

生长，转移印刷和彩色转换技术向全彩microled 显示



周晓杰, 田鹏飞, 谢金伟, 姜武, 刘贺庄, 刘然, 郭浩忠

^a 复旦大学信息科学与技术学院、工程技术研究院电子光源研究所, 上海200433

^b 国立交通大学光子学系与光电工程研究所, 新竹, 30010

^c 中国电子科学技术大学基础与前沿科学研究所, 成都610054

ARTICLE INFO

关键词: microled 显示屏, 全彩生长, 转印, 色彩转换

ABSTRACT

微发光二极管(Micro light-emitting diode, Micro -LED)显示器是一种新兴技术, 主要基于无机GaN-based LED, 相比液晶显示器(LCD)和有机发光二极管(OLED)显示, 具有高对比度、低功耗、长寿命和快速响应时间。因此, 许多研究机构和对全彩显示中的microLED进行了深入的研究, 逐步实现了microLED的商业化。而目前的研究结果表明, microled可广泛应用于显示器、可见光通信(VLC)、生物医学等领域。虽然microled具有广阔的商业前景, 但它仍然面临着巨大的挑战, 如尺寸减小对性能的影响, 实现单片高密度集成实现全彩microled显示的独立寻址, 修复技术和良率的提高等。本文综述了全彩色microled显示屏技术难点的关键解决方案。本文对各种先进的全彩microled显示技术进行了分析和讨论, 重点从生长技术、转移印刷技术和色彩转换技术三个方面进行了介绍。本文综述了这些技术所面临的机遇、进展和挑战, 旨在指导全彩microled显示屏的发展。

1. 介绍

在过去的几十年里, 显示技术得到了迅速的发展, 并得到了广泛的应用。我们可以找到各种各样的显示应用, 包括电视、大型视频广告牌、电脑, 特别是智能设备, 人们花很多时间在这些设备上与世界接触, 构成了现代生活的典型场景[1-4]。阴极射线管(CRTs)加速了视频显示器的出现, CRTs的历史已经持续了半个多世纪[5,6]。近年来, LCD和OLED显示技术得到了广泛的应用, 并逐渐占据了显示屏市场[7-9]。显示器的各种新兴应用, 如虚拟现实(VR)和增强现实(AR), 促进了高性能、新颖的显示技术的发展。在这里, micro-LED显示器,

以 GaN 为主的 led 为例。需要注意的是，芯片尺寸、像素数和每英寸像素(PPI)等参数决定了 microled 显示屏的应用领域，如表 1 所示。我们主要展示典型公司的原型，这些公司代表了最新的 microled 显示器的进展。此外，三星在 2019 年信息通信会上展示了一款 292 英寸、8 K 的大屏幕显示屏。在 2019 年增强世界博览会上，Mojo Vision 展示了一款基于 0.018 英寸面板的 14000 PPI 的 micro 显示器原型，预计将用于 VR/AR 和平视显示器等可穿戴设备。因为没有完全找到它们的详细显示信息，所以在表中列出它们。

一般来说，microLED 是指典型尺寸在 1 灯管 m 和 100 灯管 m 之间的 LED。Jiang、Dawson 和 Rogers 等人是成功开发用于显示器、VLC 和光遗传学等应用的 microled 阵列的先驱[10-12]。作为一种很有前途的显示技术，microled 显示器以其独特的高分辨率、低功耗、高亮度、灵活性、快速响应和高可靠性等优势，与 LCD 和 OLED 显示器相比，吸引了许多研究人员和公司的关注[13-20]。在未来，microled 的应用可以从平板显示扩展到空间显示、可穿戴/可植入光电子器件、光通信、生物医学检测等许多领域[21-31]。图 1 显示了未来显示器的应用场景。如图所示，microled 可以作为光电探测器接收外部信号，而高带宽发射器通过并行[32]的 microled 显示器向用户传输信息。集成了空间三维光场显示(LFD)、彩色照明(MCL)、精确空间定位(PSP)和光保真(LiFi)的高集成半导体信息显示是下一代信息显示技术的核心。microled 阵列是一种独特的高效率、低功耗的器件，它将驱动、照明和信号传输结合在一起。然而，集成和封装的成本仍然过高，这是阻碍全彩 microled 显示器商业化的主要因素[33,34]。由于采用生长技术在单片外延片上同时开发红、绿、蓝三种高效 micro 发光二极管的难度较大，人们提出了许多附加技术。生长技术是实现全彩 microled 显示的首选方法，其次是转移打印技术和颜色转换技术。然而，在这些技术中仍存在许多技术难点。本文主要介绍了三种全彩 microled 显示技术，包括生长、转移打印和色彩转换技术[35-46]，它们是实现大规模、低成本和高密度集成的强大解决方案。

microled 的生长是实现全彩 microled 显示的首选方法，通过简单的制备过程就可以实现超高分辨率的显示。本文将讨论纳米线发光二极管、多色量子阱 micro 发光二极管和纳米发光二极管的发展。通过使用选择性区域生长(SAG)技术，多个研究小组已经实现了对 InGaN/GaN 纳米线生长的精确控制。不同阵列的尺寸和间距影响了铟(In)和镓(Ga)的吸附能力，导致各源在[47]纳米线 led 外延生长过程中的掺杂比例不同。Sekiguchi 和 Ra 等采用该技术，分别成功实现了发射峰的红移或蓝移[48,49]。2011 年，Hong 等人提出了核壳纳米线 led，并通过调整外部偏置电压而不是改变其组成[50]来调整其发射颜色。后来，道森的团队在 2012 年制造了多色 QWsmicro 型 led，并将其与互补金属氧化物半导体(CMOS)集成。同时，可以通过外部不同占空比[51]的脉冲电压来调节多色 QWsmicro 型 led 的发射颜色和亮度。对于纳米 led 的全彩显示，其基本的颜色转换原理是壁厚的减小和内部应变的释放可以有效抑制量子约束 stark 效应(QCSE)，最终促进发射峰的蓝移。2017 年，郭的团队运用该原理，将纳米级 led 的发射颜色从[52]的绿色调整为蓝色。然而，在生长技术中出现了许多问题，具体体现在材料控制、颜色转换后的颜色变化以及 LED 阵列与驱动器的集成等方面。然而，目前的许多研究结果表明，通过生长技术实现多色集成是可能的，该技术在高 PPI 全彩显示中的应用潜力很大。一般情况下，PPI 高表示在 2000[1]~以上。

转移打印是材料组装和 micro 纳米处理的一项关键技术，具体表现为将 microled 从供体基片上去除，并将其转移到接收基片上。然而，传统的 microled 取放转移方法可能需要几个小时的时间，相关的技术缺陷导致产量低、集成效率低。自从 Rogers 的团队引入了使用聚二甲基硅氧烷(PDMS)印章进行大面积、多面印刷单晶 micro 结构以来，转移印刷技术一直在[53]的研究中。2013 年，罗杰斯的团队创建了一家衍生公司 X-Celeprint，该公司获得了 micro 转移印刷技术的独家权利。在过去的几年中，人们提出了各种转移印刷技术，如 PDMS 贴片取放、激光选择释放、静电吸附转移、电磁吸附转移和流体吸附转移等[12,54 - 64]。PDMS 的邮票拣购以 Rogers' s group 和 Dawson' s group 等为主要代表。在早期，罗杰斯的团队对驾驶进行了相关的研究

表 1
典型 microled 显示应用的比较。

应用程序	典型的公司	类型	面板尺寸 (英寸)	芯片尺寸 (μm)	点间距 (μm)	决议	PPI
VR / AR 显示	普莱西	单色	0.7	6	8	1920 年?1080	3000
智能手表/电话 显示	如果和京瓷	颜色	1.8	-20 - 1.8	127	256 年?256 年?RGB	200
汽车展示	友达 光电 表示	颜色	12.1	< 30	150	1920 年?720 年?RGB	169
电视显示	三星和 PlayNitride	颜色	75	~ 35 ?60	432	3840 年?2160 年?RGB	59

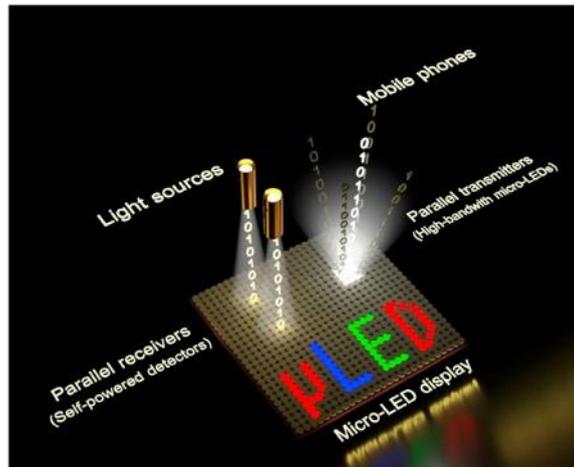


图1 所示。未来全彩microled 显示屏的应用场景。经参考文献许可转载。[32]。版权2019,ACS 出版公司。

软平版印刷中弹性体压痕的受力机理，并研究转移印刷过程中的动态控制[65-68]。在上述研究之后，Dawson 的团队演示了纳米级精度的放置和无粘接[69-71]。该技术的关键是利用PDMS 戳记的粘附性和剥离率之间的相关性[12,72]。此外，Rogers 的团队提出了一种非接触传输技术，将PDMS 戳记与脉冲激光束结合在一起[73]。在打印过程中，脉冲激光束照亮透明PDMS 印章的顶部表面，然后将热能传递到micro 观结构中。由于两种材料的吸收系数不同，micro 观结构与PDMS 戳记分离。此外，PDMS 戳记可以以曲面的形式实现转移打印[74]。这种使用弯曲PDMS 印章实现转移的技术被称为辊对辊转移技术，它是由韩国机械和材料研究所(KIMM)首次提出，并通过由计算机接口控制的辊转移系统进行。系统的滚轮与带有PDMS 戳记的设备接触，并提供实时反馈[75]。因此，micro 型led 可以通过安装在两个显微镜上的接收器基板精确地对准，然后转移到接收器基板上。此外，由于牺牲层与粘结层的吸收系数不同，激光选择性释放技术主要是利用脉冲激光束烧蚀牺牲层来分离过渡衬底中的microled。索尼采用激光选择性释放技术实现了[60]全彩microled 显示。此外，静电拾取技术主要由LuxVue 提出，2014 年被苹果收购。该方法利用静电转移头组件产生的静电吸引或排斥力，分别拾取和放置一组microled。并使用加热器来传递热量，从而促进microled 与施主基板的分离和与接收基板的结合[61]。这种传输技术也可以通过电磁力来控制，称为电磁拾取传输技术。这种方法的主要代表机构是工业技术研究院(ITRI)。电磁拾取传输技术采用电可编程磁模块产生磁力，吸引相应的磁层拾取microled，然后通过合金层将microled 粘接到接收基板上[62]。射流自组装技术是在国外技术的基础上发展起来的，1990 年主要应用于micro 电路中，之后被夏普公司用于microled 的传输。后来，富士康收购的eLux 推动了射流c 自组装技术的发展。在该技术中，利用流体悬浮液驱动microled 在接收基板上以动态注入速率平移和旋转，然后悬浮液捕获井中的microled。因此，在退火后，microled 与相应的井的电接口之间建立了电连接[63]。此外，PlayNitride 还提出了另一种流态转移技术——流态分散技术。将microled 和接收基板分别置于流体中，然后通过外力将microled 与接收基板上的合金层对齐[64]。因此，带有microled 的接收器基板被从流体中取出并通过退火粘合。目前，转移印刷技术的高成本和低产量是阻碍全彩micro 型led 显示器商业化的主要障碍。然而，近年来转移打印技术的研究结果和进展表明，它有很大的潜力成为实现全彩microled 显示的主流。特别是基于该技术可以制造出大规模的显示器。以电视为例，它可以制作从几英寸到数百英寸。而全彩microled 显示器不仅可以应用在刚性基底上，还可以应用在柔性基底上，这为未来柔性医疗设备的发展提供了先决条件。

色彩转换技术是实现全彩 microled 显示的另一种典型方法[38,76 - 80]。这项技术最初是由道森的团队提出的。随着这项技术的蓬勃发展，来自国立交通大学、复旦大学和一些公司的团队也采用了类似的技术来实现全彩显示。2005 年，伦敦帝国理工学院和斯特拉斯克莱德大学使用紫外(UV)microled 阵列激发有机荧光材料，并成功实现了多种颜色转换[45]。随后，道森的小组结合了量子点(QDs)和喷墨打印技术

实现多色转换的紫外microled阵列[81]。2008年,他们使用胶体CdSe/ZnS纳米晶体(NCs)作为颜色转换材料,结合自对准固化方法将材料限制在指定的紫外microled顶部,然后实现了红、黄、绿、蓝(RYGB)排放[77]。此外,他们在2015年提出了另一种颜色转换技术,与转移印刷技术兼容。他们利用液-毛细力将平面的MQW无机半导体膜转移到450 nm的microled上,成功制备了一种发出540 nm光的混合型microled[82]。同年,Kuo的研究小组使用气溶胶喷射(AJ)打印技术将RGB量子点喷在近紫外线microled阵列上,成功地实现了单亚像素尺寸为 $35^{\circ} \text{ m} \times 35 \mu\text{m}$ 。为了提高UV光子的利用率,他们在器件上布置了一个分布式布拉格反射器(DBR)层,将大部分泄漏的UV光子反射到QDs层[83]。此外,他们在2017年通过光刻技术创建了隔离模块,以分离不同颜色发射的混合设备,旨在减少microled像素之间的光串扰[84]。然而,采用彩色转换技术后,由于彩色转换材料寿命的缩短和混合器件转换效率的降低,会导致显示器的性能下降。然而,彩色转换技术由于其成本低、工艺简单、集成度高的独特优势,在全彩显示中仍有潜力,并一直在不断研究。例如,microled提供的高亮度是VR/AR眼镜领域的强大驱动力,在阳光背景下可以提供足够的能见度。这样的显示应用程序也足够紧凑,使得整体方法可行。与转移打印技术相比,单片技术更容易实现全彩microled显示。

在过去的几年里,许多报道都介绍了全彩microled显示的发展现状[1,35,39,85,86]。2019年,Ding等人对与本文综述相同的转移打印技术进行了调查,并强调了数值吞吐量[85]。Wierer Jr等人从几个方面总结了iii-氮化物microled在构建高效显示屏时所面临的挑战,并提出了几种克服这些问题的方法[87]。在2020年,Li等人系统地概述了将基于gan的光电设备与电子驱动器接口的替代方法[88]。然而,他们对全彩microled关键技术的详细讨论还不够。本文首先介绍了microled的制作和相关工艺,然后重点介绍了几种彩色microled显示屏的制作技术。详细介绍了生长、转移印花和色彩转换技术。有必要指出,在这篇综述中涉及的一些转移印刷技术依赖于专利文献。这篇综述提供了专利文献的深入分析。最后,本文对目前的全彩microled显示技术进行了总结,并提出了未来的发展趋势。

2. microled 的结构及相关工艺

2.1. microled 的结构与制备工艺

microLED的制备过程与传统LED是部分兼容的[89,90]。microled的施主衬底可以是硅衬底、SiC衬底、蓝宝石衬底等。本文以生长在蓝宝石衬底上的gan基顶发射microled为例,介绍其具体结构和制备工艺[91-93]。

图2显示了制备单个microled的方法。利用金属-有机化学气相沉积(MOCVD)技术在蓝宝石衬底上进行了microled外延生长。外延结构由无意掺杂的氮化镓缓冲层、氮化镓层、InGaN/GaN多量子阱(MQW)区和p-氮化镓层组成。随后,在其上制作了氧化铟锡(ITO)薄膜

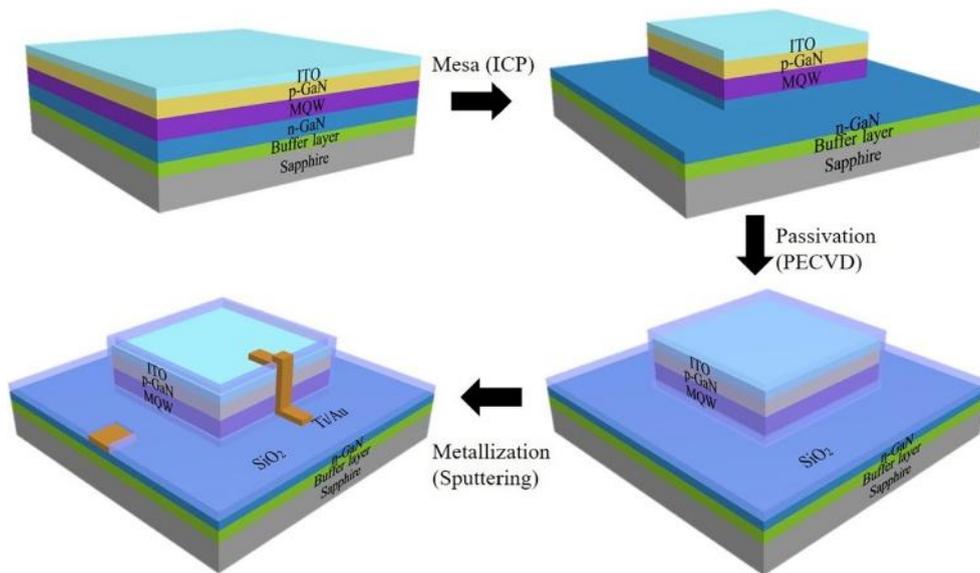


图2所示。单gan基顶发射microled的过程示意图。

由电子束蒸发或磁控溅射形成的p-GaN层的表面。ITO电阻率低，透光率高，是电流扩展层。然后，通过电感耦合等离子体(ICP)对外延片进行mesa-蚀刻，然后进行热退火以形成p-GaN的p型欧姆接触。在金属沉积前，形成SiO₂采用等离子增强化学气相沉积(PECVD)沉积钝化层，分离p型电极和n型电极。此外，通过溅射将Ti/Au层以n-pad的形式沉积在n-GaN层的表面。与制备n型电极相似，Ti/Au沉积在ITO层上形成p-pad。

microled阵列是通过不同的制备方法得到的，根据寻址方式可分为被动寻址和主动寻址。图3a所示为典型无源寻址microled阵列的示意图。每个像素连接一条p型金属线和一条n型金属线，通过扫描行电极和柱电极来驱动这两条金属线[94]。此外，简单主动寻址microled阵列的原理图如图3b所示。每个microled都有一个通用的n触点和一个独立的p触点用于分别寻址[95]。

