

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-08

基于喷墨打印的可编程钙钛矿色转换阵列及 Micro-LED 显示技术研究

曾文龙, 赵 青, 朱明超, 梁炬豪, 杨 拓, 李贵君*

(深圳大学 物理与光电工程学院 光电子器件与系统教育部重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: 喷墨打印是一种非接触式的数字化打印技术, 通过将微小的墨滴精确喷射到基材表面来形成图像或图案, 在柔性电子、显示、生物医药等领域有广泛应用。为了满足不同领域的应用需求, 开发可编程的喷墨打印技术具有重要意义。本研究从液滴形成动力学过程出发, 研究双溶剂、环境湿度及干燥温度在调控钙钛矿色转换阵列形貌的重要作用。研究采用预合成的钙钛矿量子点墨水, 并通过十二烷和甲苯双溶剂策略来诱导马兰戈尼流, 并通过马兰戈尼与毛细管流的调控作用, 来获得可精确控制的不同形貌的钙钛矿色转换阵列。此外, 本文还研究了环境湿度和干燥温度对色转换阵列形貌的调控作用。最后, 将均匀的红、绿色钙钛矿色转换阵列与 460 nm 蓝光 Micro-LED 芯片结合, 实现了 Micro-LED 全彩显示。本论文的研究工作验证了可通过对双溶剂配比、环境湿度及干燥温度等工艺参数进行可编程调控, 实现了钙钛矿量子点色转换阵列形貌的可控制备, 为喷墨打印技术的创新应用提供了新的思路和方法。

关 键 词: 喷墨打印技术; 双溶剂; 可编程调控; Micro-LED 全彩显示

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260188

CSTR: 32170.14.CJL.20260188

Research on Programmable Perovskite Color Conversion Arrays and Micro-LED Display Technology Based on Inkjet Printing

ZENG Wenlong, ZHAO Qing, ZHU Mingchao, LIANG Juhao, YANG Tuo, LI Guijun*

(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province,
College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

* Corresponding Author, E-mail: guijun@szu.edu.cn

Abstract: Inkjet printing is a non-contact digital printing technology that forms images or patterns by precisely ejecting tiny ink droplets onto a substrate surface, and it has broad applications in fields such as flexible electronics, displays, and biomedicine. To meet diverse application requirements across these domains, developing programmable inkjet printing technologies is of significant importance. This study investigates the critical roles of dual solvents, ambient humidity, and drying temperature in controlling the morphology of perovskite color-conversion arrays, starting from the dynamics of droplet formation. Pre-synthesized perovskite quantum dot inks are employed, and a dual-solvent strategy using dodecane and toluene is applied to induce Marangoni flow. By modulating the interplay between Marangoni and capillary flows, precisely controlled perovskite color-conversion arrays with various morphologies are achieved. Furthermore, the effects of ambient humidity and drying temperature on array morphology are systematically studied. Finally, uniform red and green perovskite color-conversion arrays are integrated with 460 nm blue Micro-LED chips to realize full-color Micro-LED displays. The research demonstrates that programmable control over process parameters—including dual solvent ratios, ambient humidity, and drying temperature—enables precise fabrication of perovskite quantum dot color-conversion arrays, offering new insights and methods for innovative appli-

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 深圳市重大科技计划 (KJZD20230923114559009)。

Supported by the Shenzhen Science and Technology

cations of inkjet printing technology.

Keywords: Inkjet printing technology; Dual-solvent; Programmable control; Micro-LED full-color display

1 引 言

钙钛矿量子点(PeQDs)作为一类新型半导体材料,因光致发光量子产率(PLQY)高、发射半峰宽窄、可溶液加工等特点,被广泛应用于显示、柔性电子、生物医药等领域^[1-5]。在某些应用中,需要对钙钛矿进行图案化^[6]。例如,在色转换显示技术中,为了获得全彩显示效果,需要制备红、绿色转换阵列(CCL),结合蓝光 OLED 或者 Micro-LED,以实现全彩显示^[7-9]。目前,通常采用的图案化方法主要包括纳米压印技术、微流体技术、光刻技术以及喷墨打印技术^[10-13]。其中,喷墨打印技术具有工艺简单、可编程、成本低、不需要掩模来印刷图案等优点,在选择合适的墨水后,可以实现高分辨率的打印,为低成本、快速制备 QDs 图案提供了一种可行性极高的技术^[14]。

