

文章编号: 1000-7032(2025)06-1120-09

基于纳米压印的高分辨率和高效率量子点发光二极管

黄兴云¹, 谢潇婷¹, 杨开宇^{1,2*}, 李福山^{1,2*}

(1. 福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350108;

2. 中国福建省光电信息科技创新实验室, 福建 福州 350108)

摘要: 目前, 通过各种量子点图案化技术制备的高分辨率量子点发光二极管(Quantum dot light-emitting diode, QLED)普遍面临低效率的问题, 其主要原因是像素之间存在较大的漏电流。为了解决该问题, 本文采用纳米压印技术制备了蜂窝状聚甲基丙烯酸甲酯(Poly(methyl methacrylate), PMMA)薄膜, 并将其作为电荷阻挡层应用在QLED发光层中, 成功获得了分辨率为8 467像素每英寸(Pixel per inch, PPI)的红色QLED器件。由于PMMA良好的绝缘特性, 电荷阻挡层成功隔绝了电子传输层和空穴传输层的直接接触, 所制备器件的漏电流相较于无阻挡层图案化器件大幅降低, 使其外量子效率(External quantum efficiency, EQE)得到较大提升, 最大EQE达到了15.31%, 最大亮度为100 274 cd/m²。

关键词: 量子点发光二极管(QLED); 纳米压印; 高分辨率; 电荷阻挡层

中图分类号: TN312.8 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250009

CSTR: 32170.14.CJL.20250009

High-resolution and High-performance Quantum Dots Light-emitting Diode Based on Nanoimprint

HUANG Xingyun¹, XIE Xiaoting¹, YANG Kaiyu^{1,2*}, LI Fushan^{1,2*}

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Science and Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350108, China)

* Corresponding Authors, E-mail: kaikaibrain@fzu.edu.cn; fushanli@hotmail.com

Abstract: The current high-resolution quantum dot light-emitting diodes (QLEDs) fabricated by various quantum dots patterning techniques suffer from low efficiency, mainly due to the passage of large leakage currents between pixels. To solve this issue, a honeycomb Poly(methyl methacrylate) (PMMA) film was fabricated by nanoimprint technique and applied as a charge barrier layer in the QLED light emitting layer. The resulting red QLEDs with a resolution of 8 467 pixel per inch (PPI) were successfully fabricated. Due to the good insulating properties of PMMA, the charge barrier layer successfully isolates the electron transport layer and the hole transport layer. Therefore, the leakage current of our device is greatly reduced compared to the device without charge barrier layer patterning, and the external quantum efficiency (EQE) is greatly improved, with a maximum EQE of 15.31% and a maximum brightness of 100 274 cd/m².

Key words: quantum dot light-emitting diodes (QLEDs); nanoimprint; high-resolution; charge barrier layer

1 引 言

量子点(Quantum dots, QDs)是一种纳米级别

的半导体晶体, 具有独特的量子限域效应, 能精准调控发射光的波长和颜色纯度, 由此带来了高色域、高亮度、低能耗等优势^[1-3]。量子点发光二极管

收稿日期: 2025-01-09; 修订日期: 2025-02-07

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3606500); 福建省光电信息科技创新实验室(2021ZZ126); 福建省自然科学基金(2023J01257)

Supported by National Key Research and Development Program of China (2022YFB3606500); Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China (2021ZZ126); Provincial Natural Science Foundation of Fujian (2023J01257)

(Quantum dot light-emitting diode, QLED)不仅继承了这些优点,还在显示性能上展现出卓越的稳定性、更长的使用寿命以及更宽广的视角范围,在下一代显示技术领域极具发展潜力,有望推动显示行业迈向新的高度^[4-8]。传统的量子点图案化技术包含转移印刷(Transfer printing, TP)^[9-13]、光刻技术^[14-17]以及喷墨印刷技术^[18-22]。然而,TP技术在大面积转移量子点像素时难以保证图案完整性以及保真度。光刻技术在曝光和显影的过程中,紫外线照射以及显影液的侵蚀会对敏感的量子点造成不可逆的损害,从而影响QLED器件的性能。通过喷墨印刷技术制备的量子点图案由于喷头大小的限制,只能形成50 μm 及以上大小的像素,难以满足日渐增长的显示器分辨率的要求。此外,这些方法制备的QLED器件无一例外均面临性能低下的问题。这是因为量子点像素之间没有隔离层,空穴传输层(Hole transport layer, HTL)和电子传输层(Electron transport layer, ETL)的直接接触会导致极大的漏电流,从而影响器件性能。因此,迫切需要开发一种能大面积制备高分辨率量子点图案且保证器件性能的方法。

近年来,已经发展出了许多制备电荷阻挡层(Charge barrier layer, CBL)的方法^[23-27]。聚甲基丙烯酸甲酯(Poly(methyl methacrylate), PMMA)作为优秀的绝缘材料,已经被多次报道应用在QLED中以降低电流密度。例如,Dai等^[23]通过在发光层(Emissive Layer, EML)与ETL之间插入一层6 nm厚的PMMA薄膜,成功降低了器件电流密度,并得到了高性能的QLED。Gao等^[28]采用同样的方法有效降低了高分辨率QLED的电流密度。然而,旋涂的手段难以精确沉积纳米级厚度的膜层,这使得高性能器件的产出变得不稳定。此外,PMMA在光刻领域也有广泛的应用,然而其使用的显影液通常会掺入一定量的去离子水^[29],这限制了其被制作成置于PEDOT:PSS层之上的CBL。Mao等^[25]开发了制备蜂窝状PMMA电荷阻挡层的方法,但该方法需要在水中完成打捞PMMA,并且仅可沉积在氧化铟锡(Indium tin oxide, ITO)玻璃上,这使得其通用性大打折扣。因此,开发一种简单、稳定且灵活的图案化方案十分重要。

