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

↑ 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 ▶国立交通大学光子学系与光电工程研究所,新竹,30010

。中国电子科学技术大学基础与前沿科学研究所,成都610054

ARTICLEINFO	A B S T R A C T				
关键词:microled 显 示屏,全彩生长, 转印,色彩转换	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,许多研究机构和公司对全彩显示中的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,所以没有在表中列出它们。

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 智能手表/电话	普莱西 如果和京瓷	单色 颜色	0.7 1.8	6 -20 - 1 8	8 127	1920 年?1080 256 年?256 年?RGB	3000 200
显示 汽车展示	友达光电	颜色	12.1	< 30	150	1920年?720年?RGB	169
电视显示	表示 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micro 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

3.

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°m?35µm。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,单片机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 -氦化物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。基材去除和临时粘结过程

在许多情况下,要实现全彩 microled 显示,需要去除基片和临时粘结工艺[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接工艺。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结层。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(N)2),如下化学方程所示[101,102]。

$GaN \rightarrow Ga + 1/2N_2 \uparrow$,

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 合剂层为金属合金时,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

$Si + 2KOH + H_2O \rightarrow K_2SiO_3 + 2H_2 \uparrow .,$

(2)

(1)

衬底的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_{1-x}P_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AIN 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。当氮化镓掺合不同含量的In 或AI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象素。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_{N2})[122]。较低的问_{N2},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 掩模凹陷技术的示意图[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。(f) adatom 并入纳米线生长前沿的示意图。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 mol/1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2兆位m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(~100nm)远短于Ga adatom 的扩散长度(~1)。 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x遗传算法1-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nbGaN/2O3(0001)基材采用SAG技术。然后,在x遗传算法1ex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-xN 量子势全和 GaN 量子势全(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,电流路径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 0.4N 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 EL0.15 遗传算法 0.85N 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,结合生长技术和偏压调节 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。

9

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0.82N/GaN MQW 区域的发射波长为~460 nm,有5个周期0.4遗传算法0.6N/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 600nm 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 80ma 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 Al₂O₃ 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 leds m。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 色 m ?的 RGB 像素的横截面图。10 镑每亚像素。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基片上的 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%²,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4.4.1。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(Gerit(device/substrate))设为Gerit,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(Gerit(device/substrate))随剥离率v而变化,可设为Gerit(v)(147-149)。需要注意的是,vc 代表Gerit(器件/衬底)等于Gerit(印章/器件)时的一个临界速率,G0 是v在0 左右时的能量释放速率[65150]。当v大于v时eGerit(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_e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 时 e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 SiO 的图案 2 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 SiO 上创建 了一个垂直的侧壁结构 2/ 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℃左右过夜固化。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 SiO 所示 2 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 SiO 的大小 2 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 戳子对准选定的一组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。该工艺的实现是基于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 戳子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 射流转移	磁性材料 流体	电磁 重力、毛细	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	> 10 > 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;石图: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)(€PDMS [%]310 ppm / ?C,€si 当浓度为2.6 ppm/?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/m 时²,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SiO 对牺牲层和半导体层进行蚀刻2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 提出的方法进行修改 [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 100mol / 1?100 μm ?3 米和 200 米?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 Δ T 得到使 用的应变能密度中腔的曲率半径。表达式如下

$$G = \left[\left(1 - v_c^2 \right) / 2 \right] \left[\varepsilon_0 - \kappa h_s / 2 + (\alpha_s - \alpha_c) / \Delta T \right]^2 h_c \left[E_c / (1 - v_c)^2 \right],$$
(3)

在E。弹性模量(E。平均绩点179.4。泊松比是。¼0.28), ε₀是中间平面的拉伸应变,k是曲率,拉伸。PDMS的吸收系数是。的吸收系数是单晶,ΔT是激光加热的温度高于室温,h。PDMS的厚度,h。单晶硅的厚度是多少 [72]

根据上述分析,G和T△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。精密卷绕对位技术转移

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。这种方法被称为辊对 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△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micro 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 在供体基质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micro 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结到n型电极上,第二粘结层的粘结性小于第一粘结层。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 通过第一粘结层粘结到过渡衬底上。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结到施主 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型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×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刻蚀工艺绘制后,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,电可编程序磁模块产生磁力,吸引相应的磁层。当电磁力大于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 粘接在接收基片上。

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,Vo 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Vo 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 Vcrit 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℃到 300℃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,则需要在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99.999%。

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[192193]。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-m UVmicroled,中心间距为40-m。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 右图为带和不带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micro 镜图像;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micro 镜图像。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micro镜图像。图21d 左侧为预置QDs 沉积区模具,节距为40.2°m。中间部分是使用AJ 技术进行QDs 颜色转换后的microled 荧光显micro镜图像。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micro镜图像。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°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 的项表面和 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,"hybrid micro led"是带 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4 K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micro 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micro 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, 王家明,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,电子工程出版社,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/TVLS1.2004.831472。

- (※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/10.109/1VLSI.2004.8314/2。
 《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。Tarntair 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/Jstqe.2009.2015675

[16] j.天j.Li D.Y.C.撒谎,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,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,全多功能镓基 microled 用于 2500 PPImicro 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

[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 I., 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I, 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