在打印过程中,由于墨滴边缘和内部之间的不同蒸发速率而产生的毛细管流动,打印的微阵列经常面临“咖啡环”效应。严重的咖啡环效应伴随着晶体缺陷,进一步导致严重的非辐射复合,从而降低了器件的分辨率和发光均匀性^[15]。为了利用喷墨打印工艺制备所需的钙钛矿图案化阵列,人们已经开展了大量的研究工作。在2019年,Duan等人将CsPbBr₃ PeQDs分散在UV低聚物溶液中以制备可印刷的PeQDs墨水,并使用模具辅助IJP工艺获得厚度约为6 μm,形状均匀没有咖啡环效应的PeQDs CCL^[16]。2020年,Y. M. Yin等人采用喷墨打印技术和预设模板,将CsPbBr₃和CdSe量子点制成CCL,与蓝色Micro-LED芯片结合,制造了色域达到129% NTSC的全彩Micro-LED显示屏。虽然使用UV油墨能很好控制CCL的厚度和提高量子点的稳定性,然而,量子点在聚合物溶液中的容易出现聚集和分散不均匀问题,这会显著降低CCL的光学性能^[17]。2023年Wei等人提出了三元溶剂油墨策略来增强马兰戈尼流动并抑制咖啡环效应。在他们的三元溶剂墨水策略中,引入的壬烷平衡了沸点和表面张力。他们的策略建立了梯度挥发并增强了蒸发流量,咖啡环效应得到缓解^[18]。2024年,Cai等利用CsPbBr₃/PDMS纳米颗粒开展按需喷墨打印研究,通过调

控液滴铺展与蒸发行为,实现了最小约3 μm线宽的高精度图案化,进一步突破了喷墨打印图案化分辨率的极限,为超高分辨率Micro-LED显示提供了新的技术途径^[19]。然而,喷墨打印色转换层的形貌仍易受墨水体系及工艺参数的影响,如何实现打印形貌的精准调控与均匀构筑,仍是高质量Micro-LED色转换层制备的关键问题^[20-21]。因此,有必要进一步研究喷墨打印过程中液滴蒸发行为及工艺参数对色转换层形貌的调控机制。

本文采用预合成PeQDs墨水进行喷墨打印,研究了双溶剂配比、环境湿度及干燥温度作为可调控工艺参数以实现了不同形貌PeQDs色转换层的可编程性,并制作了像素尺寸为32 μm,292 PPI、均匀的红、绿色转换阵列,实现了92.4% ITU-R Recommendation BT. 2020(简称BT. 2020)标准色域覆盖的全彩Micro-LED显示。

2 实 验

2.1 实验材料

碳酸铯(Cs₂CO₃, 99.9%),丙酸(PA, >99.5%),油酸(OA, AR),油胺(OAm, 90%),正丁胺(BLA, >99.5%)均采购于麦克林公司。溴化铅(PbBr₂, 99.9%)采购于西安宝莱特公司,异丙醇((CH₃)₂CHOH, AR),正己烷(C₆H₁₄, AR),环己烷(C₆H₁₂, AR),乙酸乙酯(C₄H₈O₂, AR)均采购于国药。碘化钾(KI, 98%),甲苯(C₇H₈, 99.99%),十二烷(C₁₂H₂₆, 99.99%)均采购于阿拉丁公司,三苯基氧化膦(TPPO, 98%)采购于Adamas公司。聚二甲基硅氧烷(PDMS)采购自道康宁公司。所有材料均未作进一步提纯。

2.2 钙钛矿量子点的合成及墨水的制备

绿光钙钛矿量子点的制备:在室温下,将异丙醇和正己烷溶液充分混合。再注入Cs前驱液,搅拌2分钟后,快速加入Pb前驱液,再搅拌2分钟至反应完成。在1500 rpm转速下离心2分钟,离心结束后,取沉淀,加入2 mL环己烷分散,再加入15 μL油酸和15 μL油胺,充分混合至溶液澄清。经乙酸乙酯沉淀、离心纯化3次,并重新分散于2 mL环己烷中备用。

红光钙钛矿量子点的制备:将一定量的KI加

入装有 2 mL 合成好的 CsPbBr_3 量子点环己烷溶液离心管中, 充分搅拌, 加入配体材料 TOPO 调控 $\text{CsPb}(\text{Br/I})_3$ 的红移速度, 当红色 PeQDs 到达目标波长后, 即可停止反应。在 8000 rpm 转速下离心 3 分钟, 待离心完成后, 加入乙酸乙酯, 离心纯化 3 次。

墨水的制备: 在最后一次纯化后, 加入 1 mL 的十二烷/甲苯混合溶剂, 放入 6 °C 恒温箱中静置 2 小时, 取上清液, 用 0.22 μm 聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 过滤头过滤, 可获得分散性良好的墨水。

2.3 钙钛矿量子点阵列制备

聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 基板的制备: 将 PDMS 主胶和辅助剂按照 10:1 的比例混合, 用研磨棒剧烈搅拌均匀, 此时 PDMS 胶体中存在气泡, 将装着 PDMS 胶体的瓶子 (打开瓶盖) 放入真空干燥箱中, 干燥 3-5 分钟, 直至所有气泡浮到表面破裂。将 ITO 玻璃基底置于 UVO₃ 清洗机清洗 30 分钟, 随后将 PDMS 胶体旋涂在 ITO 片子, 设置的转速和时间 3000 r/60 s。旋涂完后放置到 120 °C 的热板上加热 30 分钟, 待 PDMS 初步固化后, 再转移到 100 °C 的烘箱中放置 1-2 小时直至 PDMS 完全固化。

