

文章编号:1007-2780(2026)01-0163-08

胶体量子点直接光刻技术的发展与应用

黄凌祥, 常赛豪, 满忠伟*, 唐爱伟*

(北京交通大学 物理科学与工程学院, 北京 100044)

摘要:量子点发光二极管(QLED)因其色彩纯度高、发光效率高、稳定性好、可溶液加工、全彩可调以及与现有工艺兼容性好,被认为是下一代高分辨率、低功耗显示器件的有力候选。实现量子点图案化是其显示应用的前提,多种光刻技术应运而生。目前QLED图案化技术正在从传统光刻、喷墨打印等工艺复杂、性能损伤大的制备方法向直接光刻等高分辨率、无损伤方法演进。本文综述了量子点直接光刻技术的基本原理,重点讨论了3种光敏基团(叠氮类、偶氮类、二硫键类)的交联机制、光刻性能及其对QLED性能的影响,对未来量子点直接光刻技术的发展趋势及其在QLED显示的发展方向进行了预测,对未来图案化QLED显示技术的发展方向具有一定参考意义。

关键词:量子点;直接光刻;图案化;QLED;光刻交联剂

中图分类号:TN383+.1;O482.31 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2025-0198 **CSTR:**32172.14.CJLCD.2025-0198

Development and applications of direct photolithography of colloidal quantum dots

HUANG Lingxiang, CHANG Saihao, MAN Zhongwei*, TANG Aiwei*

(School of Physical Science and Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Quantum dot light-emitting diodes(QLEDs), owing to their high color purity, excellent emission efficiency, solution processability, full-color tunability, and compatibility with existing fabrication techniques, are regarded as strong candidates for next-generation high-resolution and low-power display devices. The realization of quantum dot patterning is a prerequisite for their display applications, giving rise to the emergence of various photolithographic techniques. At present, QLED patterning technologies are evolving from methods such as traditional photolithography and inkjet printing, which involve complex processes and often induce performance degradation, toward direct photolithography approaches that enable high resolution and nondestructive patterning. This article reviews the fundamental principles of direct photolithography of quantum dots, with a particular focus on the crosslinking mechanisms, lithographic performance, and impacts on QLED device characteristics of three representative photosensitive groups (azide, azo, and disulfide). Furthermore, the future development trends of direct photolithography for quantum dots and its potential directions in QLED

收稿日期:2025-09-23;修订日期:2025-10-16.

基金项目:国家重点研发计划(No.2022YFB3606501);中央高校基本科研业务费专项资金(No.V25JBZX00070)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB3606501);
Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.V25JBZX00070)

*通信联系人, E-mail:zwman@bjtu.edu.cn;awtang@bjtu.edu.cn

displays are discussed, providing valuable insights for the advancement of patterned QLED display technologies.

Key words: quantum dots; direct photolithography; patterning; QLED; photolithographic crosslinkers

1 引言

显示技术的发展历程始终伴随着显示材料的不断革新。从早期的无机荧光粉到液晶,再到有机发光材料,每一次材料突破都推动了显示器件在性能、能效与形态上的飞跃^[1]。目前,有机发光二极管(OLED)虽然在显示领域占据重要地位,但也存在一些明显的缺点和挑战,寿命短、成本高、环境稳定性差和能效与亮度限制仍是制约其进一步发展的主要瓶颈^[2]。为了进一步推动显示技术向高分辨率、低能耗和多功能方向发展,需要探索新型的发光材料与图案化技术。胶体量子点(Quantum Dots, QDs)作为一类可精确调控尺寸的半导体纳米材料,受益于独特的量子限域效应,其具备可调谐的发光特性、窄的发射谱线($\text{FWHM} < 30 \text{ nm}$)以及高光致发光量子产率($\text{PLQY} > 90\%$)等优异光学性能^[3]。这些优势使其在新一代光电子与光子器件中展现出巨大的应用潜力。然而,要推动量子点从单一器件应用走向集成化平台,一方面需要不断优化器件结构与性能,另一方面亟需发展能够在微纳米尺度上精确控制其空间分布的图案化技术。

目前量子点图案化技术主要包括喷墨打印、转印、蘸笔印刷和传统光刻等^[4-6]。喷墨打印技术具有无需掩膜、成本低、材料利用率高等优点,但制备图案的分辨率较低($> 10 \mu\text{m}$),且液滴扩散、咖啡环效应影响薄膜均匀性和边缘的锐利程度。转印可将微纳结构从供体基板转移到目标基板,具有分辨率高(可达纳米级)的优点,但存在制备工艺复杂、步骤繁琐、对基板和对准要求高、成本高等限制。蘸笔印刷可实现纳米级分辨率(约 50 nm)且可精确沉积分子或纳米材料,但速度极慢、设备昂贵和操作复杂。传统光刻与现有半导体工艺集成度高,批量化生产能力强,但需使用光刻胶和化学显影,易损伤有机/量子点材料,且成本高、工艺流程复杂、难以应用于柔性基底^[7-8]。

