

文章编号: 1000-7032(2026)05-0846-08

# 基于纳米压印和热调控转印的高分辨率量子点发光二极管

谢潇婷<sup>1</sup>, 林海燕<sup>1</sup>, 赵宇森<sup>1</sup>, 陈伟国<sup>1,2\*</sup>, 杨开宇<sup>1,2\*</sup>

(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:** 量子点发光二极管(Quantum dot light-emitting diodes, QLEDs)具有高色纯度、宽色域和溶液加工兼容性等优势, 被视为下一代高分辨率显示技术的重要发展方向。然而, 如何在无损于量子点(Quantum dots, QDs)光学性能的前提下实现高分辨率图案化, 仍是其走向实际应用的关键技术瓶颈。本文针对高分辨率QLEDs制备中的图案化难题, 提出了一种基于纳米压印与热调控转印的新型图案化工艺。该方法通过硅模板压印在聚乙烯醇缩丁醛(PVB)表面构建蜂窝状微结构, 并利用溶液润湿性控制量子点的选择性填充, 再经由热调控转印过程, 能够制备特征尺寸低至1.5  $\mu\text{m}$ 、分辨率为9 072像素每英寸(Pixel per inch, PPI)的高均匀性量子点阵列。通过采用更高分辨率的模板, 我们还实现了最高25 400 PPI像素密度的量子点阵列。进一步地, 我们通过空穴传输层(Hole transport layer, HTL)上制备量子点阵列, 成功制得了高分辨率红色QLEDs器件(9 072 PPI), 其最大外量子效率(EQE)达10.91%, 最大亮度为164 421  $\text{cd}/\text{m}^2$ 。本工作为高分辨率QLEDs的制备提供了一种工艺稳定、可重复的图案化新途径。

**关键词:** 量子点发光二极管(QLEDs); 高分辨率; 纳米压印; 热调控转印

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260021

CSTR: 32170.14.CJL.20260021

## High-resolution Quantum Dot Light-emitting Diodes Based on Nanoimprint Lithography and Thermal-regulated Transfer Printing

XIE Xiaoting<sup>1</sup>, LIN Haiyan<sup>1</sup>, ZHAO Yusen<sup>1</sup>, CHEN Weiguo<sup>1,2\*</sup>, YANG Kaiyu<sup>1,2\*</sup>

(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: bestweiguo@fzu.edu.cn; kaikaibrian@fzu.edu.cn

**Abstract:** Quantum dot light-emitting diodes (QLEDs), renowned for their high color purity, wide color gamut, and solution processability, are considered a pivotal technology for next-generation high-resolution displays. However, achieving high-resolution patterning without compromising the optical properties of quantum dots (QDs) remains a critical challenge hindering their practical application. Addressing this patterning bottleneck in high-resolution QLEDs fabrication, this work presents a novel patterning strategy based on nanoimprint lithography and thermally regulated transfer printing. The proposed method involves fabricating honeycomb microstructures on a polyvinyl butyral (PVB) surface using a silicon template, followed by selective filling of QDs controlled by solution wettability. Through a subsequent thermal-regulated transfer process, highly uniform QDs arrays with a feature size as small as 1.5  $\mu\text{m}$  and a resolution of 9 072 pixels per inch (PPI) are successfully prepared. By employing higher-resolution templates, we have further achieved QDs array with a maximum pixel density of 25 400 PPI. Furthermore, we successfully fabricated high-resolution red QLEDs device (9 072 PPI) by integrating the QDs array onto hole transport layer (HTL), achieving a maximum external quantum efficiency (EQE) of 10.91% and a peak luminance of

收稿日期: 2026-01-21; 修订日期: 2026-02-04

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3606500); 国家自然科学基金(62575071, 62305063); 福建省自然科学基金(2023J01257)  
Supported by National Key R&D Program of China(2022YFB3606500); National Natural Science Foundation of China (62575071, 62305063); Provincial Natural Science Foundation of Fujian(2023J01257)

164 421 cd/m<sup>2</sup>. This work provides a stable and reproducible patterning pathway for the fabrication of high-resolution QLEDs.

