文章编号:1000-7032(2021)06-0880-09

喷墨打印量子点墨水调控

郭标,穆兰,罗宇,李丹阳,王俊杰,李妙姿,彭俊彪* (华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室,广东广州 510641)

摘要:设计了环己基苯与十八烯的双溶剂量子点墨水体系,研究了具有 CdSe@ ZnS/ZnS 核/壳结构的绿光量 子点(QDs)成膜规律及其发光特性。设计的高沸点、低表面张力的十八烯和低沸点、高表面张力的环己基苯 所组成的双溶剂墨水体系增强了马兰戈尼流,减弱了量子点在像素坑边缘的沉积,实现了在像素坑中制备表 面平整的量子点薄膜。研制的分辨率为 240 PPI 的倒置结构顶发射绿光量子点阵列发光器件启亮电压 2.7 V,最高亮度 132 510 cd/m²,最大外量子效率 14.0%,为采用喷墨打印工艺制备高性能量子点电致发光点阵 器件提供了借鉴。

关 键 词:喷墨打印;墨水调控;量子点薄膜;倒置结构;量子点发光二极管 中图分类号:0482.31 **文献标识码:** A **DOI**: 10.37188/CJL.20210078

Ink Formulation of Quantum Dots in Ink Jet Printing

GUO Biao, MU Lan, LUO Yu, LI Dan-yang, WANG Jun-jie, LI Miao-zi, PENG Jun-biao*

(State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China) * Corresponding Author, E-mail: psjbpeng@scut.edu.cn

Abstract: In this paper, a two-solvent quantum dot ink system based on cyclohexylbenzene and octadecene was designed, and the film formation and luminescent properties of green quantum dots (QDs) with CdSe@ ZnS/ZnS core/shell structure were investigated. The double solvent ink designed with high boiling point, low surface tension of octadecene and high boiling point, low surface tension of cyclohexylbenzene benzene can enhance the Marangoni effect, weaken the quantum dots accumulation on the edge of the pixel pits, and uniform pixel QDs films were achieved. The green quantum dot array light-emitting device with upside-down and top-emitting structure was fabricated with the threshold voltage of 2.7 V, a maximum brightness of 132 510 cd/m² and a maximum external quantum efficiency of 14.0%. The results may provide a reference for the preparation of highperformance QD-LEDs array by inkjet printing technology.

Key words: ink jet printing; ink formulation; quantum dot film; inverted structure; quantum dot light-emitting diodes

1引言

量子点(QDs)具有稳定性好、发射峰窄、发光 效率高、可通过改变量子点尺寸调节发射颜色等 优点,在显示和照明领域呈现出巨大的应用潜力^[14]。随着材料和制造工艺的发展,量子点发 光二极管(QLED)显示性能逐渐达到了应用水 平^[5-9]。彭笑刚课题组报道,在 QD 层和氧化物电

基金项目:国家自然科学基金(61574061);广东省科技计划(2015B090914003)资助项目

收稿日期: 2021-03-04: 修订日期: 2021-03-19

Supported by National Natural Science Foundation of China(61574061); Science and Technology Project of Guangdong Province (2015B090914003)

子输运层之间插入绝缘层聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA),制备的红色 QLED 的外量子效率 (EQE)达到20.5%^[6]。钱磊课题组制备的红光、 绿光和蓝光 QLED 的 EQE 均高于 10%^[10]。然 而,上述报道的 QLED 器件均采用旋涂工艺制备, 难以实现红、绿、蓝(RGB)图案化结构,限制了量 子点在显示领域的应用^[11-14]。喷墨打印技术是 一种无需高精度掩模版、材料利用率高、可图案化 并且可兼容大尺寸显示器件的溶液加工技术,可 能成为 QLED 显示量产技术的首选途径^[15-18]。