这些技术瓶颈促使研究者开发新型的量子

点图案化方法^[9]。直接光刻技术通过量子点表面配体的光化学反应实现图案化,避免了光刻胶的使用,具有工艺简化、分辨率高和材料兼容性好等优势。本文介绍了直接光刻技术原理与光刻步骤,对主流直接光刻交联剂的研究进展进行了梳理,分析了其中存在的问题,并对未来量子点直接光刻技术的发展趋势及在 QLED 显示的发展方向进行了预测。

2 直接光刻技术

2.1 直接光刻的工作原理

作为一种替代性较强的光刻技术,直接光刻是一种利用光照直接在量子点材料表面引发光化学反应,实现空间选择性图案化的微纳加工技术。直接光刻将光敏单元直接引入目标材料体系中,曝光后在选定区域内发生交联、解保护或分子结构转化,邻近的分子或基底发生 C—H 插入、自由基偶联等反应,形成交联网络或引发聚合反应。交联区域因不溶于显影液而保留,未交联区域被溶解去除,从而实现图案化^[10]。如表 1 所示,常用的光敏基团有叠氮、偶氮、二硫键、光酸/碱前体等^[11-14]。

叠氮类交联剂在光照下会产生氮烯中间体,后与量子点表面的长链配体发生 C—H 插入反应,形成 C—N 交联网络,实现光刻^[10]。此种交联剂具有反应速度快、效率高等优点,被广泛使用。偶氮类交联剂在光照后会产生单线态碳烯。然后,这些碳烯通过 C—H 插入过程有效地连接相邻量子点的配体,实现光刻^[12]。此种交联剂具有可见光激发及反应条件温和等特性。二硫键类交联剂主要依托硫辛酸及其衍生物,在光照下硫辛酸发生开环反应生成 S 自由基, S 自由基可以附着于量子点表面,亦可与相邻的 S 自由基偶联形成 S—S 交联网络,进而实现光刻过程^[15]。

2.2 直接光刻的工艺流程

直接光刻技术主要分为制膜、曝光、显影 3 个步骤(图 1)^[11]。制膜(Deposition)是指将含有光

表 1 3种光敏基团的光刻机制与优点

Tab. 1 Photolithography mechanisms and advantages of three photosensitive groups

交联剂类型	光敏基团	光化学反应方程式	交联机理	优点
叠氮类	$-\text{N}_3$	$\begin{aligned} \text{R}-\text{N}_3 &\xrightarrow{h\nu} \text{R}-\text{N:} + \text{N}_2 \\ \text{R}-\text{N:} + \text{QD}-\text{L}-\text{H} &\longrightarrow \text{R}-\text{NH}-\text{L}-\text{QD} \end{aligned}$	产生活性氮烯(Nitrene),与C—H插入或与C=C加成,形成C—N键网络	反应快 交联效率高
偶氮类	$-\text{N}=\text{N}-$	$\begin{aligned} \text{R}-\text{N}=\text{N}-\text{R} &\xrightarrow{h\nu} 2\text{R}\cdot + \text{N}_2 \\ \text{R}\cdot + \text{QD}-\text{L}-\text{H} &\longrightarrow \text{R}-\text{NH}-\text{L}-\text{QD} \end{aligned}$	偶氮裂解生成碳烯自由基,引发C—H插入反应,形成C—C网络	可见光激发 条件温和
二硫键类	$-\text{S}-\text{S}-$	$\begin{aligned} \text{R}-\text{S}-\text{S}-\text{R} &\xrightarrow{h\nu} 2\text{R}\cdot-\text{S}\cdot \\ 2\text{QD}-\text{R}-\text{S}\cdot &\longrightarrow \text{QD}-\text{R}-\text{S}-\text{S}-\text{R}-\text{QD} \end{aligned}$	光裂解生成硫自由基,参与硫—烯加成或与配体自由基偶联,形成C—S或S—S网络	激发能量低 条件温和损伤小