纳米压印是制备微结构的传统技术,具有简单高效的特点^[3,25,30-33]。纳米压印已被报道适用于多种材料的直接图案化,如量子点、聚合物等。例

如,Oh等^[34]通过将纳米压印技术直接应用于量子点薄膜的图案化,成功制备了多种色彩的高分辨量子点图案。然而,利用该方法制备的量子点薄膜难以转移到QLED器件中。聚合物在纳米压印中已经得到了广泛的应用,例如压印光栅结构进行光提取^[32,35-37]以及半导体聚合物的图案化^[38]。本文提出了一种不同于传统纳米压印的制备CBL的方法。该方法通过热纳米压印获取羟丙基纤维素(Hydroxypropyl cellulose, HPC)微柱阵列,接着通过简单的溶液旋涂得到蜂窝状的PMMA薄膜。此外,我们成功地将该PMMA薄膜应用到QLED器件中,分辨率为8 467像素每英寸(Pixel per inch, PPI)。引入CBL的器件漏电流得到显著抑制,从无电荷阻挡层的2 500 $\text{mA}/\text{cm}^2@10\text{ V}$ 大幅降低至778 $\text{mA}/\text{cm}^2@10\text{ V}$ 。同时,器件最大EQE为15.31%,最大亮度达到100 274 cd/m^2 。该方法为制备高分辨率、高性能量子点发光二极管领域提供了一种新的思路。

2 实 验

2.1 材料准备

HPC购自阿拉丁,平均重均分子量(M_w)为100 000。PMMA购自阿拉丁,平均 M_w 为350 000。聚(乙二氧噻吩):聚苯硫醚(PEDOT:PSS)、Poly(9,9-dioctylfluorene-co-N-(4-(3-methylpropyl)) diphenylamine)(TFB)和氧化锌(ZnO)购自西安浴日光能有限公司。氯苯(99.8%)、乙醇(99.8%),正丁醇(99.8%)购自Sigma Aldrich。红色CdSe/ZnS量子点来自合肥福纳科技公司。所有的化学品都直接使用,无需进一步净化。实验前,需要将HPC溶于乙醇中以制成60 mg/mL 溶液;将PMMA溶于甲苯中形成8 mg/mL 的溶液;将TFB溶于氯苯中配成8 mg/mL 的溶液;将红色量子点(正辛烷溶剂)稀释成20 mg/mL 的溶液。

2.2 QLED的制备

ITO玻璃需要在使用前分别用去离子水、丙酮、异丙醇分别超声清洗15 min以去除表面杂质,然后将ITO基板放入UV-ozone中照射20 min以增加表面亲水性。接着按照4 000 r/min 的转速旋涂40 s以将PEDOT:PSS沉积在ITO玻璃上,并在150 $^{\circ}\text{C}$ 下加热20 min。然后将TFB按照3 000 r/min 的转速旋涂40 s以沉积在PEDOT:PSS上并在120 $^{\circ}\text{C}$ 下加热20 min。接着将通过纳米压印制备的蜂窝状绝缘薄膜沉积在TFB薄膜上。接下来以

2 000 r/min 的转速旋涂 40 s, 将量子点和 ZnO 依次旋涂在蜂窝状绝缘薄膜上, 并分别以 80 °C 加热 10 min。最后, 在真空镀膜机中沉积 100 nm 厚的银电极。

3 结果与讨论

3.1 蜂窝状电荷阻挡层的制备

为了组装蜂窝状电荷阻挡层, 采用线宽为 2 μm 、周期为 3 μm 的聚二甲硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)模板作为母板。采用 HPC 作为压印对象, 这是因为 HPC 的热塑性好, 并且其溶剂与 PMMA 的溶剂相互正交。在后续的 PMMA 沉积过程中, HPC 与 PMMA 不会相互影响。图 1(a) 展示了蜂窝状 PMMA 薄膜的制备流程。(I) 将 HPC 在 4 000 r/min、40 s 的参数下旋涂至平整的 PDMS 表面以形成薄膜。(II) 将具有蜂窝状结构的硬质母板如硅模板或 PDMS 模板覆盖在 HPC 表面并施加压力, 将其放置在 120 °C 加热台上加热 5 min, 接着取下母板, 得到具备微柱结构的 HPC。

(III~IV) 将 PMMA 以 3 000 r/min 的转速旋涂 40 s 沉积在 HPC 上, 接着在 80 °C 下退火 10 min。此后, 将 HPC-PMMA 在 120 °C 加热下用力覆盖在目标基板, 3 s 后从一边慢慢揭开, 将 HPC-PMMA 留在目标基板上。(V~VI) 将基板浸入 120 °C 加热的乙醇中 5 min 以去除 HPC, 留下裸露的蜂窝状 PMMA 薄膜。需要注意的是, 为了不破坏 PMMA 薄膜的完整性, 在将 PMMA 转移至目标基板的过程中, 需要保证不对 PDMS 基底造成较大的应力形变。因此, 需要将 PDMS 尽可能平整地贴合目标基板, 当 HPC-PMMA 被目标基板拾取时, 将 PDMS 衬底从一侧慢慢揭下, 如图 1(b) 所示。这样, PMMA 薄膜得以完整转移。需要注意的是, 在第五步的清洗步骤中, 由于 TFB 不溶于乙醇, 并且 TFB 层是致密的聚合物薄膜, 因此 TFB 及其下层的 PEDOT:PSS 层均不会受到乙醇的损害。