利用喷墨打印制备高性能 QLED,墨水配制 对提高器件发光性能至关重要,喷墨打印墨水不 仅需要满足可打印性,还要保证打印薄膜厚度的 均匀性和发光质量。咖啡环效应是墨滴干燥时常 见的薄膜不均匀现象,边缘高中心低的薄膜形貌 会导致器件发光不均匀,产生漏电流,降低器件的 发光效率。一般情况下,咖啡环问题可通过调整 墨水组成解决,以获得厚度均匀平整的薄 膜^[19-22]。Moon 等^[23]采用高沸点、低表面张力的 乙二醇与低沸点、高表面张力的水共混作为纳米 银颗粒的墨水溶剂,产生自外向内的马兰戈尼流, 在平面基板上采用喷墨打印技术制备出厚度均匀 的纳米银线薄膜; Denneulin 等^[24]采用同样的墨 水配方,也打印出平整均匀的碳纳米管薄膜。 2016年,彭俊彪课题组^[25]报道了基于喷墨打印 技术制备的分辨率为120 PPI 的绿光 OLED,采用 邻二氯苯和环己基苯(CHB)作为量子点墨水的 复合溶剂,通过调整墨水的粘度和打印墨滴与基 板的接触角,制备了无咖啡环效应的量子点薄膜。 但是,由于聚醚酰亚胺(PEI)的引入,器件的起亮 电压高达 5.1 V,最大电流效率仅为 4.5 cd/A。 2017年, Liu 等^[26]采用癸烷和 CHB 作为量子点 墨水的复合溶剂,通过调整墨水粘度,使墨滴在干 燥过程中实现了三相线的滑移,消除了咖啡环,制 备的喷墨打印红光 QLED 器件电流效率为 4.4 cd/A。2019年, Yang 等^[27]报道了喷墨打印正装 结构的绿光 QLED 器件,采用正辛烷和 CHB 作为 量子点墨水的复合溶剂,同样制备了无咖啡环的 量子点薄膜,但器件最大电流效率为2.8 cd/A, 最大亮度3000 cd/m²。然而,上述文章中大部分 工作是在平面基板上研究量子点液滴成膜过程, 较少研究墨滴在像素结构中干燥成膜过程,而且 器件的性能比较低,与实际应用的需要相差甚远。

喷墨打印器件的结构设计对打印器件性能影 响巨大。对于倒置结构的器件,电子传输层氧化 锌(ZnO)位于量子点的下层,通常量子点溶剂不 能溶解 ZnO,具有较好的溶剂正交性,容易制备高 质量的发光量子点与电子传输层薄膜。但是,在 正装结构的器件中,空穴传输层位于量子点的下 层,常用的空穴传输层材料,如聚「双(4-苯基) (4-丁基苯基) 胺](Poly-TPD) 或聚[9,9-二辛基 芴-CO-N-(4-丁基苯基)二苯胺](TFB)等,容易 被量子点墨水侵蚀,导致空穴传输层薄膜质量变 差,甚至还会导致器件漏电流严重。Haverinen 等 采用正装器件结构,在 Poly-TPD 薄膜上采用喷墨 打印工艺制备量子点薄膜,得到的器件最高亮度 为 381 cd/m², EQE 为 0. 19%^[28]。器件性能较低 的原因是量子点墨水溶剂氯苯会溶解下层的 Poly-TPD,使空穴传输层与量子点层界面出现一定 程度的共混,从而影响了器件性能。为了解决这 个问题,Sun 等^[29]将 TFB 进行交联反应,提高了 TFB 的耐溶剂性,最终制备的正装打印量子点 器件性能有所提高,但是交联的 TFB 溶解度降 低,增大了溶液粘度,增加了打印的难度。2016 年,韩国首尔大学的 Lee 等^[30]报道了喷墨打印 工艺制备倒置红光 QLED, 电子传输层 ZnO 与量 子点墨水实现正交,从而避免了量子点墨水侵 蚀下层薄膜的问题:但是由于打印的量子点薄 膜形貌较差,器件最大电流效率仅为0.29 cd/ A。此外,由于顶发射器件结构存在微腔效应, 在一定程度上可以提高光取出效率,这样器件 的外量子效率会得到较大的提升[31-32]。因此, 本文采用倒装顶发射器件结构,利用喷墨打印 工艺研制高性能 QLED 点阵器件,获得了高性能 量子点阵列发光器件,为研制高性能彩色量子 点发光显示器件提供了参考。