- [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GaN 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. Islim, 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. Kim, P. Gutruf, A.M.夏瑞利, 许绍义, 曹国强, 谢祖忠, 韩绍生, 赵国强。张成泽, J.W. Lee, k.t。李, 冯, 黄, M. Fabiani, G. Gratton, U. Paik, J.A.罗杰斯, 可穿 戴式脉搏血氧仪的小型无电池无线系统。脱线, 27 (2017), 1604373, https://doi.org/10.1002/adfm.201604373。

刘志忠, 庄文昌, 黄克明, 刘克明, gan 基于可穿戴应用的LEDmicro 显示器, micro 电子。Eng. 148 (2015) 98-103, https://doi.org/10.1016/j.mee.2015.09.007 王建平,王建平,王建平,美建平,等。micro电子器件与micro发光二极管在当今市场中的地位与挑战。中国电子工业学会技术论文摘要50160-163。 http://doi.org/10.1002/sdtp.13422, 2019

[32] Liu X. Lin H. Chen H. Zhang S. Qian G. Zhou X. Chen X. Zhou X. Zheng L. Liu R. Tian P. Tian,基于microled 阵列的MIMO 可见光通信的高带宽自供电探测器 阵列, ACS 光子学(2019), https://doi.org/10.1021/acsphotonics.9b00799。

周文伟,刘德明,马志强,光子元件异质集成的传输打印技术,硕士论文。(2017) 1-17, https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2017.01.001。

Rimby, Mac J, Stall, Karley, Jan Mark, Karley, K

(2019), 1808075, https://doi.org/10.1002/adfm.201808075。

[36] H.-S。金e·布鲁克纳,j 歌曲,y金正日,c. Luj. Sulkin k. Choquette y 黄R.G. Nuzzo, J.A.罗杰斯,不同寻常的策略使用氮化铟镓生长在硅(111)对固态照明,Proc。国家的。学会科学。美国108 (2011)10072-10077,https://doi.org/10.1073/pnas.1102650108
 [37] r。金,金s,宋元明,郑h,ti。Kim, J. Lee, X. Li, K.D. Choquette, J.A. Rogers,柔性垂直发光二极管, Small 8 (2012) 3123-3128,

https://doi.org/10.1002/smll.201201195

[38] K. Rae, C. Foucher, B. Guilhabert, M.S. Islim, L. Yin, D. Zhu, R.A. Oliver, D.J. Wallis, H. Haas, N. Laurand, M.D. Dawson, InGaN LEDs 集成到胶体量子点功能化超薄 玻璃, Optic Express 25 (2017) 19179-19184, https://doi.org/10.1364/OE.25.019179。

[39] H.-P.D. Shieh, 16.4:特邀论文:microLED 成为通用显示器的前景与挑战, SID 技术论文文摘50 (2019), https://doi.org/10.1002/sdtp.13425, 168-168。 复利, M.D.B.查尔顿, D.V. Talapin, 黄宏伟, ch. Harley, R.T. Harley, M.D.B. Charlton, D.V. Talapin, H.W. Huang, c.h.。林,利用非辐射能量转移的混合发光 二极管提高颜色转换效率,硕士论文22 (2010)602-606,https://doi.org/10.1002/adma.200902262。

c.s. Cok, m.m Meitl, r.r.I Rotzoll, g.m ilnik, A.J. Trindade, b.m Raymond, s.b Bonafede, d.m Gomez, t.m Moore, c.p. Prevatte, e.r Radauscher, s.d Goodwin, P. Hines, C.A. Bower, 无机发光二极管显示micro 转移印刷, j.soc。Inf. Disp. 25 (2017) 589-609, https://doi.org/10.1002/jsid.610。

庄志强,郭,刘,胡,李,陶涛,戴,志,谢,陈,陈,葛宏杰,王,肖明,史,郑,张荣,高显色指数杂化三氮化/纳米晶体白光发光二极管脱线26 (2016)36-43,https://doi.org/10.1002/adfm.201502870。

bb0 K. Kishino, K. Nagashima, K. Yamano,基于单片机的不同发射颜色的纳米柱发光二极管, APEX 6 (2012), https://doi.org/10.7567/apex.6.012101, 012101。 bb0 Kishino, A. Yanagihara, K. Ikeda, K. Yamano,单片集成的四色inggan 基纳米柱led,电子。https://doi.org/10.1049/el.2015.0770

C.A. Bower, M.A. Meitl, b.a. Raymond, e.r Radauscher, r.e Cok, s.b Bonafede, d.m Gomez, t.m Moore, c.p Prevatte, b.f Fisher, r.r Rotzoll, G.A. Melnik, a.e Fecioru, A.J. Trindade, 8个m?15个无机发光二极管,光子。Res. 5 (2017) A23-A29, https://doi.org/10.1364/PRJ.5.000A23。

王晓明,杨晓明,氮化镓纳米线的受控生长研究,纳米技术学报,6(2006)1808-1811,https://doi.org/10.1021/nl060553t。

在相同基质上生长的InGaN/GaN 纳米柱阵列的纳米柱直径从蓝色到红色的发射色控制,应用程序。理论物理。Lett. 96 (2010), 231104, https://doi.org/10.1063/1.3443734

[49]中州。Ra, R. Wang, S.Y. Woo, M. Djavid, S.M. Sadaf, J. Lee, G.A. Botton, Z. Mi, 投影显示器全彩色单纳米线像素, Nano Lett. 16 (2016) 4608-4615, https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b01929。