2.2. 基材去除和临时粘附过程

在许多情况下，要实现全彩microled显示，需要去除基片和临时粘附工艺[96]。有两种主要的方法去除施主底物，如图4所示。一种是激光发射(LLO)技术，它只适用于uv-透明衬底，如蓝宝石衬底；另一种是化学衬底去除方法，它只适用于硅衬底[97]。硅基板可以通过类似LLO的过程通过湿化学处理在全球范围内去除。然而，在这种情况下，大多数硅通常是通过机械研磨去除最初。

图4a显示了以蓝宝石衬底为例的LLO技术过程。本文还介绍了临时粘附工艺。首先，在蓝宝石衬底上生长器件层，器件层的具体结构已在前面描述。然后，通过诸如旋转涂覆等特定方法在过渡基板上涂覆一粘附层。然后，器件层可以通过有机材料、环氧树脂或金属合金等与过渡衬底结合[55,98][99]。由于蓝宝石和GaN在晶格和热膨胀系数上的不匹配，外延层中的应力对器件性能有明显的影响[100]。之后采用LLO技术将器件层与蓝宝石衬底分离，然后将器件层转移到另一个衬底上。LLO技术利用材料之间不同的吸收系数和晶格常数在界面上产生应力，导致热膨胀并最终分离。在这里，激光器的能量位于氮化镓和蓝宝石的带隙之间。当激光通过蓝宝石时，其能量被氮化镓缓冲层吸收，然后氮化镓分解为Ga和氮(N₂)，如下化学方程所示[101,102]。



由于氮化镓/蓝宝石界面处的应力，蓝宝石衬底被释放。然后，对粘附层进行蚀刻，并通过PDMS印章拾取器件层。特别是，当粘附剂层为金属合金时，可应用相应的化学溶液来蚀刻未合金的金属。

第二种更方便的去除技术如图4b所示。硅基板通常用化学溶液除去，以悬挂脆弱锚上的凹模，然后用PDMS印章取出。通常使用KOH溶液对硅衬底进行各向异性腐蚀。反应方程如下



衬底各向异性湿蚀刻可以使microled层保持在浮动状态。然后PDMS stamp与器件层接触并产生一定的压力，导致Si边缘附近的锚断裂。此外，microled是由

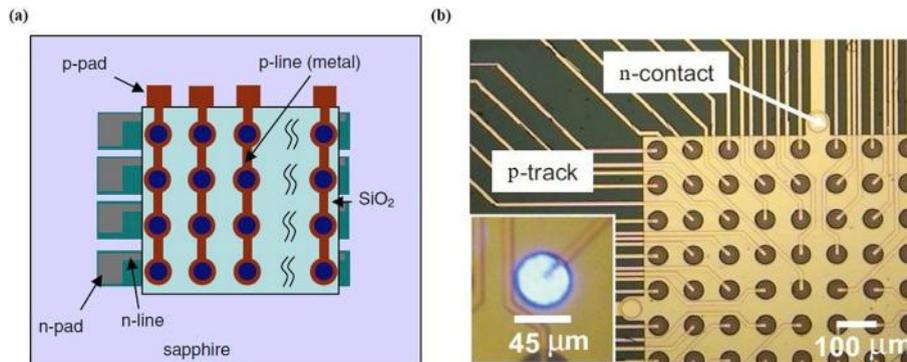


图3所示。(a)无源寻址microled阵列示意图。经参考文献许可转载。[94]。版权所有，IOP出版。(b)有源寻址microled阵列示意图。经参考文献[95]许可的转载。版权所有2014,AIP出版。

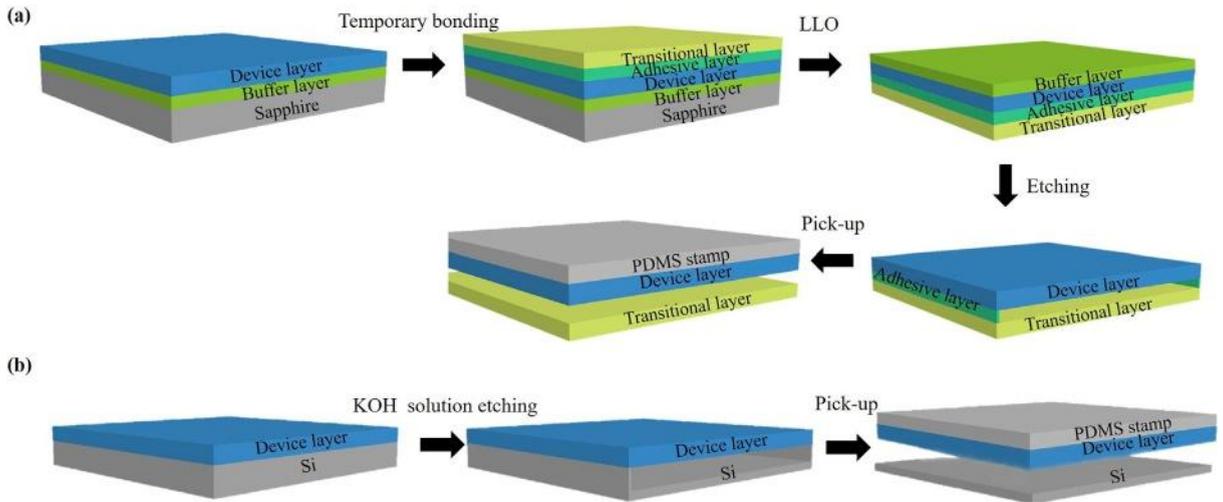


图4所示。临时结合和基材去除过程的示意图。(a) LLO技术和(b) KOH 溶液湿法刻蚀硅衬底。

压印PDMS，然后与硅基板分离。

3.全彩色microled 显示屏的生长技术

1962年，通用电气(GE)推出了第一款基于砷化镓(GaAs)的商用红色LED I_xP_x 进入市场[103,104]。随着III-N化合物的引入，高效led在蓝色和绿色波长内逐渐商业化[105,106]。20世纪70年代初，Pankove等人开发了蓝色和紫色电致发光GaN led，但p掺杂很难获得[107,108]。1986年，Amano等人在蓝宝石衬底上使用AlN缓冲层获得表面光滑的GaN膜，显著提高了二维膜的质量[109]。1992年Nichia Chemical Industries的Nakamura等人利用高温热退火技术极大地提高了mg掺杂p-GaN的电导率[110]。此后，蓝色III-V led在1994年实现商业化。到目前为止，gan基的蓝色LED在照明技术上有很大的不同。当氮化镓掺入不同含量的In或Al时，其直接带隙可从0.63 eV调整到3 eV，覆盖RGB的光谱[111,112]。因此，采用生长技术实现RGB亚像素是实现全彩microled显示的首选方法。

一般情况下，在腐蚀过程中会产生大量的侧壁缺陷。特别是当平面microled尺寸减小时，侧壁缺陷处的冲击里德霍尔(SRH)非辐射复合效应不可忽略[113]。同时，随着In成分的增加，MQWs中较大的压电场和晶体质量的恶化导致发光效率的下降[114]。相比之下，由于应变弛豫的提高，纳米led具有更高质量的异质结构和更好的光提取效率。通过高分辨率光刻技术可以精确地制备纳米结构像素。此外，多色QWsmicroled的直接生长简化了这一过程，已被证明是实现高分辨率全彩显示的一个很有前途的途径[115]。

3.1. 纳米线LED的生长

与平面LED相比，纳米线LED具有体积小、成本低以及优异的发光特性等先天优势[116]，而且纳米线LED表现出更好的光萃取效率，位错密度更低[117-120]。在本节中，横向尺寸为数百纳米的InGaN/GaN MQWs结构被认为是InGaN/GaN多量子点(MQDs)。利用分子束外延(MBE)、MOCVD或氢化物气相外延(HVPE)的SAG技术，可以在预定区域精确制备纳米线像素，而不包括形成单个像素的蚀刻过程[121]。通过降低氮含量，优化了氮化镓纳米线钛掩膜凹陷技术 2 流量(问 N_2)[122]。较低的问 N_2 ，随着Ga解吸和扩散长度的增加，钛掩膜上的侧向生长速度变慢，抑制了晶体成核。图5a为典型ti掩膜凹陷技术的示意图[123]。可以通过精确控制尺寸和间距来制备InGaN/GaN纳米线，以实现可调谐的颜色发射[124]。因此，利用SAG技术在单个晶片上制作不同参数的纳米线led可以实现多色集成。在以下情况下，将分别介绍凹陷集成纳米线像素和单一纳米线像素的尺寸依赖性颜色调谐效果。

2010年，Sekiguchi等人报道了使用SAG InGaN/GaN纳米线阵列[48]的单个晶片上的多色发射。利用rf-plasma-assisted molecular beam epitaxy (rf-MBE)在相同的衬底上生长了137~270 nm直径的纳米线，阵列的周期设置是不变的。由于相邻纳米线的阴影效应和纳米线之间的差异

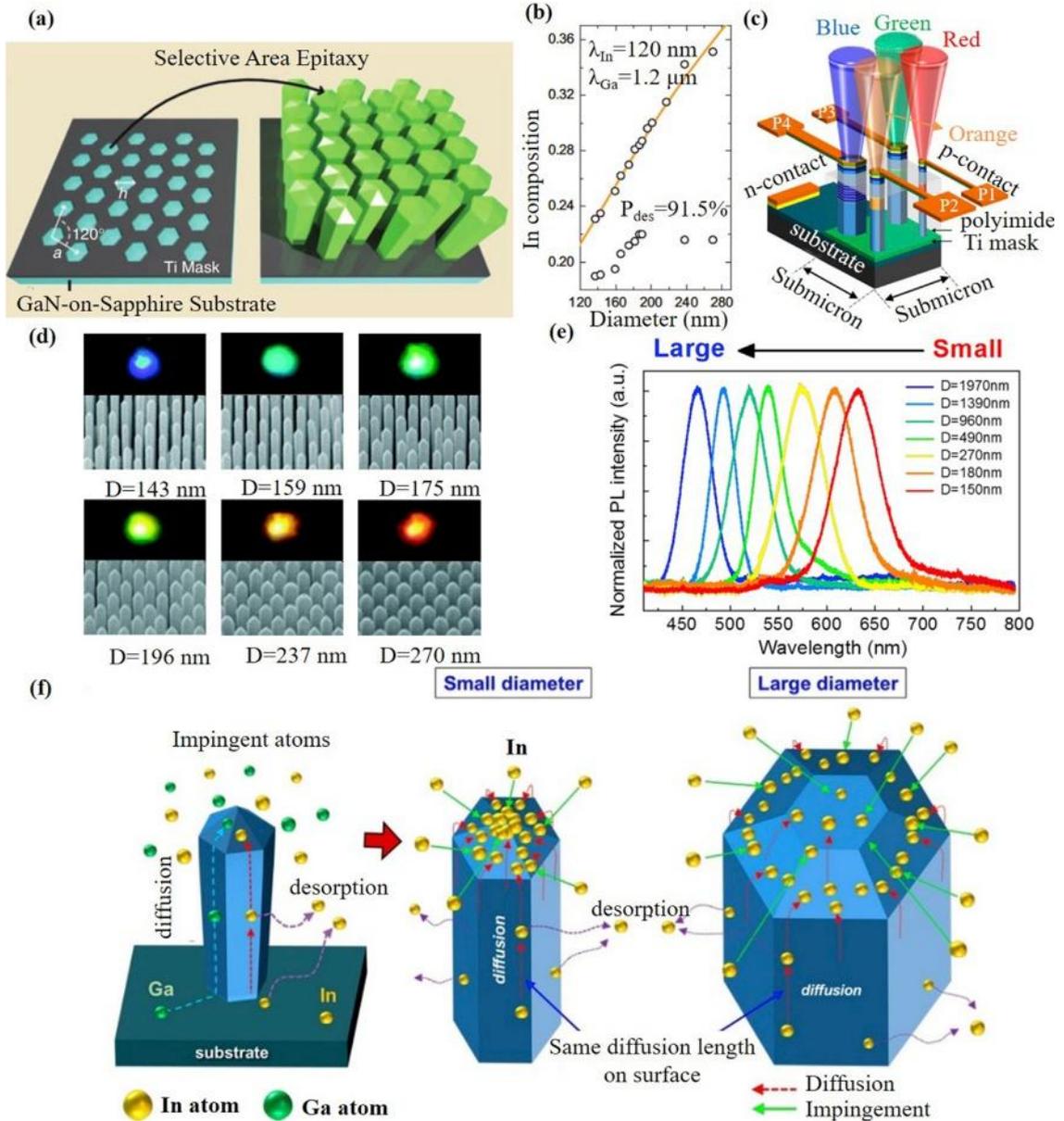


图5所示。(a) Ti-mask SAG 技术示意图。经参考文献许可转载。[123]。2016 年版权,Wiley-VCH。(b) InGaN/GaN MQDs 的In 组成与纳米线直径的关系图。经参考文献许可转载。[48]。版权所有2010,AIP 出版。(c)基于ROGB 单纳米线像素的单块集成多色led 示意图。经参考文献许可转载。[49]。版权所有2016,ACS 出版社。(d)直径为143 ~ 270 nm 的纳米线阵列的PL 近场发射和SEM 图像。转载经Ref.[48]允许。版权所有2010,AIP 出版。(e)不同直径的单个InGaN/GaN 纳米线像素的PL 发射光谱。转载经Ref.[49]允许。版权所有2016,ACS 出版社。

随着纳米线直径的增大, Ga 原子的吸收逐渐减小。最终影响了InGaN/GaN MQDs 的组成, 增加了InGaN 的In 组成。图5d 显示了直径为143 nm 至270 nm 的纳米线阵列的光致发光(PL)近场发射和SEM 图像。当纳米线直径增加时, 可以观察到彩色发射从蓝色变为红色。此外, 如图5b 所示, TEM 截面能量色散x 射线光谱表明, in 成分随纳米线直径的增大而同步增加。计算结果与实验结果吻合较好。然而, 这种阴影效应并不适用于单个纳米线像素的选择性生长。

对于单个纳米线像素的选择性生长, Ra 等人在2016年[49]研究了单个InGaN/GaN 纳米线像素的尺寸依赖性调色效应。采用钛掩模电子束光刻技术(EBL)设计了从80nm 到1.9 μm 的孔径。在相同的外延生长条件下, 蓝宝石衬底上所生长的纳米线的尺寸在150 纳米到2 μm 之间。如图5e 所示, 单纳米线像素的PL 光谱随着直径的增大呈现一致的蓝移, 这与前述的集成InGaN/GaN 纳米线像素的结果相反。在较高的生长温度下, 由于[49]的热解吸作用, In adatom 的扩散长度($\sim 100\text{nm}$)远短于Ga adatom 的扩散长度($\sim 1\mu\text{m}$)。如图5f 所示, 随着纳米线直径的增大, 由于侧向扩散, 掺杂量减少, 导致含量减少, 发射波长变短。图5c 显示了基于红、橙、绿、蓝(ROGB)单纳米线像素集成的多色led 灯[115,125]。此外, 通过对多色led 的亚像素分别偏置, 可以通过调节光谱功率分布来调节相关色温(CCT)。

然而, MQDs 成分的变化导致了颜色发射的严重变化, 这是实现对纳米线led 成分的精确控制的一个关键挑战。驱动与LED 阵列的集成是另一个问题, 尤其是在芯片尺寸缩小的情况下。为了实现全彩显示, 纳米线led 必须克服这些挑战。2019 年初, Hartensveld 等人演示了GaN 纳米线场效应晶体管(FETs)与自顶向下制备的纳米线led 的集成, 为自然生长纳米线led 与控制系统集成实现更好的集成铺平了道路[126]。

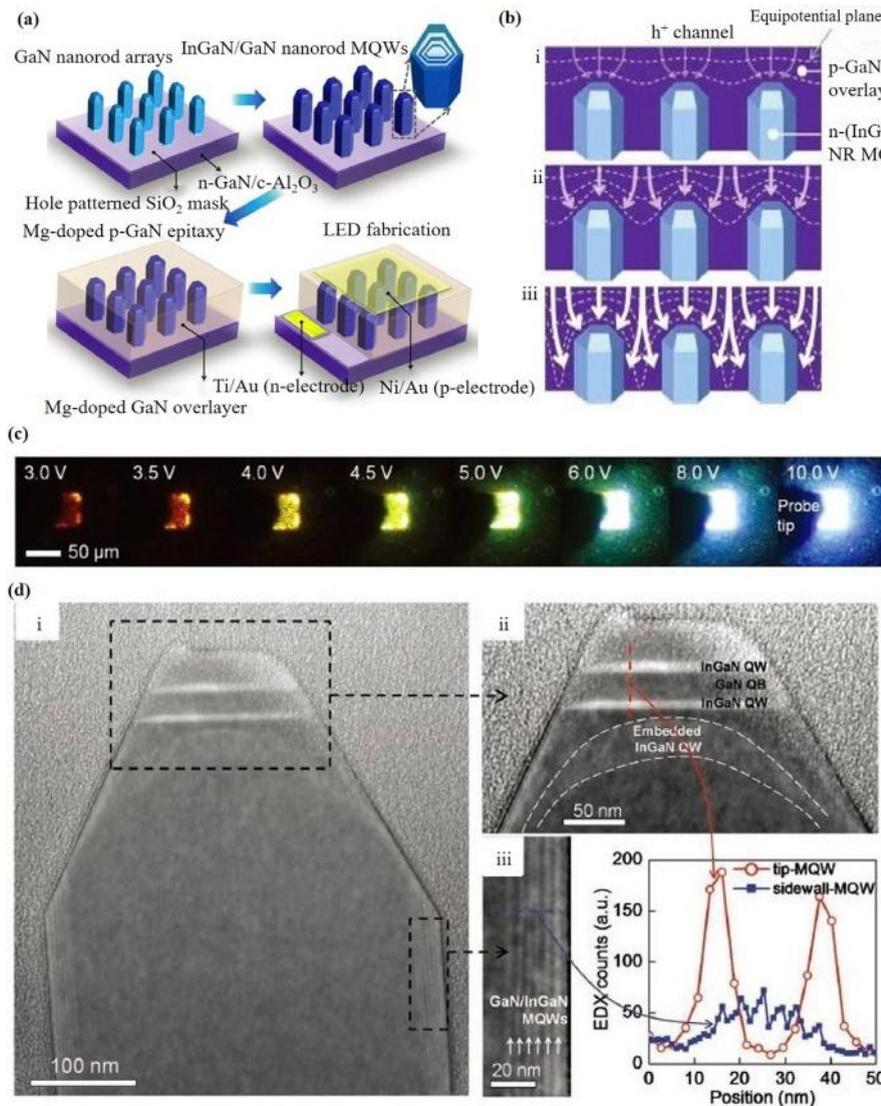


图6所示。(a)核壳纳米线led的制备工艺示意图。(b)等势平面变化示意图。(c)不同偏置电压下的光发射示意图。(d) In 含量的核-壳纳米线和EDX 光谱的TEM 图像。遗传算法。xN MQW 在尖端和侧壁。经参考文献许可转载。[50]。2011 年版权,Wiley-VCH。

