性等问题更为突出。由

于 micro-LED 芯片尺寸在 50 μm 以下，应用于显示时处于低电流密度，此时由表面缺陷导致的非辐射复合变得尤为重要。并且由于尺寸减小使得同一外延片上芯片之间的穿透位错密度统计涨落更加显著，因此对于 micro-LED 需要更低缺陷密度的外延片，或者钝化这些缺陷结构。Micro-LED 有源区的极化电场会导致电子和空穴波函数分离，降低内量子效率，且极化电场会使得电流密度变化时发光峰值波长发生偏移，不利于显示应用，因此需要有效地控制有源区的极化电场。相比于大尺寸器件，micro-LED 分光分色比较困难，且 micro-LED 的波长均匀性直接影响显示的彩色精准度，因此需要对 micro-LED 的波长均匀性提出更高的要求。

2.1 缺陷控制

当 micro-LED 应用于显示时，对应的工作电流密度较低，从简单的 ABC 模型来定性考虑缺陷对 micro-LED 辐射复合效率的影响^[27]：

$$\eta_{rad} = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3}$$

其中 η_{rad} 为辐射复合效率，由于表面复合是以表面悬挂键作为非辐射复合中心，对载流子辐射复合的影响与 Shockley-Read-Hall (SRH)复合类似，可将系数 A 对应 SRH 复合和表面复合等缺陷复合，系数 B 对应辐射复合，系数 C 对应俄歇复合， n 为载流子浓度。在低电流密度条件下，载流子浓度 n 较小，系数 C 对应的俄歇复合基本可以忽略，而系数 A 对应的 SRH 复合和表面复合等缺陷复合成为影响辐射复合效率 η_{rad} 的主要因素。

Micro-LED 芯片的侧壁面积与台面面积之比远大于大尺寸 LED 芯片，这使得 micro-LED 芯片侧壁具有更多的表面悬挂键，并且在器件制备过程中感应耦合等离子体(inductively coupled plasma, ICP)刻蚀会在芯片侧壁附近造成损伤，因

此这些表面悬挂键和由 ICP 刻蚀导致的侧壁损伤会使得 micro-LED 面临着更严重的表面缺陷问题。而 micro-LED 芯片由表面缺陷导致的非辐射复合比例上升，会导致辐射复合效率 η_{rad} 下降，从而使得内量子效率下降。

从实验结果来看，当 micro-LED 在大电流密度的注入条件下，内量子效率比大尺寸 LED 更高，这主要归因于 micro-LED 的应力弛豫、电流扩展和多体效应等^[28-30]。而在小电流密度的注入条件下，micro-LED 相比于大尺寸 LED 会存在内量子效率的下降，主要原因在于 micro-LED 含有更严重的表面缺陷，其中包括表面悬挂键和由 ICP 刻蚀带来的侧壁损伤^[30-34]。

当 micro-LED 应用于显示时，对应的工作电流密度较低，因此为了提高内量子效率，需要有效地抑制表面缺陷导致的非辐射复合。一方面可以采用侧壁钝化^[17,35-39]、湿法化学处理^[39-42]和热退火^[31,42]等方法降低表面缺陷导致的非辐射复合对 micro-LED 内量子效率的影响。另一方面可以采用无损伤的刻蚀方法代替 ICP 刻蚀^[43]，或者采用新的制备方法避免对 GaN 的刻蚀^[12]。2012 年田朋飞等人报道了适当增加热退火时间能够在一定程度上缓解侧壁的刻蚀损伤对 micro-LED 的影响，提高 micro-LED 在低电流密度下的内量子效率^[31]。2018 年 M.S. Wong 等人制备了从 10 μm 到 100 μm 的一系列尺寸不同的蓝光 micro-LED，分别采用原子层沉积(atomic-layer deposition, ALD)和等离子体增强化学气相沉积(plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD)两种方式在 micro-LED 芯片侧壁沉积 SiO_2 层进行钝化，并采用 ICP 干法刻蚀和氢氟酸(HF)溶液湿法刻蚀两种方式在侧壁沉积的 SiO_2 上开孔做金属接触。如图 1(a)~(b)所示，其中对比样品 LED-1 未经侧壁钝化处理，LED-2 经过 ALD 侧壁钝化和干法刻蚀开孔处理，LED-3 经过 PECVD 侧壁钝化和湿法刻蚀开孔处理，LED-4 经过 ALD 侧壁钝化和湿法刻蚀

开孔处理，结果表明采用 ALD 侧壁钝化和湿法刻蚀开孔的方式对 micro-LED 侧壁进行处理效果最好。对于芯片尺寸 $20\ \mu\text{m}$ 的 micro-LED，侧壁未经钝化处理时其峰值外量子效率(external quantum efficiency, EQE)为 24%，而经过原子层沉积的方式对侧壁钝化处理后其峰值 EQE 达到 33%^[37]。2019 年该研究组报道了先采用 KOH 溶液对 micro-LED 侧壁进行化学处理，之后再通过 ALD 沉积 SiO_2 进行侧壁钝化，这样能够更加有效地降低表面缺陷导致的非辐射复合^[39]。

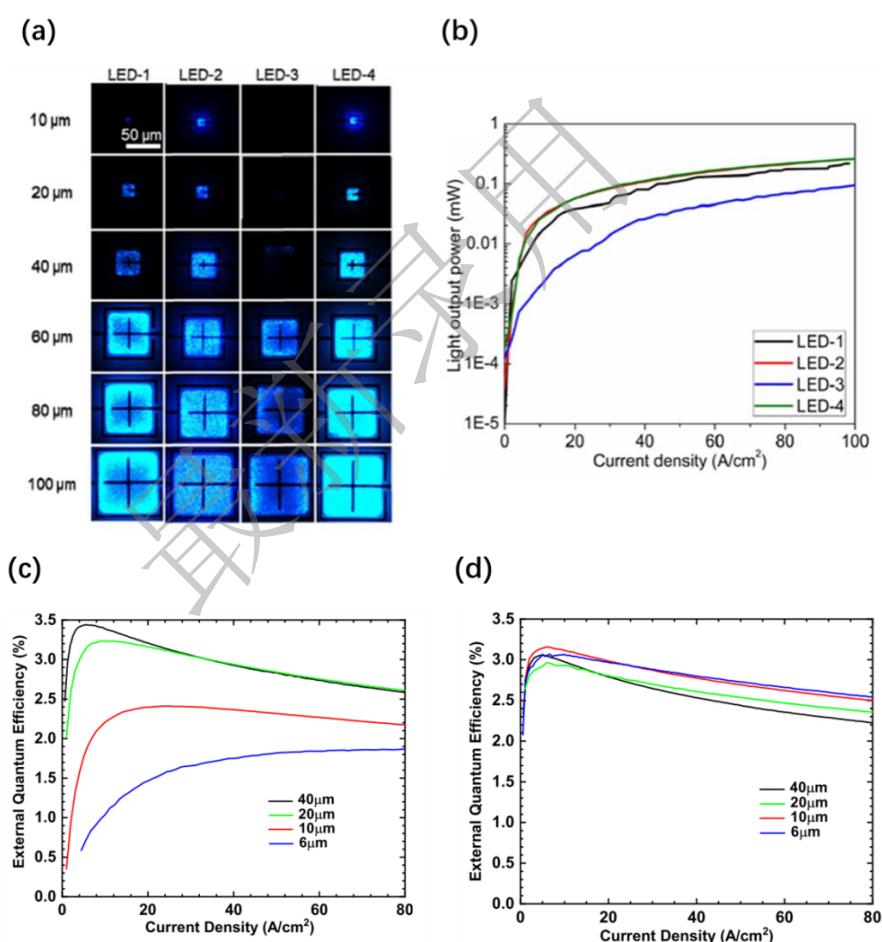


图 1(a)采用不同的侧壁钝化和刻蚀开孔方法的 micro-LED 电致发光图；(b)分别经过 ALD 和 PECVD 钝化处理的 $20\times 20\ \mu\text{m}^2$ 的 micro-LED 在不同电流密度条件下的光输出功率^[37]；(c)经过 ICP 刻蚀工艺制备的不同尺寸 micro-LED 的 EQE 与电流密度的关系；(d) 经过 NBE 刻蚀工艺制备的不同尺寸 micro-LED 的 EQE 与电流密度的关系^[43]

Fig. 1.(a) Electroluminescence images of the micro-LEDs with different sidewall passivation and etch methods at $1\ \text{A}/\text{cm}^2$; (b) Light output power characteristics of ALD and PECVD passivation methods at different current density for $20\times 20\ \mu\text{m}^2$ micro-LEDs^[37]; (c) EQE as a function of current

density of micro-LEDs with different sizes fabricated by the ICP and (d) the NBE process^[43].

2019 年日本先进工业科技研究所王学论等人报道了采用中性粒子束蚀刻 (neutral beam etching, NBE) 的方法能够有效地避免刻蚀损伤, 图 1(c)和 1(d)分别为 ICP 刻蚀和 NBE 刻蚀处理得到的 micro-LED 外量子效率随电流密度变化的曲线图, 由图 1(d)可知由 NBE 刻蚀处理的 micro-LED 的外量子效率没有随着尺寸缩小而下降, 在 1 A/cm^2 的小电流注入下各个尺寸的 micro-LED 外量子效率相差在 10%以内, 并且小尺寸的 micro-LED 外量子效率更高, 这表明 NBE 刻蚀有效地避免了侧壁的刻蚀损伤^[43]。2020 年英国谢菲尔德大学王涛等人采用无需对 GaN 进行干法刻蚀的方法在蓝宝石衬底上制备了尺寸为 $3.6 \mu\text{m}$ 的 micro-LED, 该方法先在衬底上依次生长 n-GaN 层和 SiO_2 层, 之后对 SiO_2 层进行光刻并刻蚀出微孔, 再通过选区生长的方式在微孔中依次生长 n-GaN 层、量子阱层和 p-GaN 层, 该制备过程中不需要对 GaN 进行干法刻蚀, 从而避免了侧壁的刻蚀损伤。采用这种方法制备得到的 micro-LED 裸芯的外量子效率达到约 6%, 是目前绿光 micro-LED 裸芯外量子效率的最高值, 其内量子效率为 28%, 发光亮度可超过 10^7 cd/m^2 ^[12]。

另外由于 micro-LED 尺寸一般小于 $50 \mu\text{m}$, 在同一外延片上芯片之间的位错密度统计涨落更加严重。位错作为非辐射复合中心和反向漏电流通道会影响 micro-LED 芯片性能, 这将导致不同芯片之间的发光性能差别过大, 因此 micro-LED 应用于显示时需要更低位错密度的外延片。采用 GaN 衬底进行同质外延可以得到高晶体质量的外延片, 但 GaN 衬底一般是在异质材料上通过氢化物气相外延(hydride vapor phase epitaxy, HVPE)生长得到^[44], HVPE 技术成本高且较难得到大尺寸的 GaN 衬底。目前生长 GaN 主要采用异质外延的方式, 常用的异质外

延衬底材料有蓝宝石(α -Al₂O₃)、硅(Si)和碳化硅(SiC)衬底等。为降低异质外延 GaN 的位错密度,常用的方法有缓冲层技术、侧向外延(epitaxially lateral overgrowth, ELO)技术和图形化衬底技术等。

缓冲层可以为后续的 GaN 生长提供高密度的成核中心,促进 GaN 的三维岛状生长转变为横向的二维生长,从而减少 GaN 的位错密度。在蓝宝石衬底上制备 micro-LED 的缓冲层材料有 GaN^[5,6,45]和 AlN^[46]等,在硅衬底上常用的缓冲层有 AlGaN/AlN 缓冲层^[11,14,47]、AlN/GaN 超晶格缓冲层^[48]和台阶组分渐变(step-graded) Al_xGa_{1-x}N 缓冲层等^[16,49]。北京大学宽禁带半导体研究中心在硅衬底上采用 AlN 和低 Al 组分 AlGaN 层作为缓冲层,外延得到了厚度 8 μm 、表面光滑无裂纹的 GaN,并且位错密度降到了 $1.6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$,同时采用这种缓冲层方法得到了最大厚度 10.2 μm 且无裂纹的 GaN^[50,51]。2019 年北京大学研究组报道了在 Si(100)衬底上采用 SiO₂ 层和单晶石墨烯作为缓冲层制备得到了高质量的 GaN 晶体,具体生长过程如图 2 所示,并系统研究了石墨烯上生长 GaN 的成核机理和外延机制,为 micro-LED 等 GaN 基光电器件与 Si 基电路的集成打下基础^[52]。

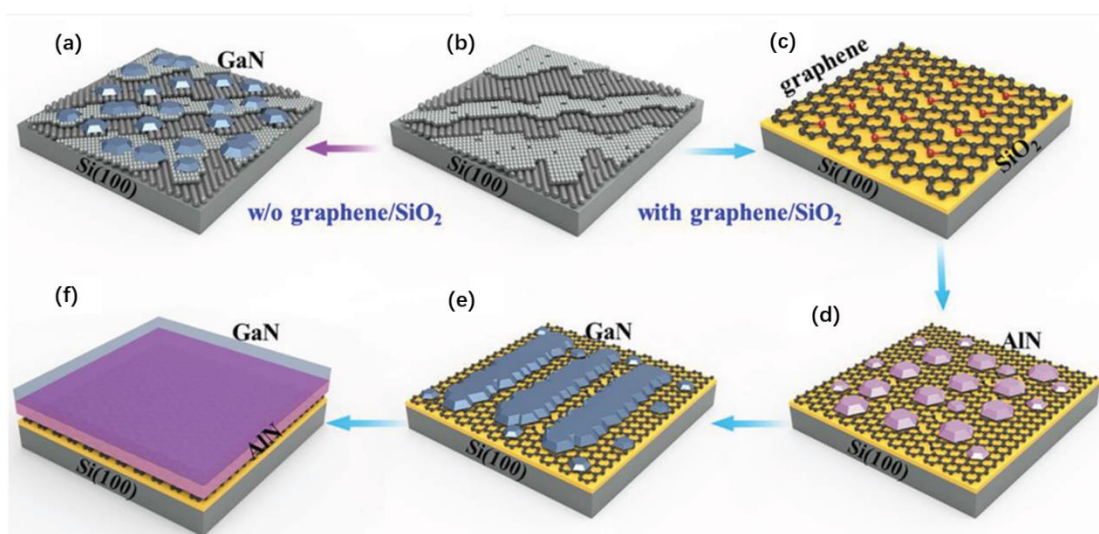


图 2 在具有和不具有单晶石墨烯/SiO₂ 缓冲层的 Si(100)上分别生长单晶 GaN 薄膜的示意图 (a)在 Si(100)上直接生长 GaN/AlN,氮化物在两种不同取向的台面上成核; (b)Si(100)的表面结构; (c)NH₃ 预处理后转移的石墨烯; (d)石墨烯上的 AlN 成核岛; (e)在 AlN 成核层上生长的

条状 GaN; (f)在具有单晶石墨烯/ SiO₂ 缓冲层的 Si(100)衬底上生长的单畴 GaN 薄膜^[52]

Fig. 2. Schematic diagram of the epitaxy of single-crystalline GaN film on Si(100) without and with single-crystalline-graphene/SiO₂ interlayers. (a) GaN/AlN directly grown on Si(100), Nitrides nucleate on neighboring terraces with two orientations; (b) Surface construction of Si(100); (c) Transferred graphene after NH₃ pretreatment; (d) AlN nucleation islands on graphene; (e) GaN strips on the AlN nucleation layer; (f) Single-domain GaN film on Si(100) substrate with single-crystalline-graphene/SiO₂ interlayers^[52].