洪奕杰, c.h。Lee A. Yoon, Kim M., h.k。宋振荣, 钟汉杰, 宋振荣, 朴延杰, g.c - c。易, 可视可调谐发光二极管, 硕士论文23 (2011)3284-3288,https://doi.org/10.1002/adma.201100806。

[51]张,龚中, J.J.D. McKendry, S. Watson, A. Cogman, Xie, P. Tian, E. Gu, Chen, G. Zhang, Kelly, R.K. Henderson, M.D. Dawson, emos 控制彩色可调智能显示器, IEEE 光子学杂志 4 (2012)1639-1646,https://doi.org/10.1109/JPHOT.2012.2212181。

-W。王氏-B。在香港、杨绍明。关铭蔡,学术界。腾,a.j。Tzou,研究。楚.P.-T。李,P.-C。Ku, c c。林,H.-C。郭,波长可调谐的 InGaN/GaN 纳米环发光二极管的 纳米球光刻,科学。众议员 7 (2017)42962,https://doi.org/10.1038/srep42962。 [52] S.-W.

[53] kj Lee M.J. Motala 说硕士Meitl,得到孩子,e. Menard A.K.垫片,J.A.罗杰斯,R.G. Nuzzo,大面积,选择性转移micro 结构硅:高性能yhin-film 晶体管的printingbased 方法支持灵活的基板,放置板牙。17(2005)2332 - 2336 年, https://doi.org/10.1002 / adma.200500578。

E.J. Radauscher, M. Meitl, C. Prevatte, S. Bonafede, R. Rotzoll, D. Gomez, T. Moore, B. Raymond, R. Cok, A. Fecioru, A. j. Trindade, B. Fisher, S. Goodwin, P. Hines, G. Melnik, S. Barnhill, C.A. Bower, 平板显示器的 micro 型 led。《发光二极管:固体照明的材料、器件和应用》,国际光学与光子学学会,2017,p. 1012418, https://doi.org/10.1117/12.2252857。

[55] P.-Y。Chang,装置转移方法:美国专利14/551066 [P]。05/26/2016。

[56] H. Oh, 用其转移装置和制造显示装置的方法:美国专利10224316 [P]。05/23/2019。 [2]王志军,张志军,等。micro型led的选择性转移·美国专利10224316 [P]。0 [2]王志军,张志军,等。micro型led的选择性转移·美国专利15/442293 [P]。07/27/2017。

bb0, F.J. Henley,从供体基质中去除非裂解/非转移材料:美国专利15/643384 [P]。02/01/2018。

[1]杨振华,杨振华,杨振华,等。超小型或超薄分立元件的放置:美国专利16/069801 [P]。02/21/2019。

[61] A.比比, J.A.希金森, H.-H。胡宏辉, 《micro 器件阵列的传输和粘接方法:美国专利9773750》[P]。09/26/2017。

[62] M.-H。吴,中州。方,学术界。Chao,电子器件的电可编程磁模块和拾取放置工艺,美国专利9607907 [P]。06/16/2016。

[63] 佐佐木(K. Sasaki), 舒尔(P.J. Schuele), 乌尔默(K. Ulmer), 乌尔默(J.-J.)。李旭东,发射显示器射流组装系统和方法:美国专利20170133558 [P]。 05/11/2017。

[64] C.-L。林,中州。赖,T.-Y。林,林志信。陈,将发光元件转移到封装基板上的方法:美国专利9412912 [P]。08/09/2016。

[65]冯,梅特尔, mBowen, Y. Huang, R.G. Nuzzo, J.A. Rogers,动态控制转移打印中的竞争裂缝, Langmuir 23 (2007) 12555-12560, https://doi.org/10.1021/la701555n。

[66]黄延宜、周文华、夏克杰、梅纳德、j.u。朴智明,《软平版印刷中的压印技术》,中华人民大学出版社,2005年。 [67]周文华,黄玉华, E. Menard, N.R. Aluru, J.A. Rogers, A.G. Alleyne,软平版印刷中的压陷机理,应用科学出版社。理论物理。网

址:http://doi.org/10.1063/1.2149513

[69] A.J. Trindade, B. Guilhabert, D. Massoubre, D. Zhu, N. Laurand, E. Gu, I.M. Watson, C.J. Humphreys, M.D. Dawson, 机械柔性基板上超薄AlInGaN 发光二极管 的纳米精度转移印刷,应用。理论物理。(2013) 239_1, https://doi.org/10.1063/1.4851875。

[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。]

A.J. Trindade, b. Guilhabert E.Y.谢,r•费雷拉J.J.D. McKendry, d.朱n. Laurand e.顾D.J.沃利斯贝聿铭沃森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。 [71]

[72]梅特尔, Z.-T。朱, V. Kumar, K.J. Lee, X. Feng, Y.Y. Huang, I. Adesida, 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.