在管路和喷头清洗干净后, 将制备好的预合成的钙钛矿量子墨水装入储液瓶中, 调整气压和相应的电压, 直至喷头能够稳定喷射墨滴。将 PDMS 基板放到喷墨打印机的承物台上, 并使用设备的负压功能吸附住基板。在调试出稳定可打印的液滴后, 设置打印图案的大小及像素尺寸后即可进行打印。将打印完成后的图案放置在洁净的空气或者氮气手套箱中进行干燥。

2.4 形貌表征

采用型号为 FEI Titan Cubed Themis G2300 的透射电子显微镜 (TEM) 来观察材料微观结构。结合了光学显微镜 (INSIZE ISM-D500) 和手持式 400 nm 紫外灯来测量光致发光微阵列样品的二维形貌。采用 SuperView W1 白光干涉仪表征微阵列样品的三维形貌。

3 结果与讨论

3.1 双溶剂比对单层咖啡环的可编程调控

采用配体辅助再沉淀法 (LARP) 方式合成的红、绿光 PeQDs 表现出很好的结晶和均匀的晶粒尺寸和高 PLQY (绿光 95%, 红光 95%)。由图 1 所示, 量子点分布均匀无堆积, 表明 PeQDs 在墨水具有良好的分散性。

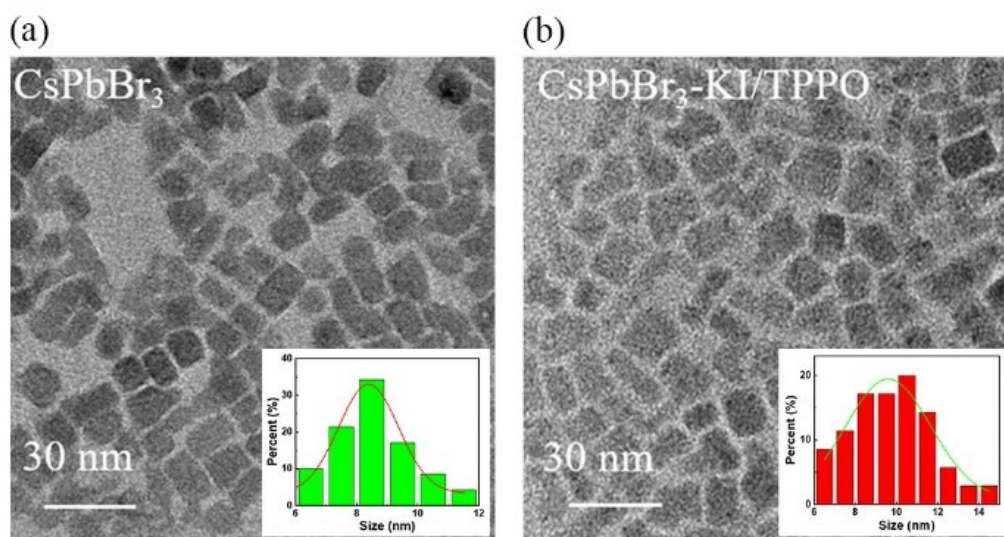


图 1 PeQDs TEM 图像与晶粒尺寸分布; (a) 绿光 PeQDs; (b) 红光 PeQDs

Fig. 1 TEM images and grain size distribution of PeQDs; (a) Green-emitting PeQDs; (b) Red-emitting PeQDs

本文采用十二烷和甲苯结合的双溶剂方法来实现打印钙钛矿图案的可编程性。实验首先使用 LARP 方式合成了红绿光 PeQDs, 再将 PeQDs 分别溶解在甲苯和十二烷中, 得到两种单溶剂墨水 Ink0 和 Ink10。以十二烷与甲苯的不同的体积比

制备双溶剂墨水: 1:9 (Ink1), 2:8 (Ink2), 3:7 (Ink3), 4:6 (Ink4), 5:5 (Ink5), 6:4 (Ink6), 7:3 (Ink7), 8:2 (Ink8), 9:1 (Ink9)。制备好的墨水如图 2 所示。

喷墨打印的液滴是否呈理想状态, 与多重因



图2 预合成绿光 PeQDs 双溶剂墨水

Fig. 2 Pre-synthesized green-emitting PeQDs dual-solvent ink

素有关,如液体的离开喷头时的初始速度、液体的密度、表面张力以及粘度以及墨水的成分等^[22]。为了更好的理解墨水的流动行为,引入无量纲特征数 Z ,其定义公式如下。

$$Z = \frac{\sqrt{\gamma\rho\alpha}}{\eta} \tag{1}$$

其中 ρ 、 γ 和 η 分别是液体的密度、表面张力以及粘度, α 是特征尺寸(喷头的半径)。Jang 等人定义 $4 < Z < 14$ 为最佳印刷适性范围^[23]。较低的 Z 值