侧向外延常用的掩膜材料有 SiO_x、SiN_x 等，部分金属如 W、Ti 和 Al/Ti 合金等同样可以作为侧向外延过程中的掩膜^[53-55]。在 GaN 生长过程中通过掩膜来阻挡位错向上穿透，并在窗口区使得位错弯曲合拢，这有效提高了后续生长的 GaN 晶体质量。石墨烯由于它独特的二维属性、良好的散热性等性质，在生长过程中将其作为掩膜可以避免掩膜的光刻等步骤^[56,57]。2017 年中科院苏州纳米所徐科等人报道了在蓝宝石衬底上生长 GaN 过程中插入单层的石墨烯，利用石墨烯图案化的纳米结构作为掩膜可以使得穿透位错减少一半^[56]。2019 年韩国 G.C. Yi 等人在 As 掺杂的 n 型 Si(100)衬底上用射频溅射的方法铺覆一层 100 nm 的金属钨 (W)，之后铺上石墨烯并刻出图案作为侧向外延的掩膜，再采用 ZnO 纳米壁作为中间层，最后外延得到高晶体质量的 GaN，从而制备了芯片间距为 10 μm 的 micro-LED，这种方法避免了巨量转移过程，揭示了 micro-LED 与 Si 基电路一体化集成的可能性^[58]。

由于侧向外延技术外延需要两步进行，中间需要插入掩膜，工艺相对复杂。图形化衬底的引入可以避免二次外延，同时能提高外延层的晶体质量和光提取效率(light extraction efficiency, LEE)^[59,60]。衬底上的图形能够影响 GaN 成核中心的分布，在成核岛合拢阶段，部分位错弯曲合并形成位错环，而不直接向上穿透至表面，GaN 位错密度得到降低^[61]。而图形化衬底的图形形状、间距和尺寸都会对外延片的质量造成影响，通常纳米级图形化衬底相比于微米级具有更高的外量子

效率提升^[62]，但需要更高要求的制备方法，如纳米压印、纳米球光刻等^[63,64]。北京大学宽禁带半导体研究中心采用纳米压印的方法制备了纳米图形化蓝宝石衬底(nanopatterned sapphire substrate, NPSS)，通过在 NPSS 衬底上生长 GaN 使得成核岛合拢时间大大降低，生长的 GaN 薄膜中应力能够有效地弛豫，位错密度降低到 $1.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ，表面粗糙度降低到 0.1 nm 以下^[65,66]。

2.2 极化场控制

c 面生长的 GaN 存在自发极化(spontaneous polarization)电场，同时有源区 InGaN 与 GaN 的晶格失配会导致压电极化(piezoelectric polarization)电场。极化电场的存在使得有源区的能带发生倾斜，电子和空穴波函数在空间上重叠减小，辐射复合几率下降，从而使得 micro-LED 内量子效率下降，同时由于极化电场的存在，当电流变化时峰值波长会产生偏移导致显示色差^[67,68]。为了减小有源区中的极化电场影响，增加电子空穴的波函数重叠，可以对极性 GaN 的有源区进行结构设计^[69-81]，或者采用半极性 GaN 材料进行替代 c 面 GaN^[82-86]。

有源区结构设计方法包括采用梯度生长温度法来调整 InGaN/GaN 量子阱能带形状^[69-74]，或者采用 AlGaIn^[75-79]、AlInN^[80]和 InN^[81]插入层等方法进行极化匹配，来减小极化电场对 micro-LED 内量子效率的影响。采用梯度生长温度的方法可以控制 InGaIn 中的 In 组分，生长多层 In 组分不同的 InGaIn 势阱，从而形成能带形状交错的 InGaIn/GaN 量子阱，如图 3(a)所示。2011 年 H.P. Zhao 等人系统地报道了能带形状交错的量子阱在提高 LED 发光效率方面的作用^[69]。对于发光波长在 520 nm 到 525 nm 的三层交错 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱，其载流子辐射复合效率 η_{rad} 比传统的 InGaIn/GaN 量子阱提高了 1.38~3.72 倍，这使得 LED 的光输出功率提高了 2.0~3.5 倍^[71]，如图 3(b)所示。AlGaIn 插入层可以

调整量子阱的能带结构，阻止 InGaN 中 In 向外扩散，同时 AlGaN 层的存在可以弛豫 InGaN/GaN 间的压应力且有利于 GaN 势垒层生长温度提高，这些都有利于提高载流子辐射复合效率^[75-78]。2014 年 J.I. Hwang 等人报道了采用 AlGaN 插入层的 AlGaN/InGaN/GaN 量子阱发光波长为 629 nm 时，对应的外量子效率为 2.9%，相比于常规的 InGaN/GaN 量子阱有明显提高，这表明引入 AlGaN 插入层可以提高 LED 在红光等长波长范围内的发光效率，有利于 micro-LED 的全彩化^[79]。

2016 年 S. Kimura 等人报道了在每层 InGaN/GaN 量子阱中插入厚度 1 nm 的不同 Al 组分的 AlGaN 层，其量子阱的能带图、载流子分布和复合速率如图 4 所示，由载流子分布图像可知相比于不含 AlGaN 层的量子阱，含有 Al_{0.3}Ga_{0.7}N 层的量子阱在靠近插入层一侧的空穴浓度更高，且对比可知在小电流注入情况即 2 A/m² 下空穴浓度的提高更加明显，从而增大了载流子辐射复合速率，因此薄 AlGaN 层的插入更有利于提高 micro-LED 在小电流注入下的内量子效率^[76]。AlInN 和 InN 插入层同样能缓解 InGaN/GaN 中的强极化电场，提高载流子辐射复合效率，提升 micro-LED 发光效率，并在红光等长波长范围相比于不含插入层的常规 InGaN/GaN 量子阱效率更高^[80,81]。

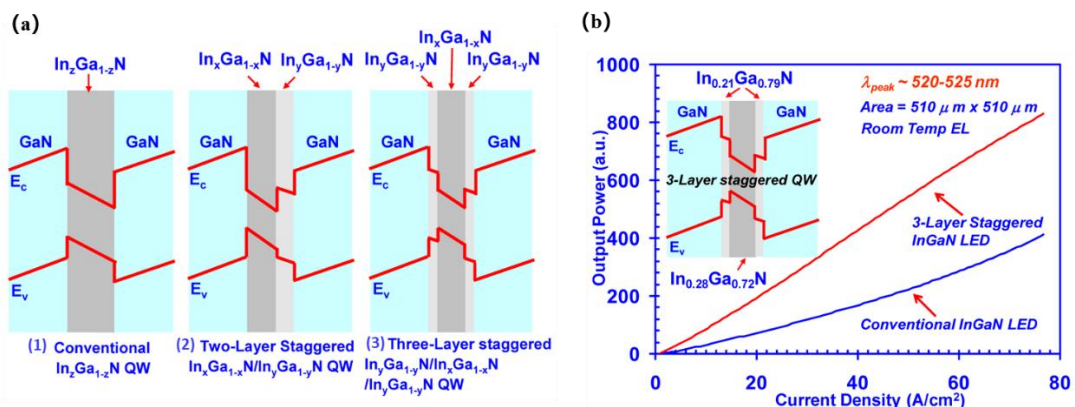


图 3 (a)常规的 In_xGa_{1-x}N-GaN 量子阱、两层交错的 In_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N 量子阱和三层交错的 In_yGa_{1-y}N/In_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N 量子阱的示意图；(b)基于常规 InGaN 量子阱和三层交错的 InGaN 量子阱的 LED 在波长 520-525 nm 范围内光输出功率与电流密度的关系，插图为

三层交错的 InGaN 量子阱的能带示意图^[69]

Fig.3.(a)Schematics of the conventional $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ -GaN quantum well (QW), two-layer staggered $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ QW and three-layer staggered $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ QW structures; (b) Light output power vs current density for conventional InGaN QW and three-layer staggered InGaN QW LEDs at $\lambda\sim 520\text{--}525\text{ nm}$, with the band lineups schematic of three-layer staggered InGaN QW^[69].

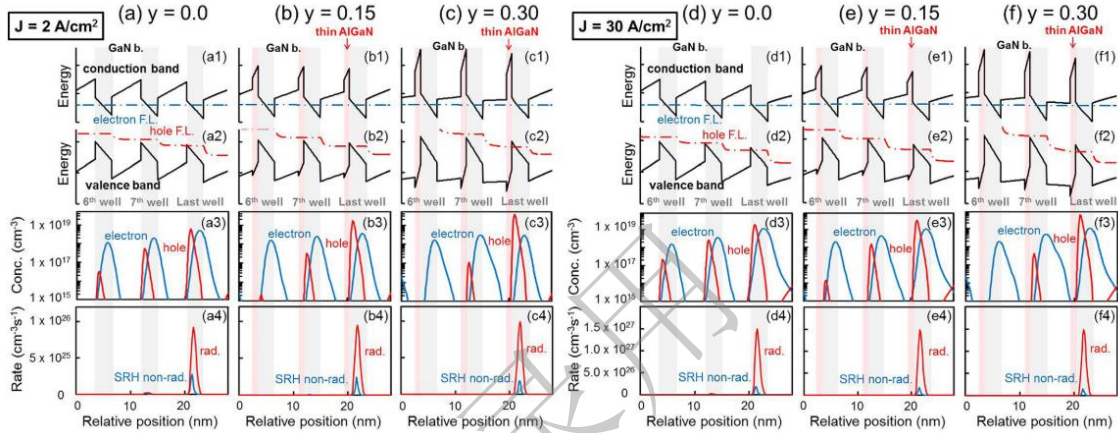


图 4 含有 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 薄插入层的量子阱的能带图、载流子分布和复合速率 (a)和(d): 量子阱中 Al 组分摩尔系数 $y=0$; (b)和(e): 量子阱中 Al 组分摩尔系数 $y=0.15$; (c)和(f): 量子阱中 Al 组分摩尔系数 $y=0.3$; (a)~(c)和(d)~(f)的工作电流密度分别设定为 2 和 30 A/cm^2 ^[76]

FIG. 4. Band diagrams, the corresponding carrier distribution, and the recombination rate of multi-quantum well (MQW) structures with thin $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ interlayers. (a) and (d) show those of the MQWs whose AlN mole fractions were set to $y=0$; (b) and (e) show those of the MQWs whose AlN mole fractions were set to $y=0.15$; (c) and (f) show those of the MQWs whose AlN mole fractions were set to $y=0.30$. The operation current densities in (a)~(c) and (d)~(f) were set to 2 and 30 A/cm^2 , respectively^[76].

采用半极性 GaN 替代 c 面 GaN 能够有效地减小极化电场，降低 micro-LED 有源区的量子限制斯塔克效应(quantum confined stark effect, QCSE)，减小当电流变化时峰值波长的偏移，并且能改善 GaN 基 LED 的 droop 效应^[82]。半极性 GaN 相比于极性和非极性 GaN 具有更高的掺 In 能力^[87,88]，可以实现更长波长的光发射，因此应用于 micro-LED 的全彩色显示有一定优势^[83]。2015 年英国谢菲尔德大学王涛等人报道了基于(11-22)半极性 GaN 的 LED 可以实现从绿色到琥珀色这一较宽波段的光发射，且当注入电流变化时峰值波长的偏移相比于极性 GaN 更

小，同时也有效地缓解了 GaN 基 LED 的 droop 效应^[84]。2019 年加州大学圣芭芭拉分校 J.H. Li 等人在 2 英寸图形化蓝宝石衬底上外延(11-22)半极性 GaN，制备了尺寸从 20 μm 到 100 μm 的一系列绿光的半极性 micro-LED，尽管外量子效率在 2%左右，远低于目前基于 c 面 GaN 的 micro-LED，但在峰移效应、droop 效应和漏电流控制等方面相比于 c 面 GaN micro-LED 更具有优势^[85]。2020 年台湾交通大学郭浩中等人在 4 英寸图形化蓝宝石衬底上生长半极性面为(20-21)的 GaN，并借助量子点技术制备了全彩 RGB 的半极性 micro-LED，如图 5 所示，其峰值外量子效率能够达到对应的 c 面 GaN micro-LED 的 60%水平，当电流密度大小从 1 A/cm^2 变化到 200 A/cm^2 时，(20-21)半极性 GaN micro-LED 峰值波长的偏移为 3.2 nm，而对应 c 面 GaN micro-LED 的峰移达到 13.6 nm，这表明采用半极性 GaN 将有利于提高 micro-LED 显示的色彩精准度^[86]。半极性 GaN 尽管在极化效应上相比于 c 面 GaN 具有优势，但面临着位错和层错密度难以有效控制的问题。由于晶格失配的影响，半极性 GaN 相比于 c 面 GaN 有更高的位错密度。堆垛层错由于垂直于 c 面 GaN 生长方向并且被阻挡在生长界面，而对于半极性 GaN 材料，高密度的堆垛层错会一直穿透到器件表面，影响发光性能。目前通过缓冲层技术和侧向外延等手段可以将位错密度降低到 10^8cm^{-2} 量级，同时将堆垛层错密度控制在 10^4cm^{-2} 量级^[89,90]，进一步采用取向控制外延(orientation controlling epitaxy, OCE)等方法能够几乎消除堆垛层错^[91,92]，但半极性 GaN 的尺寸、成本和晶体质量还难以同时达到器件应用的水平。而传统斜切极性 GaN 来获取半极性 GaN 的方式成本过高，因此到目前为止依然缺乏低成本获取高质量半极性 GaN 的有效方法。

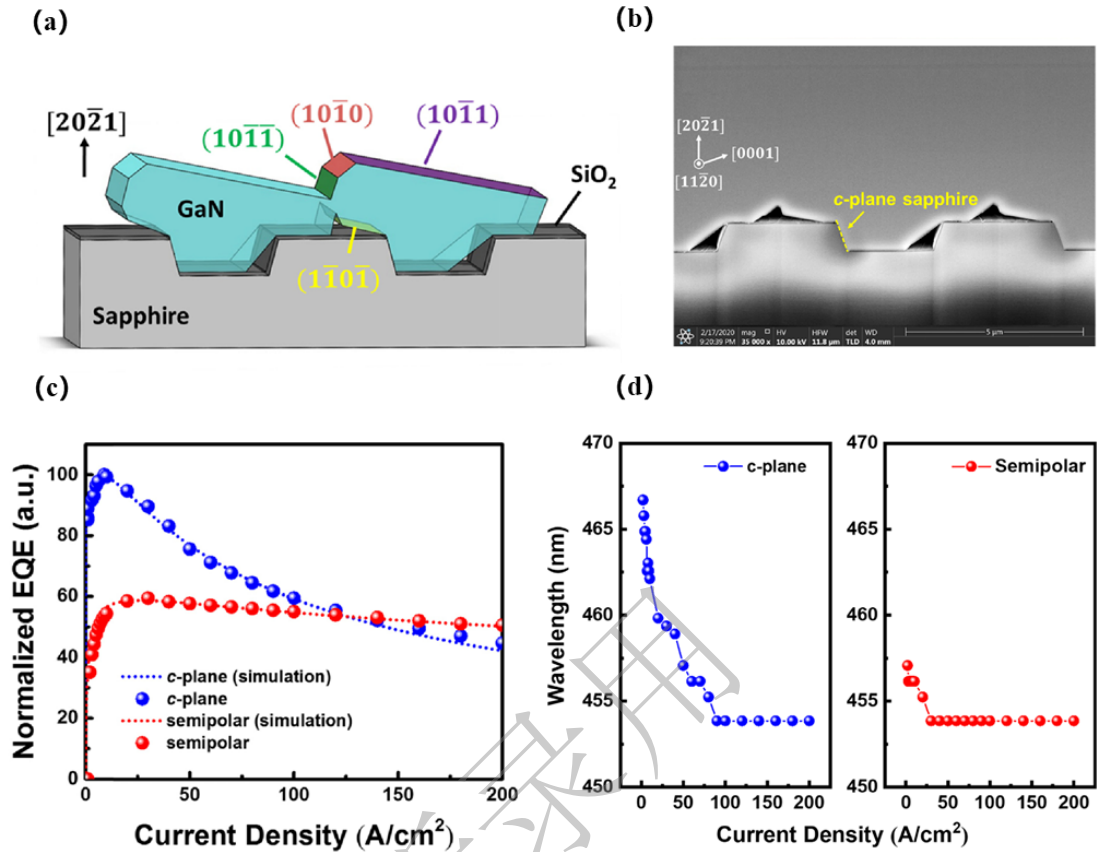


图 5 (a)在图形化蓝宝石衬底上生长的半极性 GaN 示意图；(b)通过取向控制外延在图形化蓝宝石衬底上生长的(20-21) GaN 截面的扫描电子显微镜图像；(c) c 面和半极性面 micro-LED 归一化 EQE 的实验数据和仿真曲线；(d)当电流密度在 1 至 $200 \text{ A}/\text{cm}^2$ 范围内变化时 c 面和半极性面 micro-LED 的峰值波长^[86]

Fig.5. (a)Schematic diagram of the semipolar GaN grown on a patterned sapphire substrate; (b) Cross-sectional scanning electron microscope (SEM) image of (20-21) GaN grown on a patterned sapphire substrate by orientation-controlled epitaxy; (c) Experimental data and simulation curves for normalized external quantum efficiency of c-plane and semipolar micro-LEDs; (d) Peak wavelengths of c-plane and semipolar micro-LEDs in range 1 to $200 \text{ A}/\text{cm}^2$ current density^[86].