174]崔岷植、张淑仪、李、李、金东荣、hj。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. Islim, 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. Elfstr € om, 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。金黄水发。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。

[8]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/acsami.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.-V。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,hm.p.陈,tm。陈,K.-M。刘,学术界。陈,c c。林,H.-C。用平版制作的光刻胶模子在量子点基全彩 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,斯特拉思克莱德大学,2014。

900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, L-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/smll.201200382。

[97]赵宏基, s.k。Kim, D.K. Bae, b.c. Kang J.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研究进展[P].北京:科学技术出版社,2002。03/10/2016。

[10]刘振华,刘振华,刘振华,美。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,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。砷化镓结的相干光发射,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128Px)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》12xPx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,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)。

[10]刘志军,刘志军,等。利用氮化铝缓冲层制备高质量氮化镓薄膜的实验研究。北京:清华大学学报。理论物理。(1986) 353-355, https://doi.org/10.1063/1.96549。 [j].北京:清华大学学报(自然科学版)[j].北京:科学出版社, 2002。j:。Phys. 31 (1992) L139, https://doi.org/10.1143/jjap.31.1139。

[11]王建民,王建民,王建民,王建民,王建民,王建民,科学。抛光工艺。B:micro电子与纳米结构加工、测量与现象10 (1992)1237-1266,https://doi.org/10.1116/1.585897。 [12]吴建民,等。三组氮化物的红外化:新特性与展望。5, https://doi.org/10.1063/1.3155798。

[113] 寇俊杰。沈, 邵一, 车一, 侯一, 楚一, 田一, 张一, 张振华。张用-C。Kuo, 表面复合对基于InGaN/gan 的蓝色micro 光发射二极管的影响, Optic Express 27 (2019) A643-A653, https://doi.org/10.1364/OE.27.00A643。

[H. Sekiguchi, K. Kishino, A. Kikuchi,利用射频等离子体辅助分子束外延制备有规律排列的InGaN/GaN 纳米柱, APEX 1 (2008), 124002, https://doi.org/10.1143/apex.1.124002]。

[R. Wang, H.P.T. Nguyen, A.T. Connie, J. Lee, I. Shih, Z. Mi, 单晶硅上可调谐无磷InGaN 纳米线发光二极管阵列, Optic Express 22 (2014) A1768-A1775, https://doi.org/10.1364/OE.22.0A1768。]

[H.P.T. Nguyen, K. Cui, S. Zhang, M. Djavid, A. Korinek, G.A. Botton, Z. Mi, inan /GaN 纳米线白色发光二极管的电子溢出控制, Nano Lett. 12 (2012) 1317-1323, https://doi.org/10.1021/nl203860b。

[117] S.D. Hersee, M. Fairchild, A.K. Rishinaramangalam, M. s. Ferdous, L. Zhang, p.m 张建平,张建平,张建平,等,基于模板化和可伸缩纳米线生长过程的GaN 纳米线发光二极管,电子。Lett. 45 (2009) 75-76, https://doi.org/10.1049/el:20092391
 [18]刘志军,刘志军,刘志军,刘志军,等。氮化镓纳米柱的结构和光学特性研究[j].北京:科学出版社,2002。增长300 (2007)259-262, https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.11.036。

[119] C.-G。你,Y.-F。姚明,学术界。廖,彭泽亭。苏,谢国明,谢国明。翁,学术界。林,陈宏泰,余伟华。杨国强,多截面核壳 InGaN/GaN 量子阱纳米管发光二极 管阵列,Optic Express 23 (2015) 21919-21930, https://doi.org/10.1364/Oe.23.021919。

[120]中州。Ra R. Navamathavan, H.-I。柳.C.-R。李国强,利用金属有机化学气相沉积法合成的单轴和同轴InGaN/GaN 多量子阱的单纳米线发光二极管, Nano Lett. 14 (2014) 1537-1545, https://doi.org/10.1021/nl404794v.

、时。金德胜,朴元胜,金德耀,康东文,钟家胜,氢化物气相外延法制备GaN纳米柱,硕士论文14 (2002)991 - 993,https://doi.org/10.1002/1521-4095(20020705)14:13/14<991::AID-ADMA991>3.0.CO;2-L。 [121]小时。

K. Kishino, H. Sekiguchi, A. Kikuchi,利用rf等离子体辅助分子束外延显示极其均匀的氮化镓纳米柱阵列改进钛掩膜选择区生长(SAG), J. Cryst。增长311 (2009)2063-2068, https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2008.11.056.

[123] B.H. Le, S. Zhao, X. Liu, S.Y. Woo, G.A. Botton, Z. Mi, AlGaN 纳米线阵列的可控合并:一种无位差平面紫外光子器件的应用,硕士论文28 (2016)8446-8454,https://doi.org/10.1002/adma.201602645。

[赵s., 王r., 朱s., 米中。iii. 氨化纳米线的分子束外延:从深紫外光发射器和microled 到人工光合作用的新兴应用, IEEE 纳米技术杂志13 (2019)6-16,https://doi.org/10.1109/MNANO.2019.2891370]。

[125]王荣。罗元武,赵,H.P.T. Nguyen, I. Shih, z.mi,可调谐全彩色纳米线光发射二极管阵列集成在硅和蓝宝石上,in:氮化镓材料和器件XI.国际光学与光子