**Keywords:** quantum dot light-emitting diodes (QLEDs); high-resolution; nanoimprint; thermal regulated transfer printing

## 1 引言

量子点发光二极管(QLEDs)因其优异的发光性能——包括高色纯度、宽色域覆盖、高荧光量子产率以及溶液加工兼容性,在高分辨率显示与柔性光电子器件领域极具发展潜力<sup>[1-5]</sup>。近年来,随着微显示与增强现实/虚拟现实(AR/VR)等领域对像素密度要求的持续提升,发展能够制备高分辨率、高均匀性的量子点(Quantum dots, QDs)图案化技术变得至关重要<sup>[6-9]</sup>。传统的量子点图案化技术包含光刻技术<sup>[10-12]</sup>、激光技术<sup>[13]</sup>、喷墨印刷<sup>[14-16]</sup>以及转移印刷(Transfer printing, TP)<sup>[17-18]</sup>。然而,传统的量子点光刻图案化工艺涉及紫外曝光、显影及刻蚀步骤,常导致量子点表面配体损伤、发光猝灭<sup>[19]</sup>;激光技术图案化量子点的缺陷在于其工艺过程中的紫外线和化学试剂会损害量子点,进而降低器件性能;喷墨打印可在不损伤量子点的前提下实现点阵沉积,但其分辨率受限于墨滴扩散与咖啡环效应<sup>[20]</sup>,难以满足日益增长的显示器分辨率的要求;转印技术(TP)虽可避免溶剂直接作用,却普遍面临图案保真度低的挑战<sup>[21]</sup>,这不仅制约了图案分辨率与均匀性,也影响QLEDs器件的性能与工艺良率<sup>[22]</sup>。因此,迫切需要开发一种能够在温和条件下在高分辨率QLEDs器件中实现量子点无损、高保真图案的工艺。

纳米压印是制备微结构的传统技术<sup>[23-26]</sup>,能够很好地加工聚合物、量子点等多种材料,这为实现高分辨率QLEDs的制备提供了多样化的技术路径<sup>[27-28]</sup>。例如,Huang等通过开发新型纳米压印工艺制备绝缘蜂窝状聚合物薄膜作为电荷阻挡层<sup>[29]</sup>,制备高分辨率QLEDs并且抑制像素间漏电流,提升了器件效率,但由于量子点图案化经过多步工艺,限制了该工艺能够实现的量子点图案的最高分辨率。量子点直接图案化方面已有研究,例如,Oh等通过将纳米压印技术直接应用于量子点薄膜的图案化<sup>[30]</sup>,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QLEDs器件中。因此,需要开发一

种兼具图案精度及良好器件集成性的工艺,以推动高分辨率QLEDs技术的进一步发展。

针对上述挑战,本工作提出一种基于热调控聚乙烯醇缩丁醛(PVB)黏附力的压印-转印新工艺。本工艺以PVB薄膜为图案载体与界面调控层,首先利用量子点溶液对PVB表面的良好润湿性,通过旋涂实现量子点在微坑内的选择性填充;进而借助PVB材料独特的热调控特性,通过对其温度进行控制,调节在转印过程中PVB薄膜的模量以及量子点与目标衬底之间的黏附力,从而在无需化学交联、激光处理等条件下,实现量子点图案的高完整性制备。基于此,我们成功制备了特征尺寸为1.5 μm、周期为3 μm的高均匀性量子点阵列,实现了9 072像素每英寸(Pixel per inch, PPI)的像素密度。并通过采用更高分辨率的模板,获得了最高分辨率为25 400 PPI量子点阵列。在此基础上,我们将量子点阵列集成于ITO/PEDOT:PSS/TFB/QDs/ZnO/Ag的红色QLEDs器件中(9 072 PPI),器件表现出优异的电致发光性能:在8 V驱动电压下亮度为164 421 cd/m<sup>2</sup>,最大外量子效率(EQE)为10.91%。本工作不仅提供了一种工艺稳定、能有效保持量子点本征发光特性的图案化新策略,也为未来开发超高分辨率、全彩QLEDs微显示提供了重要的技术基础与工艺借鉴。

## 2 实验

### 2.1 材料准备

聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)、聚(9,9-二辛基芴-共-N-(4-丁基苯基)二苯胺)(TFB)和氧化锌(ZnO)购自西安浴日光能有限公司。聚乙烯醇缩丁醛(PVB)、氯苯(99.8%)、正丁醇(99.8%)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)(平均M<sub>w</sub>为100 000)购自Sigma Aldrich。红色CdSe/ZnS量子点来自合肥福纳科技公司。丙酮采购自国药集团化学试剂有限公司。所有的化学品都可以直接使用,无需进一步净化。实验前,需要将PVB溶于正丁醇中以制成50 mg/mL溶液;将TFB溶于氯苯中配制成8 mg/mL的溶液;将红色量子点用正