2.3 波长均匀性

基于技术进步以及工艺成本的考虑，GaN 外延的衬底在不断往大尺寸方向发展。衬底尺寸越大，外延片的波长均匀性越难以控制。而 micro-LED 芯片发射波长不一致导致的色差会影响显示效果，图 6 所示的是典型 LED 外延片波长分布图。Micro-LED 分光分色成本很高，因此外延片的波长均匀性对于实际应用有重要意义。为保证显示效果，micro-LED 芯片波长变化的标准差一般需要小于 1

nm。InGaN/GaN LED 的发光波长与 InGaN 中 In 组分直接相关，而 InGaN 中的 In 组分由生长过程中的流量大小和生长温度决定，因此在生长过程中保持外延片上气流和温度的均匀性至关重要。

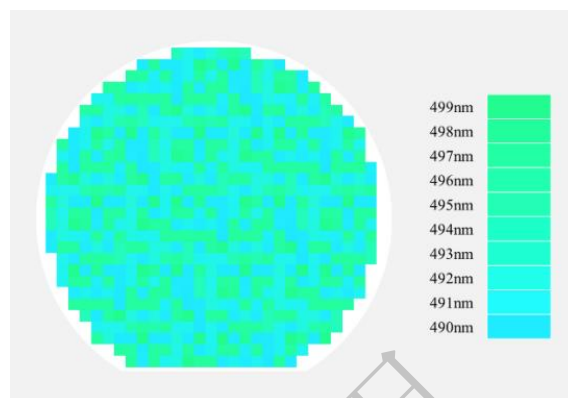


图 6 典型的 Micro-LED 发光波长在外延片上的分布

Fig.6. Typical distribution of emission wavelengths on wafer of micro-LED.

气流的均匀性一般通过气体流场模拟和优化金属有机化学气相沉积(metal-organic chemical vapour deposition, MOCVD)设备等方式尽可能地控制。德国 Aixtron 公司采用的行星式反应室中通过石墨盘整体旋转保持各个外延片间的均匀性，同时又通过气浮旋转技术驱动各个小石墨盘自转，以保持外延片上的气流均匀性，并集成了实时外延片曲率和温度监测传感器来保证温度的均匀性。2018 年 Aixtron 公司报道了行星式反应室结构的 MOCVD 在 6 英寸基于蓝宝石衬底的蓝光和绿光 LED 外延片上可实现发光波长标准差分别为 0.5 nm 和 0.75 nm，对于尺寸更大的 8 英寸基于硅衬底的蓝光 LED 外延片，可实现波长标准差在 1 nm 左右^[93]。美国 Veeco 公司采用 TurboDisc 技术的 MOCVD 通过石墨盘高速旋转配合层状垂直气流注入有助于提高外延片的波长均匀性，2018 年 Veeco 公司报道了在 6 英寸基于蓝宝石衬底的蓝光 LED 外延片上可实现 95% 的区域内发光波长的波动控制在 1~2 nm 以内，而对于 8 英寸的基于硅衬底的蓝光 LED 可实现外延片上 90% 区域内波长的波动控制在 1~2 nm 以内^[94]。

温度的均匀性同样会直接影响发光波长的均匀性，InGaN 中 In 组分对温度变化较为敏感，温度相差 1 °C 会造成 InGaN LED 发光波长的偏差达到 1 到 3 nm^[95]。由于异质衬底与 GaN 间存在晶格失配和热失配，在生长过程中外延片不可避免的弯曲会直接导致温度的不均匀。为了提高外延片的温度均匀性，通常可以采用增大衬底厚度、优化石墨盘设计、添加插入层^[96,97]和激光处理衬底^[98,99]等方法。外延片温度的均匀性和它的曲率密切相关，而外延片的曲率可与衬底的厚度和直径的关系表示为： $bow \propto \frac{t_{epi} d^2}{t_{sub}^2}$ ，其中 bow 为外延片曲率， t_{epi} 和 t_{sub} 分别为外延片和衬底的厚度， d 为衬底的直径^[100]，增大衬底厚度能有效地降低外延片的曲率。由于生长过程中外延片的弯曲会导致与水平的石墨盘接触不均匀，因此可以通过设计石墨盘基底的曲率使得外延片能够与基底充分接触提高温度均匀性。添加 AlN 等插入层、对衬底进行激光聚焦处理都是通过引入应力来补偿外延片在生长过程中产生的应力，从而减小外延片的曲率，提高温度均匀性。

2012 年 H. Aida 等人通过对蓝宝石衬底进行激光聚焦处理，将其由单晶转变为非晶态，而产生的非晶材料密度是蓝宝石单晶的 1.14 倍，这会使得衬底由于内部体积变化产生应变，用于补偿衬底与 GaN 之间的应变，从而降低外延片的曲率，有利于保持温度的均匀性^[98]。2013 年南昌大学江风益和刘军林等人报道了在 6 英寸图形化 Si 衬底上依次生长 AlN 和台阶组分渐变 $Al_xGa_{1-x}N$ 作为缓冲层，再分别生长不同厚度的 AlN 插入层，之后生长 GaN 层等结构，最后发现 30 nm 的 AlN 插入层有利于保持波长均匀性，其对应的外延片无裂纹且波长变化标准差约为 1.52 nm^[96]。2013 年 A. Nishikawa 等人报道了通过在直径 8 英寸的 Si(111) 衬底上生长 AlGaIn/AlN 缓冲层，之后生长 2 μm 厚的高掺 Si 浓度($\sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)的 n 型 GaN 层，再生长量子阱等结构，最后得到了总厚度约为 5.2 μm 的无裂纹且

均匀性良好的外延片，其发光峰值波长为 445.2 nm，发光波长变化的标准差为 2.53 nm^[101]。2019 年该研究组报道了通过在生长缓冲层后添加多个插入层，且在生长过程进行时调节插入层的生长条件来控制应变，在直径 8 英寸的 Si(111)衬底上外延得到了 GaN 厚度 6.5 μm 的无裂纹的外延片，对应的光致发光图如图 7 所示，发光波长峰值为 465.7 nm，波长变化的标准差为 0.854 nm，外延片上有 85.3%的面积波长波动在 2.5 nm 范围内^[97]。然而由于红光等长波长的波动对 In 组分变化更加敏感，保持其波长均匀性将会更加困难。

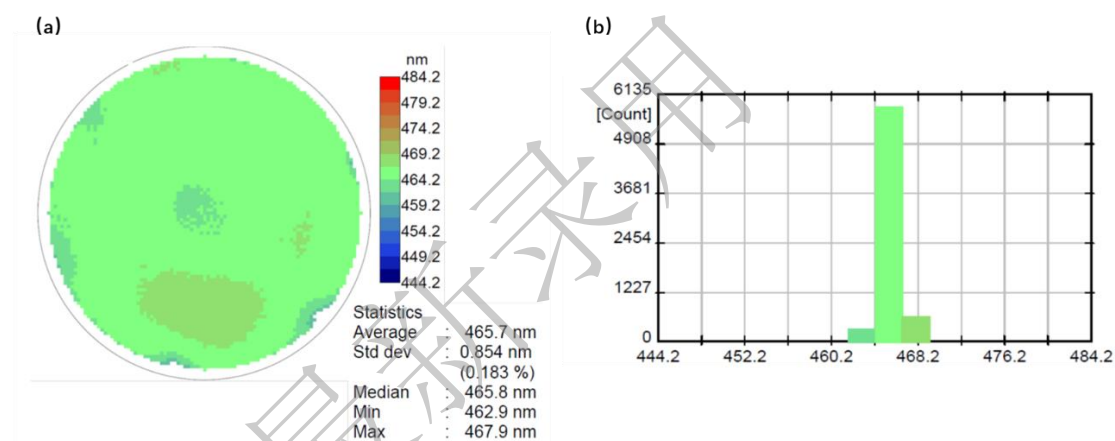


图 7 (a)基于 200 mm 尺寸硅衬底的 GaN LED 外延片光致发光的伪色彩图；(b)不同发光波长的芯片数量统计^[97]

Fig.7. (a) The pseudo-color image of photoluminescence mapping of the 200 mm GaN-on-Si LED epiwafer; (b) Statistics on the number of chips with different emission wavelengths ^[97].

2.4 小结

在缺陷控制方面，从目前的实验结果来看，micro-LED 尺寸减小带来的内量子效率下降主要来源于悬挂键和侧壁损伤等表面缺陷导致的非辐射复合。采用侧壁钝化、湿法化学处理和热退火等方法可以在一定程度上缓解效率的下降，而更为有效彻底的方法是采用中性粒子束刻蚀等无损伤的刻蚀方法，或者设计新的 micro-LED 制备方法以避免对 GaN 的刻蚀。同时位错对于 micro-LED 也有着不可忽视的影响，位错会作为非辐射复合中心和反向漏电流通道影响 micro-LED 的

芯片性能，高的位错密度会导致不同 micro-LED 芯片间发光性能差别过大。为降低外延片的位错密度，缓冲层技术、侧向外延技术和图形化衬底技术等都是常用的方法。然而 micro-LED 对于位错密度、应力控制的较高要求，需要对这些方法做进一步的研究。

在极化场控制方面，由于低电流密度下极化电场导致的量子限制斯塔克效应会降低 micro-LED 内量子效率，且电流变化引起的峰移效应会影响显示效果。为了减小极化电场，对极性 GaN 的有源区进行结构优化是目前十分有效的方法，如采用梯度生长温度法来调整量子阱能带形状或者采用 AlGaIn、AlInN 或者 InN 插入层等方法。目前看来采用 AlGaIn 等插入层更能满足 micro-LED 的显示需求，原因在于 AlGaIn 等插入层不仅能够提高辐射复合效率，同时也能提高红光等长波长 LED 的效率，有助于 micro-LED 的全彩化。采用半极性 GaN 进行替代能够从根本上解决极化电场问题，是较为长远的解决方案，但目前基于半极性 GaN 的 micro-LED 的外量子效率还有待提高，并且高质量半极性 GaN 的制备成本依然难以接受。

在波长均匀性方面，对于 micro-LED 显示应用来说，外延片的波长均匀性是非常关键的需求。波长不一致会直接影响显示效果，且会带来额外的分光分色成本。为保持波长均匀性，需要控制生长过程中气流和温度的均匀性。气流和温度的均匀性主要取决于 MOCVD 设备，这需要各个 MOCVD 生产厂商针对 micro-LED 的需求，对反应室整体设计做出相应的调整，通过优化气流注入和石墨盘设计来满足波长均匀性的高要求。对于温度均匀性的控制，外延片也可以做出相应的调整以降低生长时的弯曲曲率，主要方法有增大衬底厚度、添加插入层和激光处理衬底等。

3、Micro-LED 芯片工艺

由于 micro-LED 芯片尺寸在 $50\ \mu\text{m}$ 以下，远小于常规的 LED 芯片。芯片尺寸的减小，为后续芯片工艺在全彩色显示、巨量转移和检测技术等方面提出一系列技术难题。Micro-LED 用于显示时需要高效率的 RGB 三基色 LED，而目前 InGaN/GaN LED 在红光条件下发光效率较低，AllnGaP 四元系红光 LED 芯片在微米尺寸下效率也不高，难以满足显示应用的需求。制备过程中需要将数量庞大的 micro-LED 芯片快速且准确地转移到驱动背板上，采用传统的转移方案耗时过长且准确度不足，因此需要一种低成本、高时效且精确度高的巨量转移方法。为保证生产良率需要对巨量的 micro-LED 芯片进行快速准确的检测，以修复或移除其中的坏点，目前常用的光致发光和电致发光检测需要针对 micro-LED 巨量检测的需求做出优化，同时也迫切需要能够满足 micro-LED 巨量检测的新方法。

3.1 全彩色显示

将 micro-LED 用在显示上实现全彩化，需要解决 RGB 三基色的问题，目前 InGaN/GaN LED 可以在蓝光和绿光等波段实现高效发光，而对于 In 含量更高的红光波段发光效率偏低，因此红光 LED 一般使用 AllnGaP 四元系材料。造成红光 InGaN LED 制备困难的原因主要有极化场导致的 QCSE 效应^[67,68]、In 偏析导致的载流子局域化问题^[102]、更严重的晶格失配和更低的 InGaN 生长温度导致的高缺陷密度问题。为解决 micro-LED 显示的全彩化问题，主要的解决方案有：
(1)RGB 三基色 LED 直接排列法；(2)用 UV/Blue LED 激发量子点法；(3)设计一些特殊的结构，如纳米柱 LED，或者设计不同形状的 LED 并通过改变电流大小

使不同 In 组分的量子阱发光。图 8 为 RGB 排列法和 UV/Blue LED 激发量子点法的示意图。

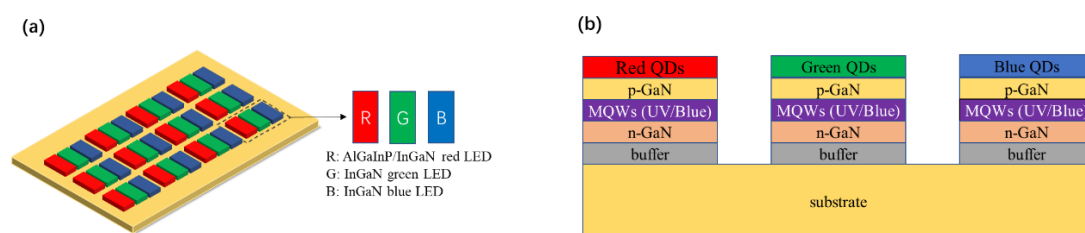


图 8 (a) 分立 RGB 排列法; (b) UV/Blue LED 激发量子点法

Fig.8. (a) Assembling RGB individual LEDs; (b) Exciting quantum dots by UV/Blue LED.