通过该策略制备的结构化 HPC 和 PMMA 薄膜(如图 2(a) 所示)在光照下能够反射出五颜六色的光, 这表明了微结构的存在。这是因为薄膜

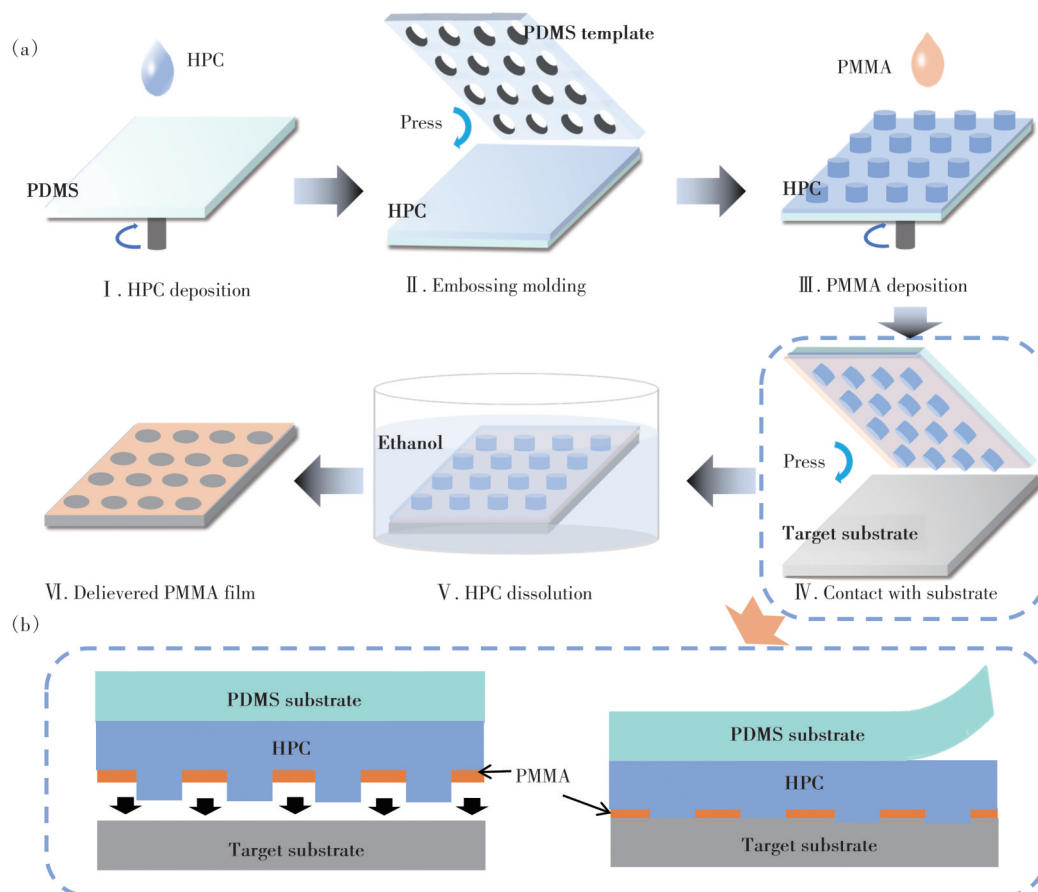


图 1 蜂窝状 PMMA 薄膜的制备流程。(a) HPC 微柱结构以及 PMMA 薄膜的制备流程; (b) PMMA 转移细节

Fig. 1 Schematic illustration of fabricating honeycomb PMMA films. (a) Schematic illustration of fabricating HPC microcolumns and PMMA film. (b) Details of PMMA transfer