(对应于高悬浮液粘度)会由于流体粘性耗散而增加液滴喷射的难度,造成喷头无法喷墨或出现带韧尾的液滴。而 Z 值较大,则会出现卫星液滴,产生与主墨滴分离的较小墨滴,很容易失去方向性,导致打印质量和精度下降。

在正式打印之前,对所有制备的墨水进行了物理参数的测试,包括溶液表面张力(γ)、密度(ρ)、粘度(η),并根据所用的喷头结合公式(1)计算出可打印参考 Z 值。通过计算得到Ink0和Ink1的 Z 值超过14,在液滴调试时很容易出现卫星液滴。随着十二烷含量的不断增加,墨水的表面张力不断下降,粘度逐渐变大,从而使得 Z 值不断下降。当十二烷含量继续增加至40 vol%时,墨水(Ink4)的 Z 值为12.50,处于容易调试液滴的 Z 值范围。Ink0与Ink4液滴的调试图如下,实验结果与理论计算相符。

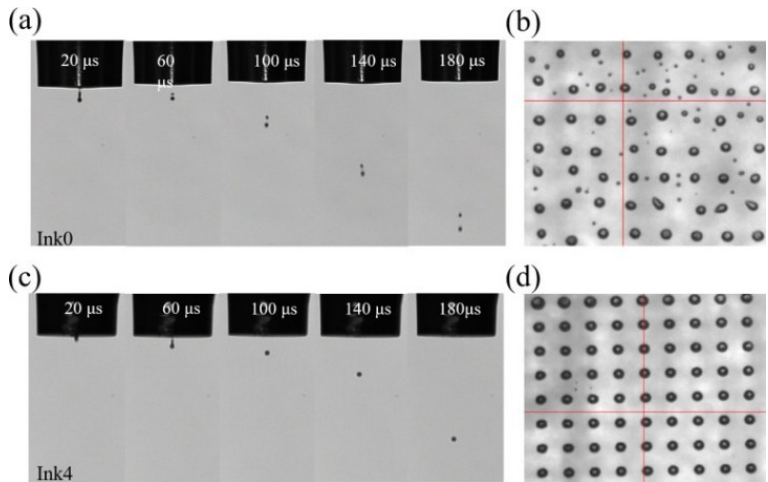


图3 Ink0和Ink4的液滴调试;(a)Ink0液滴调试;(b)Ink0打印图案;(c)Ink4液滴调试;(d)Ink4打印图案

Fig. 3 Droplet optimization and printed patterns of Ink0 and Ink4; (a) Droplet optimization of Ink0; (b) Printed pattern of Ink0; (c) Droplet optimization of Ink4; (d) Printed pattern of Ink4

十二烷和甲苯分别为高沸点低表面张力和低沸点高表面张力的溶剂。在液滴干燥过程中,低沸点的甲苯在液滴边缘挥发较快,在边缘区留下较多的高沸点低表面张力溶剂十二烷。而液滴中心溶剂的挥发速度慢,故保持双溶剂混合状态。液滴边缘和中心的溶剂不同,会产生表面张力梯度($\Delta\gamma$ =液滴边缘的表面张力-液滴中心的表面张力)。根据已有关于双溶剂蒸发行为的研究,可推测该表面张力梯度有利于诱导液滴内部马兰戈尼流的形成,使溶质由低表面张力区域向高表面张力区域迁移。马兰戈尼流方向与毛细管流相反,通过合理调控双溶剂配比,有助于抑制咖啡环效应^[24-25]。

表1 甲苯和十二烷的主要特征参数

Tab. 1 Main characteristic parameters of toluene and dodecane

溶剂	沸点(℃)	表面张力(dynes/cm)
甲苯	110.6	28.8
十二烷	216.3	25.5

由图4所示,我们可以通过调节两种溶剂的配比,来获得不同形貌打印图案,满足不同应用需求。Ink1-Ink9打印液滴干燥后的表面轮廓曲线如图5所示,结合图4与图5可以得出,采用墨水Ink4进行打印,能有效抑制咖啡环效应。当十二烷含量小于40 vol%时,随着十二烷比例增加,双溶剂体系中沸点和表面张力差异逐渐增大,液滴

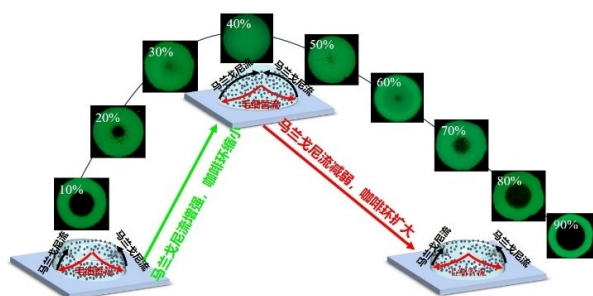


图4 双溶剂比对咖啡环形貌的可编程调控过程

Fig. 4 Programmable control of coffee ring morphology through dual-solvent ratio adjustment