2 实 验

2.1 实验材料与仪器

实验材料:ZnO 溶液购于广东普加福光电科 技有限公司,吸收边 350 nm,粒径3~5 nm。 CHB、1-十八烯(ODE)、正辛烷试剂购于 Sigma-Aldrich 公司。绿光量子点购于嘉兴纳鼎光电科 技有限公司。240 PPI 分辨率的像素结构基板由 广州新视界光电科技有限公司提供,基板的绝缘 隔离材料(像素定义层:PDL)高度约1.5 μm,有 效发光面积 8 mm × 11 mm, 子像素排列如图 1 所示。



- 图 1 240 PPI 分辨率像素结构基板示意图。(a)单个像 素平面尺寸图;(b)窄边方向截面图。
- Fig. 1 Schematic diagram of pixel structure substrate with 240 PPI resolution. (a) Planar dimensions of individual pixels. (b) Cross-section in the direction of narrow edges.

仪器设备:喷墨打印机是美国 MicroFab 公司 的 JetLab II,打印喷嘴内径 20 μm;小分子有机金 属蒸镀设备为 Anstrom Engineering 的蒸镀仪器。

测试仪器:台阶仪,Canon 光学显微镜,CS200 亮度采集-Keithley2400 电源联用电学光学测试系 统,3M 测试夹。

2.2 量子点墨水配制

将溶剂为正辛烷的绿光量子点在真空中抽干成粉末状,分散在混合溶剂(CHB与ODE)中,量子点墨水浓度为30 mg/mL。

2.3 器件制备

基板清洗:ITO/Ag/ITO 玻璃作为阳极基板, 先后用异丙醇、洗涤剂、去离子水和异丙醇超声清 洗 10 min;另外一种带像素结构的 PDL 基板采用 去离子水超声清洗 10 min,然后将基板放置于 70 ℃电烘箱中烘干 2 h,除去多余液体,供下一步 使用。

电子传输层制备:采用 ZnO 作为电子传输 层,因为 ZnO 具有较好的电子迁移率、与量子点 能级结构相匹配以及较好的耐溶剂性能。普通 ITO 基板采用旋涂工艺制备,ZnO 溶液浓度为 20 mg/mL,旋涂转速为 3 000 r/min,旋涂时间为 30 s,120 ℃ 退火 15 min;带有像素结构基板的 ZnO 层也采用旋涂方法制备,由于其具有疏水性,所以 ZnO 溶液浓度增加为 30 mg/mL,旋涂转速为 2 000 r/min,旋涂时间为 30 s,120 ℃退火 15 min。 两者 ZnO 薄膜厚度均为 40 nm 左右。

发光层制备:普通 ITO 基板的发光层采用旋 涂工艺制备,量子点浓度为 15 mg/mL,旋涂转速 为 3 000 r/min,旋涂时间为 30 s,120 ℃ 退火 15 min;带有像素结构基板采用喷墨打印工艺制备, 量子点墨水浓度为 30 mg/mL,打印完成后真空干 燥 30 min,然后再经过 120 ℃ 退火 15 min。两者 量子点薄膜厚度均为 15 nm 左右。

其他功能层制备:其他功能层采用真空蒸镀 工艺制备。首先蒸镀 40 nm 具有良好空穴迁移率 的三(4-咔唑-9-基苯基)胺(TCTA)作为空穴传输 层;再蒸镀 8 nm 的氧化钼(MoO_x),促进载流子的 注入;最后蒸镀 20 nm 的 Ag,保证电极具有良好 的导电性和较高的透光率。

每个器件的发光面积为 0.1 cm²。器件工作时,ITO 接 阴极,Ag 接 阳极,电子从 ITO 注入 ZnO;然后经过 ZnO 层到达量子点发光层,同时空 穴通过阳极进入空穴注入层 MoO_x;之后经过空穴 传输层 TCTA 到达量子点发光层,与电子结合形 成激子;激子以辐射跃迁的形式回到基态并发光。 器件结构如图 2 所示。



图 2 器件结构图 Fig. 2 Device structure diagram

3 结果与讨论

3.1 墨水配制对量子点薄膜形貌的影响

量子点层的厚度对 QLED 性能的影响较大, 平面上成膜质量一般用咖啡环因子来判断,即薄 膜中心厚度与边缘厚度的比值,越接近于1则说 明薄膜咖啡环效应越弱,形貌越好。但是,这种方 法只比较了边缘厚度和中间厚度,无法判断整个 薄膜形貌好坏。