3.2. 核-壳纳米线LED的生长

microled 发出的光的颜色通常是由一个特定的QW 结构决定的, 这个QW 结构取决于QW 区域的厚度和组成。因此, 这一现象限制了多色microled的发展。2011 年, Hong 等人提出了由横向和纵向QWs[50]组成的核壳纳米线led。他们通过改变偏置电压来调整纳米线led的发射波长, 而不是控制其内部成分。

如图6a 所示, 核壳纳米线led 通过一系列工艺形成。起初,氮化镓纳米线生长在一个npGaN /₂O₃ (0001)基材采用SAG 技术。然后,在x 遗传算法_{1,x}氮/氮化镓在纳米线的尖端和侧壁表面呈各向异性沉积。随后, 在纳米线阵列上生长了掺杂mg的p-GaN, 形成连续的覆盖层[127]。这个过程提供了一个可能的电流注入路径, 这是由偏置电压决定的。最终, 金属电极被制造出来了。如图6c 所示, 通过增加器件上的偏置电压, 可以观察到从红色到蓝色的光发射颜色。

图6d 为核壳纳米线整体(i)、尖端(ii)和垂直侧壁(iii)的截面扫描透射电镜图, x 遗传算法_{1-x}N 量子势垒和 GaN 量子势垒(QB)层交替叠加在不同厚度的最上层和垂直侧壁区域。In 的 In 内容 x 遗传算法_{1-x}用能量色散 x 射线(EDX)测量了叶尖和侧壁上的 N MQWs。由于氮化镓晶面的各向异性表面形成能影响了 adatoms 的扩散, 如图6d 右下角所示, 尖端的 In 浓度约为侧壁的 4 倍[128]。图6b 为施加不同偏置电压时的场分布模型。在接近导通电压的低电场下, (i)由于纳米线尖端附近的局部增强电位下降, 电流通路优先通过纳米线尖端的高阻 p-GaN 覆盖层形成。因此, 核壳纳米线 LED 从最上层发出红光_{0.6}遗传算法_{0.4}N 发光。随着外加偏置电压的增大, 由于埋有长波长的电致发光积分面积, 等势平面形状沿尖端呈弯曲, 电致发光逐渐变成带尾巴的青色。随着电压的进一步增加(iii)等势面变形更加明显, 导致更大的电流流入纳米线之间的间隙, 从而从 In 产生蓝色 EL_{0.15}遗传算法_{0.85}N MQW 在纳米线 LED 的侧壁上。

通过种植核壳纳米线led, 可以实现从红色到蓝色的可视颜色可调发射。此外, 在固定的驱动电流条件下, 可以得到单片集成的RGB 发光二极管。然而, 驱动与这种小型led 的集成仍然是一个需要进一步研究的问题。令人鼓舞的是, 结合生长技术和偏置调节可以调节纳米线led 的颜色发射, 这为实现全彩显示提供了一个重要的方法。

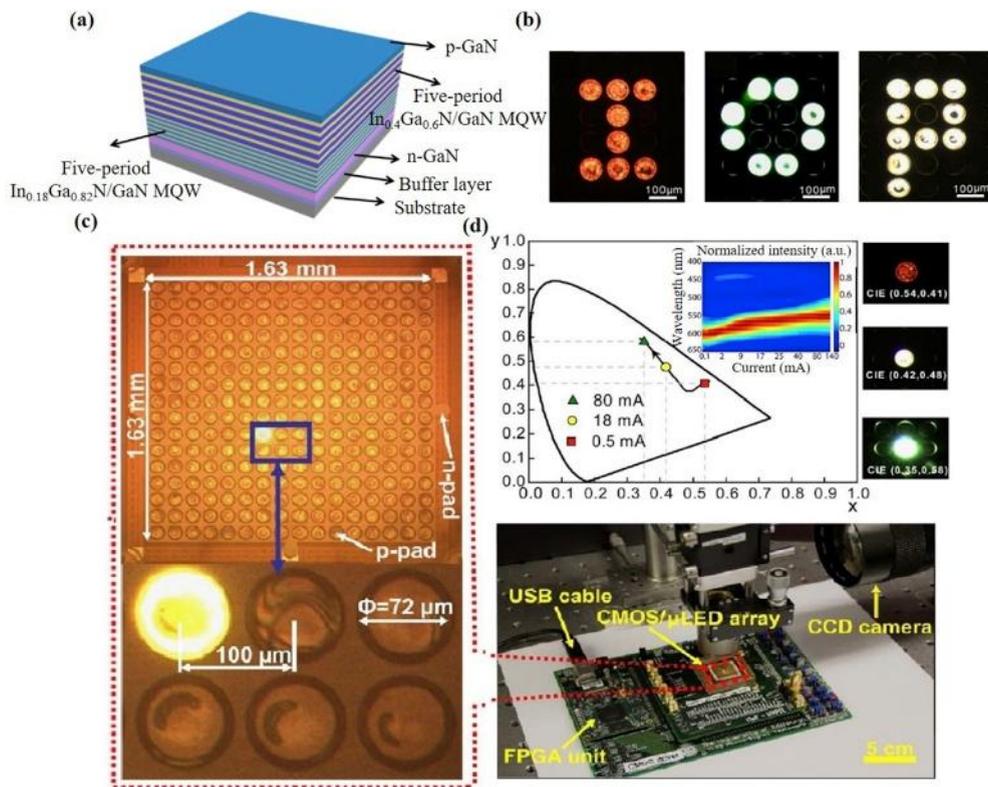


图7 所示。(a)彩色QWsmicroled 示意图。(b)平均输出功率近似相同的RGY 光发射示意图。(c) 16 个?16 组micro 型led 及色彩调节装置;(d)左侧图像:计算出CIE(1931)坐标曲线;插图图像:EL 映射光谱;右图像:RGY 显示和对应坐标。转载经Ref.[51]允许。版权2012 年IEEE。

3.3. 彩色QWsmicro 型led的生长

使用多色 QWs led 来实现全彩显示的原理类似于核壳纳米线 led, 两者都通过增加外部偏置来调整颜色。2012 年, 道森的团队提出了一种颜色可调智能显示系统, 该系统利用 CMOS 驱动基于一种新的外延结构[51]的 MQWmicro 型 led。他们利用压电场的屏蔽和带填充效应之间的竞争机制, 成功地将 microled 的发射颜色从红色调整为绿色。测试结果也表明, 该系统可以应用于高速 VLC。

彩色 QWsmicroled 的基本制备工艺与 2.1 节中介绍的相似, 除了 QW 结构不同, 即 5 个周期 0.18 遗传算法 0.82 N/GaN MQW 区域的发射波长为 460 nm, 有 5 个周期 0.4 遗传算法 0.6 N/ GaN MQW 区域, 发射波长约为 600 nm, 如图 7a 所示。图 7c 显示了一个准备好的 16×16 组 micro 型 led, 像素大小为 72° m, 中间间距为 100° m, 以及颜色调整的特定设置。CMOS 驱动也有相应的 16×16 单元阵列。每个 microled 像素通过专用的逻辑电路连接到 CMOS 驱动单元进行独立寻址。

由于条带填充效应和/或 QCSE 的筛选[129], 随着输入电流从 0.1 mA 增加到 80 mA, 计算出的 CIE(1931)坐标曲线从红色区域移至绿色区域, 如图 7d 所示。图 7d 右侧为三个坐标点对应的 microled 发出的红、黄、绿(RGY)光。从图 7d 的插图可以看出, 随着输入电流的增大, 发射波长从 600 nm 变化到 550 nm, 这与 CIE 曲线一致。一般情况下, 由直流电驱动的 microled 会出现颜色强度不均匀的情况, 而有些 microled 可能会太亮。为了得到均匀的色强分布, 改变了不同颜色驱动电压的占空比。如图 7b 所示, 展示了具有近似相同平均输出功率的不同发射波长的 microled 显示器。在 0.5 mA 时, 红色像素的输出光功率为 0.93 光波 W。绿色像素在 80 ma 时的输出光功率为 1.03 约 W, 占空比为 0.5% 。在 18 毫安时, 黄色像素的输出光功率为 0.97 光波 W, 占空比为 2% 。而且, 它的闪烁几乎是肉眼看不见的, 这也为彩色的呈现奠定了基础。并利用该系统成功实现了高速 VLC。

总之, 多色 QWs LEDs 的增长显示了一个直接的颜色可调显示, 可用于全彩色显示和 VLC 由 CMOS 和 FPGA 驱动。然而, 这种技术不能在较小的工作电流下实现全彩 microled 显示。材料的内部量子效率(IQE)和色彩调节范围需要进一步优化。

3.4. 蚀刻LED 纳米化

通过单片外延生长制造纳米 led 是实现全彩显示的另一种生长技术。纳米 LED 是在绿色 LED 外延片上开发的, 其有效带隙通过改变壁宽来调节

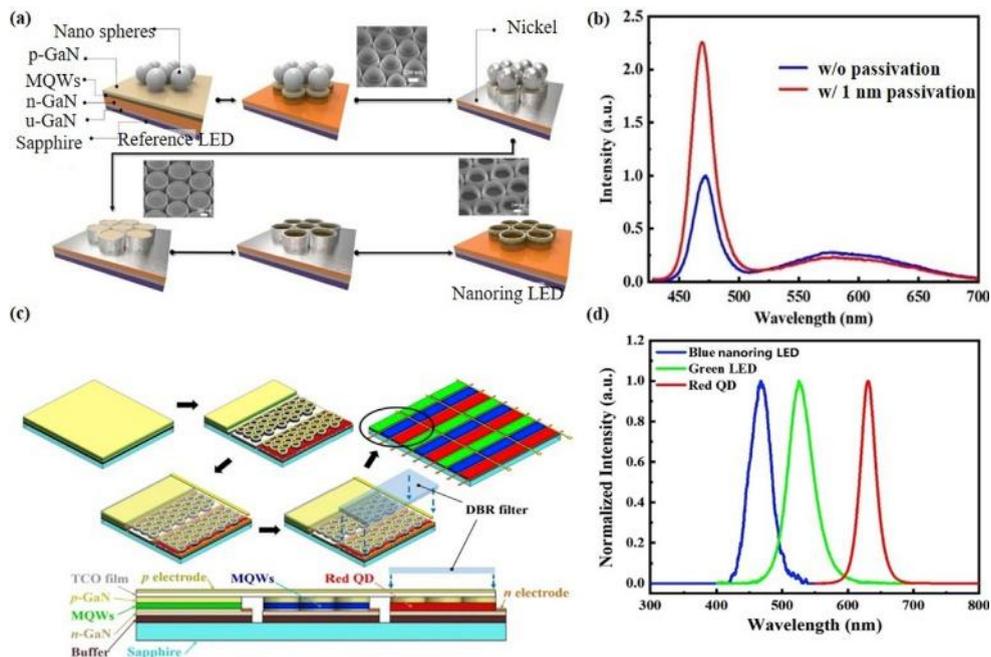


图8所示。(a)纳米化led制备工艺示意图。转载经Ref.[52]允许。版权所有, 2017, 施普林格性质。(b)带和不带钝化层的蓝色纳米led的PL光谱。(c)结合纳米led和颜色转换技术制备RGB led的工艺流程图(d) RGB亚像素的EL光谱。经参考文献[138]许可的转载。版权所有2019 中国激光出版社。

腐蚀过程。通过释放应变，降低QCSE，使倾斜能带变平，量子态分布重叠增加，纳米LED的发射颜色由绿色调到蓝色[130,131]。

2017年，郭的团队制作了纳米级led，成功实现了[52]从绿灯到蓝光的过渡。如图8a所示，具体的纳米LED制备工艺如下。microled的原理图与7周期在 0.28 遗传算法 0.72 提出了N/GaN三明治结构MQWs，由于晶格不匹配，InGaN和GaN之间存在较大的应变。首先，将直径约900nm的PS纳米球自旋涂覆在GaN LED的外延表面。接下来，该装置被蚀刻到n-GaN层上，形成一个与PS纳米球相切的圆柱形固体结构。通过电子束蒸发沉积镍层，有利于下一次蚀刻过程中纳米层的形成。然后分别用超声波和盐酸溶液去除纳米球和镍层。最终采用蚀刻和蒸发法制备电极。在实验中，对比了3个壁宽为120nm、80nm和40nm的纳米led的发射颜色变化，得到了壁宽为40nm的纳米led的最大蓝移。随着壁变薄，由于内部应变的释放，QCSE被有效抑制，导致发射峰的蓝移[132-135]。同时，由于壁变薄，电子和空穴波函数重叠增加，载流子辐射复合寿命随着辐射复合率的提高而降低[136,137]。

但上述方法只能将纳米LED的发射颜色由绿色调整为蓝色，无法实现全彩显示。2019年，他们通过在纳米LED中添加红色量子点，实现了RGB LED的单片集成[138]。添加量子点后实现颜色转换的明确原则将在第5节中详细描述，在此简要介绍。

在他们的实验中，纳米led和量子点之间的间距足够小，可以满足非辐射共振能量转移(NRET)的条件，这可以在实现全彩显示的同时提高颜色转换效率[139]。基于绿色和蓝色纳米级发光二极管的制造，一个 Al_2O_3 然后通过原子力沉积(ALD)在纳米材料的侧壁上形成钝化层，以降低侧壁缺陷造成的发射强度损失，增加PL强度[140]。将红色QD喷在蓝色纳米LED上，线宽为1.65 μm 。然后通过蚀刻和沉积技术制备了透明导电氧化物膜和金属电极。该过程的原理图如图8c所示。最后在红色QD上制备了一层DBR层，提高了颜色纯度和发光效率。图8c还显示了面积为3 μm^2 的RGB像素的横截面图。10 μm 每亚像素。图8b显示了在有和没有钝化层的情况下蓝色纳米led的PL光谱。由于内反射减小，表面捕获和缺陷引起的非辐射复合也减小了，添加钝化层后PL峰值强度显著提高了143.7%。RGB亚像素的EL光谱如图8d所示。RGB亚像素的峰值波长分别为630 nm、525 nm和467 nm。可见，将纳米化led与颜色转换技术相结合，可以有效地实现单片晶片上的RGB发射。

虽然通过开发混合量子纳米led可以实现全彩显示，但由于纳米led的发射面积小，导致发射强度低。此外，QD能量损失大，稳定性差[141]。

3.5. 总结

总之，由于In组成的变化会导致纳米led的发射颜色发生严重的变化，因此在单片上精确控制In组成是一个至关重要的挑战。纳米led在外延生长后，其发射颜色很难改变。由于晶圆片尺寸的限制，生长技术很难应用于构建micro型led小型显示器。此外，随着芯片尺寸的缩小，驱动与LED阵列的集成是器件制造的另一个问题。

尽管如此，该生长技术在高分辨率、高效率的全彩色显示器上仍有很大的应用潜力。选择性生长的整体InGaN/GaN纳米线发光二极管和单一纳米线发光二极管已经证明了尺寸依赖的颜色调谐效应。该方法简化了制备工艺。由于调优QCSE会导致纳米级发光二极管发射峰的蓝移，通过生长方法可以有效地实现全彩显示。此外，对其结构和生长机理的研究也取得了很大进展。令人鼓舞的是，整体集成的多色micro型led灯已经出现在市场上。例如，Glo和其他一些公司已经演示了纳米线LED的原型。此外，在量子效率方面，在35a/cm电流密度下，RGB商用led的外部量子效率(EQE)分别可达到45%、40%和75%，分别。与传统led相比，单片方法实现了13.5%、34%和47%的RGBmicroled的EQE，峰值出现在1-5 A/cm²，分别。然而，红色microled的量子效率仍然需要通过生长和器件处理技术来提高。

4. 彩色microled显示屏的传输技术

通过生长技术实现驱动和microled阵列的集成是很困难的。因此，目前已经采用了许多转移印刷技术来实现全彩显示。转移印刷是一种将材料或芯片从供体基板转移到几乎任何类型的基板以组装成功能系统[33]的技术。

一般来说，显示器的性能要求推动了传输技术的发展，因此研究者提出了多种传输技术来满足大批量生产的要求。如下所述，PDMS贴片取放、激光选择释放、静电吸附转移、电磁吸附转移和流体转移技术将被演示。人们普遍认为，生产量和相关的产量问题在决定哪些应用是现实的方面是极其重要的。表2显示了转移打印技术的典型参数，包括关键材料、力、每小时单位(UPH)和芯片尺寸[85,142]。值得注意的是，转移印花技术的UPH取决于几个因素。采取

以PDMS 邮票拾取放置技术为例，UPH 随着PDMS 邮票大小、像素密度和拾取放置周期的增大而增大。此外，我们将详细说明这些提到的传输技术。

4.1. PDMS 印章取放技术

以下4.1.1. 范德瓦尔斯转移技术

范德瓦尔斯转移技术主要利用PDMS 与其他材料的粘附关系[41,96,143-146]，并通过改变PDMS 戳记与衬底分离的剥离速率来实现[72]。2006 年，Rogers 的研究小组证明了弹性体印章的粘附强度与速率有关[65]。PDMS stamp 与microled 接触，通过范德华力形成保形接触[66-68]。此外，在不同阶段通过改变界面间的范德华力将microled 拾取并传送到接收基板。