蒸发过程中形成更明显的表面张力梯度。结合已有关于双溶剂体系蒸发行为的研究,可以推测液滴内部马兰戈尼流得到增强,从而有利于抑制咖啡环效应。当十二烷含量继续增加至40 vol%以上时,混合溶剂间的沸点及表面张力差异逐渐减

小,液滴内部形成的表面张力梯度减弱,同时墨水粘度增加,对液滴内部流动产生影响。因此,液滴内部流动状态发生变化,形貌发生变化。

因此,可以通过将双溶剂配比作为可调工艺参数,通过调控液滴蒸发行为,实现了色转换层形貌的可编程调控。

3.2 环境湿度和干燥温度对钙钛矿形貌的可编程调控

在喷墨打印 CCL 过程中,温度与湿度会对喷头出墨和 CCL 形貌产生影响。采用 Ink4 墨水进行喷墨打印,通过改变喷墨打印手套箱的湿度以及打印基板的温度,来探究环境湿度和干燥温度对 CCL 形貌产生的影响。如图 6(a) 和 (b) 所示,薄膜形貌会随着环境中湿度和干燥温度的变化而发生显著变化。

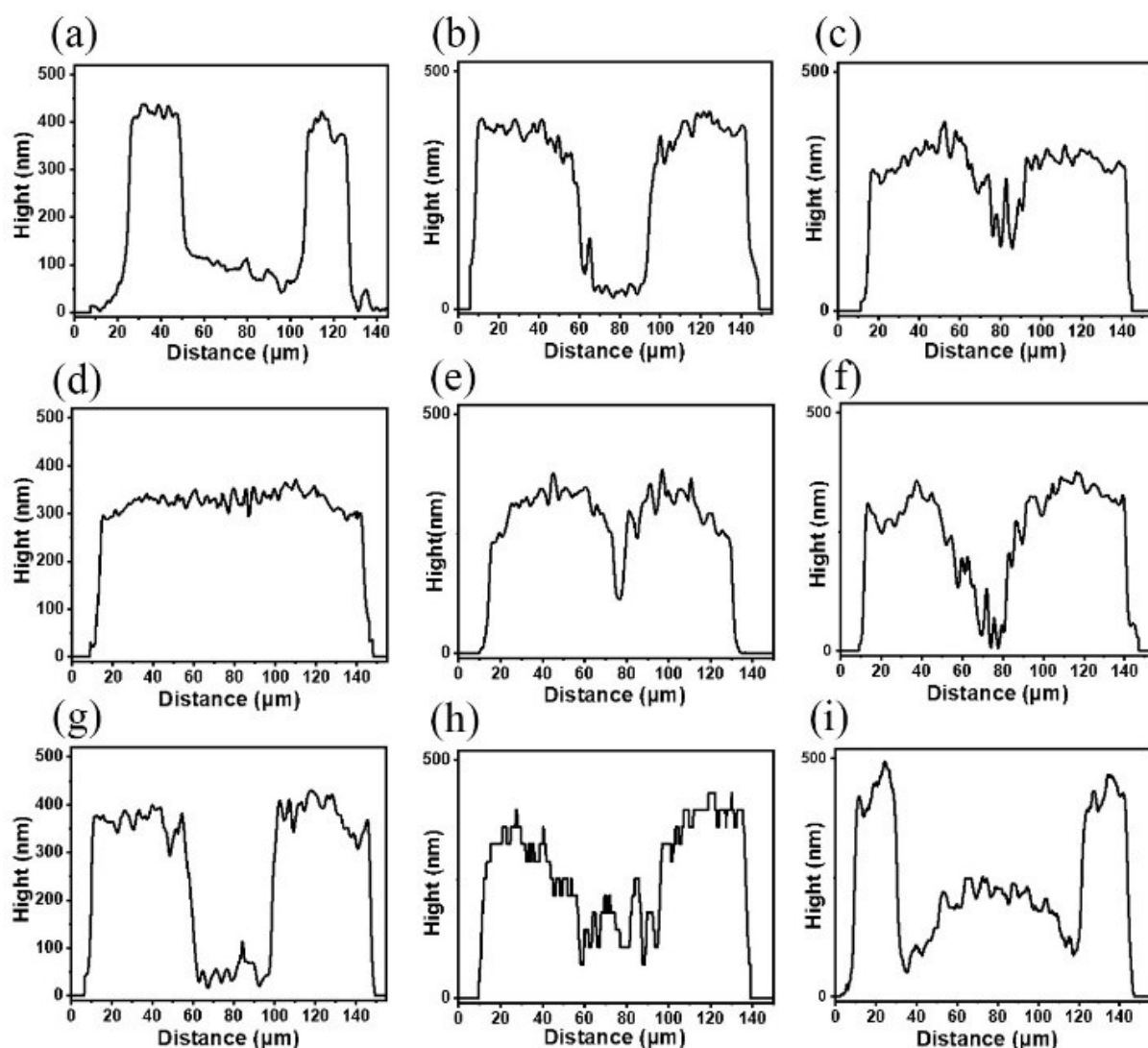


图5 (a)-(i)分别是 Ink1-Ink9 打印液滴干燥后的表面轮廓曲线图

Fig. 5 (a)-(i) are surface profile curves of the dried ink droplets for Ink1 to Ink9, respectively.