辛烷稀释;将 PMMA 溶于丙酮中形成 2 mg/mL 的溶液。

## 2.2 QLEDs 制备

ITO(氧化铟锡)玻璃需要在使用前依次用去离子水、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 以增强其表面亲水性。接着将 PEDOT:PSS 按照 3 000 r/min 的转速在 ITO 玻璃上旋涂 40 s,并在 150 °C 加热 20 min。然后,将 TFB 按照 3 000 r/min、40 s 的参数旋涂沉积在 PEDOT:PSS 上,并在 120 °C 加热 20 min。接着,将通过本工艺制备的量子点阵列转印在 TFB 薄膜上。将 PMMA 作为电荷阻挡层,以 3 000 r/min、40 s 的参数旋涂沉积在量子点阵列上,并以 80 °C 加热 5 min。再将 ZnO 以 3 000 r/min、40 s 的参数旋涂沉积在量子点阵列上,并以 80 °C 加热 10 min。最后,在真空镀膜机中沉积 100 nm 厚的银电极。

## 2.3 实验表征

硅模板、PVB 微结构以及量子点阵列的光学显微镜图像由荧光显微镜(奥林巴斯 BXFM)获得。硅模板、PVB 微结构以及量子点阵列的三维形貌图像由 3D 显微镜(奥林巴斯 BXFM)获得。光致发光

(Photoluminescence, PL)光谱通过 FLS980 光谱仪(爱丁堡),使用连续氙灯(450 W)和脉冲闪光灯进行测量。CIE、EL、亮度、电流密度、EQE 特性曲线通过带有硅光电二极管的积分球(XPQY-EQE-Adv)测量。

## 3 结果与讨论

### 3.1 蜂窝状量子点阵列制备

为了制备具有蜂窝结构的量子点阵列,我们采用圆孔直径为 1.5  $\mu\text{m}$ 、周期为 3  $\mu\text{m}$  的蜂窝状硅模板作为压印母版。图 1(a)展示了蜂窝状量子点阵列的制备流程,主要包括以下步骤:(I)在平坦的聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)表面以 2 000 r/min、40 s 的参数旋涂 200  $\mu\text{L}$  聚乙烯醇缩丁醛(PVB)溶液,静置 5 min,形成均匀薄膜。(II)将带有蜂窝状微结构的硅模板覆盖于 PVB 薄膜表面,通过定制夹具施加恒定机械压力,并在 120 °C 下加热 6 min,使 PVB 填充模板结构,在 PVB 表面形成蜂窝状微坑阵列,随后移除硅模板。(III)~(IV)在有微结构的 PVB 薄膜表面以 2 000 r/min、40 s 的参数旋涂红色量子点溶液。得益于量子点对 PVB 表面良好的润湿性与蜂窝状微坑结构的协

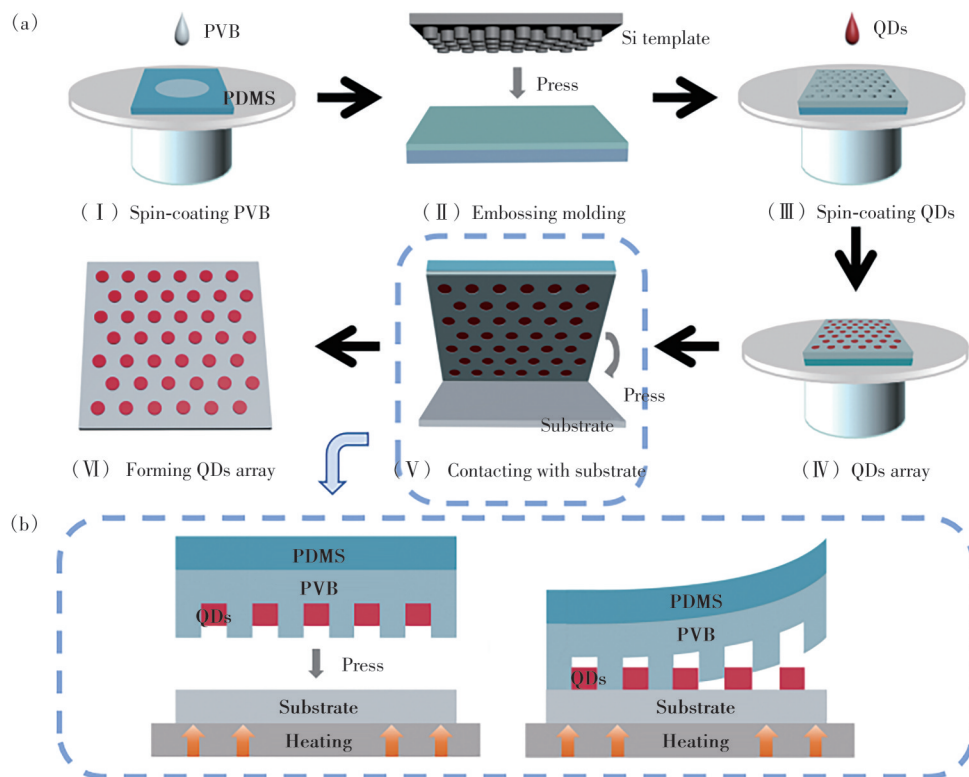


图 1 蜂窝状量子点阵列制备流程。(a)PVB 微结构以及量子点阵列制备流程;(b)量子点阵列转印细节

Fig.1 Fabrication process of honeycomb patterned QDs array. (a)Schematic illustration of the fabrication process for PVB microstructures and QDs array. (b)Detailed procedure of QDs array transfer