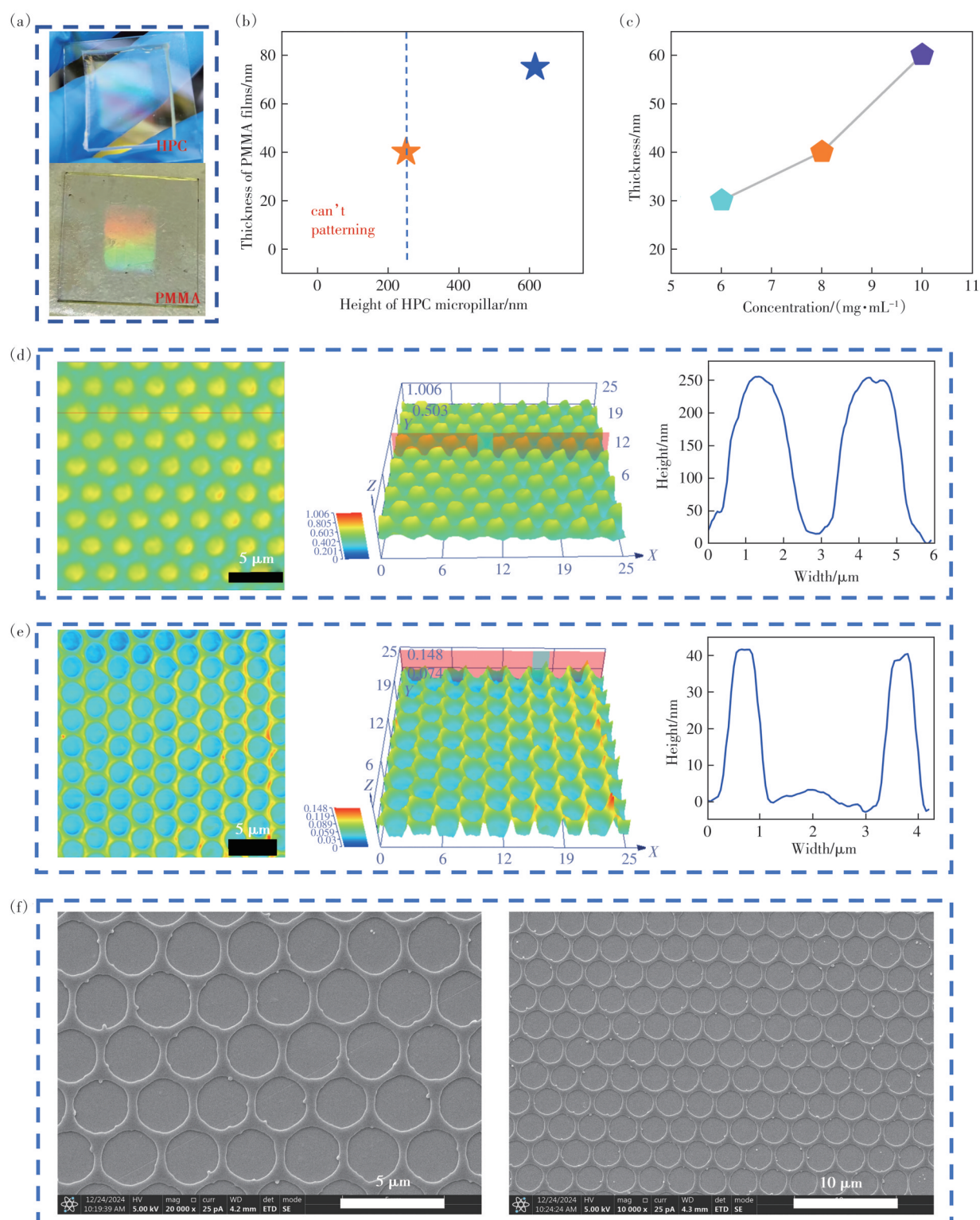


图2 蜂窝状PMMA薄膜的优化与表征。(a)结构化的HPC和PMMA;(b)微柱高度对PMMA图案形成的影响;(c)PMMA浓度与膜厚的关系;(d)HPC微柱阵列在光学显微镜下的表征;(e)蜂窝状PMMA薄膜在光学显微镜下的表征;(f)蜂窝状PMMA的SEM图像

Fig. 2 Optimisation and characterisation of honeycomb PMMA films. (a)Structured HPC and PMMA. (b)Effect of micropillar height on PMMA patterning. (c)Relationship between PMMA concentration and film thickness. (d)Characterisation of HPC micropillar arrays under optical microscope. (e)Characterisation of honeycomb PMMA films under optical microscope. (f)SEM images of honeycomb PMMA films

中的微小结构对光产生了复杂的相互作用,特别是导致了光的散射和干涉效应。当光照射到这些微小结构上时,光的传播方向会发生随机改变,形成散射光。同时,由于薄膜的厚度和微结构的周期性变化,不同波长的光在薄膜内部会发生不同程度的干涉,从而形成了我们所观察到的五颜六色的光^[39-40]。接下来我们研究了 HPC 微柱高度对蜂窝状 PMMA 形成的影响,结果如图 2(b)所示。当 HPC 微柱高于 250 nm 时,PMMA 才可以正常图案化,造成这种现象的原因是当 PMMA 薄膜落在 HPC 微柱阵列时,在重力的影响下,PMMA 倾向于沉入微柱底部,这相当于向微柱顶部的 PMMA 薄膜上施加了一个拉伸应力。这个应力会导致薄膜的分子链沿着拉伸方向逐渐伸长。由于薄膜的两侧都被拉伸,因此会在薄膜的中间部分形成一个相对较窄的颈缩区域^[41]。随着拉伸的继续,颈缩区域的分子链会受到越来越大的应力。当这个应力超过 PMMA 薄膜的强度极限时,分子链就会断裂,导致薄膜在该处撕开,因此形成了蜂窝状的微孔。较低矮的微柱无法提供足够的拉伸空间,宏观上的表现为 PMMA 成膜时无法顺利被 HPC 微柱戳破,而会覆盖在微柱表面,从而无法形成正常的图案。反之,当 HPC 微柱高于 250 nm 时,PMMA 可以轻易形成图案,因为薄膜在微柱尖端发生破裂,最终沉入底部成膜。

此外,我们进一步研究了不同浓度对 PMMA 薄膜厚度的影响,从图 2(c)可以看出,PMMA 膜厚与其浓度成明显的线性关系。然而,较低浓度(6 mg/mL)的 PMMA 在旋涂沉积时难以均匀覆盖整个图案化 HPC,导致较差的薄膜形貌。为了不影响 ETL 和 HTL 的电荷传输对称性,希望仅在量子点层进行图案化,我们选择效果稳定且尽可能薄的 PMMA 薄膜,即在 8 mg/mL 浓度下制备的电荷阻挡层。图 2(d)展示的是光学显微镜扫描的 HPC 微柱结构,其典型高度为 250 nm,周期为 3 μm ,展现出十分均匀有序的排列。通过将 PMMA 沉积到 HPC 上,形成的薄膜图案如图 2(e)所示,展现出形貌均匀且长程有序的图案,像素孔洞的典型高度为 40 nm,并且严格按照 2 μm 线宽、3 μm 周期排列。此外,我们可以通过图 2(f)展示的扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)图像观察到其更为清晰的形貌。