在像素发光器件中,常会看到只有中心区域 发光、而边缘发光较弱或者不发光的情况,这是因 为 QLED 对量子点厚度具有敏感性,量子点层厚 度细微的变化都会导致器件发光面积的变化,因此这里定义一个在像素结构中判断量子点薄膜形貌的方法。如图3所示,薄膜中心10%宽度范围内的厚度定义为薄膜的中心厚度h,中心厚度h±20%的厚度区域的宽度为有效宽度W,有效宽度W越大则说明量子点薄膜的平整性越好,边缘堆积的量子点越少;定义像素结构中薄膜的均匀性



图 3 量子点薄膜形貌示意图



为有效宽度 W 与像素坑宽度的比值,该值越接近于1则说明量子点薄膜越平整。

图 4 为量子点复合溶剂中 CHB 的含量分别 为 100%、90%、80%、70%、60% 时,打印的量子 点薄膜短轴台阶仪扫描图,其基底为旋涂了 ZnO 的 240 PPI 分辨率的像素基板。如图所示,采用 单一 CHB 溶剂的量子点墨水成膜会出现明显的 边缘堆积现象,大量的量子点都沉积在像素坑的 边缘墙壁上,而薄膜中部的量子点则很少。随着 墨水中 ODE 含量的增加,薄膜的形貌有所改善, 边缘堆积减弱,薄膜变得平整。当 CHB: ODE = 7:3时,薄膜的形貌达到最平整的状态。当墨水中 ODE 的含量继续增加时,CHB: ODE = 6:4,边缘 堆积现象同样被抑制,但是中心区域开始出现突 起,量子点开始趋向于在中心区域沉积。





从表1可知,当CHB:ODE = 10:0时,量子点 薄膜的中心厚度最薄,只有11.9 nm,中心厚度± 20%的薄膜宽度也只有10.3 μm,像素坑底部总 宽度为23 μm,计算得到均匀的部分为45%。此 时量子点薄膜的边缘堆积严重,薄膜中心沉积的 量子点较少,中心厚度较薄,量子点薄膜呈现中间 薄两边厚的状态。随着墨水体系中ODE 含量的 增加,中心厚度逐渐增加,有效宽度增加,边缘堆 积现象被抑制,量子点被带到边缘的数量减少,量 子点薄膜厚度的均匀性变好。当 CHB: ODE = 7:3 时,量子点薄膜的有效宽度达到最大的 21.7 μm,均匀性达到 94%。当 CHB: ODE = 6:4时,量子点薄膜由于中心突起,均匀性有所降低。

量子点的成膜形貌与墨水配方密切相关。与 平面上成膜容易产生咖啡环类似,在像素结构中 量子点容易形成边缘堆积的薄膜形貌。为了使量 子点从边缘迁移到像素坑中心,需要增大液滴内 部自外而内的马兰戈尼流。

表1 不同 CHB 含量墨水打印的量子点薄膜形貌参数

Tab. 1 Morphology parameters of quantum dot films printed by inks with different CHB contents

墨水配比	中心厚度 h/nm	有效宽度 W/μm	均匀性
CHB: ODE = 10: 0	12.0	10.3	45%
CHB: ODE = $9:1$	12.8	14.2	62%
CHB: ODE = $8:2$	14.5	18.0	85%
CHB: ODE = $7:3$	15.6	21.7	94%
CHB: ODE = 6:4	17.3	21.5	86%

表 2 为 CHB 和 ODE 的沸点、表面张力等物 理参数,在选择量子点溶剂时,利用了双溶剂体系 增强马兰戈尼流的基本原理。CHB 是一种沸点 较低、表面张力较高的溶剂,而 ODE 则是沸点高、 表面张力低的溶剂,可以有效地增强自外而内的 马兰戈尼流;同时两种溶剂的粘度都较低,并且 对量子点都有较好的溶解性。