一般情况下，每个破裂界面都有一个能量释放速率(G)。其中，microled /衬底界面的临界能量释放率($G_{crit(device/substrate)}$)设为 G_{crit} ，与PDMS 戳记的剥离率 v 无关，而仅与材料本身有关[143]。相反，PDMS 戳记/microled 接口的临界能量释放率($G_{crit(stamp/device)}$)随剥离率 v 而变化，可设为 $G_{crit}(v)$ (147 - 149)。需要注意的是， v_c 代表 $G_{crit}(器件/衬底)$ 等于 $G_{crit}(印章/器件)$ 时的一个临界速率， G_0 是 v 在0 左右时的能量释放速率[65,150]。当 v 大于 v_c 时 $G_{crit}(stamp/device)$ 而PDMS 戳记导致PDMS 戳记与microled 之间存在较强的界面力，否则戳记与microled 之间的界面粘附力要弱于microled 与衬底之间的粘附力[65,72,144,151]。

根据上述理论，通过对弹性体印章黏附的动力学控制实现转印的过程如下图 9b 所示。一方面，当 v 到达 v_c 时，附着力强到足以促进 PDMS 标记从供体基板拾取 micro 型 led。另一方面，当 v 小于 v_c 时，印章与 microled 之间的粘附性小于接收基板与 microled 之间的粘附性，导致 microled 与 PDMS 印章分离，粘附在接收基板上[65]。

典型的 PDMS 戳记制备过程如图 10 所示[152]。首先，SiO₂ 层经光刻和蚀刻处理。图 10a 为 SiO₂ 的图案层。接下来，如图 10b 所示，使用 KOH 溶液对 Si 进行湿蚀刻，得到了金字塔状图案。图 10c 描绘了高纵横比光刻胶涂层技术，该技术使用 SU-8 在 SiO₂ 上创建了一个垂直的侧壁结构 μ /Si。侧壁结构形成后，将 PDMS 倒入槽中。因此，如图 10d 所示，PDMS 戳记被从槽中取出。图 10e 显示了制备后 PDMS 戳记的 SEM 图像。在这里，PDMS 是透明的、惰性的、无毒的和高度粘弹性的，通常是由 Sylgard 184 A: B 的浓度为 10 : 1，在 70°C 左右过固化。PDMS 戳记可以精确地定制以适应目标设备的大小。

在进一步的研究中，Rogers 的团队在 2009 年提出了使用上述方法的实验，最终实现了 microled 的转移打印，如图 11[12]所示。范德瓦尔斯转移技术的过程开始于通过 MOCVD 在供体衬底上生长牺牲层和外延半导体层。之后，如图 11a-b, a SiO₂ 所示 μ 由光刻技术定义的硬掩膜与 ICP/反应离子蚀刻(RIE)相结合形成一个沟槽状结构。因此，牺牲层和半导体层的周界侧壁暴露出来。需要注意的是 SiO₂ 的大小 μ 层决定了 microled 的横向几何形状[68]。如图 11c 所示，为了使 microled 保持在固定位置，即使在暴露牺牲层进行完全的切槽蚀刻后，每个 microled 仍被放置在角落处的光阻约束。这里，HF 溶液被用作湿化学腐蚀剂来腐蚀牺牲层[153]。蚀刻结果如图 11d 所示。

接下来，进行了两步转移打印过程，包括从供体基片中检索microled，并将它们打印到接收基片上。转印的具体过程如下所述。首先，如图11e 所示，将PDMS 戳记对准选定的一组microled 并与之接触。用PDMS 戳记将固定在光敏电阻上的microled 剥离后，再拾取 microled。第二，PDMS 戳记与接收基板接触，并将microled 连接到接收基板。该工艺的实现在于PDMS/microled 接口与microled /接收器基板接口之间的不同粘附性。因此，如图11f 所示，microled 通过PDMS 戳记成功地从供体基板转移到接收基板。图11 工艺流程图的右侧为采用[37]范德瓦尔斯转移技术转移microled 阵列的相应步骤的SEM 图像。

通常，microled 通过接收器基板上的粘附层粘接到接收器基板上[144]。然而，粘附层阻碍了器件的散热或改变了折射率，甚至对于高导热的接收基片也是如此。2015 年，道森的团队改用挥发性液体过渡层，而不是传统的粘合剂层

表2
转移印刷技术的比较。

技术	关键材料	部队	大学(百万)	芯片尺寸(μm)
PDMS 邮票的挑选和放置	PDMS、转移膜	范德瓦耳斯	1-36	> 10
激光selective-release	缓冲层	热	2 - 100	> 1
静电传感器传输	介电层	静电	~ 12	1 - 100
电磁传感器传输	磁性材料	电磁	~ 0.9	> 10
射流转移	流体	重力、毛细	> 56	> 20

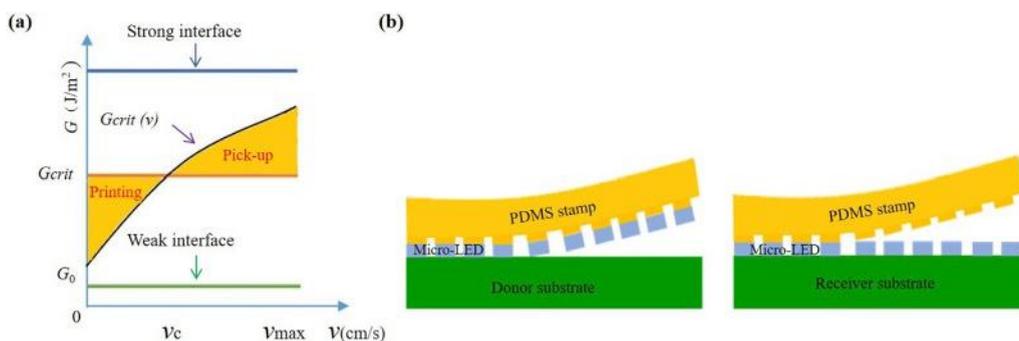


图9所示。(a)拾取和打印过程中能量释放率与剥离率关系图。绿线:界面阈值弱;蓝线:界面阈值强;紫色线:PDMS stamp/micro-LED 接口的临界能量释放率;黄线:microled /基板界面的临界能量释放率。经参考文献[65]许可的转载。版权所有2007,ACS 出版。(b)传输打印microled示意图。左图:从供体衬底拾取microled;右图:在接收器基板上打印micro型led。

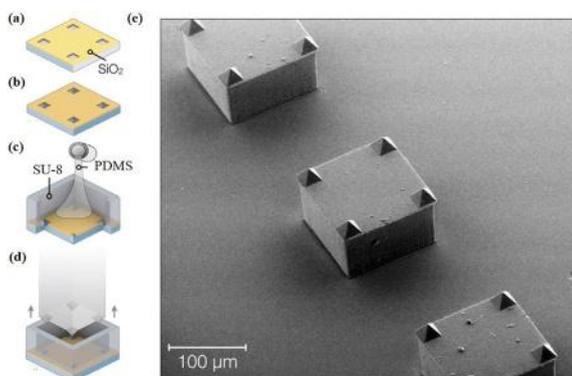


图10所示。PDMS 印章具体制作流程示意图(a)蚀刻SiO₂层。(b)蚀刻硅层。(c)旋转涂SiO₂用SU-8 分层形成侧壁,将PDMS注入槽内。(d)从战壕中捡到PDMS的印记。(e) PDMS 戳记的SEM 图像[152]。

键[71]。过程如图 12 所示。图 12a 与图 11e 相似。接下来,用浸渍在丙酮中的标准无尘擦拭 microled 的背面,如图 12b 所示。如图 12c 所示,用 PDMS 戳记拾取 microled,并将其放置在接收基板上。由于 PDMS 戳记缓慢缩回,液体会部分回流到 microled 下蒸发。图 12d 显示了键合 microled。在毛细管力作用下, microled 与接收基板之间形成了强范德华键。

4.1.2. 非接触式传输技术

上述转移技术在很大程度上取决于PDMS印章的剥离率和材料表面的清洁度和平直度。同时,提出了一种非接触传递技术,该技术与接收基板表面性质和制造工艺无关,只与micro结构和PDMS戳子的热机械响应差异有关。到目前为止,已有多位研究人员对激光驱动分层技术进行了研究[154-156]。

2012年,Rogers的团队通过非接触激光驱动方法将micro观结构从供体基板转移到接收基板上[73]。这里以单晶硅为例介绍了具体的方法。这种micro观结构也可以是microled或其他micro器件。图13e为激光非接触传输打印头的原理图。非接触激光驱动方法的工艺流程如图13a-d所示。关键的一步是将单晶硅打印到接收基板上。具体来说,如图13c所示,脉冲激光束照亮PDMS戳记的顶表面,单晶硅附着在对面表面。由于PDMS戳记在激光波长范围内是透明的,所以激光可以通过PDMS戳记将热能传递到单晶Si上。此后,PDMS戳记/单晶Si界面温度升高,进一步导致两种材料发生热膨胀。由于大区别这两种材料之间热膨胀系数(CTE)($\epsilon_{\text{PDMS}} \approx 310 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, ϵ_{Si} 当浓度为2.6 ppm/ $^\circ\text{C}$ 时),最终实现了分层[157,158]。

已知 Si/PDMS 界面的能量释放速率为 0.05-0.4 J/m²。当实际能量释放速率大于 0.4 J/m² 时,单晶 Si 可以从 PDMS 戳子中分离出来 [66,144]。特别是实施了两个重要步骤

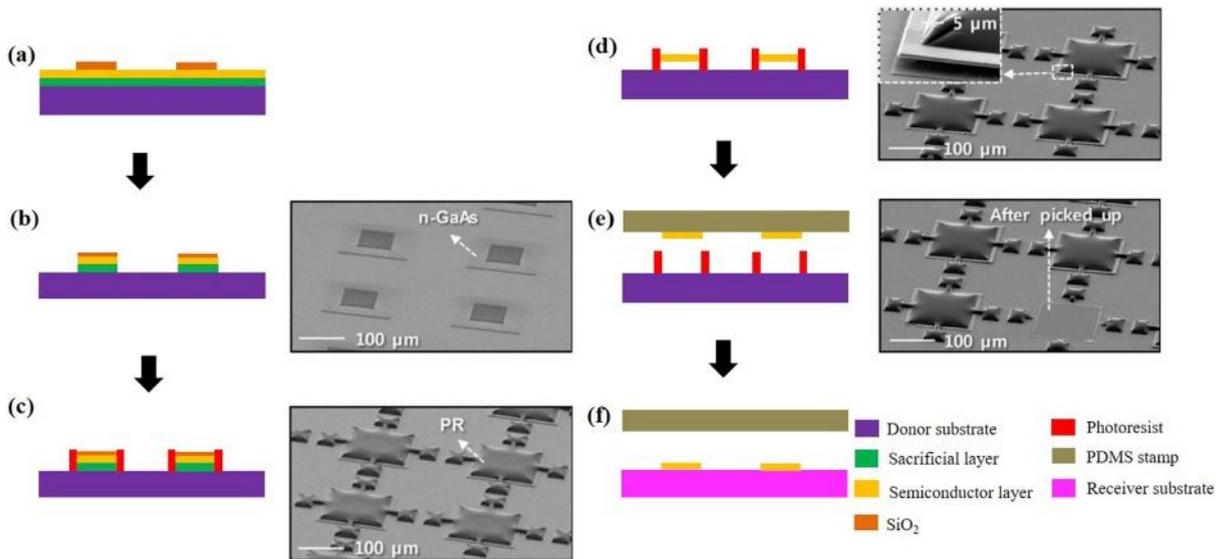


图11所示。范德瓦尔斯转移技术的原理图和扫描电镜图像。(a)生长牺牲层、半导体层和SiO₂层在施主基板上，然后蚀刻SiO₂层。(b)通过光刻SiO₂对牺牲层和半导体层进行蚀刻，艰难的面具。(c)在牺牲层的角上加光阻剂。(d)牺牲层的湿法蚀刻。(e)从供体衬底拾取microled。(f)在接收基板上打印micro型led。转载经Ref.[12]允许。版权2009年,美国科学促进会。工艺流程图右侧为microled阵列转移相应工艺的SEM图像。转载经Ref.[37]允许。2012年版权,Wiley-VCH。

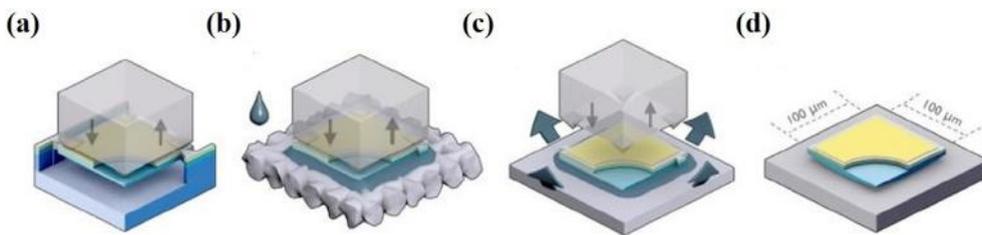


图12所示。使用挥发性液体过渡层结合microled和接收器基板的示意图。(a)使用PDMS印章从供体衬底拾取microled。(b)用浸渍丙酮的标准无尘擦拭湿microled的背面。(c)将microled置于接收基板上，并释放PDMS戳记。(d)通过毛细管力将microled与接收器基板结合。经参考文献许可转载。[71]。版权所有2015,OSA出版。

转移单晶硅。

首先，必须获得脱层所需的临界温度。他们使用 Stoney 最初提出的方法获得无限膜，并通过 Freund 提出的方法进行修正 [159,160]。在他们的实验中，假设 Si 和 PDMS 戳记周围的分布温度是恒定的。同时，激光器的波长为 800nm，单晶硅和 PDMS 印章的尺寸为 100mm / 100 μm × 3mm 和 200mm × 200 μm × 分别 100 μm。由于弯曲应变的放松，能量释放率 G 和温度之间的关系 ΔT 得到使用的应变能密度中腔的曲率半径。表达式如下

$$G = \left[\frac{(1 - \nu_c^2)}{2} \right] \left[\epsilon_0 - \kappa h_s / 2 + (\alpha_s - \alpha_c) / \Delta T \right]^2 h_c \left[E_c / (1 - \nu_c^2) \right], \quad (3)$$

在 E_c 弹性模量 (E_c 平均值为 179.4 GPa, 泊松比是 0.28), ε₀ 是中间平面的拉伸应变, κ 是曲率, 拉伸 s PDMS 的吸收系数是 ε_s 的吸收系数是单晶, ΔT 是激光加热的温度高于室温, h_s PDMS 的厚度, h_c 单晶硅的厚度是多少 [72]

根据上述分析, G 和 T Δ 之间的关系图 14 所示。可以看出, G 被保守地取为 0.5 J/m², 其对应的分层温度为 275-300 °C。然后, 基于 COMSOL 有限元模型, 采用 7.5 万个节点进行瞬态传热分析, 运行间隔时间最长为 5 ms。需要注意的是, Si/PDMS 戳记接口的初始环境温度为 27 °C。图 14b 是一个示意图, 显示的结果

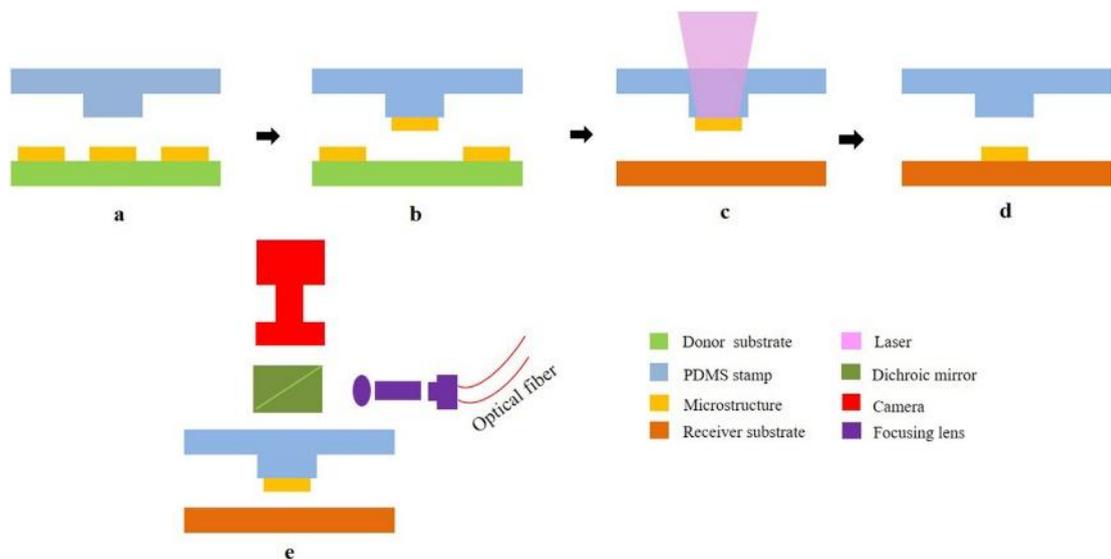


图13所示。非接触转移技术原理图。(a) PDMS 戳记与micro 观结构对齐。(b) PDMS stamp 接触了施主基板上的micro 观结构。(c)脉冲激光束照亮 PDMS 戳记的上表面，然后穿过透明的PDMS 戳记，将热能传递到micro 观结构中。(d) PDMS 戳记将micro 结构释放到接收基片上。(e)非接触转移技术打印头原理图。经参考文献许可转载。[73]。版权2012 爱思唯尔。附在PDMS 戳记上的Si 的操作模式。当模拟进行到3.4 ms 时，温度设置为135 mJ。一段时间后，脱层温度为300 ?C，温度在4 ms 升高至150 mJ。