将 RGB 三基色 LED 通过平行或垂直的方式排布, 改变脉冲电流周期和占空比来调整颜色混光, 可以实现 micro-LED 的全彩色显示^[103,104]。蓝绿光采用 InGaN/GaN LED, 红光等波段一般采用 AlGaInP LED。但是小尺寸下, AlGaInP LED 相比于 InGaN/GaN LED 表面复合速率更快^[105], 并且两者结温、生长条件等性质不同, 将它们集成到同一个像素单元上还存在问题需要解决。全彩化在效率和可靠性上期待高效率红光 InGaN/GaN LED 的推出。2017 年韩国 D.S. Lee 等人通过透明材料将蓝光和绿光 LED 垂直键合, 制备了芯片尺寸为 75 μm 并可在 450 nm~540 nm 波长范围发光的 mini-LED^[106]; 2018 年其研究组通过选区生长 (selective area growth, SAG) 技术将基于 InGaN 的蓝绿光 LED 垂直排布, 再水平粘接基于 AlGaInP 的红光 LED, 从而制备了 RGB 三种芯片直径分别为 150 μm 、150 μm 和 250(外径)-150 μm (内径)的全彩色 mini-LED, 如图 9 所示^[107]。

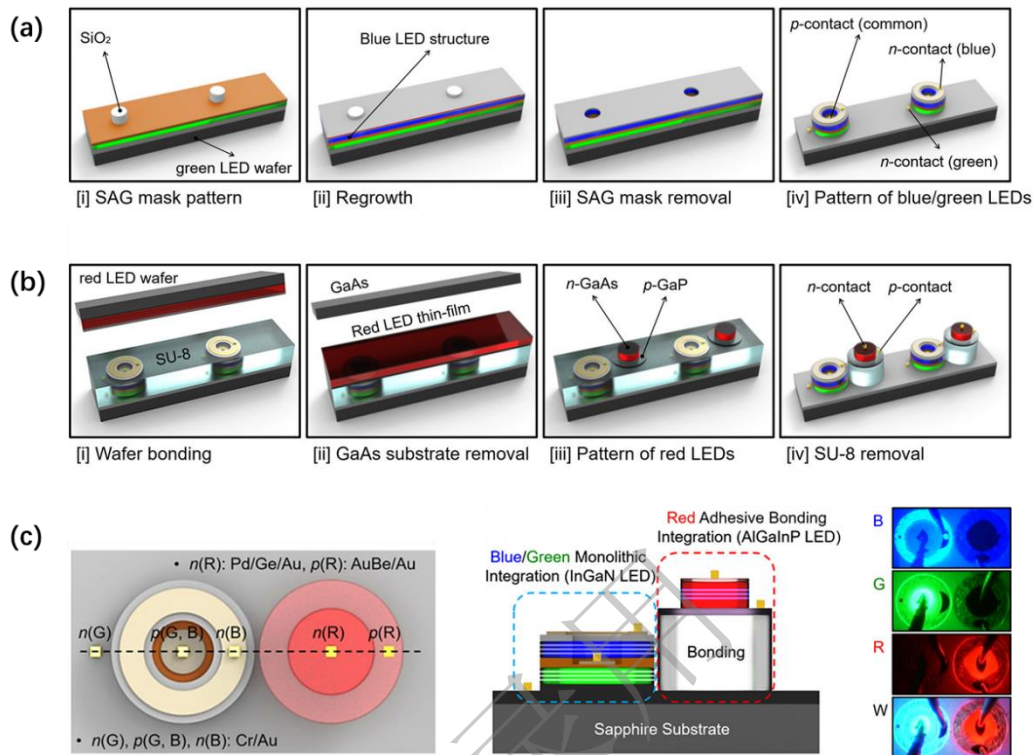
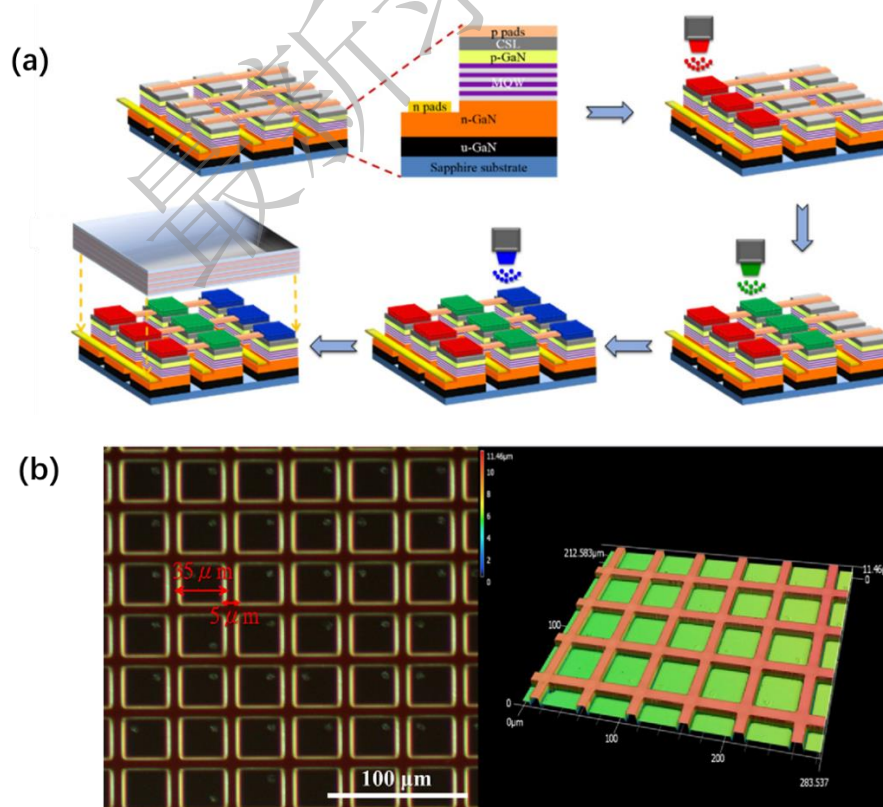


图 9 RGB LED 的制备过程示意图：(a)使用选择性区域生长制备蓝光和绿光双色 LED；(b)使用粘合剂集成红光 LED 的过程；(c)最终器件的俯视图和横截面图，RGB LED 以蓝光、绿光、红光和白光模式(从上到下)依次显示的显微图像^[107]

Fig.9. Schematic of the fabrication process of the hybrid RGB LEDs: (a) the fabrication process of the blue/green dual-color LEDs using selective area growth; (b) the process for the formation of the red pixels using adhesive bonding; (c) top and cross-sectional views of the final device, microscopic images of the hybrid RGB LEDs in (top to bottom) blue, green, red, and white color modes^[107].

通过紫外或蓝色等短波长的 LED 发光激发量子点或荧光粉等颜色转换材料的方式可以在单一的 InGa_N/Ga_N 材料上实现 RGB 发光，从而实现全彩化。该方法无需从不同晶圆上分割出单色 micro-LED 芯片组装成 RGB 像素，而是通过在未切割的紫光或者蓝光 micro-LED 芯片阵列上涂覆颜色转换材料来实现绿光和红光的发射，是制备高分辨率微显示屏的优选方案。采用紫外光源激发颜色转换材料相比于蓝色光源来说，它具有效率更高并且避免蓝光干扰的优势，但紫外光源成本相对更高，且需要避免紫外光泄露。目前常用蓝光与荧光粉组合制作白光 LED，但荧光粉会吸收部分能量且常规的荧光粉颗粒尺寸较大，因此应用到

micro-LED 上有一定困难。而量子点处于纳米尺度，吸收光谱宽，发射光谱窄，可以通过改变量子点的尺寸大小来调节发射光的波长^[108]，因此量子点应用在 micro-LED 上相较于传统的荧光粉材料具有一定的优势。2008 年 Z. Gong 等人通过紫外 micro-LED 激发 CdSe/ZnS 量子点实现了绿光和红光的颜色转换，揭示了量子点在 micro-LED 全彩色显示中的应用，但对不同颜色单元间的串扰和紫外光的泄漏没有做更详细的讨论^[109]。2015 年 C.T.Lee 等通过蓝光 micro-LED 激发 CdSe/ZnS 量子点发红光，采用布拉格反射层和 ZnO 纳米棒阵列提高了红光出射效率^[110]。同年郭浩中等人通过气流喷印技术将 RGB 三种转换颜色的量子点涂覆在紫外 micro-LED 上，并结合布拉格反射层阻挡紫外光泄露，制备得到了芯片尺寸 35 μm 、128 \times 128 阵列的全彩 RGB micro-LED^[10]，如图 10(a)。



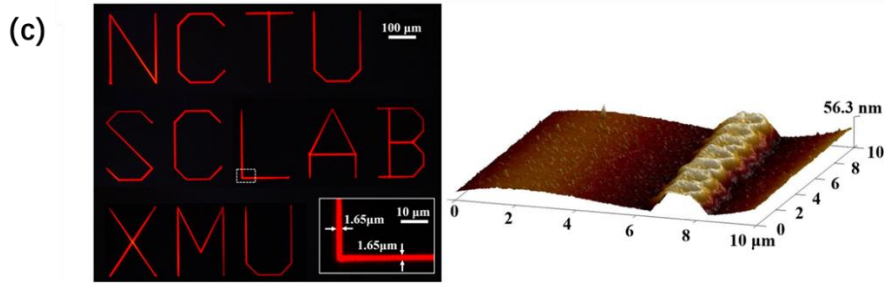


图 10 (a)基于量子点的全彩色显示 micro-LED 的制备流程^[10]; (b)光刻胶模具的光学显微镜图像, 其尺寸为 $35\ \mu\text{m}\times 35\ \mu\text{m}$ 、间距约为 $40\ \mu\text{m}$, 以及光刻胶模具的激光扫描仪显微镜图像, 其模板高度为 $11.46\ \mu\text{m}$ ^[111]; (c)荧光显微镜下使用最新的超微喷墨印刷技术在玻璃上用红色量子点印刷的图案 (插图描绘了最小线宽) 以及沉积的量子点的原子力显微镜图像^[17]

Fig. 10. (a)The process flow of the full-color emission of quantum-dot-based micro-LED display^[10]; (b) Optical microscopy image of photoresist square windows with the pixel size of $35\ \mu\text{m}\times 35\ \mu\text{m}$, where the pitch is about $40\ \mu\text{m}$. And the laser scanner microscope image of the photoresist square wall, where the height of the wall is $11.46\ \mu\text{m}$ ^[111]; (c) Fluorescence microscopy image of patterns printed by red quantum dots on a glass by using the latest SIJ printing system (the inset depicts minimum linewidth) and atomic force microscopy (AFM) image of deposited quantum dots^[17].

然而量子点涂覆的均匀性和精确度会影响 micro-LED 显示效果, 容易造成各颜色之间相互串扰, 研究表明可以在喷涂量子点时使用光刻胶模具^[111], 或者采用更高精度的喷涂技术来提高量子点的涂覆质量^[17]。2017 年郭浩中等采用紫外 micro-LED 激发量子点得到 RGB 三色光, 并借助光刻制作的模具有效提高了量子点的涂覆精度, 降低了不同颜色像素间的光学串扰, 光刻胶模具如图 10(b)^[111]。2019 年该研究组采用量子点涂覆宽度小于 $2\ \mu\text{m}$ 的超微喷墨(super-inkjet, SIJ)印刷技术得到了显示效果更好的单片 RGB micro-LED^[17], 量子点涂覆效果如图 10(c)所示。量子点虽然产额较高, 但是对于几个纳米尺寸^{量子点分散组装}的量子点分散组装以及 micro-LED 较薄的荧光层要求来说, 颜色转换效率低仍然是量子点应用于 micro-LED 较大的问题。2018 年台湾大学杨志忠等人引入了金属纳米 Ag 颗粒的方法来增强 CdSe/ZnS 量子点的转换效率, 在量子阱和量子点之间的 Ag 颗粒同时增强量子点、量子阱发光效率 10%以上, 同时荧光响应速度也得到提高

[112,113]。2019年杨志忠等人通过短距离的化学键把量子点链接在金属 Ag 纳米颗粒的表面，从而进一步增强量子点发光效率 20%以上^[114]。

一些特殊的结构，如纳米柱 LED 等同样可以用来实现单片集成的 micro-LED 全彩化。由于纳米柱 LED 侧向约束远小于普通尺寸的 LED，可以有效地弛豫应力，从而有效地降低 GaN 位错密度并减小其极化电场，提高 LED 的发光效率^[115]。如图 11(a)~(f)所示，通过控制纳米柱的直径可以改变纳米柱的 In 含量，从而改变发光波长，实现在同样的基底上外延出 RGB 三种颜色的纳米柱 LED 阵列^[116]。2018年 Katsumi Kishino 等人报道了通过纳米压印光刻、干法刻蚀和选区生长等手段在 AlN/Si 衬底上制备了直径为 220 nm、发光波长约为 504 nm 的蓝绿光纳米柱 LED，如图 11(g)~(i)所示，并揭示可以通过在同一片基底上制备直径在 80 nm 到 300 nm 范围的纳米柱 LED 来实现 micro-LED 的全彩色显示^[117]。另外一些研究表明可以通过设计不同形状的 InGaN/GaN LED，如纳米棒、金字塔形、六方环形和多面量子阱等^[118-121]，进而通过改变电流密度大小使得不同区域且不同 In 组分的量子阱发光的方式来控制 LED 发出不同波长的光。这些微小结构需要的生长条件比较复杂，且难以准确地控制发光的波长，因此在应用上有一定困难。

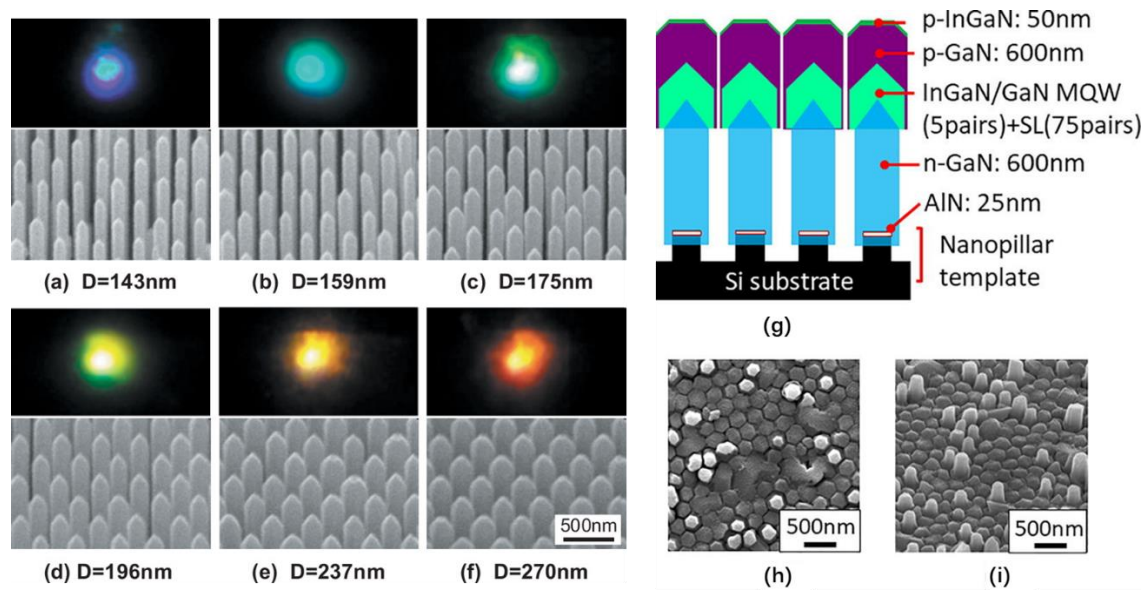


图 11 SEM 鸟瞰图和 He-Cd 激光器激发的不同直径 InGaN/GaN 纳米柱的发射图像：(a)143 nm; (b)159 nm; (c)175 nm; (d)196 nm; (e)237 nm; (f)270 nm^[116]；AlN/Si 纳米模板上的 InGaN 纳米柱 LED：(g)InGaN 纳米柱 LED 示意图；(h)纳米柱 LED 的 SEM 俯视图；(i)纳米柱 LED 的 SEM 鸟瞰图^[117]

FIG.11. Bird's-eye-view SEM and emission images excited by He-Cd laser from InGaN/GaN nanocolumns: (a) 143 nm, (b) 159 nm, (c) 175 nm, (d) 196 nm, (e) 237 nm, and (f) 270 nm^[116]; InGaN nanocolumn LEDs on the AlN/Si nanotemplate: (g) Schematic of the InGaN nanocolumn LEDs; (h) Top-view SEM image of the obtained nanocolumn LEDs; (i) Bird's-eye-view SEM image of the obtained nanocolumn LEDs^[117].