[125] 主宋。夕元武, 起, H.P.I. Nguyen, I. Shin, Zmi, 可调管主彩巴纳禾线元发射二极管阵列集成在硅和监玉右上, in:数化镓材料和器件AI 学, 2016,97481S, https://doi.org/10.1117/12.2213741.
 [12] 刘建华, 张建华, 等。氮化镓纳米线发光二极管与场效应晶体管的集成与研究, 中国电子工程出版社。Device Lett. 40 (2019) 427-430, https://doi.org/10.1109/LED.2019.2895846。
 [127] An S.J., Hong Y.J., g.c.-c。咦,Y.-J。李d.k., 高质量GaN 薄膜在自组装亚micro米硅球表面的异质外延生长, 硕士论文18 (2006)2833-

2836,https://doi.org/10.1002/adma.200601628。

[128]洪依俊, 柳依俊, y.o - j。Doh, S.H. Kang, k.j。江, 金, 李, K.H. Oh, g.e。李志伟,利用不同基板晶体平面的 ZnO 纳米结构的外延生长模式。Chem. 19 (2009) 941-947, https://doi.org/10.1039/B816034A。

[129]龚中,刘,陶,马祖柏,谢,胡,陈,张,潘,郝,黄绿色和琥珀micro像素化InGaN发光二极管的电学、光谱和光学性能,半圆。科学。Technol.27 (2011),015003,https://doi.org/10.1088/0268-1242/27/1/015003。

[13]王庆,王涛,应力弛豫对复合量子阱纳米棒光学性能的影响,物理学报。达成。Phys. 44 (2011), 395102, https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/39。

[132]研究。李,学术界。倪,彭译葶。陈,通过集成印迹增强gan基发光二极管的光提取机制 光学快车18 (2010)A489-A498, https://doi.org/10.1364/OE.18.00A489。

[133] R 科斯特, D 赛格, w.a. Quitsch, O. Pfingsten, A. Poloczek, S. Blumenthal, G. Keller, W. Prost, G. Bacher, F.-J。Tegude, 高速GaN/GaInN 纳米线阵列硅上发光 二极管(111), Nano Lett. 15 (2015) 2318-2323, https://doi.org/10.1021/nl504447j。

[134] T. Takeuchi, S. Sota, M. Katsuragawa, M. Komori, H. Takeuchi, H. Amano, I. Akasaki, GaInN 应变量子井中压电场的量子受限斯塔克效应, Jpn。j:。Phys. 36 (1997) L382, https://doi.org/10.1143/jjap.36.1382

[13]刘建华,刘建华,等。量子阱中载流子的研究进展[j].电子科学与工程,2005,11(3):533-533。物理。92 (2002)3071-3074,https://doi.org/10.1063/1.1502186。 [136] P. Lefebvre, J. All?张建民,张建民,张建民,等。时间分辨光致发光在GaN-(GaAl)N量子阱内电场探测中的应用。Rev. B 59 (1999) 15363,

https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.15363。 [13]刘志军,刘志军,刘志军,刘志军,刘志军,等,等。氮化镓/铝中压电场对振子强度的影响x遗传算法1.xN量子阱,物理。Rev. b57 (1998) R9435, https://doi.org/10.1103/PhysRevB.57.R9435。

[138]陈正荣,陈正荣。沈,吴,张志勇。廖,L.-F。陈,J.-R。周,张炳扬。李,学术界。林,c c。林,C.-W。谢尔,P.-T。李,a.j。赵,陈, h - c。全彩色单片混合量子点纳米 micro 发光二极管,利用原子层沉积和无辐射共振能量转移,光子,提高效率。Res. 7 (2019) 416-422, https://doi.org/10.1364/PRJ.7.000416。

[M. Achermann, M. a. Petruska, S. Kos, D.L. Smith, D.D. Koleske, V.I. Klimov,利用外延量子阱的半导体纳米晶体能量转移泵送,《自然》429 (2004)642-646,https://doi.org/10.1038/nature02571]。

[M.S. Wong, D. Hwang, A.I. Alhassan, C. Lee, R. Ley, S. Nakamura, S.P. DenBaars,利用原子层沉积的侧壁passivation研究iii -氮化物micro发光二极管的高效 率,光学表达26 (2018)21324-21331,https://doi.org/10.1364/OE.26.021324]。

[141] F. Olivier, S. Tirano, L. Dupr?王建民,王建民,王建民,军。 尺寸减小对gan 基micro发光二极管性能的影响。北京:中国电子科技大学学报,2016.09.052。 [1]刘建民,刘建民,刘建民,刘建民,等。基于激光技术的高速率等离子体发光二极管组装技术[j].电子科学与工程学报,2006,第3卷,第3期,第3卷,第3期。 [143] A. Carlson, A.M.鲍文,黄玉英, R.G. Nuzzo, J.A.罗杰斯,材料组装和micro/纳米器件制造转移印刷技术,硕士论文24 (2012)5284-

5318,https://doi.org/10.1002/adma.201201386.

https://doi.org/10.1073/pnas.1005828107。

[145]白、杨宏华、与友义、陈宏华、申、刘、杨齐、Kandela、Liu Z. - k。Kang, c. c Wei, c.r Haney, A. Brikha, X. Ge, X. Feng, P.V. Braun, Huang, W. Zhou, J.A. Rogers, 柔性瞬态光波导和单晶硅表面波生物传感器,硕士论文 30 (2018), 1801584,https://doi.org/10.1002/adma.201801584。