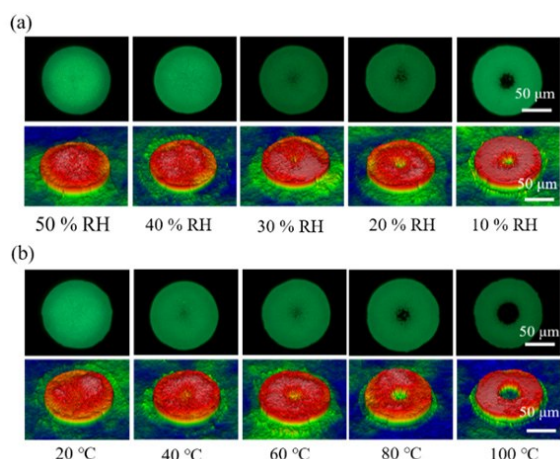


图6 不同环境湿度和干燥温度对CCL形貌的影响(上排为荧光显微图,下排为三维形貌图):(a)环境湿度;(b)干燥温度

Fig. 6 Effect of different environmental humidity and drying temperature on CCL morphology (top row: fluorescence microscopy images; bottom row: 3D morphology images): (a) environmental humidity; (b) drying temperature

在高温干燥环境中,液滴边缘与中心的挥发速度变得更加不平衡,并且使溶液粘度快速下降,增强的马兰戈尼流并不足以平衡被加强的毛细管流动。且湿度过低,会使喷头处的溶剂挥发过快,当打印频率低时,容易造成喷头堵塞。由图6的实验结果表明,要获得均匀的形貌,Ink4墨水的最佳打印湿度和干燥温度分别为40% RH和20 °C。因此,环境湿度和干燥温度均属于喷墨打印过程中的可编程工艺参数。通过调节其数值可进一步控制液滴蒸发及结晶过程,实现不同形貌色转换层的可控制备。

3.3 色转换 Micro-LED 的实现

采用双溶剂墨水、PDMS基板的策略来进行打印。首先,获得红绿两种不同颜色的液滴,随后,将提前设计好的图案输入喷墨打印设备的程序中,打印出色转换阵列。图7(a)为460 nm蓝光 Micro-LED;图7(b)是在背光激发下,红绿色转换阵列实现了色转换过程,拍摄荧光图像时叠加了一层500 nm的滤光片,滤除了多余蓝光。