表 2 CHB 和 ODE 的沸点、表面张力等物理参数 Tab. 2 Boiling point, surface tension and other physical pa-

rameters of CHB and ODE

溶剂	沸点⁄ ℃	表面张力/ (mN・m ⁻¹)	粘度/ cP	密度/ (g・mL ⁻¹)
CHB	238	34.5	3.14	0.95
ODE	314	28.1	3.60	0.79

从图 5 可知,不同比例量子点墨水的粘度和 表面张力都在一个合适的范围内,具有良好的可 打印性。随着 ODE 含量的增加,混合溶剂的表面 张力逐渐降低,粘度逐渐增大。墨水在 ZnO 上的 接触角一直都很小,这说明量子点液滴在 ZnO 上 有良好的浸润性。



图 5 不同比例墨水的表面张力、粘度和在 ZnO 上的接触角。

Fig. 5 Surface tension, viscosity and contact angle on ZnO of different proportions of inks.

墨滴的铺展状态如图 6(a)所示,可以根据杨 氏方程描述固-液-气三相界面之间关系, $\sigma_{LV}\cos\theta = \sigma_{SV} - \sigma_{SL}$,这里 $\sigma_{LV}, \sigma_{SV}, \sigma_{SL}$ 分别是液体-固体、固 体-气体、固体-液体表面张力,根据测得的墨水在 ZnO 衬底上的接触角 $\theta = 5^{\circ}$ 可知,量子点墨水在 ZnO 衬底上具有非常好的浸润性。图 6(b)为量 子点墨水在像素结构的基板上铺展的示意图,由 于器件第一层的 ZnO 是通过旋涂方法制备,导致 像素坑壁上附着了 ZnO 层。根据上述的杨式方 程,液滴在落入像素坑后,液滴边缘在三种表面张 力的合力作用下,沿着隔离柱向上移动,由于 ZnO 对于量子点墨水具有良好的浸润性,最终形成的 平衡状态为很严重的下凹液面。



图 6 量子点墨水在 ZnO 衬底上的接触角示意图。(a) 墨水在平坦 ZnO 衬底上的接触角示意图;(b)墨水 在旋涂了 ZnO 的像素坑基板接触角示意图。

随着液滴的干燥,边缘溶剂的挥发速度比中 心的要快,附着在墙壁上的液体挥发量比中心要 多,为了维持凹液面的平衡状态,中心的液体不断 向边缘补充,形成了从中心到边缘的毛细流动。 大量的量子点被带到边缘处沉积,形成了严重的 边缘堆积现象。

本文采用的复合溶剂体系中, CHB 是低沸 点、高表面张力溶剂, ODE 是高沸点、低表面张力 溶剂。在液滴干燥过程中, 边缘的液滴挥发速度

Fig. 6 Schematic diagram of contact angle of quantum dot ink on ZnO substrate. (a)Schematic diagram of contact angle of ink on flat ZnO substrate. (b)Schematic diagram of contact angle of pixel pit substrate with ink painted on ZnO.

比中心要快,边缘低沸点的 CHB 挥发较多,ODE 相对含量上升,此时与中心相比,边缘液体表面张 力较小,形成了表面张力梯度,产生了自边缘向中 心的马兰戈尼流,将溶质从边缘带到了中心,缓解 了液滴干燥过程中的边缘堆积现象。马兰戈尼流 与毛细流的方向如图 7 所示。当增加墨水中 ODE 含量时,马兰戈尼流效应增强,更多的量子 点被带到像素坑的中心沉积,边缘堆积的量子点 减少,从而形成的量子点薄膜均匀性越好。但是 当 CHB: ODE = 6:4时,马兰戈尼流过强,中心的 量子点沉积过多导致薄膜中心突起,薄膜的均匀 性反而降低。



图 7 液滴在像素坑内的马兰戈尼流与毛细流方向示意图

Fig. 7 Diagram of Marangoni flow and capillary flow directions of droplet in the pixel pit

3.2 墨水配制对量子点发光器件的影响

量子点薄膜形貌会直接影响器件的电致发光性能,图8给出了不同比例墨水制备的打印器件在4V电压下的电致发光情况。当采用单一 CHB作为墨水打印的器件,其电致发光区域很小,窄边宽度只有10.8 μm。当在墨水中添加 10%的 ODE 时,量子点薄膜形貌变好,均匀性增