不同发光器件对功能层沉积的顺序有不同的

要求。例如钙钛矿发光二极管^[42-46],典型的发光层位于 PEDOT:PSS 之上,可以选择在 ITO 或者在 PEDOT:PSS 上沉积电荷阻挡层,此时乙醇溶剂的 HPC 可以轻易转移至高亲水性的目标基底上。然而,一些量子点图案化技术,如喷墨打印技术以及本工作所采用的方法,需要将电荷阻挡层沉积在亲水性较低的功能层如聚(9-乙烯基咔唑)(Poly(9-vinylcarbazole), PVK)和 TFB 上。为了不对这些功能层造成损害,我们必须避免对这些功能层进行直接操作,如等离子体处理或者材料掺杂等。因此,我们需要将视角转变为对 HPC 薄膜参数的调整,例如可以提高 HPC 的分子量,或者可以将溶剂更换成黏度和沸点相对更高的溶剂,目的都是为了增大薄膜黏性,使得薄膜可以顺利快速地转移至目标基板。在这里,我们将 HPC 溶剂从乙醇更换为丁醇,这是因为乙醇的挥发性比丁醇强。在旋涂成膜时,乙醇溶剂会更快地挥发,使得 HPC 分子在较短时间内就开始聚集和缠结,形成的薄膜结构相对较为疏松,分子间的结合力相对较弱,因此薄膜的黏性相对较小。而丁醇挥发速度较慢,在成膜过程中,HPC 分子有更多的时间进行充分的缠结和相互作用,形成的薄膜结构更加紧密,聚合物链之间的结合更加牢固,进而导致薄膜的黏性较大。通过调整溶剂,我们可以将 PMMA 薄膜沉积在 QLED 的任意功能层上,这大大提高了量子点图案化的灵活性。

3.2 高分辨率 QLED 的制备与表征

在成功实现 PMMA 膜层图案化并转移至目标基板的基础上,我们将红色量子点通过旋涂沉积到电荷阻挡层的空位中,如图 3(a)所示。图 3(b)展示了红色量子点的透射电子显微镜(Transmission electron microscope, TEM)扫描图像,其单个纳米颗粒的典型大小在 10 nm 左右。由于 PMMA 为疏水材料,因此量子点溶液会完全嵌入坑内。量子点沉积完成后在 365 nm 紫外光激发下的荧光图案如图 3(c)所示。可以看到其像素边界清晰,排列有序,表明了该方法在大面积制备量子点图案时的优势。像素化量子点薄膜的归一化光致发光光谱(Photoluminescence, PL)如图 3(d)所示,其波峰位于 630 nm。

如图 4(a)所示,我们将图案化量子点薄膜作为 EML,并按照 ITO/PEDOT:PSS/TFB/PMMA-QDs/ZnO/Ag 的结构制备出分辨率为 8 467 PPI 的 QLED

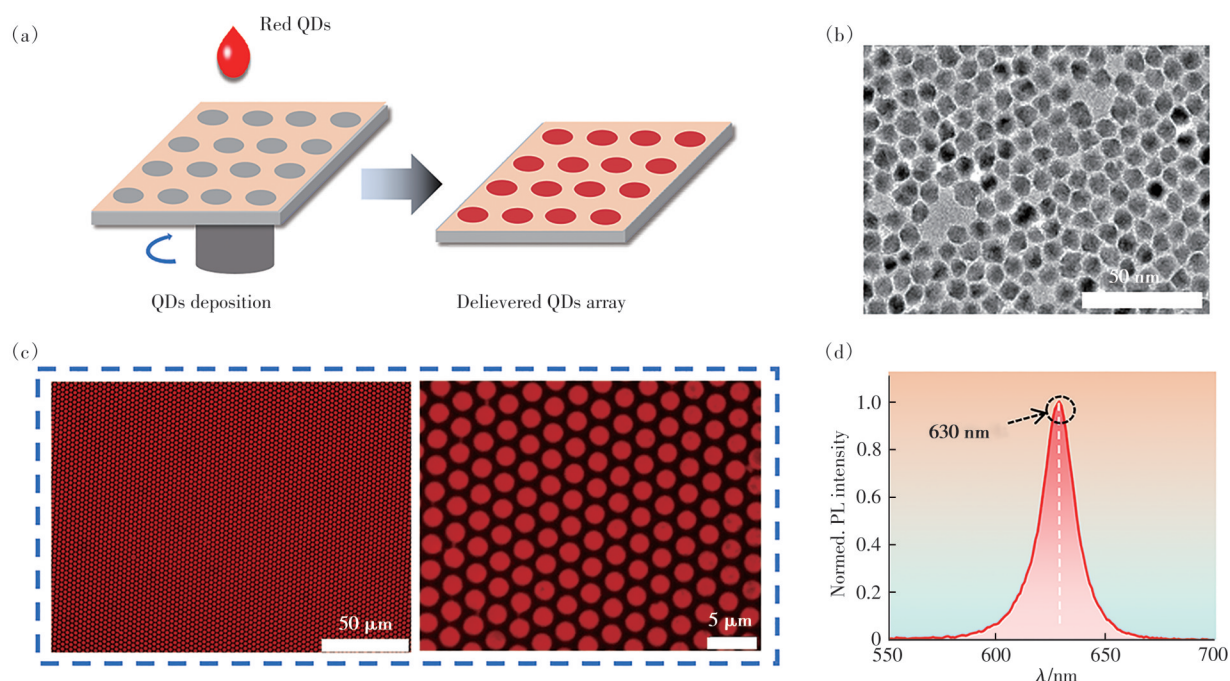


图3 高分辨红色量子点阵列的制备和表征。(a)红色量子点的沉积;(b)红色量子点的TEM图像;(c)红色量子点阵列的荧光显微镜图像;(d)红色量子点阵列的PL光谱