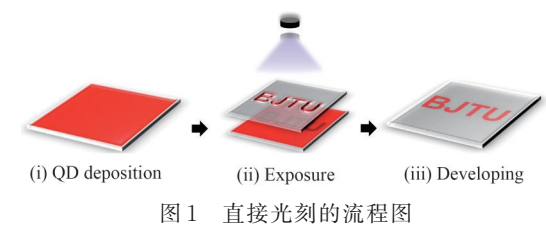


Fig. 1 Flowchart of direct photolithography

敏交联剂或光刻材料的薄膜均匀涂覆在处理好的基底表面,形成光刻所需的感光层。通过控制转速、浓度等调控膜的厚度与均匀性等。曝光(Exposure)是指通过掩膜版或数字光场对特定区域进行光照,使光敏基团发生光化学反应,从而在照射区域形成交联以产生溶解性差异。通过控制曝光波长、剂量、距离等可以调控交联的程度以及降低光毒性的产生。显影(Development)是指利用适当的溶剂或处理方法去除未反应或未交联区域,保留图案化结构,最终得到所需的微纳结构图案。通过控制显影剂的种类、用量以及洗脱方式可以控制成像的质量、边缘清晰度以及良品率等。通过优化上述3个步骤,可以实现分辨率且良品率较高的图案化量子点薄膜。

3 直接光刻交联剂的研究进展

3.1 叠氮类交联剂

2020年,清华大学张昊团队系统地研究了叠氮类交联剂的光反应机理以及量子点光刻性能^[10]。结果表明,光照后产生的氮烯中间体由于单重态和三重态能级差(ΔE_{ST})较大,不利于系间

窜越过程,因此对氧气不敏感,氮烯中间体迅速发生C—H插入反应,在空气中也可完成光刻行为。优化光刻工艺后,可实现3 μm线宽图案,EQE保留原始器件约90%,但PLQY下降严重(约38%,254 nm曝光下)。为了解决交联剂光刻后光物理性能损失严重的问题,北京交通大学唐爱伟教授团队发展了一种刚性的交联剂CTPA(图2(a))。该交联剂以刚性的环戊烷(CTP)为中间体,叠氮为光活化位点。刚性结构的引入,更有利于实现溶解度差异,提高良品率和图案清晰度^[16]。以CdSe量子点材料为发光层,蓝、绿、红量子点均可实现6 350 PPI的分辨率和极限1 μm线宽显影(图2(b)和图2(c))。对于不同尺寸的线宽保真度较高,成像图案的品质较好(图2(d)和图2(e))且可在柔性基底上完成光刻行为,为柔性器件应用奠定了基础。光物理表征发现,光刻后,量子点PLQY保留率达到初始值的99%(图2(g)),寿命降低极少(图2(h))。能级结构测试发现,CTPA的最低未占轨道(LUMO)高于量子点导带能级,表明CPTA不能接受来自量子点的光生载流子(电子),换句话说,较高的LUMO能级为QD电子提供了更强的能量屏障,防止它们在光吸收后被捕获或遵循非辐射重组途径。光刻前后的器件性能表征发现,交联后电流密度和亮度较原始器件略有降低,光刻后红光量子点的EQE仍超过21%,最大亮度超过180 000 cd·m⁻²,且电致光谱稳定性较好(图2(i~k))。研究结果表明,抬升交联剂LUMO能级是实现无损直接光刻的有效手段。