图 8 不同比例墨水打印的器件在 4 V 电压下的电致发 光图

Fig. 8 Diagram of EL emission driving at 4 V from the devices printed by using inks with different ODE proportions 大,电致发光宽度扩大到 14.8 μm。当墨水比例 达到 CHB: ODE = 7:3时,薄膜形貌最好,其电致 发光的宽度达到最大的 21.5 μm。当墨水比例达 到 CHB: ODE = 6:4时,量子点薄膜中心突起,均 匀性降低,发光宽度也降低到 18.1 μm。

从图9可知,量子点薄膜的有效宽度与器件 电致发光的宽度具有高度的一致性。因为在像素 结构中,QLED 对量子点厚度具有很强的敏感性, 一旦边缘区域比中心区域厚 20%,那么过厚的区 域在同样的驱动电压下发光变弱,甚至不发光,只 有量子点层在合适的厚度范围内 QLED 器件才会 发光。薄膜的有效宽度可以有效地反映器件的电 致发光质量,这种方法对我们判断薄膜均匀性和 电致发光情况具有重要的意义。



图 9 不同比例墨水打印成膜的有效宽度和实际电致发 光宽度对比数据图

Fig. 9 Comparison of effective width and actual EL emission width of printed films from inks with different proportions

图 10 为同比例墨水打印器件和旋涂器件的 J-V-L 曲线和 CE-J 曲线,表3 为不同比例墨水打 印器件和旋涂器件性能汇总表。从这些结果可 以看出,打印器件的效率与其墨水配方密切相 关。当采用单一 CHB 作为量子点溶剂时,薄膜 的均匀性较差,电致发光面积较小,器件电流效 率和 EQE 都偏低;当量子点墨水中 ODE 的含量 逐渐增多,量子点薄膜的均匀性逐渐提升,电致 发光面积变大,器件电流效率和 EQE 都会提高; 当 CHB: ODE = 7:3时,器件的性能达到最好,其 电流效率达到 58.4 cd/A, EQE 达到 14.0%,达 到了旋涂器件的 84.3%。表4 汇总了近几年来 喷墨打印像素结构的 QLED 器件性能,对比文献 报道,我们所制备的喷墨打印 QLED 器件性能有 明显的提升。



图 10 不同比例墨水打印器件和旋涂器件的电学特性曲线。(a) J-V-L 曲线;(b) CE-J 曲线。

Fig. 10 Electrical characteristics curves of printed devices and spin coated devices with different ink proportions. (a) *J-V-L* curve. (b) CE-*J* curve.

表 3 不同比例墨水打印器件和旋涂器件性能汇总

Tab. 3 Performance summary of ink printing devices and spin coating devices with different proportions

条件	$V_{\rm on}/{ m V}$	$L_{ m max}/$	CE _{max} /	FOF
		$(\mathrm{cd}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{m}^{-2})$	$(cd \cdot A^{-1})$	EQE _{max}
CHB 100%	2.8	56 154	29	7.0
CHB 90%	2.7	78 995	44	10.7
CHB 80%	2.7	84 022	50	12.1
CHB 70%	2.7	132 510	58	14.0
CHB 60%	2.8	95 519	47	11.3
旋涂	2.6	323 197	69	16.6

4 结 论

本文设计了 CHB 和 ODE 混合溶剂作为量子点 墨水,在具有像素结构的基板上采用喷墨打印工艺制 备了形貌良好、厚度均匀的量子点薄膜。通过对墨水 中 CHB 和 ODE 溶剂组分的优化,调控马兰戈尼流的 强度,使马兰戈尼流与毛细流达到平衡,像素坑中 QD 薄膜的边缘堆积现象被有效地抑制,打印制备的量子 点薄膜形貌均匀平整。在此基础上,研制的 240 PPI

表 4 喷墨打印像素结构 QLED 器件性能总结

Tab. 4	Performance summary of inkjet printing pixel s	truc
	ture QLED device	

发光峰/	分辨率/	CE_{max}	$L_{ m max}/$	nof
nm	PPI	$(cd \cdot A^{-1})$	$(\mathrm{cd}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{m}^{-2})$	rei
634	73	0.29	2 500	[30]
524	120	4.5	12 000	[25]
630	73	4.4	12 100	[26]
548	500	2.8	3 000	[27]
524	240	58.0	132 510	This work

分辨率的印刷倒置顶发射绿光 QLED 器件, 启亮 电压为 2.7 V, 最大亮度为 132 510 cd/m², 最大电 流效率为 58 cd/A, 最大 EQE 为 14.0%。这种墨 水配制方法对喷墨打印制备高分辨率、高亮度、高 效率彩色 QLED 显示屏具有一定的指导意义。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/ CJL.20210178.