3.2 巨量转移

在 micro-LED 芯片制备完成后，需要将其转移到电流驱动背板上。Micro-LED 芯片尺寸在 $50\ \mu\text{m}$ 以下，一次 micro-LED 芯片转移的像素数量会达到数百万到千万量级，采用传统的转移技术将耗时过长。对于分辨率为 1920×1080 的全高清显示屏，为了控制坏点在 5 个以下，良率需要达到 99.9999%。目前的转移技术难以满足如此高的良率要求，因此需要一种既满足时效性，又要保证极高的准确率的巨量转移技术。随着各种 micro-LED 技术路线的提出，巨量转移方案也呈百花齐放之势，主要有抓取释放法、激光剥离法、流体组装法和滚轴转印法等。下面介绍其中的抓取释放法和激光剥离法。

3. 2. 1 抓取释放法(Pick and place)

对于抓取释放法一般采用各种不同类型的作用力将 micro-LED 芯片抓取到转移头上,之后通过精准地移动转移头,将 micro-LED 芯片移动到对应的驱动电路基板位置,再通过调整作用力将 micro-LED 芯片释放到基板上。转移过程中所采用的作用力有范德华力、静电力和磁力等,不同的研究单位在各自的技术方案上都积累了大量的发明专利。

美国的 X-celeprint 公司等单位选择采用弹性印模进行转移,通过调整弹性印模与 micro-LED 芯片之间的范德华力大小来对芯片进行拾取和放置。如图 12 所示,在转移过程中要实现转移 micro-LED 芯片与原基底分离,需要对原基底进行处理,使得芯片阵列与原基底只通过部分锚点和系链相连接。利用聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)材料作为转移的弹性印模,通过控制弹性印模与 micro-LED 芯片之间的范德华力使芯片阵列与原基底分离,再高精度地控制转印头将其转移到接收基板上的准确位置。这种转印技术最早在 2006 年由美国伊利诺斯大学 A. Rogers 等人提出^[122]。2009 年 A. Rogers 等人揭示了这种转印方法可用于 LED 显示领域,可以对不同形状、尺寸小到微米尺度,并且可以是平面或柔性的 LED 进行转移^[123]。在这之后由 A. Rogers 等人创建的 X-celeprint 公司采用 PDMS 微转印的方式对半导体器件与硅基电路的集成做了一系列的尝试^[124-131],其中包含对 micro-LED 的巨量转移^[129,130],并且这种微转印技术的对准精度可达到 $\pm 1 \mu\text{m}$ ^[131]。2017 年 X-celeprint 公司报道了将 PDMS 微转印技术用于转移 micro-LED 时,在转移效率方面,对于芯片尺寸为 $75 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$ 的 LED 芯片阵列,单次转移的数量可达到 8 万余颗,且单次转移的时间控制在 45 秒内。在转移精度方面,对于转移芯片尺寸为 $70 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$ 的 LED 芯片阵列,良率达到

99.99%，且可转移的最小 micro-LED 尺寸达到 $3\ \mu\text{m}\times 3\ \mu\text{m}$ ^[132]。

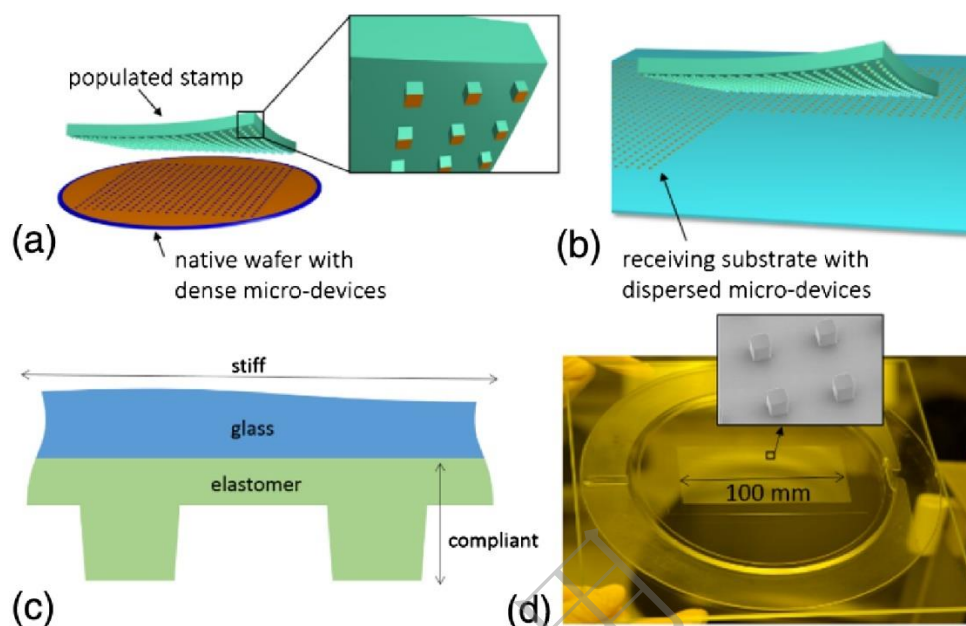


图 12 (a)转移印模从装有密集微器件的原晶圆上获取微器件阵列；(b)将分散的微器件转移到接收基板上；(c)转移印模的横截面示意图；(d)有效面积 $100\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$ 的转移印模阵列照片，插图弹性印模表面的电子显微镜图像^[130]

Fig.12. (a) Transfer stamp retrieves an array of micro-devices from a native wafer with densely packed micro-devices; (b) Transfer the dispersed micro-devices onto the receiving substrate; (c) A transfer stamp is illustrated in cross section; (d) A photograph of a transfer stamp with a $100\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$ active area, the inset shows an electron micrograph of the surface relief on the elastomer stamp^[130].

美国苹果公司收购的 LuxVue 公司等单位通过调控静电作用力将 micro-LED 芯片吸附并准确放置到基板上。LuxVue 专利^[133]介绍了调控静电作用力转移 micro-LED 的具体过程。首先将转移头定位在 micro-LED 芯片阵列单元上方，转移头包含两个硅电极，通过对两硅电极分别施加正、负电压产生静电力拾取 micro-LED 芯片，然后移动到所需转移到的驱动电路基板位置，通过关闭电源、降低两硅电极间电压或改变电压波形等方式释放阵列单元，将 micro-LED 芯片放置到对应的基板位置从而完成转移。台湾工研院(ITRI)等单位^[134]选择在 micro-LED 芯片中均匀地掺入磁性材料如铁钴镍等使 micro-LED 芯片附有磁性，利用通电的电感线圈产生磁力对 micro-LED 芯片进行吸附，之后断电消除磁力将

micro-LED 芯片释放到目标基板上。

3. 2. 2 激光剥离法(Laser lift-off)

英国 optovate 公司、日本索尼公司等研究单位选择了激光剥离的巨量转移方案^[135-138]，采用激光剥离的方式则避免了对 micro-LED 芯片的抓取过程，借助激光将 micro-LED 芯片从衬底上剥离并放置在接收基板上。首先将待转移的 micro-LED 芯片粘合在临时转移衬底上，使用紫外激光器发射紫外光照射在 micro-LED 芯片 GaN/蓝宝石衬底界面上，靠近界面处的 GaN 吸收紫外光能量并受热分解，使得 micro-LED 芯片从原衬底上剥离。之后再通过激光将临时转移衬底上的粘合材料分解，从而将 micro-LED 芯片从临时转移衬底上剥离放置到目标基板上。如图 13 所示，由于发射激光的光子能量小于蓝宝石衬底禁带宽度，大于 GaN 禁带宽度而被 GaN 强烈吸收，从而产生高温使靠近蓝宝石衬底界面 GaN 分解成 Ga 和 N₂。2019 年加州大学洛杉矶分校报道了基于激光剥离的 micro-LED 巨量转移方法，由于在激光剥离过程中可能会使得 micro-LED 芯片表面出现凹陷和裂纹等损伤，该方法采用电镀镍支撑层的技术来缓解激光剥离过程中的应力，使得激光剥离过程的良率接近 100%。他们采用可激光剥离的热塑性聚酰亚胺材料作为临时转移衬底和 micro-LED 芯片的粘合材料，将 micro-LED 芯片从原衬底激光剥离后，通过激光分解粘合材料将 micro-LED 芯片选择性地放置在接收基板上，从而使得整体转移良率高于 99%^[139]。

采用激光剥离法对 micro-LED 芯片进行转移，需要精确地控制激光的功率和束斑大小，以避免对 micro-LED 芯片造成损伤。目前用于 GaN 激光剥离的激光器主要有钕铝石榴石(YAG)激光器和氟化氪(KrF)准分子激光器^[140-143]，用于 micro-LED 芯片剥离时，一般选择作用时间短、脉冲能量合适的激光器来减少损

伤。北京大学宽禁带半导体研究中心与东莞中镓半导体公司合作研制出了 YAG 微区激光剥离的设备原型，该设备能够快速且低损伤地对 GaN 基 LED 芯片进行剥离转移。激光器对应的激光波长为 355 nm，激光脉冲能量在 0-300 μJ 范围内可调，脉冲宽度为 30 ns，最高频率可达 50 kHz，光斑大小在微米尺度，扫描一片四英寸整片所需时间可控制在 5 分钟。尽管 YAG 激光器的剥离阈值能量密度比 KrF 激光器有所增加，但单个脉冲的能量小于 KrF 激光器，对 GaN 造成的剥离损伤更小，有利于满足 micro-LED 芯片巨量转移的大规模、高时效需求^[142,143]。

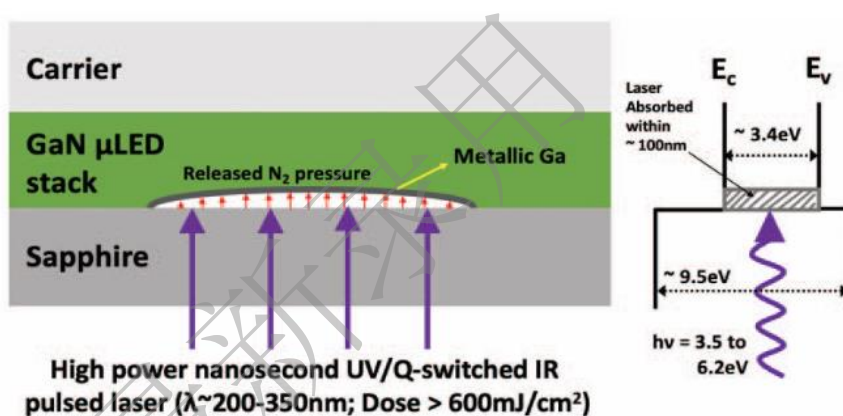


图 13 激光剥离工艺的示意图和氮化镓/蓝宝石界面的能带图^[139]

Fig.13. Schematic of the laser lift-off process along with the band diagram of the GaN/sapphire interface^[139].

3.3 检测技术

Micro-LED 用于显示时芯片数目达到数百万甚至上千万颗，在生产过程中需要及时检测出显示芯片中的坏点进行移除或修复。目前常用的 micro-LED 显示芯片检测技术为光致发光(Photoluminescence, PL)扫描绘图(mapping)技术和电致发光技术(Electroluminescence, EL)，光致发光测试能在不接触且不损坏 LED 芯片的情况下对其进行发光波长、亮度快速扫描测试，但无法检测出芯片电学性能上的问题，影响检测的准确度。电致发光测试通过对 LED 芯片加以电流来进行测试，准确度比光致发光测试更高。但电致发光测试工艺复杂，测试过程中要进

行多次转移，且需要专门的测试装置，一些探针还可能造成芯片损伤，传统电致发光测试并不能满足高效检测的要求。因此需要对现有的光致发光和电致发光测试做出相应的改进，以满足 micro-LED 的巨量检测需求。

3.3.1 光致发光检测

Micro-LED 应用于显示时对于波长和亮度的均匀性要求很高，因此对 micro-LED 波长和亮度的检测尤为重要。光致发光的光谱可以提供 micro-LED 的发光波长和亮度等信息，这有助于提前挑选出芯片中的坏点进行修复和移除，保证波长和亮度的均匀性。光致发光检测具有简单方便、检测速度快、无接触且无损伤等优点，可以对 micro-LED 芯片的发光特性进行初步的判断，但其缺点在于无法得到芯片的电学性能，检测准确度不够高。因此应用于 micro-LED 的检测时，可以将光致发光与其他手段结合起来提高其检测的准确度，比如增加对散射光谱的分析来提取 micro-LED 芯片更多的结构信息^[144-147]。

通过分析散射光谱中的拉曼信号可以得到 micro-LED 芯片的位错密度^[148]、应力分布^[149]、载流子浓度^[150]、刻蚀损伤^[151]、Mg 受主的激活^[152]以及工艺过程中产生的中间化合物等一系列信息。根据拉曼信号能对 micro-LED 芯片的电学性能做出精确的判断，结合光致发光提供的波长、亮度特性可以对 micro-LED 进行快速准确的检测。北京大学宽禁带半导体研究中心研究组针对 micro-LED 的巨量检测需求，提出了共焦显微拉曼结合光致发光的检测系统。共焦显微拉曼检测过程简单、检测速度快，能够实现无伤检测，其激发光的光斑大小在微米左右，能够满足 micro-LED 的分辨率要求。如图 14，激光器发射激光经过光路照射到 micro-LED 芯片表面微米大小的区域，之后该区域中芯片的光致发光和拉曼信号返回光路进入多通道光谱仪，多通道光谱仪中分光光路将 micro-LED 芯片的光

致发光和拉曼信号分离，并分别提取光致发光和拉曼光谱。根据光致发光谱和拉曼光谱可以准确地判断该区域内 micro-LED 芯片的发光特性和电学性能，根据指标对 micro-LED 芯片进行分类从而完成检测^[146,147]。

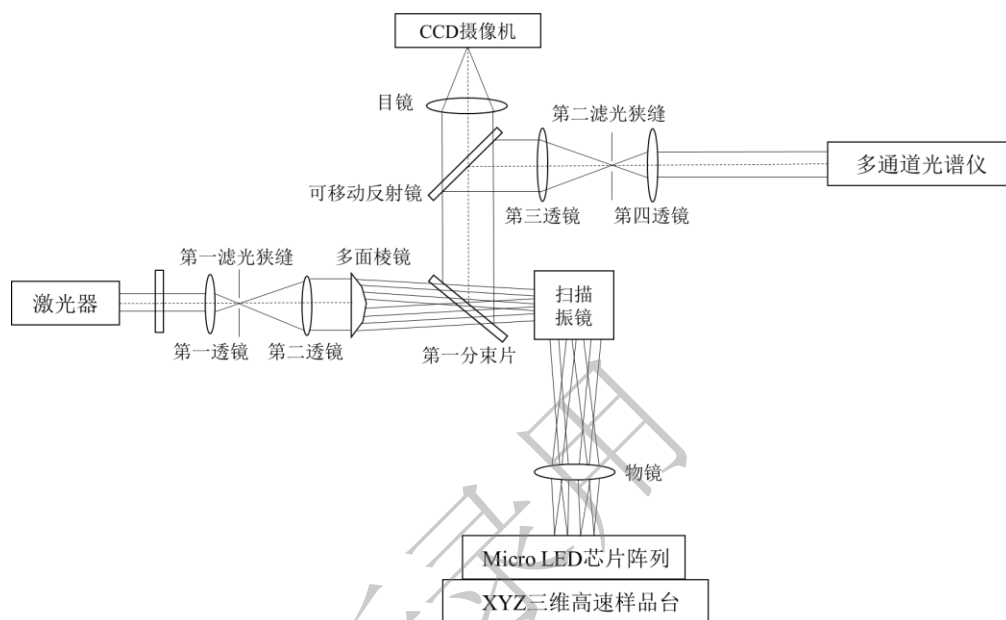


图 14 micro-LED 芯片共焦显微拉曼结合光致发光检测系统示意图^[146]

Fig.14.Schematic diagram of confocal micro Raman combined photoluminescence inspection system of micro-LED^[146].