同作用,量子点溶液在旋涂过程中通过毛细力驱动优先填充于凹坑内部,同时在离心力作用下从坑外凸起区域自发去湿润,从而实现高选择性的图案化沉积。随后在80℃下加热10 min,固化形成量子点阵列。(V)~(VI)将带有量子点阵列的PDMS-PVB复合膜与目标基板贴合,放置在设有特定温度的加热台上,施加压力保持10 s,之后从一侧缓慢剥离PDMS-PVB,量子点阵列即被转印至目标基板上。需特别说明的是,为保证图案转移的完整性和均匀性,在贴合过程中应避免对PDMS基底施加过大应力或引起形变。贴附时应确保PDMS与目标基板紧密平整接触,剥离时以缓慢、均匀的方式进行,如图1(b)所示。该方法能够实现量子点阵列的高保真度转移,且无需化学交联、激光处理等条件,较好地保持了其光学性能。

### 3.2 温度与浓度对转印量子点阵列质量的影响

接下来,我们研究了不同工艺条件对量子点阵列质量的影响。在典型的CdSe-QLEDs结构中,发光层(Emission layer, EML)通常位于空穴传输层(Hole transport layer, HTL)上方,量子点阵列能否完整转移至TFB表面直接影响器件性能。首先,我们研究了转印温度对量子点阵列转移完整性的影响,结果如图2(a)所示。在较低温度(<70℃)下,PVB薄膜模量较高、弹性差,难以有效推动量子点与TFB表面形成紧密接触,导致界面

黏附力弱,量子点无法从PVB载体上脱离。当温度升至70~100℃时,PVB逐渐软化进入高弹态,在压力下发生弹性变形,从而将量子点均匀“推向”TFB实现紧密接触,量子点/TFB界面黏附力显著提高。但由于PVB弹性响应仍不均匀,量子点转印阵列呈现局部转印特征。在100℃的优化温度下,PVB的状态达到与TFB界面理想匹配:弹性变形能力保障量子点阵列与TFB完整均匀接触,弹性恢复力则维持图案结构完整性。此时,量子点/TFB界面黏附力超过PVB/量子点界面结合力,剥离时分离界面转移至PVB/量子点之间,实现量子点阵列的完整、高保真转印。在110℃下转印图案的形貌与100℃的结果高度一致,这恰好证明100℃已足以实现PVB流变性的充分优化,从而保证图案的完整转印。但当温度超过110℃,PVB过度软化并呈现弹性过大,易导致PVB薄膜一同转印至TFB表面,影响工艺稳定性。因此,100℃是实现量子点阵列转印完整性的最佳工艺窗口。图2(b)展示了制备过程中使用的硅模板、具有蜂窝状微结构的PVB薄膜及所制备的量子点阵列。在光照下,样品表面显示出均匀分布的彩色衍射图样,该彩色图样主要源于白光照射下蜂窝状微结构产生的衍射效应:当具有特定周期(如3 μm)的微结构被白光照射时,其周期性排列的微结构会作为二维光栅,使不同波长的光发生