参考文献:

- [1] YUAN Q L, WANG T, YU P L, et al. A review on the electroluminescence properties of quantum-dot light-emitting diodes
 [J]. Org. Electron., 2021,90:106086.
- [2] LIU Y F, DING T, CHEN X T, et al. . Highly conductive alkaline-earth metal electrodes: the possibility of maintaining both low work function and surface stability for organic electronics [J]. Adv. Opt. Mater., 2020,8(15):2000206.
- [3] WOOD V, BULOVIĆ V. Colloidal quantum dot light-emitting devices [J]. Nano Rev., 2010,1(1):5202-1-7.
- [4] SHIRASAKI Y, SUPRAN G J, BAWENDI M G, et al. . Emergence of colloidal quantum-dot light-emitting technologies
 [J]. Nat. Photonics, 2013,7(1):13-23.

- [5] COLVIN V L, ALIVISATOS A P, SCHLAMP M C. Light-emitting diodes made from cadmium selenide nanocrystals and a semiconducting polymer [J]. Nature, 1994,370(6488):354-357.
- [6] DAI X L,ZHANG Z X,JIN Y Z, et al. Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on quantum dots [J]. Nature, 2014,515(7525):96-99.
- [7] WANG O Y, WANG L, LI Z H, et al. . High-efficiency, deep blue ZnCdS/Cd_xZn_{1-x}S/ZnS quantum-dot-light-emitting devices with an EQE exceeding 18% [J]. Nanoscale, 2018,10(12):5650-5657.
- [8] ACHARYA K P, TITOV A, HYVONEN J, et al.. High efficiency quantum dot light emitting diodes from positive aging [J]. Nanoscale, 2017,9(38):14451-14457.
- [9] CAO W R, XIANG C Y, YANG Y X, et al. Highly stable QLEDs with improved hole injection via quantum dot structure tailoring [J]. Nat. Commun., 2018,9(1):2608-1-6.
- [10] YANG Y X, ZHENG Y, CAO W R, et al. . High-efficiency light-emitting devices based on quantum dots with tailored nanostructures [J]. Nat. Photonics, 2015,9(4):259-266.
- [11] MANDERS J R, HYVONEN J, TITOV A, et al. 48-1: invited paper. High efficiency and ultra-wide color gamut quantum dot LEDs for next generation displays [J]. SID Symp. Dig. Tech. Pap., 2016,47(1):644-647.
- [12] XIANG C Y, CAO W R, YANG Y X, et al. The dawn of QLED for the FPD industry [J]. Inf. Disp., 2018, 34(6): 14-17.
- [13] QIAN L, YANG Y X, CAO W R, et al. 6-2: Invited paper. Key challenges towards the commercialization of quantum-dot light-emitting diodes [J]. SID Symp. Dig. Tech. Pap., 2017,48(1):55-57.
- [14] KIM L, ANIKEEVA P O, COE-SULLIVAN S A, et al. Contact printing of quantum dot light-emitting devices [J]. Nano Lett., 2008,8(12):4513-4517.
- [15] KIM T H, CHO K S, LEE E K, et al. Full-colour quantum dot displays fabricated by transfer printing [J]. Nat. Photonics, 2011,5(3):176-182.
- [16] CHO H, KWAK J, LIM J, et al. Soft contact transplanted nanocrystal quantum dots for light-emitting diodes: effect of surface energy on device performance [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2015,7(20):10828-10833.
- [17] CHOI M K, YANG J, KANG K, et al. Wearable red-green-blue quantum dot light-emitting diode array using high-resolution intaglio transfer printing [J]. Nat. Commun., 2015,6:7149-1-8.
- [18] KIM B H, NAM S, OH N, et al. Multilayer transfer printing for pixelated, multicolor quantum dot light-emitting diodes [J]. ACS Nano, 2016,10(5):4920-4925.
- [19] 郑华. 全溶液法制备 OLED 显示屏及相关研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2011. ZHENG H. OLED Displays Made Through All-solution Process and Related Studies [D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [20] 刘会敏. 喷墨打印电致发光薄膜及器件制备方法的研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2016.
 LIU H M. Studies of Electroluminescence Films and Preparing the Light Emitting Diode Devices Based on Inkjet Printing Chnology [D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [21] 郑奕娜,郑华,许伟,等. 全印刷工艺制备聚合物 OLED 显示屏 [J]. 高分子通报, 2014(2):97-104.
 ZHENG Y N, ZHENG H, XU W, et al. All-solution processed polymer OLED displays [J]. Polym. Bull., 2014(2):97-104.
 (in Chinese)
- [22] 刘会敏,郑华,许伟,等. 喷墨打印有机电致发光显示屏的制作工艺及研究进展 [J]. 中国材料进展, 2014,33(3): 163-171.