3. 3. 2 电致发光检测

电致发光检测可准确地提供 micro-LED 芯片的电学性能，给出芯片的发光波长和亮度等信息，然而检测过程比较复杂，目前速度难以满足 micro-LED 巨量检测要求，且检测时与芯片接触可能对芯片造成损伤。对于 micro-LED 芯片的巨量测试，需要对检测过程进行改进提高检测速度并尽可能地减小芯片损伤，目前国内已有一些关于改进 micro-LED 电致发光检测方法的专利，比如通电点亮 micro-LED 后使用光敏胶来移除坏点^[153,154]；使用特殊设计的电极和探针，实现不需要封装即可对 micro-LED 进行加电检测^[155]；使用多对的正负电极条技术，可以同时测量多个 micro-LED^[156]；采用特殊设计的检测基板实现对 micro-LED 的自动检测^[157]；或者引入 TFT 测试板等来完成大面积的面板测试^[158]。

通过电致发光点亮 LED 后，一般采用大尺度范围内的总亮度来检测 LED 发光亮度，这难以满足微米尺度的 micro-LED 芯片巨量测试要求。数码相机的图像传感器可以将光信号转化为电信号获取亮度信息，而将高像素的数码相机与显微镜系统结合能够有效地提高分辨率，达到 micro-LED 芯片的微米尺度，因此数码相机与显微系统结合的亮度检测方法能够准确地给出单个 micro-LED 芯片的亮度信息。2018 年厦门大学报道了基于数码相机显微成像系统的 micro-LED 芯片表面亮度检测系统，在施加电流点亮 micro-LED 之后，通过采集数码相机的图像和曝光时间获取芯片表面亮度信息，并通过自制的数据处理软件对各个芯片的亮度信息进行分析处理，从而挑选出亮度异常的坏点。图 15(a)~(c)为实验测得单个 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$ 的 micro-LED 芯片亮度的伪彩色图和 3D 分布，图 15(d)~(e)为部分 micro-LED 芯片发光图以及亮度与外加电压的曲线图，根据各个芯片的平均亮度值可判断出 8 号芯片为亮度异常的坏点^[159]。

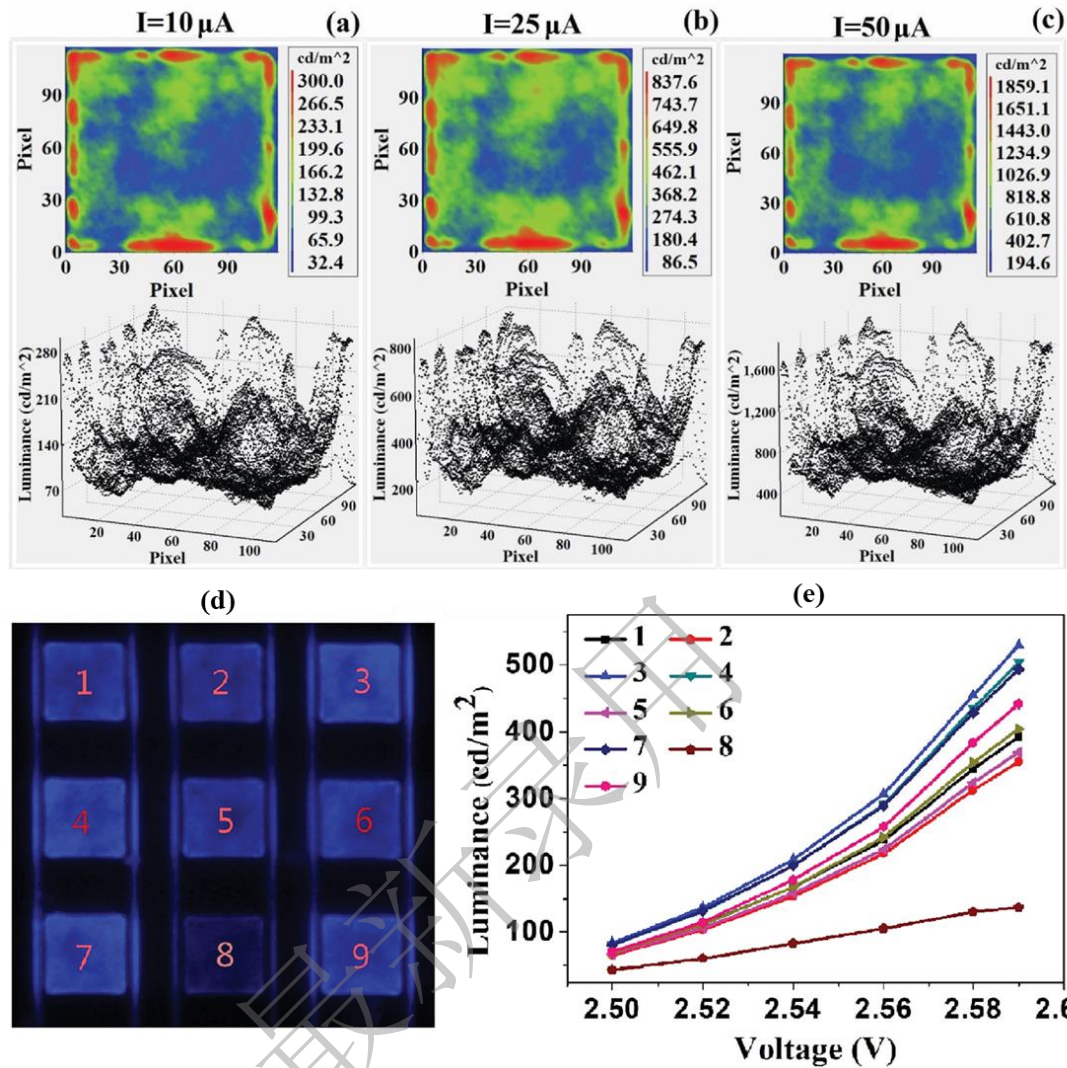


图 15 (a)~(c) 单个 micro-LED 芯片不同电流对应的亮度的伪彩色图和 3D 分布; (d) micro-LED 阵列中的部分芯片; (e) 这些芯片在不同电压下的平均亮度^[159]

Fig.15. (a)~(c) The pseudo color map and 3D distribution of the luminance of the single micro-LED chip under different current; (d) The certain chips on the micro-LED array; (e) The average luminance of these chips under different voltages^[159].

3.4 小结

在全彩色显示方面, RGB 排列法、量子点颜色转换法和纳米柱 LED 等都是可能的解决方案。对于 RGB 直接排列法, 目前 InGaN LED 红光等长波长仍然效率低下, 需要进一步提高红光 InGaN LED 的效率, 而 AlGaInP LED 存在着更严重的表面复合, 并与蓝绿光 InGaN LED 集成存在驱动、老化问题。量子点转换技术能够有效地实现全彩化, 在 micro-LED 显示领域具有广阔的发展前景, 但目

前量子点转换效率需要进一步提高。通过改变纳米柱直径来调整纳米柱 LED 发光波长，但纳米柱 LED 面临着 In 组分难以精确控制的问题，同时也需要克服纳米柱 LED 与驱动电路的集成问题。

在巨量转移方面，抓取释放法、激光剥离法、流体组装法和滚轴转印法等都有各自的优势。相比较而言，借助 PDMS 微转印的抓取释放法和激光剥离法是比较具有应用前景的转移方法。PDMS 微转印技术经过十几年的发展逐渐成熟，在 micro-LED 巨量转移上也实现了较高的良率和产能，但对抓取表面的平坦度有较高的要求，需要更精确地控制范德华力的大小。激光剥离法避免了抓取过程，可以实现 micro-LED 的选择性转移，微区激光剥离技术可以避免对芯片造成较大的损伤，同时产能也得到较大的提高，不过和 CMOS 键合技术以及相关的亚微米制备技术需要进一步提升。

在检测技术方面，光致发光测试能对 LED 芯片进行检测速度较快的无伤测试，但难以检测出电学性能，需要与其他手段结合提高 micro-LED 检测的准确性。共焦显微拉曼结合光致发光检测具有快速、准确、分辨率高且无伤测试的特点，能够对 micro-LED 芯片的电学性能和发光特性做出全面的判断，可以作为 micro-LED 巨量检测的有效手段。电致发光测试效果准确且全面，但速度相对较慢，且检测过程可能对芯片造成损伤，需要改进以提高检测速度和减小芯片损伤。借助数码相机显微成像系统能够对单个 micro-LED 芯片电致发光的表面亮度信息做出准确判断，但同样需要提高检测速度来满足 micro-LED 检测需求。

4、总结和展望

本文说明了 micro-LED 显示的发展现状，介绍了在外延生长和芯片工艺两

方面存在的困难及可能的解决方案，外延生长方面包括缺陷控制、极化场控制和波长均匀性问题，芯片工艺方面包括全彩色显示、巨量转移和检测技术问题，并对各种解决方案的可行性进行了探讨。Micro-LED 作为新一代的显示技术，在显示效果上有着 LCD 和 OLED 难以企及的优势。随着商用 5G 技术的推广，人们对于高度微型化和集成化的显示技术需求越来越强烈。目前 micro-LED 显示技术经过长达二十年的技术积累，相关的技术难题正在逐步地被克服，一些 micro-LED 显示产品初步走入大众的视野。Micro-LED 显示技术未来将在 VR/AR、智能手机、平板电脑、高阶电视和可穿戴设备等各个领域发挥出不可替代的作用。现阶段在世界范围内越来越多的企业等研究单位投身到 micro-LED 显示的研发中，国内也有不少高校、企业等单位在这一领域做出突出贡献，相信在不久的将来 micro-LED 显示技术必定会走入大众生活，在显示领域占据至关重要的地位。

参考文献：

- [1] Nakamura S, Mukai T, Senoh M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 1687
<https://doi.org/10.1063/1.111832>
- [2] Fan Z Y, Lin J Y, Jiang H X 2008 *J. Phys. D* **41**45 94001
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/9/094001>
- [3] McCall S L, Levi A F J, Slusher R E, Pearton S J, Logan R A 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 289 <https://doi.org/10.1063/1.106688>
- [4] Jin S X, Li J, Li J Z, Lin J Y, Jiang H X 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 631
<https://doi.org/10.1063/1.125841>
- [5] Jiang H X, Jin S X, Li J, Shakya J, Lin J Y 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 1303

<https://doi.org/10.1063/1.1351521>

- [6] Jeon C W, Choi H W, Gu E, Dawson M D 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 2421 <https://doi.org/10.1109/lpt.2004.835626>
- [7] Liu Z J, Chong W C, Wong K M, Lau K M 2013 *J. Disp. Technol.* **9** 678
<https://doi.org/10.1109/JDT.2013.2256107>
- [8] Chong W C, Cho W K, Liu Z J, Wang C H, Lau K M 2014 *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)* La Jolla, USA, Oct 19-22, 2014 p1 <https://doi.org/10.1109/CSICS.2014.6978524>
- [9] Liu Z J, Zhang K, Liu Y B, Yan S W, Kwok H S, Deen J, Sun X W 2018 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* San Francisco, USA, Dec 1-5, 2018 p38.1.1 <https://doi.org/10.1109/IEDM.2018.8614692>
- [10] Han H V, Lin H Y, Lin C C, Chong W C, Li J R, Chen K J, Yu P, Chen T M, Chen H M, Lau K M, Kuo H C 2015 *Opt. Express* **23** 32504
<https://doi.org/10.1364/OE.23.032504>
- [11] Templier F, Benaïssa L, Aventurier B, Nardo C D, Charles M, Daami A, Henry F, Dupré L 2017 *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* **48** 268
<https://doi.org/10.1002/sdtp.11684>
- [12] Bai J, Cai Y, Feng P, Fletcher P, Zhao X, Zhu C, Wang T 2020 *ACS Photon.* **7** 411
<https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.9b01351>
- [13] Day J, Li J, Lie D Y C, Bradford C, Lin J Y, Jiang H X 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 031116 <https://doi.org/10.1063/1.3615679>
- [14] Tian P F, McKendry J J D, Gong Z, Zhang S L, Watson S, Zhu D D, Watson I M,

- Gu E D, Kelly A E, Humphreys C J, Dawson M D 2014 *J. Appl. Phys.* **115**
033112 <https://doi.org/10.1063/1.4862298>
- [15] Ludovic D, Marjorie M, Valentin V, Bernard A, Franck H, François O, Sauveur T,
Anis D, Templier F 2017 *Proc. SPIE* **10104** 1010422
<https://doi.org/10.1117/12.2252196>
- [16] Zhang X, Li P A, Zou X B, Jiang J M, Yuen S H, Tang C W, Lau K M 2019 *IEEE
Photon. Technol. Lett.* **31** 865 <https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2910729>
- [17] Huang Chen S W, Shen C C, Wu T, Liao Z Y, Chen L F, Zhou J R, Lee C F, Lin C
H, Lin C C, Sher C W, Lee P T, Tzou A J, Chen Z, Kuo H C 2019 *Photonics Res.*
7 416 <https://doi.org/10.1364/prj.7.000416>
- [18] Jiang H X, Lin J Y 2013 *Opt. Express* **21** A475
<https://doi.org/10.1364/OE.21.00A475>
- [19] Wu T Z, Sher C W, Lin Y, Lee C F, Liang S J, Lu Y J, Huang Chen S W, Guo W
J, Kuo H C, Chen Z 2018 *Appl. Sci.* **8** 1557 <https://doi.org/10.3390/app8091557>
- [20] Ding K, Avrutin V, Izyumskaya N, Özgür Ü, Morkoç H 2019 *Appl. Sci.* **9** 1206
<https://doi.org/10.3390/app9061206>
- [21] Wierer J J, Tansu N 2019 *Laser Photonics Rev.* **13** 1900141
<https://doi.org/10.1002/lpor.201900141>
- [22] Wasisto H S, Prades J D, Gülink J, Waag A 2019 *Appl. Phys. Rev.* **6** 041315
<https://doi.org/10.1063/1.5096322>
- [23] Lee H E, Shin J H, Park J H, Hong S K, Park S H, Lee S H, Lee J H, Kang I S,
Lee K J 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1808075

<https://doi.org/10.1002/adfm.201808075>

- [24] Wong M S, Nakamura S, DenBaars S 2020 *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **9** 015012 <https://doi.org/10.1149/2.0302001JSS>
- [25] Zhou X J, Tian P F, Sher C W, Wu J, Liu H Z, Liu R, Kuo H C 2020 *Prog. Quantum. Electron.* **71** 100263 <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2020.100263>
- [26] Liu Z J, Lin C H, Hyun B R, Sher C W, Lv Z J, Luo B Q, Jiang F L, Wu T, Ho C H, Kuo H C, He J H 2020 *Light Sci. Appl.* **9** 83 <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0268-1>
- [27] Karpov S 2015 *Opt. Quantum Electron* **47** 1293 <https://doi.org/10.1007/s11082-014-0042-9>
- [28] Zhan J L, Chen Z Z, Jiao Q, Feng Y L, Li C C, Chen Y F, Chen Y Y, Jiao F, Kang X N, Li S F, Wang Q, Yu T J, Zhang G Y, Shen B 2018 *Opt. Express* **26** 5265 <https://doi.org/10.1364/OE.26.005265>
- [29] Li C C, Zhan J L, Chen Z Z, Jiao F, Chen Y F, Chen Y Y, Nie J X, Kang X N, Li S F, Wang Q, Zhang G Y, Shen B 2019 *Opt. Express* **27** A1146 <https://doi.org/10.1364/OE.27.0A1146>
- [30] Hwang D, Mughal A, Pynn C D, Nakamura S, DenBaars S P 2017 *Appl. Phys. Express* **10** 032101 <https://doi.org/10.7567/apex.10.032101>
- [31] Tian P F, McKendry J J D, Gong Z, Guilhabert B, Watson I M, Gu E D, Chen Z Z, Zhang G Y, Dawson M D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 231110 <https://doi.org/10.1063/1.4769835>
- [32] Meyaard D S, Shan Q, Cho J, Fred Schubert E, Han S H, Kim M H, Sone C, Jae