[146] h。胡,张国强, A. Bibl,带稳定柱的micro型装置:美国专利9209348 [P]。12/08/2015。

[147] A.N.金特, s.m。界面粘接、能量耗散与粘接之研究,清华大学。科学。B 变异较大。Phys. 32 (1994) 1543-1555, https://doi.org/10.1002/polb.1994.090320826

[148] K.-H.。蔡.K.-S。金氏粘滑在薄膜剥离试验 i。90 剥离试验, Int. J. Solid Struct. 30 (1993) 1789-1806, https://doi.org/10.1016/0020-7683(93) 90234-X。 [149] K.-S。金志强,薄膜粘着性剥离试验的弹塑性分析,金志强。板牙。Technol. 110 (1988) 266-273, https://doi.org/10.1115/1.3226047。

[150] k•r•舒尔,d•安,w.l.陈志明,陈志明,陈志明,莱性材料轴对称粘接试验,国立中山大学机械工程研究所硕士论文。化学。Phys. 199 (1998) 489 - 511, https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3935(19980401)199: 489::AID-MACP489>3.0.CO;2-A。

[151] A. Carlson, S. Wang, P. Elvikis, P.M.用转移印刷技术进行确定性装配的具有可调附着力的主动可编程弹性表面。脱线22 (2012)4476-4484,https://doi.org/10.1002/adfm.201201023。

[152] A.J. Trindade, 氮化基发光二极管的转移印刷,斯特拉思克莱德大学,2015。

. [153] Ko, M.P. Stoykovich, J. Song, V. Malyarchuk, W.M. Choi, C.-J.。余, J.B. Geddes Iii, 肖, 王, 黄, J.A.罗杰斯, 基于可压缩硅光电子学的半球形电子眼摄像机, Nature 454 (2008) 748, https://doi.org/10.1038/nature07113.

[15]刘志军,刘志军,刘志军,韩。基于准分子激光的金属薄膜沉积研究[j].北京:科学出版社,2002。Phys. 60 (1986) 1538-1539, https://doi.org/10.1063/1.337287。

[5]杨玉玲,杨玉玲,杨玉玲,等。硅的热膨胀系数与晶格参数的精确测定[j].北京:科学出版社,2002。Phys. 56 (1984) 314-320, https://doi.org/10.1063/1.333965。

[J.E. Mark, H.R. Allcock, H.R. Allcock, R. West, 无机聚合物,第二版,牛津大学出版社,组约,2005。] [5]王建平,张建平,等。金属薄膜的制备与性能研究[m].北京:科学出版社,2002。Lond。——爵士。一个包含。人民行动党。一个数学。理论物理。字符82 (1909)172-175,https://doi.org/10.1098/rspa.1909.0021。

[L.B. Freund, S. Suresh, 薄膜材料:应力、缺陷形成和表面演化,剑桥大学出版社,伦敦, 2004]。

[161]裴s., Kim H., Lee Y., Xu X., j.s. - s。朴奕义,郑, J. Balakrishnan, T. Lei, Kim H.R., Song y.i.i, y.- j。Kim, K.S. Kim, B.€ Ozvilmaz, j.h。安宝宏, S. lijima, 透明电极用30英寸石墨烯薄膜的卷对卷生产,纳米技术5 (2010)574,https://doi.org/10.1038/nnano.2010.132。

[162] M.H.李:Lim D.J. Ruebusch a 卷 r 李 r · Kapadia T.J. Scok, k.武井 K.Y. 曹z 粉丝,h. 张成泽 m. 吴 g. 赵 a · 贾维精密卷绕对位阳极化和腐蚀铝箔的高通量表面 nanotexturing 纳米列托人。11(2011)3425 - 3430 年,https://doi.org/10.1021/nl201862d。

[163]塔瓦雷斯,克耶斯特拉普-汉森,h-g。《有机纳米纤维的高效滚动转移技术》,小7(2011)2460-2463,https://doi.org/10.1002/smll.201100660。 [164]杨,黄禹锡,赵焕明, J.-H。歌,S.-J。Park, J.A. Rogers, H.C. Ko,利用平面和滚轴型邮票在悬浮配置中形成的用于确定性装配的硅micro/纳米结构阵列, Small 7 (2011) 484-491, https://doi.org/10.1002/smll.201001633。

[165]研究所。Park, S. Biswas, J. Fang, M. Mozafari, T. Stauden, H.O. Jacobs,使用辊对辊流体自组装和分层制造的毫米薄橡胶状固体照明模块, adv.mater. 27 (2015) 3661-3668, https://doi.org/10.1002/adma.201500839

[166]杨s.y., A. Carlson, H. Cheng, Q. Yu, N. Ahmed, J. Wu, S. Kim, M. Sitti, P.M.黄耀辉, J.A.罗杰斯,弹性材料表面的定向粘附强度及其在连续辊对辊转移印花中的 应用,硕士论文,24 (2012)2117-2122,https://doi.org/10.1002/adma.201104975.

[17]刘志军,刘志军,刘志军,等,刘志军,等,为志军,等,等。外延发射过程内固有横向蚀刻速率的研究[j].北京:科学出版社,2001。理论物理。a79 (2004) 1801-1807, https://doi.org/10.1007/s00339-003-2100-1。

[J. Lee, J. Wu, M. Shi, J. Yoon, S.I. Park, M. Li, Z. Liu, Y. Huang, J. a. Rogers, 可伸缩神化镓光伏光电设计, vol. 23 (2011) 986-991, https://doi.org/10.1002/adma.201003961.