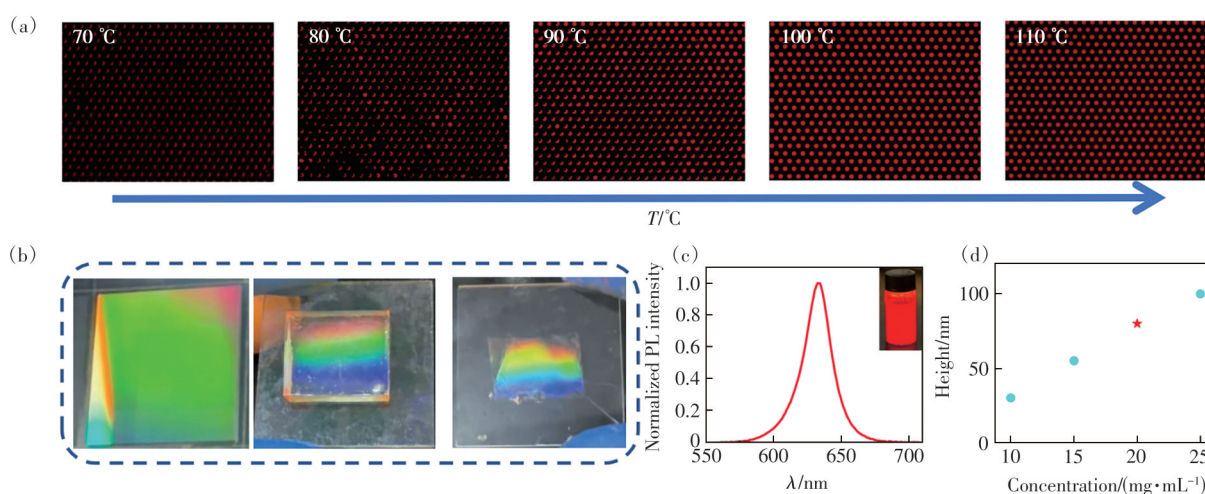


图2 温度与浓度对量子点图案化质量的影响。(a)不同转印温度下量子点阵列的荧光显微镜图像;(b)硅模板、PVB薄膜及量子点阵列的结构色图片;(c)红色量子点的归一化PL光谱,插图为紫外光激发下的溶液荧光;(d)量子点阵列厚度与溶液浓度的关系

Fig.2 Influence of temperature and concentration on the quality of QDs array. (a)Fluorescence microscopy images of QDs array at different transfer temperatures. (b)Structural color images of the silicon template, PVB film, and QDs array. (c)Normalized PL spectrum of red QDs. The inset shows the solution fluorescence under UV excitation. (d) Relationship between QDs array height and solution concentration

衍射并产生相长干涉,从而在人眼或相机中呈现出特定的彩色条纹。这种图样的色彩分布与微坑的周期、深度等参数直接相关,是其高度周期性和均匀性的直接光学证明。图 2(c)为本工作所用红色量子点的归一化 PL 光谱,其发射峰位于 633 nm,表现出优异的单色性与发光特性,适用于后续 QLEDs 器件的制备。此外,我们研究了量子点溶液浓度对所制备量子点高度的影响。如图 2(d)所示,薄膜厚度与溶液浓度呈现良好的线性依赖关系。实验发现,当浓度低于 15 mg/mL 时,量子点较薄且形貌较差,难以形成连续均匀的发光层。在 20 mg/mL 浓度下,薄膜厚度约为 80 nm,该厚度在保证发光层结构完整性的同时,有利于实现载流子的有效限制与辐射复合。当浓度增至 25 mg/mL 时,薄膜厚度达 100 nm,过厚的发光层将显著增加驱动电压,并且效率低下。综合考虑薄膜形貌控制与平衡载流子注入,确定 80 nm 为本工作制备高分辨率 QLEDs 器件的最佳发光层厚度。

图 3(a)为通过荧光显微镜获取的硅模板、经压印形成的具有蜂窝状微结构的 PVB 薄膜以及

最终制得的量子点阵列的图像。图像显示,经过纳米压印、量子点旋涂、热调控转印的步骤之后,量子点图案依然完整保留了硅模板的结构特征,呈现均匀有序的排列,表明该工艺具有良好的图案保真度。图 3(b)进一步通过三维形貌测试展示了本工艺各步骤的表面结构形貌。硅模板的微结构高度约为 900 nm,经压印后 PVB 薄膜的对应结构高度约为 500 nm,而最终形成的量子点图案平均高度约为 80 nm。结构高度因工艺特性而逐级递减,最终制得的量子点阵列的图案与模板图案保持了高度一致,该结果证实了压印与转印工艺具有良好的图案复现性。为说明本方法在制备不同图案形状时的适用性,我们进一步制备了多种量子点阵列。结果如图 3(c)所示,我们成功实现了红色蜂窝状图案(尺寸 500 nm,周期 1  $\mu\text{m}$ ),分辨率为 25 400 PPI;绿色蜂窝状图案(尺寸 1  $\mu\text{m}$ ,周期 2  $\mu\text{m}$ ),分辨率为 12 700 PPI;蓝色蜂窝状图案(尺寸 1.5  $\mu\text{m}$ ,周期 3  $\mu\text{m}$ ),分辨率为 9 072 PPI。这些图案均展现出良好的周期性及均匀的发光,表明本工艺具备良好的图案设计灵活性,在微纳