LIU H M,ZHENG H,XU W, et al. . Technology and development of ink-jet printing electroluminescence displays [J]. Mater. China, 2014,33(3):163-171. (in Chinese)

- [23] KIM D, JEONG S, PARK B K, et al. Direct writing of silver conductive patterns: improvement of film morphology and conductance by controlling solvent compositions [J]. Appl. Phys. Lett., 2006,89(26):264101-1-3.
- [24] DENNEULIN A, BRAS J, CARCONE F, et al. Impact of ink formulation on carbon nanotube network organization within inkjet printed conductive films [J]. Carbon, 2011,49(8):2603-2614.
- [25] JIANG C B, ZHONG Z M, LIU B Q, et al. Coffee-ring-free quantum dot thin film using inkjet printing from a mixed-solvent system on modified ZnO transport layer for light-emitting devices [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2016,8(39):

26162-26168.

- [26] LIU Y,LI F S,XU Z W, et al. Efficient all-solution processed quantum dot light emitting diodes based on inkjet printing technique [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2017,9(30):25506-25512.
- [27] YANG P H, ZHANG L, KANG D J, et al. . High-resolution inkjet printing of quantum dot light-emitting microdiode arrays [J]. Adv. Opt. Mater., 2020,8(1):1901429-1-7.
- [28] HAVERINEN H M, MYLLYLÄ R A, JABBOUR G E. Inkjet printing of light emitting quantum dots [J]. Appl. Phys. Lett., 2009,94(7):073108-1-3.
- [29] SUN W J, XIE L M, GUO X J, et al. Photocross-linkable hole transport materials for inkjet-printed high-efficient quantum dot light-emitting diodes [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2020, 12(52):58369-58377.
- [30] HAN J, KO D, PARK M, et al. Toward high-resolution, inkjet-printed, quantum dot light-emitting diodes for next-generation displays [J]. J. Soc. Inf. Dis., 2016, 24(9):545-551.
- [31] NAKANISHI Y, TAKESHITA T, QU Y, et al. 58-2: Distinguished paper: active matrix QD-LED with top emission structure by UV lithography for RGB patterning [J]. SID Symp. Dig. Tech. Pap., 2020,51(1):862-865.
- [32] 张娟, 焦志强, 闫华杰, 等. 微腔效应对顶发射串联蓝光有机电致发光器件性能的影响 [J]. 物理学报, 2020, 69 (9):096104-1-15.

ZHANG J, JIAO Z Q, YAN H J, et al. . Influence of microcavity effect on the performance of top emission tandem blue organic light emitting devices [J]. Acta Phys. Sinica, 2020,69(9):096104-1-15. (in Chinese)



郭标(1996 –),男,湖北黄冈人,硕 士研究生,2018 年于武汉理工大学 获得学士学位,主要从事喷墨打印 量子点发光器件的研究。 E-mail: guobiao1996@gmail.com



彭俊彪(1962 -),男,山东宁津人,博 士,教授,博士研究生导师,1993 年于 中国科学院长春物理研究所获得博士 学位,主要从事有机发光材料与器件 的研究。

E-mail: psjbpeng@ scut. edu. cn