[17]陈志军,陈志军,等。半导体薄粒的非接触选择性激光辅助置位技术,电子工程学报。Compon。Packag。Manuf. Technol. 2 (2012) 971-978, https://doi.org/10.1109/TCPMT.2012.2183594。

[171] K. Tomoda, 设备转移方法和显示设备制造方法:美国专利12/647826 [P]。07/29/2010。

[172] A. Bibl, J.A. Higginson, h.f. s. Law, H.-H。胡, micro 型装置的转移方法:美国专利8333860 [P]。12/18/2012。

[173] A. Bibl, J.A. Higginson, h.f. s. Law, h.h.h。Hu. microled 转移头加热器总成及转移 microled 的方法:美国专利 8349116 [P]。01/08/2013。 A. Bibl, D. Golda,柔性接触micro 拾音器阵列:美国专利9136161 [P]。09/15/2015。

[175] h。Hu, A. Bibl, 含牺牲释放层和分段腔的稳定结构:美国专利9166114 [P]。10/20/2015。

[176] K.V. Sakariya, A. Bibl, H.-H.。Hu, 带地线的有源矩阵显示面板:美国专利9559142 [P]。01/31/2017。 A. Bibl, D. Golda,集成电极引线的柔性micro器件转移头:美国专利8791530 [P]。07/29/2014。

[178] D. Golda, J.A. Higginson, A. Bibl, P.A. Parks, S.P. Bathurst, 集成位移传感器micro 拾取阵列安装:美国专利9095980 [P]。08/04 / 2015。

[179] L.-Y。陈,H.-W。李国强,半导体结构转移方法:美国专利9722134 [P]。08/01/2017。

[180] H.O. Jacobs,表面自组装方法:美国专利7774929 [P]。08/17/2010。

[J.J. Jacobsen, G.W. Gengel, G.S.W. Craig, 多模块组件的制造方法:美国专利6316278 [P]。11/13/2001。

[182]舒尔(P.J. Schuele),佐佐木(k.s Sasaki),乌尔默(k.l Ulmer), j-j。表面安装发射元件显示器:美国专利15/410001 [P]。05/11/2017。

[183] J.J. Daniels, G.V. Nelson, 固体发光片和封装裸模半导体电路电气绝缘体:美国专利7952107 [P]。05/31 / 2011。

[184] S. Kim, E. Saeedi, B. Amirparviz, micro 流体阱元件的自组装:美国专利7874474 [P]。01/25/2011。

[j] J. Lee, V.C. Sundar, J.R. Heine, M.G. Bawendi, K.F. Jensen, II-VI 半导体量子点聚合物复合材料的全彩色发射, m.d. 12 (2000) 1102 - 1105, https://doi.org/10.1002/1521-4095(200008)12:15<1102::AID-ADMA1102>3.0.CO;2-J。

[H. Song, S. Lee, 光致发光(CdSe) ZnS 量子点-聚甲基丙烯酸甲酯聚合物复合薄膜在可见光谱范围,纳米技术18 (2007), 055402,https://doi.org/10.1088/0957-

4484/18/5/055402]。 [187]龚、古、金、马苏柏、吉尔哈贝特、张宏宇、道森、V. Poher、肯尼迪、法兰奇、Neil,高效倒装芯片micro像素化发光二极管阵列:micro显示器和颜色转换 的潜在应用,J.物理学。达成。Phys. 41 (2008), 094002, https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/9/094002。

[188]陈宏,贺建民, s.t.t。吴,量子点增强液晶显示器的最新进展,IEEE J. Sel。上面。电子数据。23 (2017)1-11,https://doi.org/ 10.1109/JSTQE.2017.2649466。

[189] J.-T。哦,S.-Y。李,Y.-T。文, 文振辉, 朴正熙, 洪锦宣, 朱锦耀, 吴志强。垫片,h。宋,J.-O。Song H. Amano, T.-Y。宋永明, 基于红藻的不同芯片几何结构的 发光二极管的光输出性能, 光学表达26 (2018)11194-11200,https://doi.org/10.1364/OE.26.011194。

[包x,梁振英,王文伟,田,秦,陆建军,海藻基micro发射二极管阵列器件的设计与制造,光学激光器。]Technol. 78 (2016) 34-41, https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.016。

[11]王建民,王建民,等。表面复合对三氮化发光二极管效率的影响。电子科学与工程。Status Solidi Rapid Res. Lett. 10 (2016) 480-484. https://doi.org/10.1002/pssr.201600059。

[192] j.k Han, J.I. Choi, A. Piquette, M. Hannah, M. Anc, M. Galvez, J.B. Talbot, J. McKittrick, 近紫外LED 固态照明荧光体开发与集成, ECS 固态科学与技术杂志2 (2013)R3138-R3147, https://doi.org/10.1149/2.014302jss.

[22]谢宝光,胡瑞平,罗新霞,量子点转换发光二极管封装技术,电子学报,2005.12(1):533-533。(2016),https://doi.org/10.1115/1.4033143。

[194] Jung T. Jung, Choi J.H., Jang S.H., Han S.J., micro 显示器应用中的micro 发光二极管技术综述,发表于:SID 技术论文文摘,Wiley 在线图书馆, 2019, pp. 442-446, https://doi.org/10.1002/sdtp.12951.