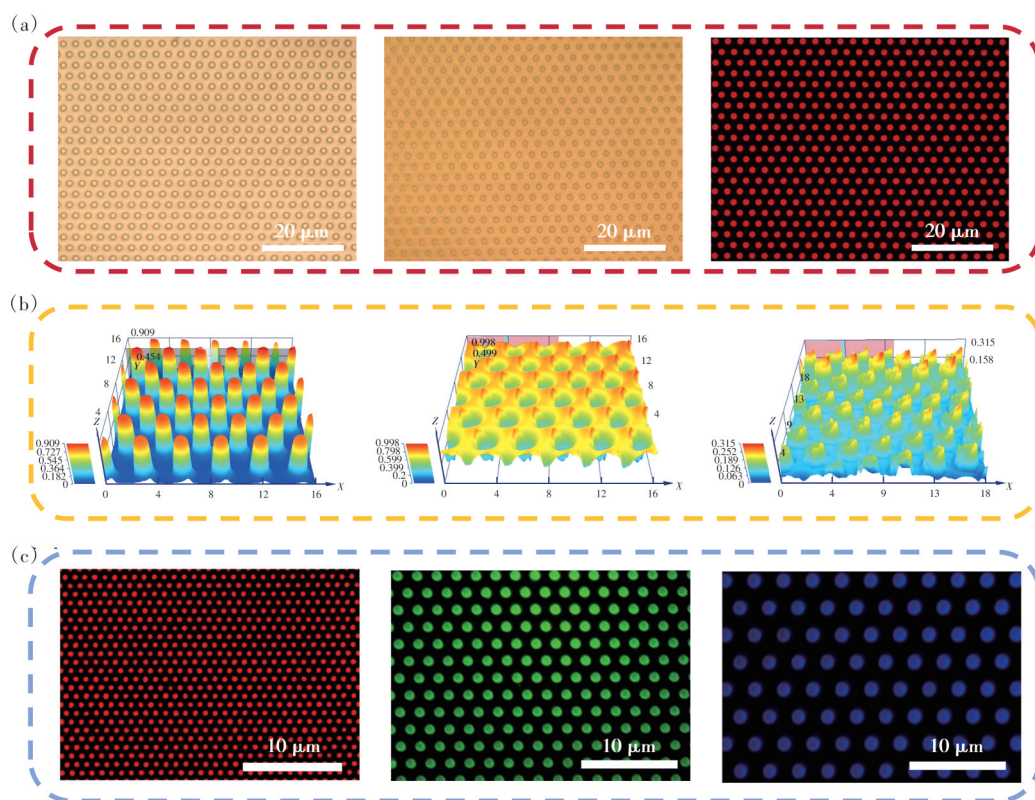


图 3 量子点阵列表征。(a)硅模板、PVB 薄膜与量子点阵列的荧光显微镜图像;(b)硅模板、PVB 薄膜与量子点阵列的三维形貌图像;(c)不同量子点阵列的图案展示

Fig.3 Characterization of QDs array. (a)Fluorescence microscopy images of the silicon template, PVB film, and QDs array. (b) Three-dimensional topography images of the silicon template, PVB film, and QDs array. (c)Pattern demonstrations of different QDs array

光电子器件与显示领域具有潜在应用价值。

### 3.3 高分辨量子点发光器件制备

如图4(a)所示,我们进一步将图案化的量子点薄膜作为发光层,采用ITO/PEDOT:PSS/TFB/QDs-PMMA/ZnO/Ag的结构制备了分辨率为9 072 PPI的QLEDs器件。该器件的能级结构如图4(b)所示。图4(c)展示了红色QLEDs器件的归一化电致发光(Electroluminescence, EL)光谱,其发射峰位于633 nm,与量子点PL光谱的峰值完全一致,说明器件制备对量子点的发光特性没有影响,未发生光谱偏移。插图为器件在工作状态下的荧光显微镜

图,通过像素阵列验证了高分辨QLEDs的成功制备。图4(d)为器件发光的CIE 1931色坐标,其值为(0.692 3, 0.310 8),位于标准红色区域,表明该器件具有良好的色纯度。图4(e)为器件的电流密度-电压-亮度( $J$ - $V$ - $L$ )特性曲线,在8 V电压下器件的亮度达到164 421  $\text{cd}/\text{m}^2$ ,表现出优异的发光性能。进一步地,如图4(f)所示,该器件的最大外量子效率(EQE)可达10.91%,说明器件在实现高亮度的同时具备良好的电光转换效率。上述结果共同表明,基于本工艺制备的图案化量子点阵列可用于构建高分辨率、色纯度良好的QLEDs器件。