Fig. 3 Preparation and characterisation of high-resolution red quantum dots arrays. (a) Deposition of red quantum dots. (b) TEM image of red quantum dots. (c) Fluorescence microscopy images of the red quantum dots array. (d) PL spectra of the red quantum dots arrays

器件。器件各个功能层的能级排列如图4(b)所示。电荷阻挡层的作用如图4(c)所示,由于PMMA良好的绝缘性能,ETL和HTL注入的电子和空

穴无法通过PMMA,从而只会被限制在量子点层进行复合并发射光子。器件的归一化电致发光光谱(Electroluminescence, EL)如图4(d)所示,可以

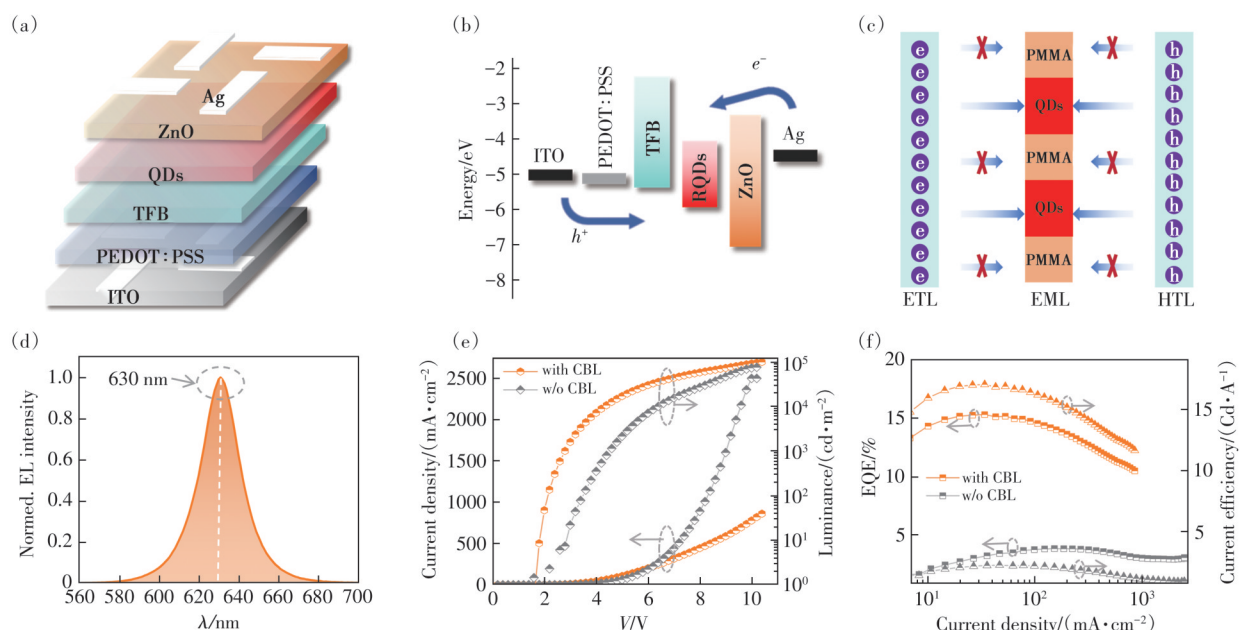


图4 高分辨率红色量子点发光二极管的结构与表征。(a)QLED器件结构;(b)QLED器件能级图;(c)电荷阻挡层的工作示意图;(d)器件的EL光谱;(e)器件的 J - V - L 特性曲线;(f)器件的EQE- J -CE特性曲线

Fig. 4 Structure and characterisation of high-resolution red quantum dots light-emitting diodes. (a) Schematic diagram of the QLEDs. (b) Energy diagram of the QLEDs. (c) Schematic of the operation of the charge barrier layer. (d) Normalized EL spectra of QLEDs. (e) J - V - L characteristics of patterned red QLEDs. (f) EQE- J -CE characteristics of patterned red QLEDs

看到其波峰相较于 PL 光谱没有发生偏移,始终处于 630 nm,表明 CBL 对量子点的发光光谱没有影响。图 4(e)展示的是两组具有相同分辨率、但分别有/无 CBL 的红色高分辨 QLED 器件的电流密度-电压-亮度 (Current density-voltage-luminance, J - V - L) 特性曲线之间的比较,其中无 CBL 的对照器件是通过本实验室的拉膜转印技术^[26](LB-TP)实现的。可以看出,相较于无阻挡层的器件,有阻挡层的器件的电流密度得到了大幅降低,从 2 500 mA/cm²@10 V 降低至 778 mA/cm²@10 V,说明电荷阻挡层能有效地将 ETL 和 HTL 进行隔离,从而显著消除了漏电流。此外,器件的亮度也达到了 100 274 cd/m²。进一步地,如图 4(f)所示,由于漏电流被抑制,单位时间内发出的光子数与单位时间内注入的电子-空穴对的比值增大,使得器件的 EQE 得到了极大的提升,从 3.27% 提高到 15.31%。此外,器件的电流效率也得到了极大提升。这些结果都说明了 CBL 对于提高高分辨率