[195]华盛顿特区。陈,Z.-G。刘,Z.-H。邓,王志强,余志刚。曹,Q.-L。Liu,白色发光二极管混合磷光颗粒尺寸的光效和角色均匀性优化,Rare Met, 33 (2014) 348-352, https://doi.org/10.1007/s12598-013-0216-9。

下一代led 荧光粉材料, Nat. Mater. 13 (2014) 891-896, https://doi.org/10.1038/nmat4012。

[197] G.-S。陈.B.-Y。魏.C.-T。李.H.-Y。李兆祥,带HBR和DBR结构的单片红、绿、蓝micro发光二极管,IEEE光子学。抛光工艺。Lett. 30 (2017) 262-265, https://doi.org/10.1109/LPT.2017.2786737。 [12]刘振华,刘振华,等。固体发光材料的研究进展[]].北京科学出版社,2002。陶瓷。Soc. 97 (2014) 1327-1352, https://doi.org/10.1111/jace.12943。

[199] Y. Shirasaki, G.J. Supran, M.G. Bawendi, V. Bulovi?[1]陈志军,胶体量子点发光技术的研究,光子学报,7(2013)13-23,https:// doi.org/10.1038/nphoton.2012.328.

[5]刘建民,刘建民,刘建民,等,等。量子点生物偶联技术的研究进展[j] 生物工程学报,2003 (3),(1):435-446,http://http://doi.org/10.1038 /nmat1390。

[5]刘志军,刘志军,刘志军,刘志军,刘志军,等,等。超阈值光子泵浦和双光子泵浦蓝发射胶体量子点膜光学增益介质的研究,清华大学学报,2002。化学。5 (2014) 2214-2218, https://doi.org/10.1021/jz500726h。

[202] H.-V。汉族.cc。林.杨绍明。关铭蔡.H.-C。陈.K.-J。陈.杨绍明。关铭叶,W.-Y。林.H.-C。郭,余,一种基于胶体量子点敏化的高效混合砷化镓太阳能电池, Sci。众议员 4 (2014)5734,https://doi.org/10.1038/srep05734。

[13]刘欣欣,张文武,刘瑞平,郑丽玲,郭瑞平,田平。用于可见光通信的microled 与钙钛矿量子点的高带宽白光系统,ACS应用学报。板牙。接口10 (2018)5641-5648,https://doi.org/10.1021/acsami.7b17810.

[陈平, 付元英, r.a Aminirad, Wang, Zhang, Wang, K. Galatsis, Zhou. C., 全打印分离碳纳米管薄膜晶体管电路及其在有机发光二极管控制中的应用, Nano Lett. 11 (2011) 5301-5308, https://doi.org/10.1021/nl202765b.

[205] M. Singh, H.M. Haverinen, P. Dhagat, G.E. Jabbour, 喷墨印刷工艺及其应用,硕士论文22 (2010)673-685,https://doi.org/10.1002/adma.200901141

[207]刘r.,丁海辉,林J.,沈F.,崔中,张T.,气溶胶喷印法制备铂装饰单壁碳纳米管氢传感器,纳米技术23 (2012), 505301,https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/50/505301。

[208]杨,张磊,康德杰,R.Strahl,T.Kraus,量子点发光micro二极管阵列的高分辨率喷墨打印,先进光学材料8 (2020), 1901429,https://doi.org/10.1002/adom.201901429。

[J.M. Hoey, A. Lutfurakhmanov, D.L. Schulz, I.S. Akhatov, aerosol 直写技术及其在micro 电子学中的应用综述,纳米技术杂志2012 (2012),

https://doi.org/10.1155/2012/324380。] [211]郭芳, E.-L.。项祥, 谭国强, y.f. 局域网,彭译葶。蔡.S.-T。吴, 使用漏斗管阵列的彩色转换microled 显示器光学效率的三倍, 晶体9 (2019)39,https://doi.org/10.3390/cryst9010039.

[212]王海华, k.s. 李, 黄永发。Ryu,学术界。在香港,中州。赵,利用光敏环氧树脂中分散的CdSe/ZnS量子点的主动封装方法实现的白光发光二极管,纳米技术 19 (2008), 145202,https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/14/145202。

[13]顾东华,张宏华,孙宏华,道森医学博士,A.R. Mackintosh, A.J.C. Kuehne, R.A. Pethrick, C. Belton, D.D.C. Bradley,利用光固化聚合物共混制备无机/有机 micro 结构发光二极管,应用研究。理论物理。网址:http://doi.org/10.1063/1.2431772。
 [214]金,李,李,林,江,甘micro 盘发光二极管,应用。理论物理。(2000) 631-633, https://doi.org/10.1063/1.125841。

[215] n. Laurand b. Guilhabert j. Mckendry A.E.凯利, b. Rae d. Massoubre z 锣, e. 顾r • 亨德森医学道森, 胶体量子点纳米复合材料对可见光波长调制光信号的转换,选择, 板牙。Express 2 (2012) 250-260, https://doi.org/10.1364/OME.2.000250。

[16]刘泽明,半导体晶片在液体毛细管作用下的键合,应用。理论物理。77 (2000) 651-653, https://doi.org/10.1063/1.127074。