其次，在综合考虑辐射损耗、激光高斯光束和单晶硅反射率的情况下，应严格计算激光系统的功率，以达到脱层温度。结果，单晶硅被成功地转移到接收基片上。

4.1.3. 精密卷绕对齐技术转移

PDMS 戳记的转移技术通常采用PDMS 戳记的平面结构，但PDMS 戳记也可以以曲面的形式进行转移打印。这种方法被称为辊转移技术，目前已经引起了人们的广泛关注

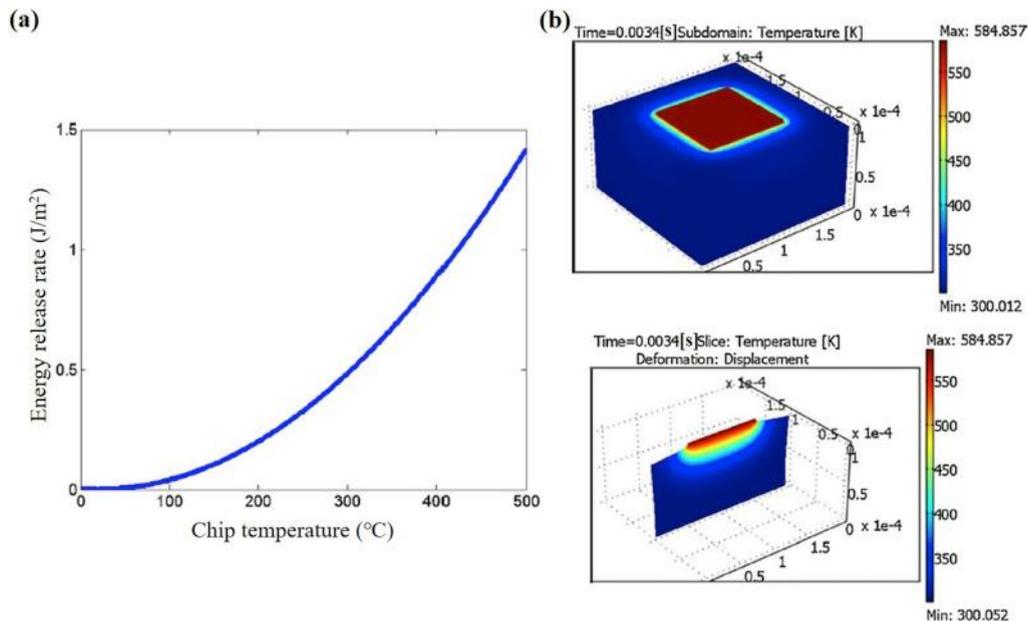


图14所示。(一)图G和 $T\Delta$ 之间的关系。(b) Si 和PDMS stamp 的COMSOL 有限元模型。上图:PDMS 戳记和所附Si 的温度梯度;底部图像:PDMS 刻印片的温度梯度。经参考文献[73]许可的转载。版权2012 爱思唯尔。

关注microled的大量生产[161-164]。与平面式PDMS 邮票转移技术相比，辊对辊转移技术具有成本低、产率高、效率高等优点[35,163,165,166]。该技术采用计算机接口的滚轮系统，通过反馈模块对接触载荷的大小和均匀性进行精确控制。反馈模块包含两个负载传感器和两个z轴执行器[75]。此外，一个自动辊到辊转移设备保持精确的对准由两个安装的显微镜。2017年，KIMM提出了一种用于microled的辊对辊转移印刷工艺，如图15所示[74]。

首先，利用MOCVD在供体基板上生长牺牲层和活性层。然后采用ICP/RIE蚀刻牺牲层，将microled锚定并悬挂在桥结构上[167,168]，如图11d所示。在接下来的步骤中，这些micro型led通过带着作为毛毯的PDMS邮票的卷对卷转移机从捐赠基板中提取出来。图15a-b所示为将辊置于钢轴上的传输设备模型示意图。转印过程如下。如图15c所示，带PDMS戳子的辊子在供体基板上的microled上移动。通过优化施主基材和辊之间的夹紧力，micro型led被精确地转移到PDMS印章上。然后由滚轮系统将microled转移到接收器基板上TFTs的相应位置。通过使用安装在卷对卷转移机上的两台显微镜，TFTs和micro型led被精确地校准。因此，microled被放置在接收基片上，如图15d所示。

在辊对辊的传递过程中，必须注意两个关键问题：一是使辊夹紧压力均匀化，二是使辊的角度运动与试样安装平台的平移运动同步。具体来说，夹紧力可以通过两端的载荷传感器实时测量。反馈系统由z轴驱动器驱动，然后对自动滚轮系统进行校准，以实现均匀的夹紧接触压力。

4.2. 激光选择性释放转移技术

激光选择释放转移技术可以弥补接触式PDMS贴片取放转移技术的不足，利用不同材料之间吸收系数不同的特点完成microled的转移打印[169,170]。索尼公司在2009年用激光烧蚀技术演示了选择性转移打印microled的步骤。具体来说，消融了一个牺牲层，并将microled从过渡衬底中分离出来，如图16所示[171]。

如图16a所示，在供体衬底上制备了半导体层、p型电极层和牺牲层。铂和Au沉积在镍(Ti或Cr)层上形成p-pad，有效地将光转化为热。在这里，牺牲层的材料可以是树脂或金属。然后，过渡衬底通过旋转涂层与施主衬底结合

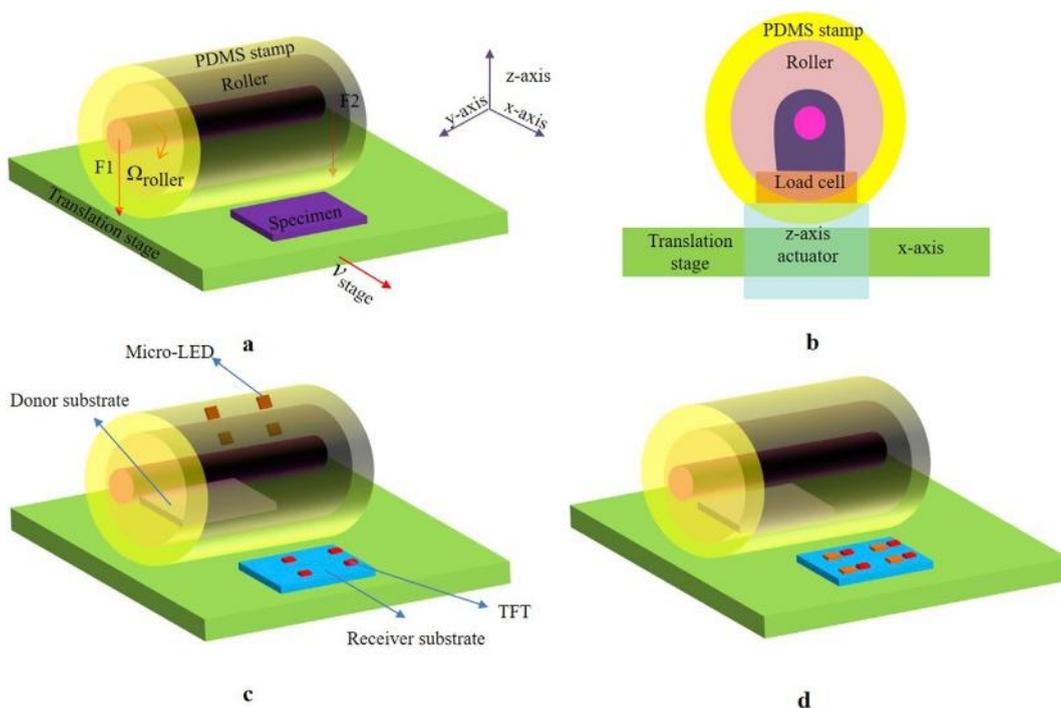


图15所示。(a)转移印刷设备模型示意图。(b)卷对卷转移印刷设备的侧面图。经参考文献[75]许可的转载。2013年版权,Wiley-VCH。(c)从供体衬底拾取micro型led的PDMS戳记示意图。(d)PDMS在接收器基板上打印micro型led的原理图。

固化第一粘合层，如图16b所示。过渡基片和第一粘结层对后续烧蚀过程中使用的激光是透明的。如图16b-c所示，使用脉冲激光束照射供体衬底，烧蚀供体衬底/半导体层界面。因此，供体衬底被分离并从半导体层中移除，如第2.2节所述。

接下来，在半导体层上制作n型电极。随后进行光刻和蚀刻，以形成图形电极和独立的microled，如图16d-e所示。然后通过第二粘结层将接收器基板粘接到n型电极上，第二粘结层的粘性小于第一粘结层。具体来说，如图16f所示，第二粘结层与过渡衬底表面上的microled相对，这有助于将n型电极层捕获到第二粘结层。当脉冲激光束选择性地照射过渡衬底时，过渡衬底和第一粘合层被透射。为使烧蚀过程正常进行，第一粘结层的吸收系数小于牺牲层的吸收系数。由于两层的吸收系数相差很大，牺牲层在瞬间被烧蚀。因此，所选的microled被从过渡衬底中分离出来并粘接到第二层粘合剂上。此外，由于第一粘接层的附着力更强，激光未照射的microled保留在过渡衬底上，如图16g所示。

值得注意的是，激光选择性释放技术通过选择性地对多个microled进行光照射，可以成功地将大量的microled转移到多个microled上。然而，这项技术需要精确控制激光功率和分辨率。

4.3. 静电感应转移技术

静电拾取转移技术是指由机械臂驱动的静电转移头阵列利用静电吸引或排斥力，将microled从过渡基板拾取并释放到接收基板。静电拾取技术可以同时传输大量的microled，这与传输头阵列的大小和器件间距有关[172-176]。图17给出了通过静电拾取技术传输microled的工艺流程示意图，该技术由苹果公司收购的LuxVue公司提出[61]。

如图17a所示，一组microled通过第一粘合层粘接到过渡衬底上。第一键合层的材料和厚度取决于键合机理。在microled的上方，是一系列台面结构的静电转移头，由基底支撑电极层和介电层组成[177]。静电转移头的间距是相应的microled阵列间距的整数倍。因此，microled阵列可与静电转移头匹配，用于精确采集和打印[178]。为了方便与microled接触，静电转移头采用凸型双极或单极寻址方案。

开始时，静电转移头放置在microled上有一定的间隙，对抓地力影响不大。当对静电转移头阵列施加相关电压时，可以产生相互吸引的静电引力[173]。每个静电转移头拾取一个microled，如图17b所示。同时，采用加热器1通过红外线热灯、激光、电阻式加热元件等对静电转移头组件进行加热。热量通过静电转移头传递到microled上，同时由加热器2加热第一键合层。因此，第一层粘合剂和microled一起被静电转移头拾取。

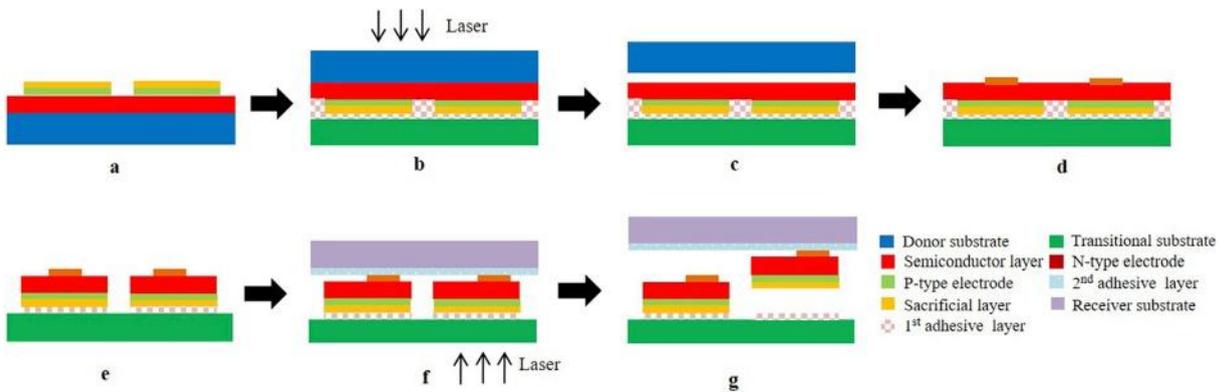


图16所示。激光选择性释放转移技术的示意图。(a)在供体衬底上制造半导体层、p型电极和牺牲层。(b)通过第一粘结层将过渡衬底粘接到施主衬底。(c)在激光照射后，将供体衬底与半导体层分离。(d)在半导体层上沉积n型电极层。(e)利用光刻和蚀刻技术制造独立的micro led灯。(f)接收基板通过第二粘结层与过渡基板接触。(g)在激光照射后将所选microled从过渡衬底转移和结合到接收衬底。

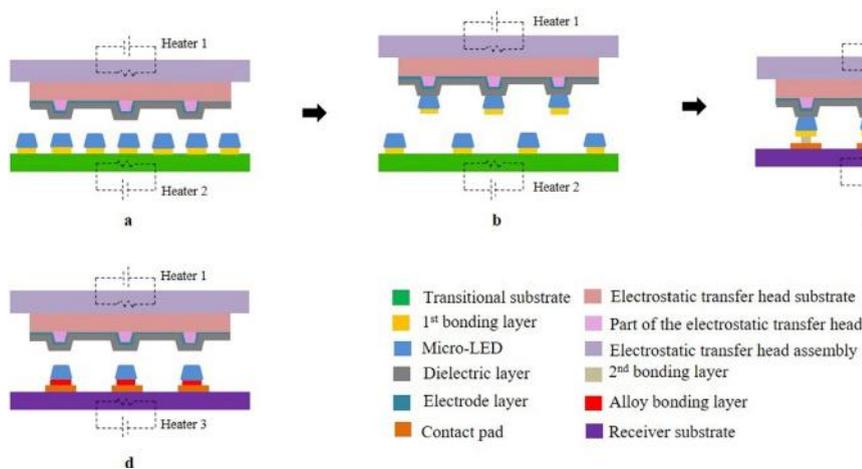


图17. 静电吸附转移技术的示意图。(a)静电转移头组件，位于过渡衬底顶部表面的microled上方。(b)静电转移头组件通过静电吸引力从过渡衬底拾取micro型led。(c)静电转移头组件通过静电排斥力将micro型led放置在接收基板上。(d)静电转移头组件从接收器基板上移除，将microled留在接收器基板上。

与拾取过程类似，加热器3在打印过程中将能量从接收器基板转移到第二粘合层。如图17c所示，将拾取的microled放置在接收基板上，然后通过接触垫粘接到第二粘接层。值得注意的是，合金键合层由共晶合金键合、瞬态液相键合或固态扩散键合形成。然后通过关闭电压源、降低静电转移头电极上的电压、改变交流电压波形或接地电压源等方式产生静电斥力。最后，静电转移头从接收基板上移除，如图17d所示。

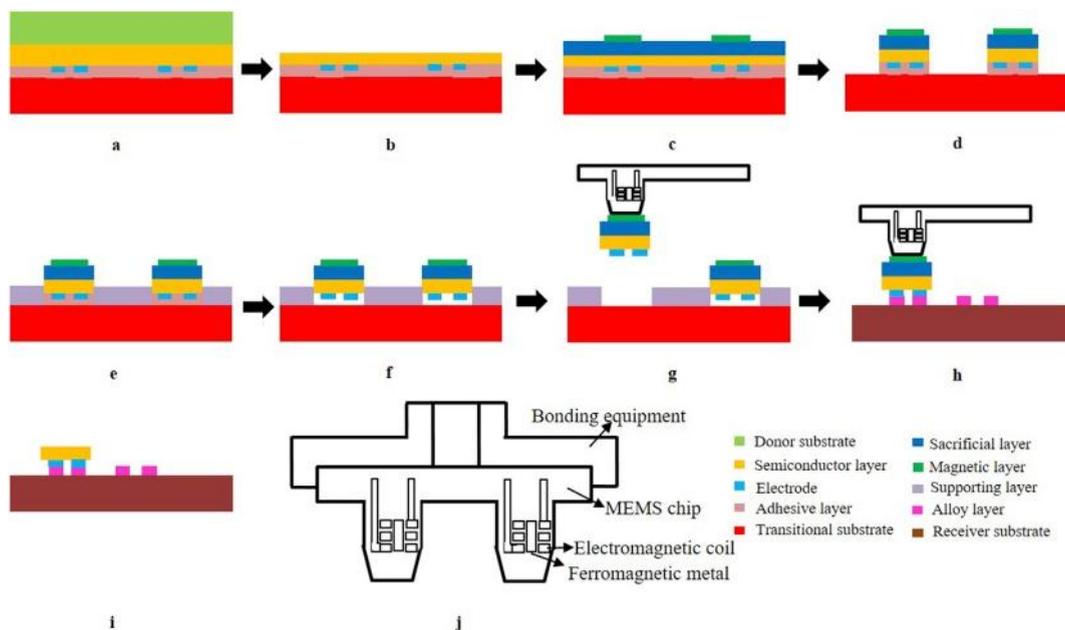


图18所示。电磁拾音器传输技术原理图。(a)在施主基板上沉积半导体层和电极，并通过粘合层将电极和半导体层与临时基板粘合。(b)通过LLO工艺从半导体层中去除供体衬底。(c)在过渡衬底上制造磁层和牺牲层。(d)干刻蚀半导体层和牺牲层。(e)在microled之间填充支撑材料。(f)去除粘附模式，以断开从过渡衬底的microled。(g)电可编程磁模块通过磁力拾取microled。(h)电可编程磁模块通过加热将micro型led打印到接收器基片上。(i)去掉电可编程磁模块，将microled留在接收基板上。(j)电可编程磁模块示意图。

在静电拾取传递技术的过程中，对 microled 的抓取力与输入电压有关。为了防止 microled 的断裂，必须严格准备介电层。此外，台面结构的厚度较薄，这就需要有一个相对平坦的 microled 衬底。

4.4. 电磁拾音器传输技术

电磁拾取传输技术是另一种从过渡基片拾取 microled 并将其高效打印到接收基片上的强大方法，该方法是通过由电可编程磁模块产生的电场和磁力来实现的[179]。ITRI 给出了电磁拾取传输技术的过程，如图18所示[62]。