Oh S, Kyu Kim J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 081106

<https://doi.org/10.1063/1.3688041>

[33] Konoplev S S, Bulashevich K A, Karpov S Y 2018 *Phys. Status Solidi A* **215**

1700508 <https://doi.org/10.1002/pssa.201700508>

[34] Kou J Q, Shen C C, Shao H, Che J M, Hou X, Chu C S, Tian K K, Zhang Y H,

Zhang Z H, Kuo H C 2019 *Opt. Express* **27** A643

<https://doi.org/10.1364/OE.27.00A643>

[35] Zhao C, Ng T K, Prabaswara A, Conroy M, Jahangir S, Frost T, O'Connell J,

Holmes J D, Parbrook P J, Bhattacharya P, Ooi B S 2015 *Nanoscale* **7** 16658

<https://doi.org/10.1039/c5nr03448e>

[36] Zuo P, Zhao B, Yan S, Yue G, Yang H J, Li Y F, Wu H Y, Jiang Y, Jia H Q, Zhou J

M, Chen H 2016 *Opt. Quantum Electron* **48** 288 [https://doi.org/10.1007/s11082-](https://doi.org/10.1007/s11082-016-0551-9)

[016-0551-9](https://doi.org/10.1007/s11082-016-0551-9)

[37] Wong M S, Hwang D, Alhassan A I, Lee C, Ley R, Nakamura S, DenBaars S P

2018 *Opt. Express* **26** 21324 <https://doi.org/10.1364/OE.26.021324>

[38] Yang C M, Kim D S, Park Y S, Lee J H, Lee Y S, Lee J H 2012 *Opt. Photonics J.*

02 185 <https://doi.org/10.4236/opj.2012.23028>

[39] Wong M S, Lee C, Myers D J, Hwang D, Kearns J A, Li T, Speck J S, Nakamura

S, DenBaars S P 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 097004

<https://doi.org/10.7567/1882-0786/ab3949>

[40] Chen W J, Wen X M, Latzel M, Heilmann M, Yang J F, Dai X, Huang S J,

Shrestha S, Patterson R, Christiansen S, Conibeer G 2016 *ACS Appl. Mater.*

Interfaces **8** 31887 <https://doi.org/10.1021/acsami.6b11675>

- [41] Zhang Y Y, Guo E Q, Li Z, Wei T B, Li J, Yi X Y, Wang G H 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 243 <https://doi.org/10.1109/lpt.2011.2177251>
- [42] Yang Y, Cao X A 2009 *J. Vac. Sci. Technol. B* **27** 2337
<https://doi.org/10.1116/1.3244590>
- [43] Zhu J, Takahashi T, Ohori D, Endo K, Samukawa S, Shimizu M, Wang X L 2019
Phys. Status Solidi A **216** 1900380 <https://doi.org/10.1002/pssa.201900380>
- [44] Usui A, Sunakawa H, Sakai A, Yamaguchi A 1997 *Jpn. J. Appl. Phys.* **36** 7B
<https://doi.org/10.1143/JJAP.36.L899>
- [45] Nakamura S 1991 *Jpn. J. Appl. Phys.* **30** L1705
<https://doi.org/10.1143/jjap.30.L1705>
- [46] Amano H, Sawaki N, Akasaki I, Toyoda Y 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 353
<https://doi.org/10.1063/1.96549>
- [47] Ishikawa H, Zhao G-Y, Nakada N, Egawa T, Jimbo T, Umeno M 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** L492 <https://doi.org/10.1143/jjap.38.L492>
- [48] Feltin E, Dalmaso S, Mierry P D, Beaumont B, Lahrèche H, Bouillé A, Haas H, Leroux M, Gibart P 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** L738
<https://doi.org/10.1143/jjap.40.L738>
- [49] Kim M H, Do Y G, Kang H C, Noh D Y, Park S J 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2713
<https://doi.org/10.1063/1.1412824>
- [50] Cheng J P, Yang X L, Sang L, Guo L, Hu A Q, Xu F J, Tang N, Wang X Q, Shen B 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 142106 <https://doi.org/10.1063/1.4917504>

- [51] Zhang J 2019 Ph. D. Dissertation (Beijing: Peking University) (in Chinese) [张洁 2019 博士学位论文(北京: 北京大学)]
- [52] Feng Y X, Yang X L, Zhang Z H, Kang D, Zhang J, Liu K H, Li X Z, Shen J F, Liu F, Wang T, Ji P F, Xu F J, Tang N, Yu T J, Wang X Q, Yu D P, Ge W K, Shen B 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1905056 <https://doi.org/10.1002/adfm.201905056>
- [53] Cho C Y, Kwon M K, Park I K, Hong S H, Kim J J, Park S E, Kim S T, Park S J 2011 *Opt. Express* **19** A943 <https://doi.org/10.1364/OE.19.00A943>
- [54] Matsuoka R, Okimoto T, Nishino K, Naoi Y, Sakai S 2009 *J. Cryst. Growth* **311** 2847 <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.01.027>
- [55] Park J, Moon D, Park S, Park S H, Yoon E 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 025501 <https://doi.org/10.1143/jjap.51.025501>
- [56] Xu Y, Cao B, He S Y, Qi L, Li Z Y, Cai D M, Zhang Y M, Ren G Q, Wang J F, Wang C H, Xu K 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 102105 <https://doi.org/10.1063/1.4998924>
- [57] Xu Y, Su X J, Cao B, Li Z Y, Liu Y, Cai D M, Zhang Y M, Wang J F, Wang C H, Xu K 2019 *CrystEngComm* **21** 902 <https://doi.org/10.1039/c8ce02019a>
- [58] Chung K, Lee K, Tchoe Y, Oh H, Park J, Hyun J K, Yi G C 2019 *Nano Energy* **60** 82 <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.03.040>
- [59] Tadamoto K, Okagawa H, Ohuchi Y, Tsunekawa T, Jyouichi T, Imada Y, Kato M, Kudo H, Taguchi T 2001 *Phys. Status Solidi A* **188** 121 [https://doi.org/10.1002/1521-396x\(200111\)188:1<121::aid-pssa121>3.0.co;2-g](https://doi.org/10.1002/1521-396x(200111)188:1<121::aid-pssa121>3.0.co;2-g)
- [60] Jiang F Y, Liu J L, Wang L, Xiong C B, Fang W Q, Mo C L, Tang Y W, Wang G

- X, Xu L Q, Ding J, Wang X L, Quan Z J, Zhang J L, Zhang M, Pan S, Zheng C D
2015 *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.* **45** 067302(in Chinese)[江风益, 刘军林, 王
立, 熊传兵, 方文卿, 莫春兰, 汤英文, 王光绪, 徐龙权, 丁杰, 王小兰, 全
知觉, 张建立, 张萌, 潘拴, 郑畅达 2015 中国科学:物理学 力学 天文学 **45**
067302] <https://doi.org/10.1360/SSPMA2015-00027>
- [61] Sun Y J, Yu T J, Dai J H, Wang N H, Luo R H, Liang Z W, Zhang N, Li C Y,
Kang X N, Zhang G Y 2014 *CrystEngComm* **16** 5458
<https://doi.org/10.1039/C4CE00054D>
- [62] Gao H Y, Yan F W, Zhang Y, Li J M, Zeng Y P, Wang G H 2008 *J. Appl. Phys.*
103 014314 <https://doi.org/10.1063/1.2830981>
- [63] Huang H W, Lin C H, Yu C C, Lee B D, Chiu C H, Lai C F, Kuo H C, Leung K
M, Lu T C, Wang S C 2008 *Nanotechnology* **19** 185301
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/18/185301>
- [64] Chen J J, Su Y K, Lin C L, Chen S M, Li W L, Kao C C 2008 *IEEE Photon.*
Technol. Lett. **20** 1193 <https://doi.org/10.1109/LPT.2008.924900>
- [65] Chen Y F, Chen Z Z, Li J Z, Chen Y Y, Li C C, Zhan J L, Yu T J, Kang X N, Jiao
F, Li S F, Zhang G Y, Shen B 2018 *CrystEngComm* **20** 6811
<https://doi.org/10.1039/c8ce01450g>
- [66] Li J Z, Chen Z Z, Jiao Q Q, Feng Y L, Jiang S, Chen Y F, Yu T J, Li S F, Zhang G
Y 2015 *CrystEngComm* **17** 4469 <https://doi.org/10.1039/c5ce00476d>
- [67] Fiorentini V, Bernardini F, Della Sala F, Di Carlo A, Lugli P 1999 *Phys. Rev. B* **60**
8849 <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.60.8849>

- [68] Ambacher O, Majewski J, Miskys C, Link A, Hermann M, Eickhoff M, Stutzmann M, Bernardini F, Fiorentini V, Tilak V, Schaff B, Eastman L 2002 *J. Phys. Condens. Matter* **14** 3399 <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/13/302>
- [69] Zhao H P, Liu G Y, Zhang J, Poplawsky J D, Dierolf V, Tansu N 2011 *Opt. Express* **19** A991 <https://doi.org/10.1364/OE.19.00A991>
- [70] Zhao H P, Arif R A, Ee Y K, Tansu N 2009 *IEEE J. Quantum Electron* **15** 1104 <https://doi.org/10.1109/jstqe.2009.2016576>
- [71] Zhao H P, Liu G Y, Li X, Arif R, Huang G S, Poplawsky J D, Penn S, Dierolf V, Tansu N 2009 *IET Optoelectron.* **3** 283 <https://doi.org/10.1049/iet-opt.2009.0050>
- [72] Tsai M C, Yen S H, Kuo Y K 2011 *Appl. Phys. A* **104** 621 <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6458-1>
- [73] Arif R A, Ee Y K, Tansu N 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 091110 <https://doi.org/10.1063/1.2775334>
- [74] Yang Z W, Li R, Wei Q Y, Yu T, Zhang Y Z, Chen W H, Hu X D 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 061120 <https://doi.org/10.1063/1.3075862>
- [75] Shioda T, Yoshida H, Tachibana K, Sugiyama N, Nunoue S 2012 *Phys. Status Solidi A* **209** 473 <https://doi.org/10.1002/pssa.201100356>
- [76] Kimura S, Yoshida H, Uesugi K, Ito T, Okada A, Nunoue S 2016 *J. Appl. Phys.* **120** 113104 <https://doi.org/10.1063/1.4962719>
- [77] Alhassan A I, Farrell R M, Saifaddin B, Mughal A, Wu F, DenBaars S P, Nakamura S, Speck J S 2016 *Opt. Express* **24** 17868 <https://doi.org/10.1364/OE.24.017868>

- [78] Al Muyeed S A, Sun W, Wei X, Song R, Koleske D D, Tansu N, Wierer J J 2017 *AIP Adv.* **7** 105312 <https://doi.org/10.1063/1.5000519>
- [79] Hwang J I, Hashimoto R, Saito S, Nunoue S 2014 *Appl. Phys. Express* **7** 071003 <https://doi.org/10.7567/apex.7.071003>
- [80] Sun W, Al Muyeed S A, Song R, Wierer J J, Tansu N 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 201106 <https://doi.org/10.1063/1.5028257>
- [81] Zhao H P, Liu G Y, Tansu N 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 131114 <https://doi.org/10.1063/1.3493188>
- [82] Wang T 2016 *Semicond. Sci. Technol.* **31** 093003 <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/9/093003>
- [83] Poyiatzis N, Athanasiou M, Bai J, Gong Y, Wang T 2019 *Sci. Rep.* **9** 1383 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37008-5>
- [84] Bai J, Xu B, Guzman F G, Xing K, Gong Y, Hou Y, Wang T 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 261103 <https://doi.org/10.1063/1.4939132>
- [85] Li H J, Wong M S, Khoury M, Bonef B, Zhang H J, Chow Y C, Li P P, Kearns J, Taylor A A, Mierry P D, Hassan Z, Nakamura S, DenBaars S P 2019 *Opt. Express* **27** 24154 <https://doi.org/10.1364/OE.27.024154>
- [86] Huang Chen S W, Huang Y M, Singh K J, Hsu Y C, Liou F J, Song J, Choi J, Lee P T, Lin C C, Chen Z, Han J, Wu T Z, Kuo H C 2020 *Photonics Res.* **8** 630 <https://doi.org/10.1364/prj.388958>
- [87] Strittmatter A, Northrup J E, Johnson N M, Kisin M V, Spieberg P, El-Ghoroury H, Usikov A, Syrkin A 2011 *Phys. Status Solidi B* **248** 561

<https://doi.org/10.1002/pssb.201046422>

- [88] Zhao Y J, Yan Q M, Huang C Y, Huang S C, Hsu P S, Tanaka S, Pan C C, Kawaguchi Y, Fujito K, Van De Walle C G, Speck J S, DenBaars S P, Nakamura S, Feezell D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 201108
<https://doi.org/10.1063/1.4719100>
- [89] Zhang Y, Bai J, Hou Y, Smith R M, Yu X, Gong Y, Wang T 2016 *AIP Adv.* **6** 025201 <https://doi.org/10.1063/1.4941444>
- [90] Monavarian M, Rashidi A, Feezell D 2019 *Phys. Status Solidi A* **216** 1800628
<https://doi.org/10.1002/pssa.201800628>
- [91] Song J, Choi J, Zhang C, Deng Z, Xie Y J, Han J 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 33140 <https://doi.org/10.1021/acsami.9b11316>
- [92] Song J, Han J 2020 *Phys. Status Solidi B* **257** 1900565
<https://doi.org/10.1002/pssb.201900565>
- [93] Beckers A, Fahle D, Mauder C, Kruecken T, Boyd A R, Heuken M 2018 *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* **49** 601 <https://doi.org/10.1002/sdtp.12413>
- [94] Paranjpe A, Montgomery J, Lee S M, Morath C 2018 *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* **49** 597 <https://doi.org/10.1002/sdtp.12414>
- [95] Armour E, Lu F, Belousov M, Lee D, Quinn W 2009 *Semicond. Today* **4** 82
- [96] Liu J L, Zhang J L, Mao Q H, Wu X M, Jiang F Y 2013 *CrystEngComm* **15** 3372
<https://doi.org/10.1039/c3ce27059a>
- [97] Nishikawa A, Loesing A, Slischka B 2019 *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* **50** 591
<https://doi.org/10.1002/sdtp.13581>

- [98] Aida H, Takeda H, Aota N, Koyama K 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 016504
<https://doi.org/10.1143/jjap.51.016504>
- [99] Aida H, Aota N, Takeda H, Koyama K 2012 *J. Cryst. Growth* **361** 135
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2012.08.039>
- [100] Ohno Y, Kuzuhara M 2001 *IEEE Trans. Electron Devices* **48** 517
<https://doi.org/10.1109/16.906445>
- [101] Nishikawa A, Groh L, Solari W, Lutgen S 2013 *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** 08JB25
<https://doi.org/10.7567/jjap.52.08jb25>
- [102] Auf der Maur M, Pecchia A, Penazzi G, Rodrigues W, Di Carlo A 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 027401 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.027401>
- [103] Park I K, Kim J Y, Kwon M K, Cho C Y, Lim J H, Park S J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 091110 <https://doi.org/10.1063/1.2890492>
- [104] El-Ghoroury H, Yeh M, Chen J C, Li X, Chuang C L 2016 *AIP Adv.* **6** 075316
<https://doi.org/10.1063/1.4959897>
- [105] Boroditsky M, Gontijo I, Jackson M, Vrijen R, Yablonovitch E, Krauss T, Cheng C C, Scherer A, Bhat R, Krames M 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 3497
<https://doi.org/10.1063/1.372372>
- [106] Kang C M, Kong D J, Shim J P, Kim S, Choi S B, Lee J Y, Min J H, Seo D J, Choi S Y, Lee D S 2017 *Opt. Express* **25** 2489
<https://doi.org/10.1364/OE.25.002489>
- [107] Kang C M, Lee J Y, Kong D J, Shim J P, Kim S, Mun S H, Choi S Y, Park M D, Kim J, Lee D S 2018 *ACS Photon.* **5** 4413