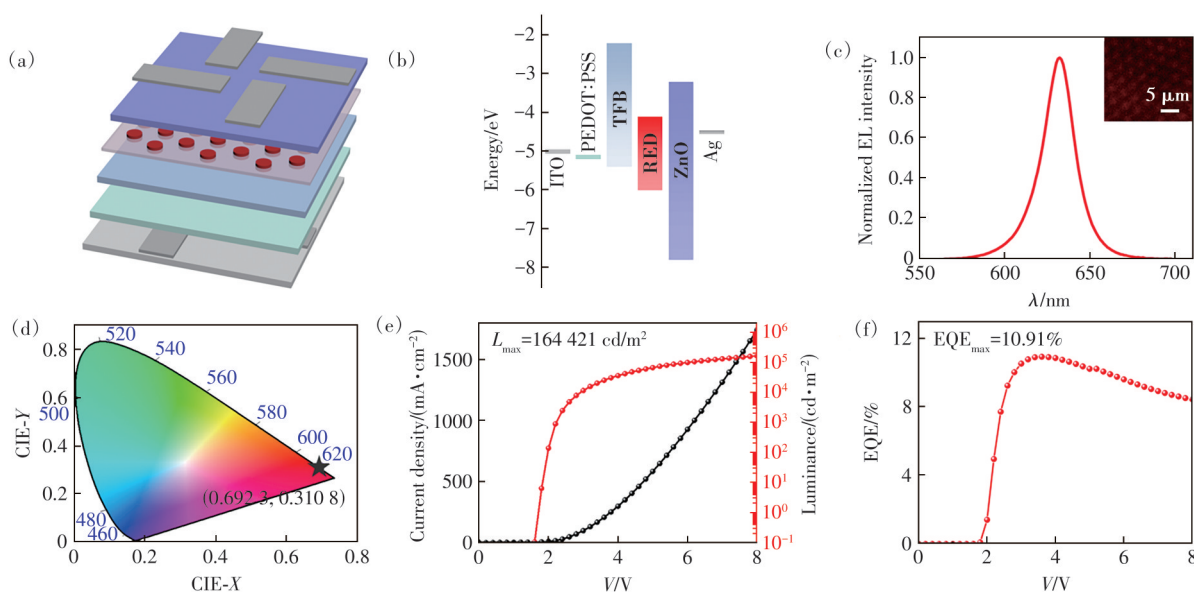


图4 高分辨率红色QLEDs结构与表征。(a)QLEDs器件结构;(b)器件能级图;(c)器件的EL光谱,插图为器件在工作状态下的荧光显微镜图;(d)器件的CIE坐标;(e)器件的 $J$ - $V$ - $L$ 特性曲线;(f)器件的EQE- $V$ 特性曲线

Fig.4 Structure and characterisation of high-resolution red QLEDs. (a)Schematic diagram of the QLEDs. (b)Energy diagram of the QLEDs. (c)Normalized EL spectra of the QLEDs. The inset shows a fluorescence microscopy image of the device under an applied bias. (d)CIE coordinates of the QLEDs. (e) $J$ - $V$ - $L$  characteristics of the QLEDs. (f)EQE- $V$  characteristics of the QLEDs

## 4 结 论

本工作提出的工艺核心在于利用PVB薄膜作为图案化载体和界面调控层,通过控制转印温度以调节其在转印过程中的模量以及与量子点、目标衬底之间的界面黏附力。这种方法成功规避了传统图案化技术中常需的化学交联、激光处理等可能损伤量子点的条件,实现了对量子点温和、无损的图案化制备。实验结果表明,该工艺能够制备出特征尺寸低至1.5  $\mu\text{m}$ 、分辨率为9 072 PPI的高均匀性量子点阵列,并成功实现了高达25 400 PPI的像素密度,展现了其在超高分辨率应用方面的巨大潜力。将本

工艺制备的量子点阵列集成至红色QLEDs器件(9 072 PPI),器件表现出卓越的电致发光性能:最大亮度可达164 421  $\text{cd}/\text{m}^2$ ,最大EQE达到10.91%。这些性能参数充分验证了该图案化工艺在保持量子点高效发光特性方面的有效性。综上所述,本工作提出了一种工艺稳定、可重复且能较好保持量子点本征发光特性的图案化新策略,为突破高分辨率QLEDs的技术瓶颈提供了切实可行的新路径。