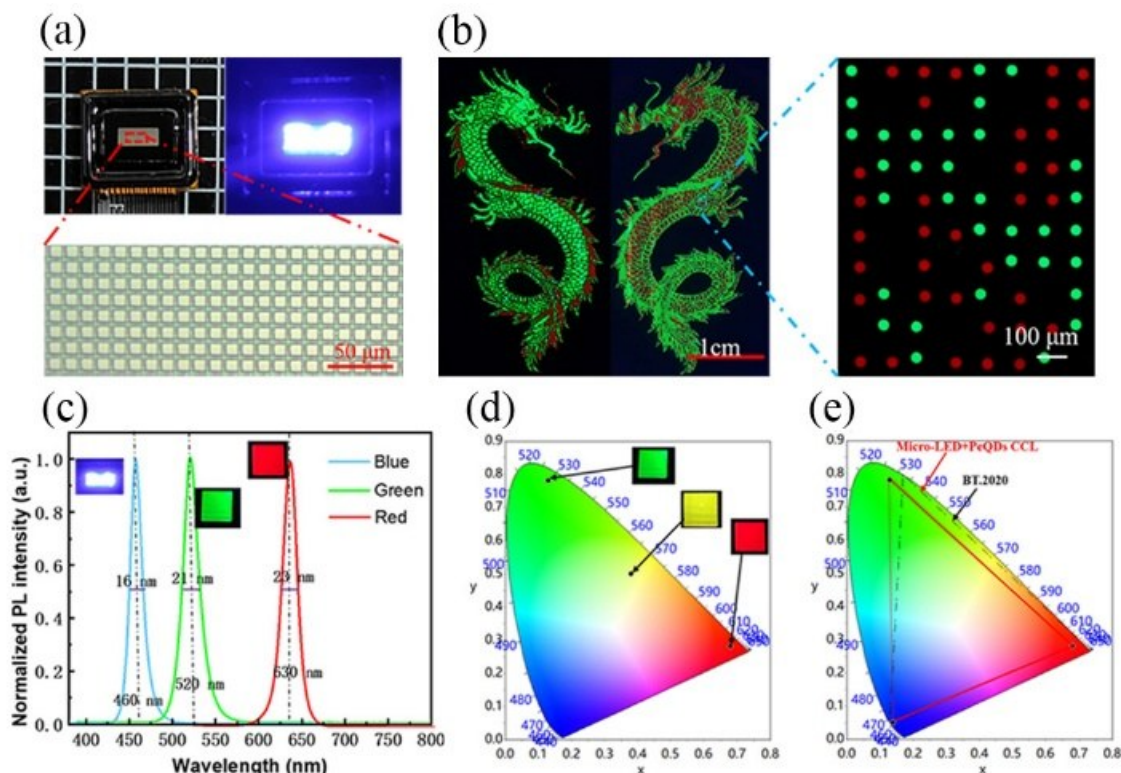


图7 蓝光 Micro-LED 与红、绿色转换层结合的显示效果图(a)Micro-LED 实物及局部放大图;(b)实现色转换的显示效果图;(c)色转换阵列460nm蓝光激发下的PL光谱(d)色坐标图;(e)Micro-LED结合色转换阵列的色域覆盖图

Fig. 7 Display effect of Micro-LED combined with red and green color conversion arrays (a) Actual Micro-LED and magnified local view; (b) Display rendering achieving color conversion; (c) PL spectrum of the color conversion array under 460nm blue light excitation (d) Color coordinate diagram; (e) Color gamut coverage diagram of Micro-LED combined with the color conversion array

打印出的红光像素尺寸与厚度与绿光一致分别为 32 μm 和 2.2 μm ,制备的 CCL 的像素密度为 292 PPI。

Micro-LED 的色转换通过喷墨打印技术,将红绿量子点精确沉积在蓝光 Micro-LED 上。量子点吸收蓝光并转换为红光和绿光,并结合为转换的蓝光,最终实现全彩显示。图 7(c)所示的 PL 光谱图,在 460 nm 的蓝光激发下,绿光和红光的 PL 发射峰波长分别为 520 nm 和 630 nm。其 CIE 坐标 (x,y) 如图 7(d) 所示分别为 (0.13, 0.78) 和 (0.68, 0.28),黄色 CCL 的 CIE 坐标为 (0.38, 0.50)。由图 7(e) 所示, Micro-LED (CIE 坐标 (0.14, 0.05)) 与 PeQDs CCL 实现了 92.4% BT. 2020 标准的色域覆盖。

所有实验均在相同工艺条件下重复进行,所

得打印结果具有良好的重复性,文中展示的结果为具有代表性的实验结果。

4 结 论

本文研究了双溶剂、环境湿度和干燥温度在调控钙钛矿色转换阵列形貌方面的重要作用,实现了形貌可控的喷墨打印技术,并制备了均匀的红、绿色转换阵列与 Micro-LED 全彩显示器件。研究作为形貌可控的喷墨打印技术提供了新的思路和方法。

本文(补充文件及)专家审稿意见和作者回复内容
下载地址: http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.2024**** (2024**** 为文章稿号)。

参 考 文 献:

- [1] 徐峰. MicroLED 显示技术发展概述[J]. 数字通信世界, 2021(5): 45-46.
XU F. Development survey of display technique based on MicroLED [J]. *Digital Communication World*. 2021, (05):45-6. (in Chinese)
- [2] Cai J, Zhang X, Chen Y, *et al.* Neuron-inspired CsPbBr₃/PDMS nanospheres for multi-dimensional sensing and interactive displays[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 55.
- [3] 何航宇,冯志鹏,庄国亮,等. 应用于色转换显示的红光钙钛矿发光材料研究现状[J]. 发光学报, 2025, 46(02): 273-284.
HE H Y, FENG Z P, ZHUANG G L, *et al.* Current status of red perovskite light emitting materials for color conversion displays [J]. *Chinese Journal of Luminescence*. 2025, 46(2):273 - 284. (in Chinese)
- [4] 陈逸群,林立华,胡海龙,等. 基于多功能苯乙基溴化铵修饰层的喷墨打印钙钛矿量子点发光二极管[J]. 发光学报, 2024, 45(8): 1343-1353.
CHEN Y Q, LIN L H, HU H L, *et al.* Inkjet Printed Perovskite Quantum Dot Light-emitting Diodes Based on Multifunctional Phenethylammonium Bromide Modification Layer [J]. *Chinese Journal of Luminescence*. 2024, 45(8): 1343-1353. (in Chinese)
- [5] 张志清,罗忠明,朱明超,等. 基于维度调制的准二维蓝色钙钛矿发光二极管[J]. 发光学报, 2023, 44(06): 1013-1022.
ZHANG Z Q, LUO Z M, ZHU M C, *et al.* Quasi-two-dimensional blue perovskite light-emitting diodes based on phase modulation [J]. *Chinese Journal of Luminescence*. 2023, 44(06):1013-1022. (in Chinese)
- [6] Wang Y, Luo Y, Kong X, *et al.* Patterning technologies of quantum dots for color-conversion micro-LED display applications[J]. *Nanoscale*, 2025, 17(4): 1764-1789.
- [7] Li G, Tseng M C, Chen Y, *et al.* Color-conversion displays: current status and future outlook[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 301.
- [8] 李佳源,刘逸菲,古宇轩,等. 面向 Micro-LED 全彩显示的量子点图案化技术[J]. 发光学报, 2025, 46(11): 2000-2016.
LI J Y, LIU Y F, GU Y X, *et al.* Quantum Dots Patterning Technologies for Micro-LED Full-color Displays [J]. *Chinese Journal of Luminescence*. 2025, 46(11): 2000-2016. (in Chinese)
- [9] Ye F, Tian M, Lan X, *et al.* Unraveling the critical roles of surface chemical states on anion exchange of halide perovskites[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 484: 149418.