QLED 性能的重要性。

4 结 论

本工作基于纳米压印构建了蜂窝状 PMMA 电荷阻挡层,并通过优化 PMMA 参数以使其能够转移到 QLED 各个功能层相应的基底上,使其适用于各种器件结构。进一步地,我们将 PMMA 应用在 QLED 发光层,并成功制备了像素密度为 8 467 PPI 的红光 QLED 器件。蜂窝状 PMMA 电荷阻挡层的引入使漏电流得到有效抑制,优化后的器件峰值亮度为 100 274 cd/m²,最大外量子效率为 15.31%。本工作成功解决了通过传统量子点图案化技术制备 QLED 过程中面临的器件效率低下的问题,为实现下一代高分辨率高性能显示器提供了新的思路。

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.20250009>

参 考 文 献:

- [1] FAN J P, HAN C F, YANG G J, *et al.* Recent progress of quantum dots light-emitting diodes: materials, device structures, and display applications [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(37): 2312948.
- [2] 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.
- [3] ZHENG Y T, YU Y S, CHEN W, *et al.* High-resolution light-emitting devices for display applications [J]. *Sci. China Mater.*, 2023, 66(6): 2128-2145.
- [4] QIAN L, ZHENG Y, XUE J G, *et al.* Stable and efficient quantum-dot light-emitting diodes based on solution-processed multilayer structures [J]. *Nat. Photonics*, 2011, 5(9): 543-548.
- [5] SUN Q J, WANG Y A, LI L S, *et al.* Bright, multicoloured light-emitting diodes based on quantum dots [J]. *Nat. Photonics*, 2007, 1(12): 717-722.
- [6] WANG T, CHEN Z J, ZHANG H M, *et al.* Color-tunable alternating-current quantum dot light-emitting devices [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(38): 45815-45821.
- [7] 潘友江,林立华,杨开宇,等. 高分辨率量子点图案化技术 [J]. *光学学报*, 2024, 44(2): 0200004.
PAN Y J, LIN L H, YANG K Y, *et al.* Patterning technology of high-resolution quantum dots [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2024, 44(2): 0200004. (in Chinese)
- [8] 战胜,刘佳田,张汉壮,等. 基于无机电荷产生层的量子点电致发光器件 [J]. *发光学报*, 2022, 43(10): 1469-1477.
ZHAN S, LIU J T, ZHANG H Z, *et al.* Quantum-dot light-emitting diodes based on inorganic charge-generation layer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(10): 1469-1477. (in Chinese)
- [9] JEONG J W, YANG S R, HUR Y H, *et al.* High-resolution nanotransfer printing applicable to diverse surfaces via interface-targeted adhesion switching [J]. *Nat. Commun.*, 2014, 5(1): 5387.
- [10] KEUM H, JIANG Y R, PARK J K, *et al.* Photoresist contact patterning of quantum dot films [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(10): 10024-10031.
- [11] KIM T H, CHUNG D Y, KU J, *et al.* Heterogeneous stacking of nanodot monolayers by dry pick-and-place transfer and

- its applications in quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2013, 4(1): 2637.
- [12] NAM T W, KIM M, WANG Y M, *et al.* Thermodynamic-driven polychromatic quantum dot patterning for light-emitting diodes beyond eye-limiting resolution [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 3040.
- [13] ZHAO J Y, CHEN L X, LI D Z, *et al.* Large-area patterning of full-color quantum dot arrays beyond 1 000 pixels per inch by selective electrophoretic deposition [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 4603.
- [14] FU Z, ZHOU L K, YIN Y, *et al.* Direct photo-patterning of efficient and stable quantum dot light-emitting diodes *via* light-triggered, carbocation-enabled ligand stripping [J]. *Nano Lett.*, 2023, 23(5): 2000-2008.
- [15] QIE Y, HU H L, YU K B, *et al.* Ligand-nondestructive direct photolithography assisted by semiconductor polymer cross-linking for high-resolution quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nano Lett.*, 2024, 24(4): 1254-1260.
- [16] SONG K M, KIM M, CHO H, *et al.* Noninvasive and direct patterning of high-resolution full-color quantum dot arrays by programmed microwetting [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(10): 16598-16607.
- [17] YANG J, LEE M, PARK S Y, *et al.* Nondestructive photopatterning of heavy-metal-free quantum dots [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(43): 2205504.
- [18] BAI J Y, HU H L, YU Y S, *et al.* Achieving high performance InP quantum dot light-emitting devices by using inkjet printing [J]. *Org. Electron.*, 2023, 113: 106705.
- [19] JIANG C B, MU L, ZOU J H, *et al.* Full-color quantum dots active matrix display fabricated by ink-jet printing [J]. *Sci. China Chem.*, 2017, 60(10): 1349-1355.
- [20] 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.
- [21] LIU Y, ZHU Y B, HU H L, *et al.* Quantum dot self-assembly deposition in physically confined microscale space by using an inkjet printing technique [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2021, 12(35): 8605-8613.
- [22] 刘辰, 魏昌庭, 罗鑫, 等. 喷墨打印量子点电致发光显示关键材料与技术的今生与前世 [J]. *发光学报*, 2024, 45(9): 1410-1430.
- LIU C, WEI C T, LUO X, *et al.* Historical evolution and current status of key materials and technologies in inkjet-printed quantum dot electroluminescent displays [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(9): 1410-1430. (in Chinese)
- [23] 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.
- [24] LUO C Z, ZHENG Z S, DING Y H, *et al.* High-resolution, highly transparent, and efficient quantum dot light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(33): 2303329.
- [25] MAO C M, JU S M, ZHENG J P, *et al.* Ultra-high-resolution perovskite quantum dot light-emitting diodes [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(4): 2202058.
- [26] MENG T T, ZHENG Y T, ZHAO D L, *et al.* Ultrahigh-resolution quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Nat. Photonics*, 2022, 16(4): 297-303.
- [27] YANG K Y, WENG X K, FENG J H, *et al.* High-resolution quantum dot light-emitting diodes by electrohydrodynamic printing [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(7): 9544-9550.
- [28] GAO H J, QIE Y, ZHAO H B, *et al.* High-performance, high-resolution quantum dot light-emitting devices through photolithographic patterning [J]. *Org. Electron.*, 2022, 108: 106609.
- [29] SAMAL P, KUMAR SAMAL J R, RHO H S, *et al.* Direct deep UV lithography to micropattern PMMA for stem cell culture [J]. *Mater. Today Bio*, 2023, 22: 100779.
- [30] CHOU S Y, KRAUSS P R, RENSTROM P J. Nanoimprint lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1996, 14(6): 4129-4133.
- [31] GATES B D, XU Q B, STEWART M, *et al.* New approaches to nanofabrication: molding, printing, and other techniques [J]. *Chem. Rev.*, 2005, 105(4): 1171-1196.
- [32] WANG S J, DOU X Y, CHEN L, *et al.* Enhanced light out-coupling efficiency of quantum dot light emitting diodes by nanoimprint lithography [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(24): 11651-11656.
- [33] YANG J, YOO J, YU W S, *et al.* Polymer-assisted high-resolution printing techniques for colloidal quantum dots [J]. *Macromol. Res.*, 2021, 29(6): 391-401.
- [34] OH Y S, LEE K H, KIM H, *et al.* Direct micro/nano patterning of multiple colored quantum dots by large area and