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.20260021>

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] DAI X L, DENG Y Z, PENG X G, *et al.* Quantum-dot light-emitting diodes for large-area displays: towards the dawn of commercialization [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(14): 1607022.
- [ 3 ] SHEN H B, GAO Q, ZHANG Y B, *et al.* Visible quantum dot light-emitting diodes with simultaneous high brightness and efficiency [J]. *Nat. Photonics*, 2019, 13(3): 192-197.
- [ 4 ] 相恒阳, 王益飞, 于鹏, 等. 磷化铟量子点及其电致发光研究现状和挑战 [J]. *发光学报*, 2024, 45(2): 231-251.  
XIANG H Y, WANG Y F, YU P, *et al.* Current status and challenges in indium phosphide quantum dots and their electroluminescence [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(2): 231-251. (in Chinese)
- [ 5 ] 吕玫, 张丽, 张彦, 等. 量子点发光二极管稳定性提高策略 [J]. *中国光学*, 2021, 14(1): 117-134.  
LYU M, ZHANG L, ZHANG Y, *et al.* Strategies for improving the stability of quantum dots light-emitting diodes [J]. *Chin. Opt.*, 2021, 14(1): 117-134. (in Chinese)
- [ 6 ] ZHAO D L, ZHENG Y T, MENG T T, *et al.* Efficient quantum dot light-emitting diodes with ultra-homogeneous and highly ordered quantum dot monolayer [J]. *Sci. China Mater.*, 2022, 65(3): 757-763.
- [ 7 ] YANG J, CHOI M K, YANG U J, *et al.* Toward full-color electroluminescent quantum dot displays [J]. *Nano Lett.*, 2021, 21(1): 26-33.
- [ 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]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(11): 2000-2016. (in Chinese)
- [ 9 ] MA T, WANG Y F, CHEN J, *et al.* One-step, mask-free, rapid laser writing fabrication of electroluminescent perovskite@oxide pixels for ultra-high PPI, efficient Micro-QLEDs [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(7): 2413811.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 蒋博瑞, 宋博翔, 陈恩果, 等. 基于 N-苯基马来酰亚胺改性的量子点光刻胶制备色转换像素化薄膜 [J]. *发光学报*, 2025, 46(3): 536-544.  
JIANG B R, SONG B X, CHEN E G, *et al.* Quantum dot photoresists for pixelated color conversion films based on N-Phenylmaleimide modification [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(3): 536-544. (in Chinese)
- [ 13 ] SUN S Z, WANG C, YAN C Y, *et al.* Femtosecond laser induced amorphization of quantum dots and application in three-dimensional optical data storage [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2022, 105(12): 7291-7301.
- [ 14 ] WEI C T, SU W M, LI J T, *et al.* A universal ternary-solvent-ink strategy toward efficient inkjet-printed perovskite quantum dot light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(10): 2107798.
- [ 15 ] QIU G R, YI Y Q Q, XIE L M, *et al.* High-efficiency inkjet-printed quantum-dot light-emitting diode enabled by solvent-resistant hole transport materials with high surface energy and extended conjugation [J]. *Sci. China Mater.*, 2024, 67(1): 205-213.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] YANG K Y, ZHENG H X, ZHONG C, *et al.* High-resolution and high-performance full-color electroluminescent quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nano Energy*, 2025, 138: 110817.
- [ 19 ] KONG X M, FAN X T, WANG Y H, *et al.* Recent advances of photolithography patterning of quantum dots for micro-display applications [J]. *Nano Mater. Sci.*, 2025, 7(1): 49-64.
- [ 20 ] WANG C, PARK M J, CHOO Y W, *et al.* Inkjet printing technique for membrane fabrication and modification: a review

- [J]. *Desalination*, 2023, 565: 116841.
- [21] HONG S W, SHIN H H, AHN S, *et al.* Assembly and integration of micro-led displays: a review of transfer methods targeting near-perfect yield [J]. *Int. J. Extrem. Manuf.*, 2026, 8(2): 022008.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 高晓蕾, 陈艺勤, 郑梦洁, 等. 大面积纳米压印技术及其器件应用 [J]. *光学精密工程*, 2022, 30(5): 555-573.  
GAO X L, CHEN Y Q, ZHENG M J, *et al.* Large-area nanoimprint lithography: processes and device applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(5): 555-573. (in Chinese)
- [26] 高秀敏, 刘岳峰, 张海静, 等. 用于有机发光器件和有机激光的纳米压印结构 [J]. *液晶与显示*, 2021, 36(1): 8-20.  
GAO X M, LIU Y F, ZHANG H J, *et al.* Nanoimprinted structures for organic light-emitting devices and lasers [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2021, 36(1): 8-20. (in English)
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 黄兴云, 谢潇婷, 杨开宇, 等. 基于纳米压印的高分辨率和高效率量子点发光二极管 [J]. *发光学报*, 2025, 46(6): 1120-1128.  
HUANG X Y, XIE X T, YANG K Y, *et al.* High-resolution and high-performance quantum dots light-emitting diode based on nanoimprint [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(6): 1120-1128. (in Chinese)
- [30] OH Y S, LEE K H, KIM H, *et al.* Direct Micro/Nano patterning of multiple colored quantum dots by large area and multi-layer imprinting [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2012, 116(21): 11728-11733.



谢潇婷(2002-),女,福建连江人,硕士研究生,2023年于福建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: 1106249609@qq.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



陈伟国(1989-),男,江西赣州人,博士,讲师,2023年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事半导体胶体量子点、钙钛矿等发光材料与光电器件的研究。  
E-mail: bestweiguo@fzu.edu.cn