- [10] Kang J H, Li B, Zhao T, *et al.* RGB Arrays for Micro-Light-Emitting Diode Applications Using Nanoporous GaN Embedded with Quantum Dots[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(27): 30890-30895.
- [11] Mei W, Zhang Z, Zhang A, *et al.* High-resolution, full-color quantum dot light-emitting diode display fabricated via photolithography approach[J]. *Nano Research*, 2020, 13(9): 2485-2491.
- [12] Qin F, Liu C, Wu W, *et al.* Inkjet Printed Quantum Dots Color Conversion Layers for Full-Color Micro-LED Displays[J]. *Electronic Materials Letters*, 2023, 19(1): 19-28.
- [13] Sun W, Li F, Tao J, *et al.* Micropore filling fabrication of high resolution patterned PQDs with a pixel size less than 5 μm [J]. *Nanoscale*, 2022, 14(16): 5994-5998.
- [14] Yang X, Lin Y, Wu T, *et al.* An overview on the principle of inkjet printing technique and its application in micro-display for augmented/virtual realities[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(6): 210123-210124.
- [15] Liu B, Li J, Wang G, *et al.* Lattice strain modulation toward efficient blue perovskite light-emitting diodes[J]. *Science Advances*, 2022, 8(38): eabq0138.
- [16] Duan M, Feng Z, Wu Y, *et al.* Inkjet-Printed Micrometer-Thick Patterned Perovskite Quantum Dot Films for Efficient Blue-to-Green Photoconversion[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(12): 1900779.
- [17] Yin Y, Hu Z, Ali M U, *et al.* Full-Color Micro-LED Display with CsPbBr₃ Perovskite and CdSe Quantum Dots as Color Conversion Layers[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(8): 2000251.
- [18] Wei C, Su W, Li J, *et al.* A Universal Ternary-Solvent-Ink Strategy toward Efficient Inkjet-Printed Perovskite Quantum Dot Light-Emitting Diodes[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(10): 2107798.
- [19] Cai J, Lai W, Chen Y, *et al.* Pushing Patterning Limits of Drop-On-Demand Inkjet Printing with Cspbbr₃/PDMS Nanoparticles[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(10): 2400298.
- [20] Shanker R, Sardar S, Chen S, *et al.* Noniridescent Biomimetic Photonic Microdomes by Inkjet Printing[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(10): 7243-7250.
- [21] Deegan R D, Bakajin O, Dupont T F, *et al.* Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops[J]. *Nature*, 1997, 389(6653): 827-829.
- [22] Zhang Y, Li D, Liu Y, *et al.* Inkjet Printing in Liquid Environments[J]. *Small*, 2018, 14(27): 1801212.
- [23] Jang D, Kim D, Moon J. Influence of Fluid Physical Properties on Ink-Jet Printability[J]. *Langmuir*, 2009, 25(5): 2629-2635.
- [24] Babatunde P O, Nanri N, Onitsuka K, *et al.* Factors Dominating Polymer Film Morphology Formed from Droplets Using Mixed Solvents[J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2012, 45(8): 622-629.
- [25] Nikolov A D, Wasan D T, Wu P. Marangoni flow alters wetting: Coffee ring and superspreading[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2021, 51: 101387.



曾文龙,男,广东韶关人,硕士研究生,
2024年于汕头大学获得学士学位,主
要从事新型显示技术方面的研究。
E-mail: 2400233037@mails. szu. edu.
cn



李贵君,男,贵州安龙人,博士,教授,
2016年于中国香港科技大学获得博
士学位,主要从事新型显示技术和高
效光伏电池技术方向的研究。
E-mail: gliad@connect. ust. hk