图18a-b 说明了使用 LLO 过程将一组 microled 从施主衬底暂时转移到过渡衬底的过程[146]，如第2.2节所述。采用化学机械抛光 (CMP)、等离子蚀刻等工艺对半导体层进行稀释。由图18c 可知，在半导体层的表面涂覆了一层牺牲层，牺牲层由有机材料、有机聚合物、介电介质或氧化物构成。为了保证后续的电磁拾取传递过程，在牺牲层上形成了厚度为 $1 \times m$ 的磁层，位于一对电极之上。磁层材料从镍、镍铁合金或其他有利的铁磁性金属中选择。此外，将粘附层、半导体层和牺牲层通过光刻和干蚀工艺绘制后，可形成多个隔离 microled，如图18d 所示。接下来，用预定厚度的支撑材料填充 microled 之间的间隙，预定厚度小于 microled 的厚度。随后，去除粘附层，将 microled 与过渡衬底断开，如图18e-f 所示。

然后，如图18g 所示，电可编程磁模块产生磁力，吸引相应的磁层。当磁力大于 microled 的重量与连接器件和支撑层的力之和时，microled 被拾取。图18j 描述了电可编程磁模块的结构，该模块包括 MEMS 芯片和键合设备。MEMS 芯片由电磁线圈组成，每个线圈分别进行控制和寻址。铁磁性金属包含在电磁线圈之间。随后，将拾取的 microled 放置在接收基板上，进行加热过程，以确保 microled 能够通过合金层成功粘接到接收基板上，如图18h 所示。因此，如图18i 所示，采集了电可编程磁模块，并将 microled 粘接到接收基片上。

而对于电磁拾取传输技术，磁性材料的均匀性影响着电磁吸附的准确性和一致性。此外，电可编程模块的设计较为复杂。

4.5. 流体传输技术

一般来说，转移印花技术的成本较高。为了解决这一问题，逐渐提出了流控传输技术来实现全彩 microled 显示。本节主要介绍了射流自组装技术和射流分散技术。

4.5.1. 射流自组装技术

传统的电子设备流控组装通常通过最小化熔锡毛细管界面的表面能来实现[180]。然而，有两个挑战需要克服:一个是如何实现最大速度的 microled 捕获

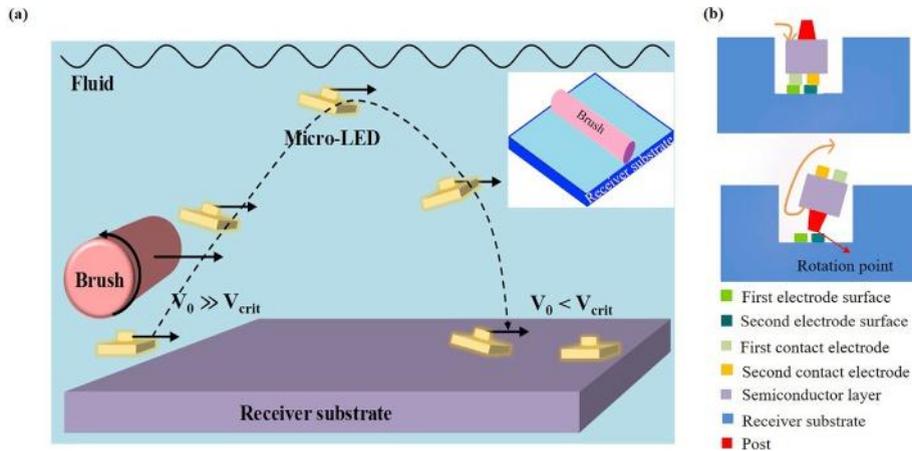


图19所示。(a)采用射流自组装技术由接收器基板捕获的 microled 示意图。插图:有旋转轴的圆柱形刷。(b) microled 与柱落入接收器基板的横截面视图。顶部图像:井内未倒置的 microled 示意图;中间图像:井中 microled 倒转示意图。

二是如何实现高速阵列装配的最小分布速度。本文介绍的射流自组装技术是由eLux提出的，该技术是通过在圆盘状microled上应用高差异局部强迫来实现的[63]。microled通过辅助机制在井中捕获，退火后电连接到相应井的电界面[181]。

首先，将衬底和microled浸没在流体悬浮液中，如图19a所示。图19b为microled、接收器基片和后置的详细原理图。在流体组装之前，井底的两个电极表面覆盖着焊料，并将连接到microled的电触点上。柱子在校准和定向中起作用[182]。在流体组装过程中，一个阻力对microled产生非对称的影响，是由周围的micro扰产生的。如图19b顶部所示，阻力导致净弯矩为负，从而迫使microled的前缘向下，保持了井内microled。在图19b中间，液体流动使microled在井中倒转，然后阻力在固定旋转点附近产生一个正力矩，从而使反向microled翻转到正确的方向。因此，倒置的microled可能会被挤出井，被下一口井捕获。因此，该岗位有利于提高捕集效率。该液体可用作助熔剂，其材料可为气体或液体，如醇、多元醇、酮、卤烃或水。由刷、刮水器、旋转气缸、加压流体和机械振动组成的辅助系统促进了流体悬浮的流动，从而使microled被置换，使捕获microled成为可能。如图19a的插图所示，圆柱形刷有一个旋转轴，其长度大于或等于基板的宽度。圆柱形刷外径为50毫米，由刚毛簇组成，簇间间距为6毫米，类似于牙刷。一个刚毛簇是由许多75个直径的尼龙或聚丙烯刚毛在一个紧密包装，螺旋模式或双向螺旋模式。这些材料对microled无害，与microled和载体液具有良好的相互作用。

具体原理如下。悬浮体沿衬底的长边以第一速度流动。一个辅助机制刷翻译在相同的方向和刷也旋转自己同时创建在第一个速度的第一个局部方差。所述电刷可重复将microled沿第一方向或相反方向平移，而所述第一局部方差可大于或小于第一速度。通过这种方式，刷迫使microled通过基板表面，并在再次在表面沉淀之前移动一段距离。然后，microled将在沉淀过程后组装在井中。请注意，micro型led能否被捕获主要取决于捕获速度。如图19a所示， V_0 表示单个microled的速度， V_{crit} 表示捕获速度。考虑到井周围的实际环境，圈闭速度被定义为临界速度。如果 V_0 大于 V_{crit} ，microled将摆脱井，否则，microled将缓慢移动，足以被井捕获。

这里，我们主要描述micro型led被困在井中的情况。作用在microled上的力可以模拟为刷子的水平平移速度和旋转速度的函数。如图19a所示，可以得到microled的运动轨迹类似于抛物线。随着电刷的平移和旋转，电刷周围的流体很可能是湍流的，因此许多micro型led聚集在这个区域。首先，这些microled被动向上移动，由湍流引起的高速离开基板表面。接下来，电刷继续移动，驱动这些microled开始在基板表面向前散射，然后流经流体，振荡，减速，最后以低于 V_{crit} 的速度下沉到表面或井中。有必要来回转换电刷，以确保尽可能多的microled被捕获到井中，而额外的未捕获的microled被转换电刷以固定的旋转方向扫走。

一旦捕获过程完成，集成设备将在足够高的温度下经历一个退火过程，以熔化包裹在microled电接点上的焊料和在井底的电极表面。然后，microled的电触点要与电接口电连接紧密。另外，通过选择一定的焊料熔点和一定的流体悬浮沸点，可以通过清扫和蒸发的方法去除流体悬浮。

4.5.2. 射流分散技术

射流分散技术与射流自组装技术类似，只是microled通过控制器引起的外力或外部磁场与接收器基板对齐[64]。具体过程如图20所示，这是由PlayNitride提出的。

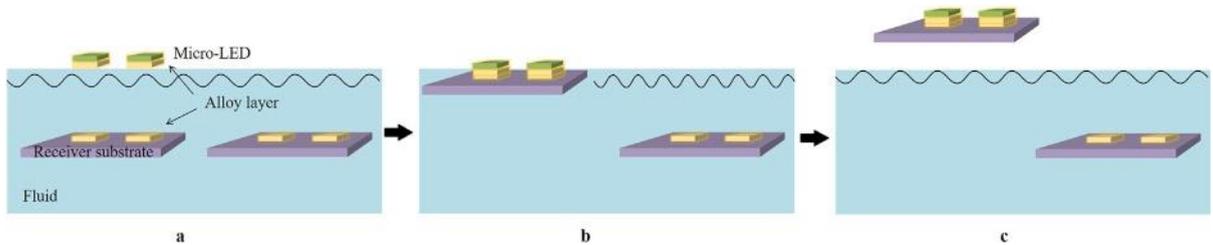


图20. 流体分散技术原理图。(a)将microled和合金层放置在液体上。(b)将合金层与接收器基板对齐。(c)将接收基板与micro型led一起从流体中取出并相互粘接。

首先, 通过合金层(共晶点在 140°C到 300°C之间)将 micro 型 led 连接到临时衬底上。如第 2.2 节所述, 通过衬底去除工艺从临时衬底中去除半导体层。接下来, 如图 20a 所示, 许多合金层附着的接收器基板浸没在液体中。在这种情况下, 合金层间距为预定尺寸, 液体可能是极性溶剂、非极性溶剂或磁性流体[183]。microled 由于密度较低, 在液体上漂浮, 呈二维分布。然后, 通过一个辅助系统来动态调节流量、流体流向和一个方向的螺距, 从而保证这些 microled 具有预定的螺距。如果液体是极性溶剂或非极性溶剂, 则需要槽内安装多个控制器。液体的沸点小于 140 摄氏度, 目的是防止高温破坏合金层。此外, 流体的粘度应适中。一方面, 该流体不能有效驱动低粘度的 microled。另一方面, 如果流体粘度过高, 在后续处理中很难去除粘附在 microled 表面的流体残留物。如果液体是磁性流体, 就需要一个外部磁场来控制 microled 之间的间距。下一步是排列和放置这些 microled 的合金层的接收器基板一个接一个, 如图 20b 所示。然后, 将接收器基片和 micro 型 led 从液体中取出。之后, 将集成器件加热到合金层共晶点以上, 以使 microled 与接收基板结合[184], 如图 20c 所示。microled 上的残渣可以通过加热去除。

然而, 流体传输技术的难点在于流体的选择和修复技术。而且, 只有在液体蒸发干燥后才能进行封包。

4.6. 总结

目前, 转移印花技术面临着巨大的挑战。转移打印技术实现全彩microled 显示的主要障碍是成本高, 如转移打印成本、修复成本等。随着显示器尺寸的增大, 从不同的晶片集成RGBmicro 型led 是非常昂贵的。众所周知, 贯穿率和产率是工艺技术的重要指标。但在实施过程中存在许多技术困难, 影响了转化率。拾放的速度和精度, 以及microled 与背板之间的互连是关键因素。一般情况下, 转移成品率低于99.9999%, 这就使得修复技术显得尤为必要。值得注意的是, 越来越多的公司在提高产量的同时降低了生产成本。如 PlayNitride 和Glo 在1-1.5 井眼m的精度下, UPH 达到4000 万, 通过回流处理, 产率由99.9%提高到99.9999%。

综上所述, 大量关于转移技术的文献表明, 它已经成功地应用于microled 显示。摘要microled 全彩显示屏产业化是必然的趋势, 而技术转移的关键是要使其大批量、高产地产投入生产。正如我们前面提到的, 不同的应用程序与不同的传输技术兼容。例如, 静电拾取和电磁拾取传送技术似乎提供了在拾取头上执行特定“齿”的范围。这可能是一个非常关键的能力, 以拒绝较差的led, 从而提高产量。然而, 使用类似的方法, 采用低成本的射流自组装技术来选择microled 似乎有些麻烦。在上述转移印刷技术中, 最常用的是PDMS 贴片贴片转移技术和激光选择释放转移技术。除了射流扩散技术外, play 氮化物还利用激光选择性释放转移技术来实现全彩microled 显示。特别的是, planar PDMS 邮票转让技术是由X-celeprint 独家授权的, 但目前许多公司都在使用该技术, 这可能会引发侵权问题。此外, 还有其他的转移印刷技术, 如Mikro Mesa 采用的粘连转移印刷技术。随着新型转移技术的进一步发展, 可以看出转移印刷技术在未来的显示时代有着广阔的前景。

5.彩色microled 显示屏的色彩转换技术

色彩转换技术是实现全彩microled 显示的一种有效方法, 在3.4 节中已经提到。使用颜色转换技术, 我们只需要制作单色的micro 型 led, 然后改变它们的颜色。一般来说, 红光和绿光分别是通过蓝色/UV LEDs 激发红光和绿光量子点或荧光粉来获得的[6,185-188]。色彩转换技术最初是由道森的小组提出的, 他们使用microled 激发荧光材料的颜色转换, 以实现全彩显示。特别是, UVmicroled 比蓝色microled 更适合用于激发颜色转换材料。因为蓝色microled 用于激发颜色转换材料时, 红光和绿光的响应时间比蓝光的响应时间慢, 导致microled 的响应不一致。此外, 蓝光激发效率较低, 不同颜色的microled 的发光强度可能分布不均匀[83]。

与转移印刷技术相比, 色彩转换技术可以实现更一致的效率和降解 microled 显示器。特别是色彩转换技术有很大的优势, 消除了基于 AlGaInP 的红色 LED 制造[13,189,190]。众所周知, AlGaInP 价格昂贵, 表面复合速度大, 易断裂, 与氮化镓工艺不相容。这些问题严重影响器件制造, 降低红色 LED 的 EQE[87,191]。此外, 绿色 LED 比蓝色和红色 LED 有更低的 EQE, 称为“绿间隙”。因此, 许多研究者决定采用颜色转换技术来获得全彩 microled 显示屏。在蓝/紫外 microled 激发下, 红光的效率可以提高。

荧光粉是LED 照明中应用最广泛的材料, 在量子产率、热稳定性和化学稳定性方面具有很大优势[192,193]。目前, 几种商用荧光材料被用于颜色转换, 包括氮化-、硅酸盐-和氟硅酸钾-等[194]。然而, 由于荧光粉的存在, 其应用受到了限制

几个micro米的大颗粒尺寸[195,196]和依赖于尺寸的亮度均匀性[6,185]。因此，在microled上涂覆荧光粉后，颜色转换效率相对较低[197]。这个问题可以通过减小荧光粉的尺寸来解决，但可能会导致量子效率下降[85,198]。相比之下，量子点具有量子约束效应，使其具有发射光谱窄、吸收光谱宽、荧光强度高的优点[199,200]。目前，QDs已经被证明是可行的microled显示[201-203]。

在过去的几十年里，人们提出了几种实现microled颜色转换的方法，如涂层、印刷、UV 自对准固化和液体毛细管力传递等。在本节中，我们主要讨论几种选择的方法来实现全彩显示[77,83]。

5.1. 印刷技术

在印刷技术方面，研究人员最初报道了一种利用喷墨打印技术将色彩转换材料集成到microled中的方法，作为生产全彩microled显示器的手段。随后在此基础上发展了AJ 打印技术，具有高分辨率的大面积沉积[204-208]。该工艺主要采用超声波/气动雾化QDs 油墨，通过喷雾器和气流控制喷射出均匀、尺寸可控的QDs 物料。由于QDs 油墨不直接接触喷嘴壁，该技术工作距离长，对QDs 油墨粘度要求低[209,210]。

2015 年，Kuo's group 将AJ 打印技术与QDs 结合，实现了全彩microled 显示[83]。具体来说，他们利用UVmicroled 激发RGB QDs，实现RGB 转换。打印AJ 的过程如图21a 所示。首先，在峰值波长为395 nm 的紫外外延片上制备了无源矩阵紫外microled 阵列。然后通过调节护套气体流量和载气流量在microled 阵列上打印RGB QDs 喷雾。为了提高紫外光子的利用率，减少泄漏的紫外光子，采用了HfO₂/SiO₂ 在器件上设置DBR 层，将泄漏的UV 光子反射到QDs 层。最终，通过将RGB QDs 与128 × 128 个阵列的35- μm UVmicroled，中心间距为40- μm。反射光谱表明，DBR 层在395 nm 波长处的反射率为90%，而在RGB 波长处的反射率较低。图21b 的左侧为RGB QDs 喷涂的microled 的发射性能图像。图21b 右图是带和不带DBR 层的microled 的相对EL 光谱。如图所示，在没有DBR 层的情况下，microled 在395 nm 处有一个明显的峰值，在RGB 波长处有micro 弱的发射。相反，EL 光谱中的红线表明，在带有DBR 层的microled 的紫外波段几乎没有发射，而RGB 波段的发射强度显著增强了183%、173%和194%，

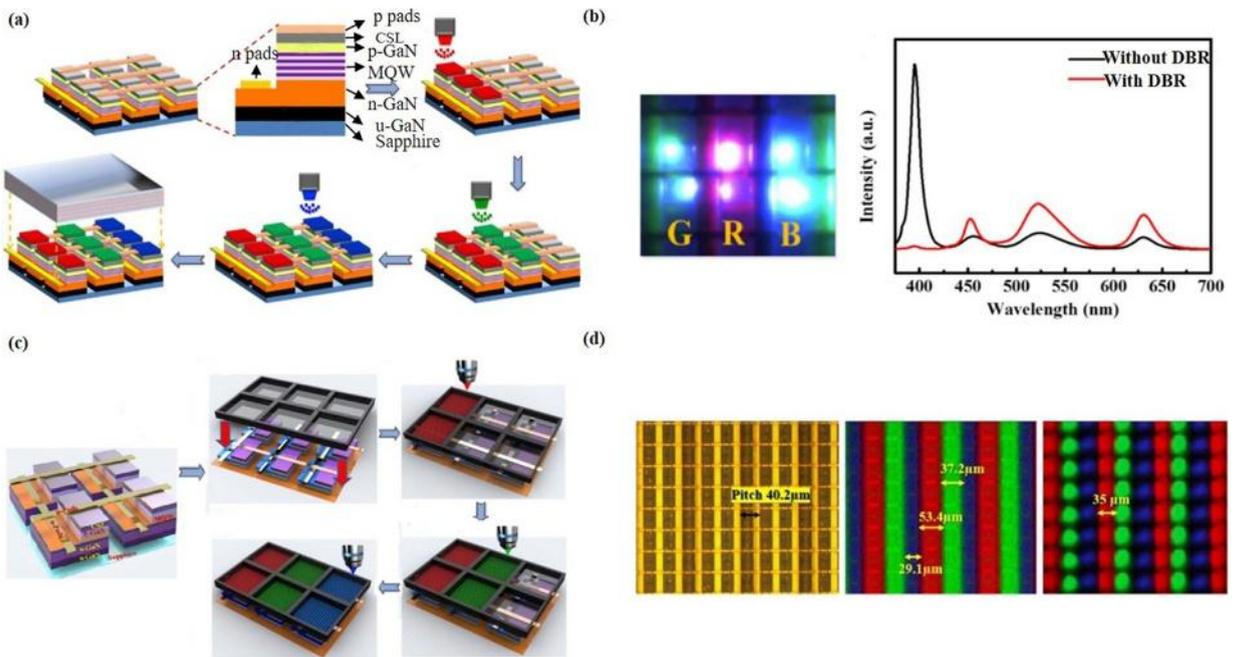


图21。(a) AJ 印刷工艺示意图。(b)左侧图像:RGB 亚像素发射图像;右图:带和不带DBR 层的microled 的EL 光谱。经参考文献[83]许可的转载。版权所有2015,OSA 出版。(c)基于光刻模具和AJ 印刷技术的全彩microled 显示屏工艺流程。(d)左侧图像:设定QDs 沉积区模具图像;中间图像:使用AJ 技术不使用光刻模具进行QDs 颜色转换后的microled 荧光显微图像;右图:结合光刻模具和AJ 印刷技术进行QDs 颜色转换后的microled 荧光显微图像。经参考文献[84]许可的转载。中国激光出版社2017 年版权所有。