<https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b00876>

- [108] Lee J, Sundar V C, Heine J R, Bawendi M G, Jensen K F 2000 *Adv. Mater.* **12** 1102 [https://doi.org/10.1002/1521-4095\(200008\)12:15<1102::AID-ADMA1102>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/1521-4095(200008)12:15<1102::AID-ADMA1102>3.0.CO;2-J)
- [109] Gong Z, Gu E D, Jin S R, Massoubre D, Guilhabert B, Zhang H X, Dawson M D, Poher V, Kennedy G T, French P M W, Neil M A A 2008 *J. Phys. D* **41** 094002 <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/9/094002>
- [110] Lee C T, Cheng C J, Lee H Y, Chu Y C, Fang Y H, Chao C H, Wu M H 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 2296 <https://doi.org/10.1109/lpt.2015.2462072>
- [111] Lin H Y, Sher C W, Hsieh D H, Chen X Y, Chen H M P, Chen T M, Lau K M, Chen C H, Lin C C, Kuo H C 2017 *Photonics Res.* **5** 411 <https://doi.org/10.1364/prj.5.000411>
- [112] Lin C H, Chiang H C, Wang Y T, Yao Y F, Chen C C, Tse W, Wu R N, Chang W Y, Kuo Y, Kiang Y W, Yang C 2018 *Opt. Express* **26** 23629 <https://doi.org/10.1364/OE.26.023629>
- [113] Chang W Y, Kuo Y, Kiang Y W, Yang C C 2019 *Opt. Express* **27** A629 <https://doi.org/10.1364/OE.27.00A629>
- [114] Wang Y T, Liu C W, Chen P Y, Wu R N, Ni C C, Cai C J, Kiang Y W, Yang C C 2019 *Opt. Lett.* **44** 5691 <https://doi.org/10.1364/OL.44.005691>
- [115] Guo W, Zhang M, Banerjee A, Bhattacharya P 2010 *Nano Lett.* **10** 3355 <https://doi.org/10.1021/nl101027x>
- [116] Sekiguchi H, Kishino K, Kikuchi A 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 231104

<https://doi.org/10.1063/1.3443734>

- [117] Yamano K, Kishino K 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 091105
<https://doi.org/10.1063/1.5022298>
- [118] Hong Y J, Lee C H, Yoon A, Kim M, Seong H K, Chung H J, Sone C, Park Y J, Yi G C 2011 *Adv. Mater.* **23** 3284 <https://doi.org/10.1002/adma.201100806>
- [119] Tchoe Y, Jo J, Kim M, Heo J, Yoo G, Sone C, Yi G C 2014 *Adv. Mater.* **26** 3019
<https://doi.org/10.1002/adma.201305684>
- [120] Lee M L, Yeh Y H, Tu S J, Chen P C, Lai W C, Sheu J K 2015 *Opt. Express* **23** A401 <https://doi.org/10.1364/OE.23.00A401>
- [121] Funato M, Hayashi K, Ueda M, Kawakami Y, Narukawa Y, Mukai T 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 021126 <https://doi.org/10.1063/1.2956404>
- [122] Meitl M A, Zhu Z T, Kumar V, Lee K J, Feng X, Huang Y Y, Adesida I, Nuzzo R G, Rogers J A 2005 *Nat. Mater.* **5** 33 <https://doi.org/10.1038/nmat1532>
- [123] Park S I, Xiong Y J, Kim R H, Elvikis P, Meitl M, Kim D H, Wu J, Yoon J, Yu C J, Liu Z J, Huang Y G, Hwang K C, Ferreira P, Li X L, Choquette K, Rogers J A 2009 *Science* **325** 977 <https://doi.org/10.1126/science.1175690>
- [124] Zhang J, De Groote A, Abbasi A, Loi R, O'Callaghan J, Corbett B, Trindade A J, Bower C A, Roelkens G 2017 *Opt. Express* **25** 14290
<https://doi.org/10.1364/OE.25.014290>
- [125] Corbett B, Loi R, Zhou W, Liu D, Ma Z 2017 *Prog. Quantum. Electron.* **52** 1
<https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2017.01.001>
- [126] De Groote A, Cardile P, Subramanian A Z, Fecioru A M, Bower C, Delbeke D,

Baets R, Roelkens G 2016 *Opt. Express* **24** 13754

<https://doi.org/10.1364/OE.24.013754>

- [127] Bower C A, Meitl M A, Bonafede S, Gomez D, Fecioru A, Kneeburg D 2015 *IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* San Diego, USA, May 26-29, 2015 p963 <https://doi.org/10.1109/ECTC.2015.7159711>
- [128] Yoon J, Lee S M, Kang D, Meitl M A, Bower C A, Rogers J A 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 1313 <https://doi.org/10.1002/adom.201500365>
- [129] Meitl M, Radauscher E, Bonafede S, Gomez D, Moore T, Prevatte C, Raymond B, Fisher B, Ghosal K, Fecioru A, Trindade A, Kneeburg D, Bower C 2016 *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* **47** 743 <https://doi.org/10.1002/sdtp.10748>
- [130] Bower C A, Meitl M A, Raymond B, Radauscher E, Cok R, Bonafede S, Gomez D, Moore T, Prevatte C, Fisher B, Rotzoll R, Melnik G A, Fecioru A, Trindade A J 2017 *Photonics Res.* **5** A23 <https://doi.org/10.1364/PRJ.5.000A23>
- [131] Ye N, Muliuk G, Zhang J, Abbasi A, Trindade A, Bower C, Thourhout D, Roelkens G 2017 *J. Light. Technol.* **PP** 1 <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2777509>
- [132] Gomez D, Ghosal K, Moore T, Meitl M A, Bonafede S, Prevatte C, Radauscher E, Trindade A J, Bower C A 2017 *IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* Orlando, USA, May 30-June 2, 2017 p1779 <https://doi.org/10.1109/ectc.2017.318>
- [133] Golda D, Bibl A 2016 *U.S. Patent* 15/052767 [2016-2-24]
- [134] Wu M H, Fang Y H, Chao C H 2015 *U.S. Patent* 14/954993 [2015-11-30]

- [135] Woodgate J M, Harrold J 2009 *U.S. Patent* 12/922841 [2009-10-01]
- [136] Woodgate J M, Harrold J 2009 *Chinese Patent* 200980139118.X [2009-10-01]
- [137] Woodgate J M, Harrold J 2011 *U.S. Patent* 13/880455 [2011-10-20]
- [138] Tomoda K 2009 *U.S. Patent* 12/647826 [2009-12-28]
- [139] Ezhilarasu G, Hanna A, Paranjpe A, Iyer S S 2019 *IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* Las Vegas, USA, May 28-31, 2019 p1470 <https://doi.org/10.1109/ECTC.2019.00226>
- [140] Chu C F, Lai F I, Chu J T, Yu CC, Lin C F, Kuo H C, Wang S C 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 3916 <https://doi.org/10.1063/1.1651338>
- [141] Ueda T, Ishida M, Yuri M 2011 *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** 041001 <https://doi.org/10.1143/jjap.50.041001>
- [142] Sun Y J, Yu T J, Jia C Y, Chen Z Z, Tian P F, Kang X N, Lian G J, Huang S, Zhang G Y 2010 *Chinese Phys. Lett.* **27** 127303 <https://doi.org/10.1088/0256-307x/27/12/127303>
- [143] Sun Y J, Trieu S, Yu T J, Chen Z Z, Qi S L, Tian P F, Deng J J, Jin X M, Zhang G Y 2011 *Semicond. Sci. Technol.* **26** 085008 <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/8/085008>
- [144] Jung H D, Kim Y B, Kim J M 2016 *Korean Patent* 101810078B1 [2016-12-22]
- [145] Jung H D, Lee M J, Kim Y B, Kim D H 2018 *Korean Patent* 102067972B1 [2018-09-21]
- [146] Chen Z Z, Pan Z J, Jiao F, Zhang S L, Kang X N, Chen Y F, Zhan J L, Chen Y Y, Nie J X, Shen B 2020 *Chinese Patent* 202010366912.6 (in Chinese)[陈志忠, 潘

- 祚坚, 焦飞, 张树霖, 康香宁, 陈怡帆, 詹景麟, 陈毅勇, 聂靖昕, 沈波
2020 中国专利 202010366912.6] [2020-05-01]
- [147] Chen Z Z, Pan Z J, Jiao F, Zhang S L, Kang X N, Chen Y F, Zhan J L, Chen Y Y, Nie J X, Shen B 2020 *Chinese Patent* 202010528322.9 (in Chinese)[陈志忠, 潘祚坚, 焦飞, 张树霖, 康香宁, 陈怡帆, 詹景麟, 陈毅勇, 聂靖昕, 沈波 2020 中国专利 202010528322.9] [2020-06-11]
- [148] Kokubo N, Tsunooka Y, Fujie F, Ohara J, Onda S, Yamada H, Shimizu M, Harada S, Tagawa M, Ujihara T 2019 *Jpn. J. Appl. Phys.* **58** SCCB06
<https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab0acf>
- [149] Bagnall K R, Moore E A, Badescu S C, Zhang L, Wang E N 2017 *Rev. Sci. Instrum.* **88** 113111 <https://doi.org/10.1063/1.5010225>
- [150] Yamamoto H, Agui K, Uchida Y, Mochizuki S, Uruma T, Satoh N, Hashizume T 2017 *Jpn. J. Appl. Phys.* **56** 08LB07 <https://doi.org/10.7567/jjap.56.08lb07>
- [151] Cunningham W, Gouldwell A, Lamb G, Roy P, Scott, Mathieson K, Bates R, Smith K, Cusco R, Watson I, Glaser M, Rahman M 2001 *J. Phys. D* **34** 2748
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/18/306>
- [152] Aid S R, Uneme T, Wakabayashi N, Yamazaki K, Uedono A, Matsumoto S 2017 *Phys. Status Solidi A* **214** 1700225 <https://doi.org/10.1002/pssa.201700225>
- [153] He Z S, Xing L, Fu J J, Liu G 2018 *Chinese Patent* 201810972545.7 (in Chinese)[何泽尚, 邢亮, 符鞠建, 刘刚 2018 中国专利 201810972545.7] [2018-08-24]
- [154] Niu X L, Weng S Z, Xu X Y, Sun L Y, Jiang X F 2017 *Chinese Patent*

- 201711432965.8 (in Chinese)[牛小龙, 翁守正, 徐相英, 孙龙洋, 姜晓飞
2017 中国专利 201711432965.8] [2017-12-26]
- [155] Zhao C T 2019 *Chinese Patent* 201910015236.5 (in Chinese)[赵承潭 2018 中
国专利 201910015236.5] [2019-01-08]
- [156] Zhu H, Liu G X 2018 *Chinese Patent* 201810660970.2 (in Chinese)[朱浩, 刘国
旭 2018 中国专利 201810660970.2] [2018-06-25]
- [157] Song X X, Lv Z J, Yao Q, Zhang F, Liu W Q, Dong L W, Cui Z, Meng D T, Wang
L B 2019 *Chinese Patent* 201911001793.8 (in Chinese) [宋晓欣, 吕志军, 姚
琪, 张锋, 刘文渠, 董立文, 崔钊, 孟德天, 王利波 2019 中国专利
201911001793.8] [2019-10-21]
- [158] Xu S J, Wang M X, Huang H T, Zhu J H, Gao W 2019 *Chinese Patent*
201910885722.2 (in Chinese)[徐尚君, 王鸣昕, 黄洪涛, 朱景辉, 高威 2019
中国专利 201910885722.2] [2019-09-19]
- [159] Zheng L L, Guo Z Q, Yan W, Lin Y, Lu Y J, Kuo H C, Chen Z, Zhu L H, Wu T Z,
Gao Y L 2018 *IEEE Access* 6 51329 <https://doi.org/10.1109/access.2018.2869778>

A review of key technologies for epitaxy and chip process of micro light-emitting diodes in display application

PAN Zuo-Jian¹⁾ CHEN Zhi-Zhong^{1)*} JIAO Fei¹⁾²⁾ ZHAN Jing-Lin¹⁾ CHEN Yi-Yong¹⁾
CHEN Yi-Fan¹⁾ NIE Jing-Xin¹⁾ ZHAO Tong-Yang¹⁾ DENG Chu-Han¹⁾ KANG Xiang-Ning¹⁾
LI Shun-Feng³⁾ WANG Qi³⁾ ZHANG Guo-Yi¹⁾³⁾ SHEN Bo¹⁾

1)(State Key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, School of Physics,

Peking University, Beijing 100871, China)

2)(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University,

Beijing 100871, China)

3)(Dongguan Institute of Optoelectronics, Peking University, Dongguan, 523808, Guangdong, China)

Abstract: The continuous miniaturization and integration of pixelated devices have become a main trend in the field of display. Micro light-emitting diode (micro-LED) display is composed of an array of LEDs that are sub-50-micrometers in length. It has huge advantages in brightness, resolution, contrast, power consumption, lifetime, response speed and reliability compared with liquid crystal display (LCD) and organic LED (OLED) display. Consequently, micro-LED display is regarded as the next generation display technology with high potential applications, such as virtual reality (VR), augmented reality (AR), mobile phones, tablet computers, high-definition TVs and wearable devices. Currently, the combination of commercial 5G communication technology with VR/AR display, ultra high definition video technologies will further prompt the development of micro-LED display industry. However, micro-LED display still has some basic scientific and technological problems to be resolved. As the chip size shrinks to below 50 μm , some problems that are not serious for large-size LEDs appear for micro-LEDs. These problems include crystalline defects, wavelength uniformity, full-color emission, massively transferring and testing, and so on. In the past two decades, many research groups have proposed various solutions to those problems, which have

greatly promoted the progress of micro-LED display. In this paper, the overview of micro-LED display since 2000 is given firstly, which includes the main research results and application achievements. Secondly the issues involved in the wafer epitaxy and chip process of micro-LEDs and possible solutions are discussed based on the display application in details. Surface state induced by the dangling bonds and dry etching damages are concerned for the nonradiative recombination at low injection level. The remedies are provided for those surface states, such as atomic-layer deposition and neutral beam etching. Some methods to reduce the threading dislocation and suppress the polarization field are summarized for micro-LED epitaxial growth. Moreover, the GaN-based LEDs on Si (100) substrate are also introduced for the future integration of micro-LEDs to the Si-based integrated circuits. As to the wavelength uniformity, the MOCVD equipment and growth technology including the laser treatment are discussed. In the chip processing part, the full-color display, mass transfer and effective inspection technology are discussed. Assembling RGB individual LEDs, quantum dot phosphor material and nanocolumn LEDs are different routes for full-color display. Their trends in the future are provided. The pick and place, laser lift-off technologies are strengthened in the massively transferring for micro-LEDs. In the massively and rapidly inspection technologies, the photoluminescence combined with Raman scattering, the electroluminescence combined with

digital camera are discussed. Finally, the summary and outlook in these issues are also provided.

Key words: micro light-emitting diodes; display; epitaxy; chip process; inspection

* Project supported by the National Key Research and Development Program (Grant No. 2016YFB0400602), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61674005), the Science and Technology Major Project of Guangdong Province (Grant No. 2016B010111001) and the Science and Technology Planning Project of Henan Province (Grant No. 161100210200).

最新应用