- multilayer imprinting [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2012, 116(21): 11728-11733.
- [35] 刘亚梅, 马海航, 谷岩, 等. 振动辅助纳米压印制备双面光栅结构薄膜 [J]. 光子学报, 2022, 51(6): 0631002.
LIU Y M, MA H H, GU Y. Preparation of double-sided grating structure film by vibration-assisted nanoimprinting lithography [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2022, 51(6): 0631002. (in Chinese)
- [36] 梁龙, 郑悦婷, 林立华, 等. 自浸润式纳米压印耦合实现量子点发光二极管性能提升 [J]. 发光学报, 2024, 45(4): 613-620.
LIANG L, ZHENG Y T, LIN L H, *et al.* Improving performance of quantum dot light-emitting diode with self-immersed nanoimprint-coupling [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(4): 613-620. (in Chinese)
- [37] 孙宝玉, 许济琛, 谷岩, 等. 振动辅助纳米压印制备大面积光栅结构 [J]. 应用光学, 2022, 43(1): 124-130.
SUN B Y, XU J C, GU Y, *et al.* Preparation of large-area grating structure by vibration-assisted nanoimprint [J]. *J. Appl. Opt.*, 2022, 43(1): 124-130. (in Chinese)
- [38] BEHL M, SEEKAMP J, ZANKOVYCH S, *et al.* Towards plastic electronics: patterning semiconducting polymers by nanoimprint lithography [J]. *Adv. Mater.*, 2002, 14(8): 588-591.
- [39] HUANG J R, YIN Y, LIU G W, *et al.* Amorphous photonic structure patterns with thin film interference effects for multi-level anticounterfeiting [J]. *Langmuir*, 2024, 40(47): 25034-25041.
- [40] LI G, LENG M Y, WANG S C, *et al.* Printable structural colors and their emerging applications [J]. *Mater. Today*, 2023, 69: 133-159.
- [41] MORIEL A, BOUCHBINDER E. Necking instabilities in elastoviscoplastic materials [J]. *Phys. Rev. Mater.*, 2018, 2(7): 073602.
- [42] CHANG C Y, SOLODUKHIN A N, LIAO S Y, *et al.* Perovskite white light-emitting diodes based on a molecular blend perovskite emissive layer [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(28): 8634-8642.
- [43] WEI Z H, XING J. The rise of perovskite light-emitting diodes [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2019, 10(11): 3035-3042.
- [44] LU J X, WEI Z H. The strategies for preparing blue perovskite light-emitting diodes [J]. *J. Semicond.*, 2020, 41(5): 051203.
- [45] ZHAO C Y, ZHANG D Z, QIN C J. Perovskite light-emitting diodes [J]. *CCS Chem.*, 2020, 2(4): 859-869.
- [46] YU R N, LI C X, ZHAO B, *et al.* Frontiers in green perovskite light-emitting diodes [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 18(4): 2300780.



黄兴云(2000-),男,江西上饶人,硕士研究生,2022年于赣南师范大学获得学士学位,主要从事量子点发光器件制备及性能提升的研究。
E-mail: huangxydianzi@163.com



李福山(1978-),男,福建莆田人,博士,研究员,2005年于北京大学获得博士学位,主要从事量子点光电材料与器件的相关研究。
E-mail: fushanli@hotmail.com



杨开宇(1984-),男,福建福州人,博士,副教授,2019年于福州大学获得博士学位,主要从事量子点、钙钛矿等发光材料与器件的相关研究。
E-mail: kaikaibrian@fzu.edu.cn