分别。

在全彩显示中，microled的对比度和色彩纯度是至关重要的特征，因为它们可以使视觉效果更加逼真。然而，前一种方法存在颜色串扰，影响了颜色的纯度。为了减少光串扰，2017年制作了图案光刻胶模具并与AJ printing 结合使用。量子点的面积被一个通过光刻法制造的模具所限制[84]。如图21c所示，模具窗的尺寸与microled的尺寸相同，间隔的宽度与microled之间的间隔相同。在中间间隔间形成了一堵墙，并在侧壁镀银，目的是反射漏光，消除新的串音。通过调整模具窗口和microled台面并优化打印参数，RGB qd 被有效地喷射到microled 台面区域。该方法大大减少了QDs 沟槽区域的重叠。图21d为相关显微图像。图21d左侧为预置QDs 沉积区模具，节距为40.2 μ m。中间部分是使用AJ 技术进行QDs 颜色转换后的microled 荧光显微图像。右侧为microled 通过光刻模具和AJ 印刷技术相结合进行QDs 颜色转换后的荧光显微图像。结果表明，在没有光刻模的情况下，量子点区域的边界模糊。而红色QDs 区域的宽度约为53.4 μ m，导致串扰值约为32.8%。相比之下，加入光刻胶模具可以得到清晰的QDs 边界，可以计算出串扰值在零附近。因为光刻模具确定了量子点的面积，而侧壁上的银层反射消除了新的串扰。

在过去的几年中，许多研究者提出了通过几何色彩转换器来提高 microled 的对比度和色彩纯度的方法。例如，Chen 等在 2018 年提出了另一种方案[197]。如图 22a 所示，自旋涂在 microled 上的图案黑色基体光刻胶层，在 400 ~ 700 nm 的波长范围内透光率较低。然后，microled 被分离成独立的个体，周围环绕着黑色矩阵光刻胶。随后，红色和绿色的量子点被喷到单个的 microled 区域。此外，在 QDs/microled 的顶表面和 microled 的底表面分别制作了蓝带高反射率的 DBR 层和用于背反射的混合布拉格反射镜(HBR)层。结果，黑色矩阵光阻剂加倍了 microled 的对比度。由于添加了 DBR 层和 HBR 层，颜色转换后的 microled 的红色和绿色 CIE 色度坐标更接近红色和绿色区域。

此外，Gou 等人在2019年提出了一种采用漏斗管阵列的色彩转换器结构[211]。在实验中，创建了一个没有漏斗管阵列的对照组，并进行了模型仿真。图22b显示了带有颜色转换器的micro型led的配置。在microled上涂上一层黄色磷光层，形成滤色阵列。接下来，在microled层上形成与每个亚像素对齐的漏斗管阵列，以减少光串扰。模拟结果表明，microled在加入漏斗管阵列后消除了光串扰。通过优化漏斗管锥角，可以提高光效率和环境对比度。

上述印刷方法正在不断地被研究者研究。然而，QD 的稳定性是影响全彩microled 显示寿命和可靠性的关键因素。此外，MQWs 和QDs 之间的空间分离限制了颜色转换效率，QD 可能含有对人体健康有害的重金属。尽管如此，该印刷技术在实现高PPI 全彩显示方面仍有很大优势，满足了未来高品质全彩microled 显示的要求。

5.2. UV 自对准固化技术

道森的团队在2008年首次提出了通过UV 自对准固化实现全彩microled 显示屏的想法。胶体CdSe/ZnS NCs 与UVmicroled 一起被用作颜色转换材料[77]。由于树脂对UV 波长敏感，自对准固化可用于限制特定UVmicroled 顶部的颜色转换材料[212-214]。通过该方法，可以快速实现microled 的颜色转换，工艺简单，成本低。

在实验中，使用了不同颜色的NCs/乙烯基溶液和对紫外线敏感但对温度不敏感的环氧预聚体

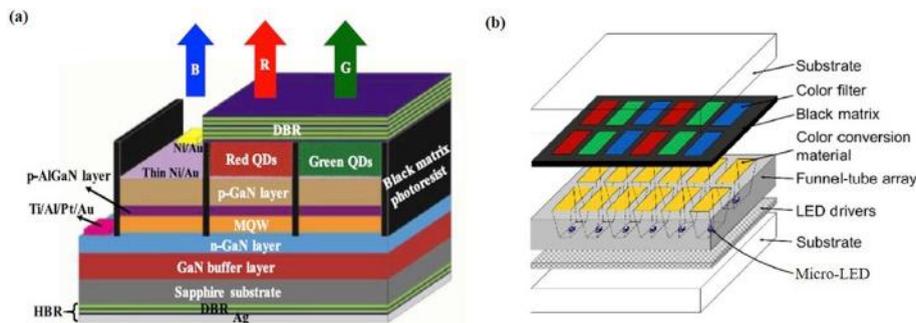


图22。(a) HBR 层和DBR 层的microled 示意图[197]。(b)带有漏斗管阵列的microled 示意图。经参考文献[211]许可复制。版权2019,MDPI 出版。

混合制备纳米复合材料。接下来，纳米复合材料与 UVmicro 发光二极管对齐，然后自旋涂覆在 micro 发光二极管上，制造聚合物薄膜。之后，胶片经过适当的曝光处理，最终由 microled 驱动。

从图23a的纳米复合材料的吸收光谱可以看出，在相同的浓度下，纳米复合材料中所采用的不同类型的NCs的吸收是不同的。发射光谱表明，纳米复合材料的发射峰在波长604 nm、555 nm、518 nm和477 nm处的半宽分别为30.5 nm、30.5 nm、32.5 nm和35.5 nm。图23b为该方法的相关图。左侧为白光照明下micro型led和纳米复合材料集成后的显micro镜图像。中间部分是纳米复合材料与microled集成的原理图。右边部分是一个典型的裸UVmicroled的显micro镜图像。图23c显示了相同驱动电流下像素的发射光谱，其中未转换的紫外峰的强度被归一化。值得注意的是，为了清晰起见，图中只绘制了红色纳米复合材料在紫外波段的发射光谱。如图23d所示，通过UV增强Si光电探测器测量了含34个甲流的裸UVmicroled的光输出功率。通过有色玻璃长通滤光片去除未转换的UV后，发光纳米复合材料的光学输出功率分别为6 风晴、3 风晴、0.15 风晴和0.05 风晴。因此，在40 mA的驱动电流下，RYGB纳米复合材料的颜色转换效率分别为17.7%、9%、0.5%和0.2%。

紫外光自对准固化可快速实现色转换，但数控的稳定性和色转换效率有待进一步提高。此外，由于micro结构容易扩大，曝光时间和剂量也需要严格控制。

5.3. 液体毛细管力传递技术

除了上述的UV自定向固化技术外，Dawson的小组还提出了一种与转移印花兼容的平面QWs无机半导体膜色转换技术。与有机半导体和碳量子点(CQD)不同，无机半导体薄膜是稳定的，几乎不受封装技术的影响[215]。

2015年，他们采用450 nm的microled激发ZnCdSe/ZnCdMgSe MQW膜，成功制备了一种发出540 nm光的杂化microled[82]。该技术的关键步骤是如何将无机变色膜转移到microled上。首先，MBE在InGaAs/InP上生长MQW膜，MBE含有一个CdMgZnSe屏障和9个ZnCdSe QWs，如图24a所示。然后通过机械抛光和湿法蚀刻去除基体，湿法蚀刻去除缓冲层。然后用蜡将MQW膜固定在玻璃上，再用去离子水转移到microled上。因此，MQW膜与microled通过液毛细管直接结合，完成杂化microled的制备[216]。在第4.1.1节中描述了类似的方法。实验结果如图24b所示。其中“裸microled”是不带MQW膜的microled，“hybrid micro led”是带MQW膜的集成microled，“integrated MQW”是带MQW膜的microled，同时还有一个用于检测的过滤器。裸microled的发射峰值位于波长450 nm处。MQW膜在450 nm波长处的吸收为97-98%，发射峰主要在540 nm波长处，带边吸收波长在460 nm左右。可以看出，混合microled的发射峰分别在475 nm和540 nm处。同时，实验结果表明，MQW膜的固有带宽和混合microled的调制带宽分别为145 MHz和51 MHz，远远高于CQD和荧光粉。

该方法也可应用于海藻和/或InGaN材料体系的MQW结构，以实现在其他波长的颜色转换。例如，II-VI和III-V血小小板兴奋通过毛细管保税设备显示绿色和红色排放。[152]。此外，还可以实现microled显示。

5.4. 总结

颜色转换技术虽然是实现单片micro型led显示的重要手段，但仍面临着一些困难。其中最关键的问题之一就是QDs的稳定性差，具体表现在以下几个方面：QDs的恶化可能会降低microled显示器的可靠性和寿命；低效率(30%)的QDs可能会降低显示效率；量子点必须经过光刻或喷墨印刷的沉积和制版过程；来自蓝色/UVmicroled的高通量光子可能会干扰QDs的性能。除此之外，MQWs和QDs之间的空间分离限制了色转换效率，色转换材料可能含有对人体健康有害的镉。

然而，由于QD色彩转换技术具有成本低、分辨率高、组装和驱动程序简单等突出特点，许多QD色彩转换技术得到了广泛的应用，包括光刻、印刷、转移印刷等。特别是在单片上制备蓝色microled和绿色microled，然后用蓝色microled激发红色QD来实现红光也是可行的。通常，像素密度是色彩转换技术的一个重要特征。与转移印刷技术相比，色彩转换技术可以达到更高的像素密度。目前，色彩转换技术面临着巨大的挑战，需要进一步的发展。在色彩转换过程中，应通过添加滤色器来提高microled的对比度和色彩纯度；可以添加四分之一波板来防止环境光激发量子点；建议将向后发射的光子回收，以减少效率损失。另外，颜色转换技术可能会对发射光束产生形状影响，这对AR的应用是一个很大的挑战。

近年来，全彩microled显示逐渐被报道。例如，eLux在2019年展示了一款42 PPI和1000 nits的彩色转换原型，使用了40个led，相当于110英寸面板上的4K显示屏。

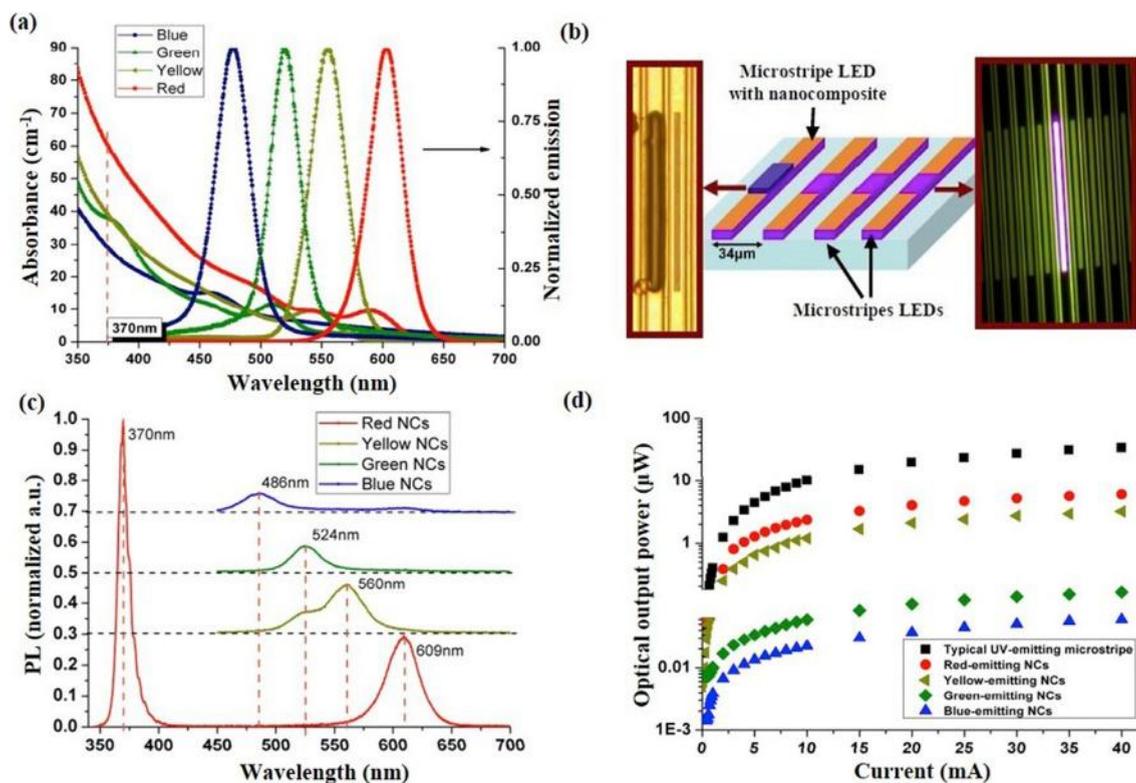


图23所示。(a)纳米复合材料中不同类型NCs的吸收和发射光谱。(b)左侧图像:白光照明下microled与纳米复合材料集成后的显显微镜图像;中间图像:纳米复合材料与microled集成示意图;右图:典型裸UVmicroled的显显微镜图像。(c)相同驱动电流下RYGB像素的发射光谱。(d)裸UVmicroled、rygb发射纳米复合材料的光输出功率与电流关系图[77]。

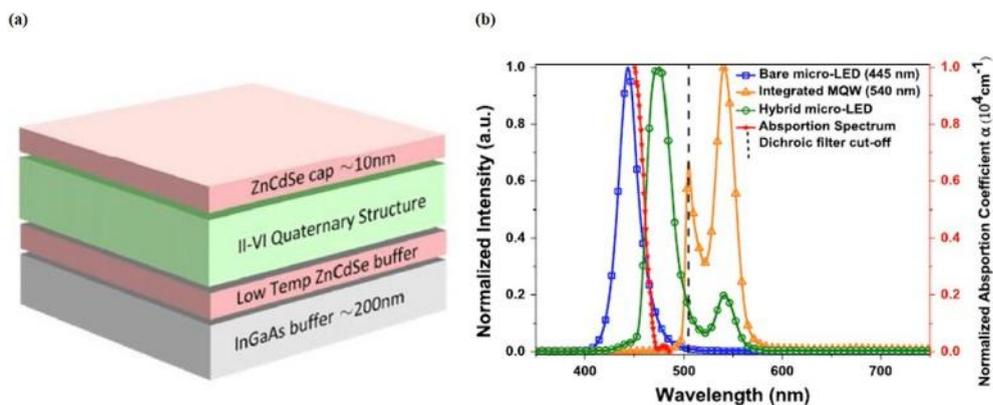


图24。(a)MQW膜结构示意图。(b)MQW膜在三种模式下的吸收光谱和发射光谱。经参考文献[82]许可的转载。IOP 出版公司版权所有。

6. 结论和观点

综上所述, 本文综述了近年来各种彩色microled显示技术, 从生长技术到转移打印技术和彩色转换技术。在此, 从microled的典型结构和制备过程开始, 随后的部分强调流行的全彩microled显示技术。该生长技术在结构和机理研究方面取得了很大进展, 在高分辨率、高效率的全彩显示领域具有显著的应用潜力。然而, 驱动器与microled阵列的集成和效率的提高是该技术面临的巨大挑战。转移印花技术已被a广泛应用

目前该技术的生产企业众多,但成本和收率是阻碍该技术发展的主要障碍。低成本、高PPI的彩色转换技术也是实现全彩microled显示的重要技术。然而,能量损失、效率低下和材料的不稳定性仍然是需要进一步解决的问题。

目前, microled 显示屏市场还处于起步阶段,还没有大规模扩张,这对我们来说既是机遇也是挑战。包括三星(Samsung)、索尼(Sony)、夏普(Sharp)、京东方(BOE)等在内的许多公司都投资于全彩 microled 显示屏的关键技术,比如转移技术。在衍生产品方面,各大厂商也已提前开展了相关研究。在终端应用方面,首先将出现大规模的户外和商业展示,然后是汽车和可穿戴展示。未来,随着全球关键技术的快速发展,大面积、低成本、高效率的 microled 显示有望成为一种重要的未来显示技术。

确认

这项工作由国家自然科学基金(NSFC)(61974031、61705041)、上海市技术标准计划(18DZ2206000)、国家重点研发计划(2017YFB0403603)资助。作者感谢中村修二教授对本文的帮助。

参考文献

- 王建民,王建民,等。microled 显示器的研究现状与展望,中国电子科技大学学报,49(2018)593-596,https://doi.org/10.1002/sdtp.12415。
- 蔡宏伟,道森,基于阵列密度矩阵可寻址micro显示器的制作,IEEE光子学。抛光工艺。网址:http://doi.org/10.1109/lpt.2003.818643。
- 刘志明,王志明,庄文昌,刘家明,半导体器件与半导体器件集成电路(LEDOS),半导体器件与半导体器件集成电路技术论文(2011)1215-1218,http://doi.org/10.1889/1.3621049。
- Z.B. Kamarei, 2014年诺贝尔物理学奖的科学家图书馆员分析:高效蓝光二极管的发明,Sci.抛光工艺。Libr. 34(2015)19-31,https://doi.org/10.1080/0194262x.2014.1003438。
- 刘伟杰,《电子电子管显示器》,《电子与电子工程》;威利在线图书馆,霍博肯,美国新泽西州,1999年。
- [6] T. Wu, c.w. 谢尔,林奕华, c.f. 李,梁顺,吕元祥,李善惠。黄晨,郭伟, h.c - c. 郭志晨, micro 型led 与 micro 型led:下一代显示技术的候选产品。Sci. 8(2018)1557,https://doi.org/10.3390/app8091557。
- 刘振伟,等离子体显示器的发展,电子工业出版社,2002。《等离子科学》34(2006)268-278,https://doi.org/10.1109/TPS.2006.872440。
- 张新民,蔡国荣,沈宏明,液晶显示器动态背光亮度缩放,IEEE译。非常大的规模。Syst. 12(2004)837-846,https://doi.org/10.1109/TVLSI.2004.831472。
- 《等离子体显示面板:物理、最新发展与关键问题》,杨永平,杨永平。达成。Phys. 36(2003)R53,https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/6/201。
- 3-氮化蓝micro显示器,应用软件公司。理论物理。网址:http://doi.org/10.1063/1.1351521。
- 蔡宏伟,全正伟,道森医学博士,高分辨率128?氮化micro电子显示器,IEEE电子。设备Lett. 25(2004)277-279,https://doi.org/10.1109/led.2004.826541。
- [12] siv. Park, Y. Xiong, r.h. Kim, P. Elvikis, M. Meitl, d.h. Kim, J. Wu, J. Yoon, C.-J. 余,刘中,黄,高中。黄, P. Ferreira, X. Li, K. Choquette, J.A. Rogers, 可变形和半透明显示器用无机发光二极管的印刷组件,科学325(2009)977-981,https://doi.org/10.1126/science.1175690。
- [13] r. Horng H.-Y. 简.F.-G. Tamtair D.-S. 刘建平,《红外光 microled 显示器的制作与研究》,IEEE 电子器件学会学报6(2018),http://doi.org/10.1109/jeds.2018.2864543。
- 刘启明,刘志明,全集成有源矩阵可编程UV和蓝色microled显示系统(SoP), Soc. Inf. Disp. 25(2017)240-248,https://doi.org/10.1002/jsid.550。
- 刘志明,黄国明,姜中文,唐中文,刘克明,利用倒装芯片技术在有源矩阵基板上的单片发光二极管micro显示,IEEE J. Sel. 上面。电子商务,15(2009)1298-1302,https://doi.org/10.1109/Jstqc.2009.2015675。
- [16] j. 天.j. Li D.Y.C. 撒荒.c. 布拉德福德J.Y. Lin H.X.江,III-nitride 全面高分辨率集中,达成。理论物理。网址:99(2011),031116,https://doi.org/10.1063/1.3615679。
- 王建民,王建民,王建民,王建民,王建民,王建民,《microled 显示器制造技术研究》,中国电子科技大学学报,2003(1),北京:中国电子科技大学。
- 张伟强,刘志强,王志明,刘启明,ASIC驱动的1700像素无源矩阵microled显示器,2014年IEEE复合半导体集成电路学术研讨会,IEEE,2014,页1-4,https://doi.org/10.1109/CSICS.2014.6978524。
- 刘志强,张国强,刘玉英,颜淑英,郭宏强,叶志强,孙欣欣,全多功能铱基 microled 用于 2500 PPI micro 显示器、温度传感、光能采集和光检测,发表于:2018 IEEE 国际电子器件会议(IEDM), IEEE, 2018,https://doi.org/10.1109/IEDM.2018.8614692,行政院。
- [1] 蒋海霞,林j.y., 氮化microled 与未来一十年进展回顾,光学快速21(2013)A475-A484,https://doi.org/10.1364/OE.21.00A475。
- 刘欣欣,田P.,魏Z.,易S.,黄Y.,周X.,邱,胡l., Fang Z. Fang, Cong, Zheng, R. Liu, Gbps 长距离实时可视光通信技术,IEEE 光子学杂志9(2017)1-9,https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2775648。
- 刘欣欣,易,周欣欣,方中,刘欣欣。邱,胡l., Cong., Zheng, R. Liu, Tian., 基于NRZ-OOK调制的绿色激光二极管数据速率2.70 Gbps的34.5 m水下光无线通信,Optic Express 25(2017)27937-27947,https://doi.org/10.1364/OE.25.027937。
- 论文编号:bb0 论文编号:bb0 论文编号:bb0 论文编号:bb0 论文编号:bb0 论文编号:bb0 论文编号:bb0 论文编号:bb0
- [24] S.Y. Lee, k.i. Park, Huh, Koo, H.G. Yoo, Kim, C.S. Ah, G.Y. Sung, K.J. Lee, 耐水柔性GaIn LED在液晶聚合物基质上的植入生物医学应用,纳米器件。能源1(2012)145-151,https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2011.07.001。
- [25] H.E. Lee, S.H. Lee, M. Jeong, J.H. Shin, Y. Ahn, D. Kim, S.H. Oh, S.H. Yun, K.J. Lee, 使用单片柔性垂直AlGaInP 发光二极管的Trichogenic 光激发,ACS Nano 12(2018)9587-9595,https://doi.org/10.1021/acsnano.8b05568。
- 李s.h., 金志贤,申j.h.,李h.e., i.s.s. Kang K. Gwak, d.s. 金,金博士,李k.j., 在大脑表面通过灵活的垂直发光二极管的光发生控制身体运动,纳米水。能源44(2018)447-455,https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.12.011。
- bb0 K. Rae, P.P. Manousiadis, M.S. Islam, L. Yin, J. Carreira, J.J.D. Mckendry, B. Guilhabert, I.D.W. Samuel, G.A. Turnbull, N. Laurand, H. Haas, M.D. Dawson, 传输印刷microled和基于聚合物的可见光通信收发器,Optic Express 26(2018)31474-31483,https://doi.org/10.1364/oe.26.031474。
- [28]我。金永庆、郑元辉、黄新荣、司uda、李玉玺、宋振明、宋元明、鲍焕明、李玉玺。金,卢,李s.d., i.s. Song, G. Shin, R. Al-Hasani, S. Kim, M.P. Tan, Y. Huang, F.G. Omenetto, J.A. Rogers, 可注射的细胞级光电子与无线光遗传学的应用,科学340(2013)211-216,https://doi.org/10.1126/science.1232437。

- [j] McPhillimy, B. Guilhabert, C. Klitis, M.D. Dawson, M. Sorel, M.J. Strain. 单模膜硅光子器件的高精度转移印刷, *Optic Express* 26 (2018) 16679-16688, <https://doi.org/10.1364/OE.26.016679>.]
- [71] A.J. Trindade, b. Guilhabert E.Y.谢, r • 费雷拉J.J.D. McKendry, d.朱n. Laurand e.顾D.J.沃利斯贝律铭沃森C.J.汉弗莱斯,医学博士道森,异构集成钻石的氮化镓发光二极管和硅转移印花,视觉表达23 (2015)9329 - 9338,<https://doi.org/10.1364/OE.23.009329>.
- [72]梅特尔, Z.-T. 朱, V. Kumar, K.J. Lee, X. Feng, Y.Y. Huang, I. Adessoia, R.G. Nuzzo, J.A. Rogers. 弹性体印章的粘附动力学控制转印, *Nat. Mater.* 5 (2006) 33-38, <https://doi.org/10.1038/nmat1532>.
- [73] R. Saeidpourazar, M.D. Sangid, J.A. Rogers, P.M.激光驱动micro 转移打印原型打印机, *j.manuf. Process.* 14 (2012) 416-424, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.09.014>.
- [74]崔岷植、张淑仪、李、李、金东荣、h.j. 李,黄永发。金,黄永发。由叠置对准辊转移印刷而成的可伸缩有源矩阵无机发光二极管显示器。脱线。27 (2017), 1606005,<https://doi.org/10.1002/adfm.201606005>.
- [75] B.K. Sharma, B. Jang, J.E. Lee, S.-H. 裴俊浩, T.W.金, h.j. 李,黄永发。金,黄永发。用于可拉伸电子的氧化晶体管的负载控制辊转移。脱线23 (2013)2024-2032,<https://doi.org/10.1002/adfm.201202519>.
- [76] M.F. Leitao, J.M.M. Santos, b.g Guilhabert, s. Watson, A.E. Kelly, M.S. Islam, H. Haas, M.D. Dawson, N. Laurand, Gb/s 可见光通信与胶体量子点彩色转换器, *IEEE J. Sel.* 上面。(2017) 1-10, <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2017.2690833>.
- [B. Guilhabert, D. Elfström, A.J.C. Kuehne, D. Massoubre, h.x x Zhang, S.R. Jin, A.R. Mackintosh, E. Gu, R.A. Pethrick, M.D. Dawson, inanmicropixelated 发光二极管上的纳米晶/环氧复合材料自定向书写集成, *Optic Express* 16 (2008) 18933-18941, <https://doi.org/10.1364/oe.16.018933>.]
- [78] J. Herrnsdorf, B. Guilhabert, J. j.d. McKendry, Z. Gong, D. Massoubre, S. Zhang, S. Watson, A.E. Kelly, E. Gu, N. Laurand, M.D. Dawson. 混合有机/GaN 光子晶体发光二极管, 应用。理论物理。Lett. 101 (2012), 141122, <http://doi.org/10.1063/1.4757870>.
- [79] D.-S. 金, S.-Y. 金,黄永发。荣格, S.-Y. 基于量子点CSP技术的高品质成像microled 显示, *电子。Imag.* 16 (2018), <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2018.16.COLOR-185,185-1>.
- [80]周德辉, 田平, 井平, 孙, 陈, 徐, 李, 梅, 刘, 张伟, 郭, 曲, 张洪, micro 波辅助加热多色量子点荧光粉的研究, *ACS 应用。板牙。接口* 10 (2018)27160-27170,<https://doi.org/10.1021/acsaami.8b06323>.
- [81] M. Wu, Z. Gong, A.J.C. Kuehne, A.L. Kanibolotsky, Y.J. Chen, I.F. Perepichka, A.R. Mackintosh, E. Gu, P.J. Skabara, R.A. Pethrick, M.D. Dawson. 基于喷墨打印的混合式GaN/有机micro 结构发光器件, *Optic Express* 17 (2009) 16436-16443, <https://doi.org/10.1364/OE.17.016436>.
- [82] J.M.M.桑托斯B.E.琼斯P.J. Schlosser,沃森j. Herrnsdorf b. Guilhabert J.J.D. McKendry, J.D. De 耶稣,助教加西亚,贝拉Tamargo 接着,a E 凯利j. E Hastiel n. Laurand 医学道森,混合GaN 领导与capillary-bonded 族化合物发光color-converting 膜可见光通信,Semicond. 科学。Technol. 30 (2015), <https://doi.org/10.1088/0268-1242/30/3/035012,035012>.
- [83] H.-Y. 汉族,H.-Y. 林,c.c. 林,观测。庄,J.-R. 李,K.-J. 陈, 余伯明, 余秋明。陈,小时。陈,K.-M. 刘,H.-C. Kuo, 量子点 microLED 显示技术的共振增强全彩色发射, *Optic Express* 23 (2015) 32504-32515, <https://doi.org/10.1364/OE.23.032504>.
- [84] H.-Y. 林,C.-W. 谢尔,D.-H. 谢长廷,X.-Y. 陈, h.m.p 陈, t.m. 陈,K.-M. 刘,学术界。陈,c.c. 林,H.-C. 用平板制作的刻胶膜子在量子点全彩 micro 发光二极管显示器上的光串音减少, *光子。Res.* 5 (2017) 411-416, <https://doi.org/10.1364/prj.5.000411>.
- [85] 丁克文, V. Avrutin, N. Izyumskaya, U. 欧欧Ozgur, H. Morkoc, Micro-LEDs, a manufacturability perspective, *Appl. Sci.* 9 (2019) 1206, <https://doi.org/10.3390/app9061206>.
- [M.S. Wong, S. Nakamura, S.P. DenBaars, 高性能iii -氮化micro 发光二极管研究进展, *ECS 固态科学与技术杂志*9 (2020), <https://doi.org/10.1149/2.0302001JSS,015012>].
- [87] J.J. Wierer Jr., N. Tansu, iii -氮化microled 高效发射显示, *激光光子。Rev.* 13 (2019), 1900141, <https://doi.org/10.1002/lpor.201900141>.
- [88] 李国辉, 傅维义, 蔡宏伟, 晶片规模GaN 整合, *工程。电子电子。* 70 (2020), 100247,<https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2020.100247>.
- [89] P. Tian, 新型micro 像素化iii -氮化发光二极管:制备、效率研究与应用, 斯特拉斯克莱德大学, 2014.
- [90] 杨, 张立龙, 麦肯德利, 贺恩斯多夫, 田培智, 龚志强, 吉, 华生, 顾恩华, 道森, 冯, 王, 胡, 定根型micro 发光二极管尺寸依赖性电容研究, *应用科学出版社。Phys.* 116 (2014), <https://doi.org/10.1063/1.4891233,044512>.
- [91] P. Tian, A. Althumali, E. Gu, I.M. Watson, M.D. Dawson, R. Liu, 蓝色InGaNmicro 光发光二极管在3.5 kA cm 极高电流密度下的老化特性?2, *Semicond. 科学。Technol.* 31 (2016), <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/4/045005,045005>.
- [92] 田, 麦肯德利, 龚振中, 吉哈贝特, 华生, 顾, 陈振中, 张, 道森, 蓝晶micro 发光二极管的尺寸依赖效率与效率下降, *应用研究。理论物理。* (2012), 231110, <https://doi.org/10.1063/1.4769835>.
- [93] 田, 爱德华兹, 华莱士, 马丁, 麦肯德利, 顾, 道森, Z.-J.邱, 贾志强, 陈志强, 张志强, 郑丽玲, 刘r., HVPE 和MOCVD 生长的不同缓冲层厚度gan 基发光二极管特性, *J.物理学报。达成。Phys.* 50 (2017), <https://doi.org/10.1088/1361-6463/50/7/075101,075101>.
- [4] 范志强, 林志强, 蒋宏强, 三氮化体micro 发射极阵列的研究与应用, *物理学报。达成。Phys.* 41 (2008), 094001, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/094001>.
- [95] 田, 麦肯德利, 龚, 张, 沃森, 朱, 沃森, 顾, Kelly, C.J. Humphreys, 道森, 硅衬底micro 象素化gan 基发光二极管的特性与应用, *应用科学出版社。Phys.* 115 (2014), 033112, <https://doi.org/10.1063/1.4862298>.
- [96] 我。Kim, Y.H. Jung, J. Song, Kim D. Li, h - s. 金,I.-S. 宋, J.J. Wierer, H.A. Pao, Huang, J.A. Rogers, 高效micro 尺度GaN 发光二极管及其在不同衬底上的热特性, *Small* 8 (2012) 1643-1649, <https://doi.org/10.1002/sml.201200382>.
- [97] 赵宏基, s.k. Kim, D.K. Bae, b.c. Kang I.S. Lee, y.h. 李国祥, 激光发射氮化镓薄膜光子晶体氮化镓基发光二极管, *IEEE 光子。抛光工艺。* <https://doi.org/10.1109/LPT.2008.2006506>.
- [11] 陈志强, 陈志强, 等。可控制厚度变化的硅片粘接技术研究[P].北京:科学技术出版社, 2002。07/21/2015。
- [11] 刘建华, 刘建华, 等。有机电化学晶体管的进展[P].北京:科学技术出版社, 2002。03/10/2016。
- [10] 刘建华, 刘建华, 等。氮化镓与氮化镓的位错研究[J].北京:科学出版社, 2002。Status Solidi (c) (2003) 1684-1709, <https://doi.org/10.1002/pssc.200303126>.
- [王文胜, 赵元义, 周恩来, 余建明, 张建民, 张建民, 张建民, 张建民, 张建民, 张建民, 等。准分子激光发射制备氮化镓/金属/硅异质结构的光学性质与研究, *清华大学学报。理论物理。* 75 (1999) 1887-1889, <https://doi.org/10.1063/1.124861>。
- [102] 张炳扬, 楚, 我。赖,J.-T. 楚,c.c. Yu, 张炳扬, 林,H.-C. 郭, 王胜昌, 激光发射法制备氮化镓发光二极管的研究。Phys. 95 (2004) 3916-3922, <https://doi.org/10.1063/1.1651338>.
- [10] 王建民, 王建民, 王建民, 等, 等。砷化镓的相干光发射, *物理。Rev. Lett.* 9 (1962) 366, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.9.366>.
- [4] 刘建华, 李建华, 等。光学系统的相干(可见)光发射_{10xP_x}连接,达成。理论物理。1 (1962) 82-83, <https://doi.org/10.1063/1.1753706>。
- [10] 王建民, 《氮掺杂对砷化镓的影响》_{10xP_x} 电致发光二极管,达成。理论物理。网址:19 (1971)184-186,<https://doi.org/10.1063/1.1653876>。
- [10] 刘志军, 刘志军, 刘志军, 等。氮掺杂与不掺杂GaAsP 二极体的辐射复合机理。清华大学学报。物理。43 (1972)4075-4083,<https://doi.org/10.1063/1.1660876>。
- [J.I. Pankove, J.E. Berkeyheiser, GaN 发光二极管的频率响应, *IEEE* 60 (1972) 1456-1457, <https://doi.org/10.1109/PROC.1972.8933>].
- [10] 刘建华, 杨建华, 等。氮化镓的电致发光特性, 聚合物的电致发光特性, *化学工程学报*, 2002, (3)。