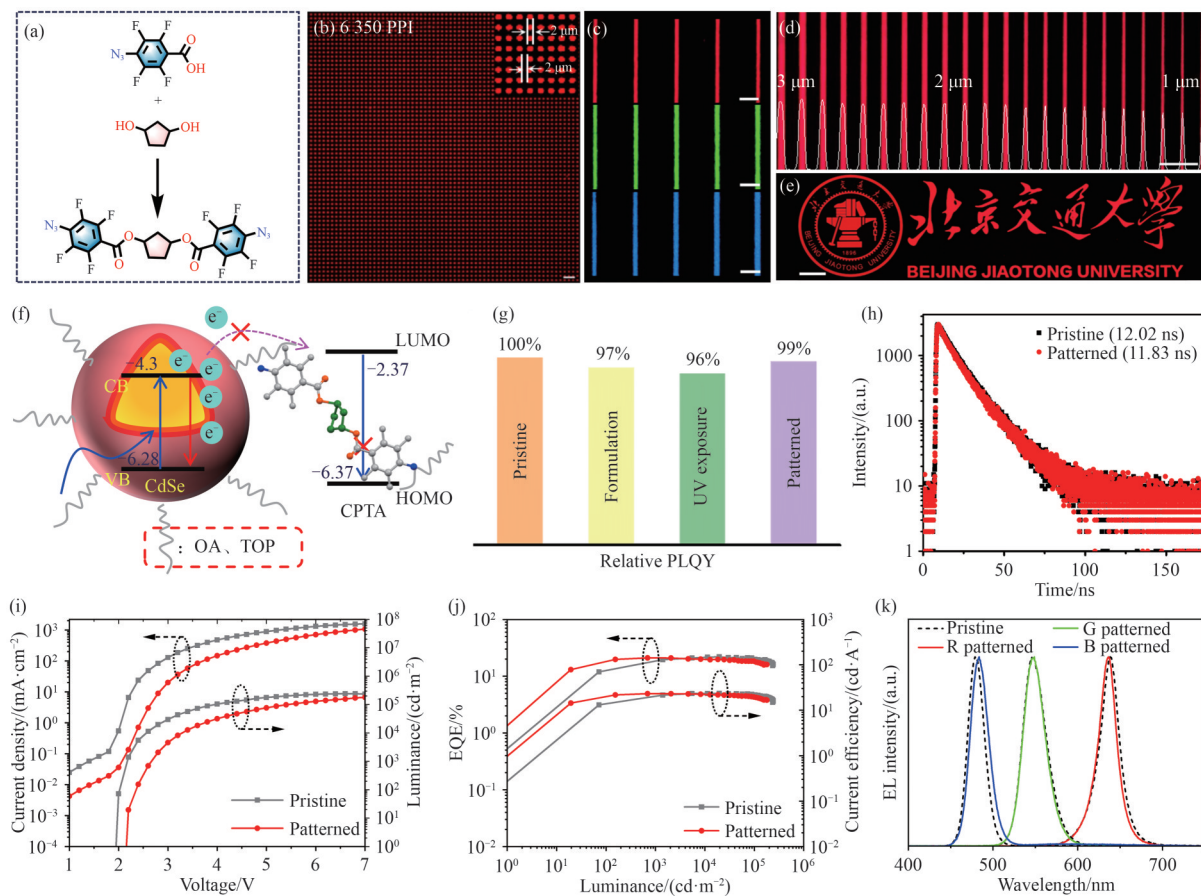


图2 (a)CPTA的合成步骤;(b~e)图案化量子点薄膜;(f)红光CsSe量子点和CPTA的能级结构;(g)光刻过程中PLQY变化情况;(h)光刻前后寿命变化;(i)J-V-L曲线;(j)EQE-CE-L曲线;(k)交联前后荧光光谱^[16]。

Fig. 2 (a) Synthetic route of CPTA; (b~e) patterned quantum dot films; (f) Energy level alignment of red CsSe QDs and CPTA; (g) PLQY evolution during photolithography; (h) Lifetime variation before and after photolithography; (i) J-V-L curves; (j) EQE-CE-L curves; (k) Fluorescence spectra before and after crosslinking^[16].

3.2 偶氮类交联剂

2025年,复旦大学聂志鸿教授课题组提出了一种基于配体交联的策略,利用三臂偶氮化合物(3G)作为交联剂,在光照下产生氮烯自由基,偶联量子点表面配体,进而实现了对化学敏感型发光纳米粒子的高保真度、高分辨率(可达纳米尺度)直接图案化(图3(a))^[17]。3G分子结构经过合理设计,具有以下特点:(i)屏蔽脂肪族C—H键;(ii)延长活性位点之间的距离;(iii)引入更多可交联基团。得益于这些设计,基于3G的方法展现出与化学敏感纳米粒子的高度相容性,可在极低紫外曝光剂量(仅 $18 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$,显著低于常见偶氮交联剂所需的 $200 \sim 500 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$)下,实现结构与光学性能几乎完全保留的任意纳米粒子图案化(图3(b))。以光学敏感的钙钛矿量子点为例,其光致发光量子产率可保留约90%,发

射峰位与寿命几乎无变化(图3(c~f))。该方法的非破坏性主要归因于:(i)超低曝光剂量即可实现有效交联;(ii)3G交联剂能级高于纳米粒子(能级匹配合理);(iii)3G的温和光化学特性。

为了克服基于光刻胶的传统光刻方法导致量子点膨胀、图案失真和光学性能下降的难题,2025年,韩国大邱庆北科学技术院Jong-Soo Lee教授团队基于直接光刻技术设计了一种偶氮交联剂:4-(3-三氟甲基-3H-二氮烯-3-基)苯甲酸(TDBA)(图3(g))^[12]。基于该交联剂能够实现特征尺寸小至约 $2 \mu\text{m}$ 的高分辨率量子点图案化,并有效保持其光学性能(PLQY保留率达到105%,绝对PLQY从53.6%提高到56.2%)。此外,通过在图案化后的薄膜上引入四(3-巯基丙酸)季戊四醇酯(PETMP)进行硫醇-烯处理(图3(h)),薄膜PLQY保留率达到120%,绝对

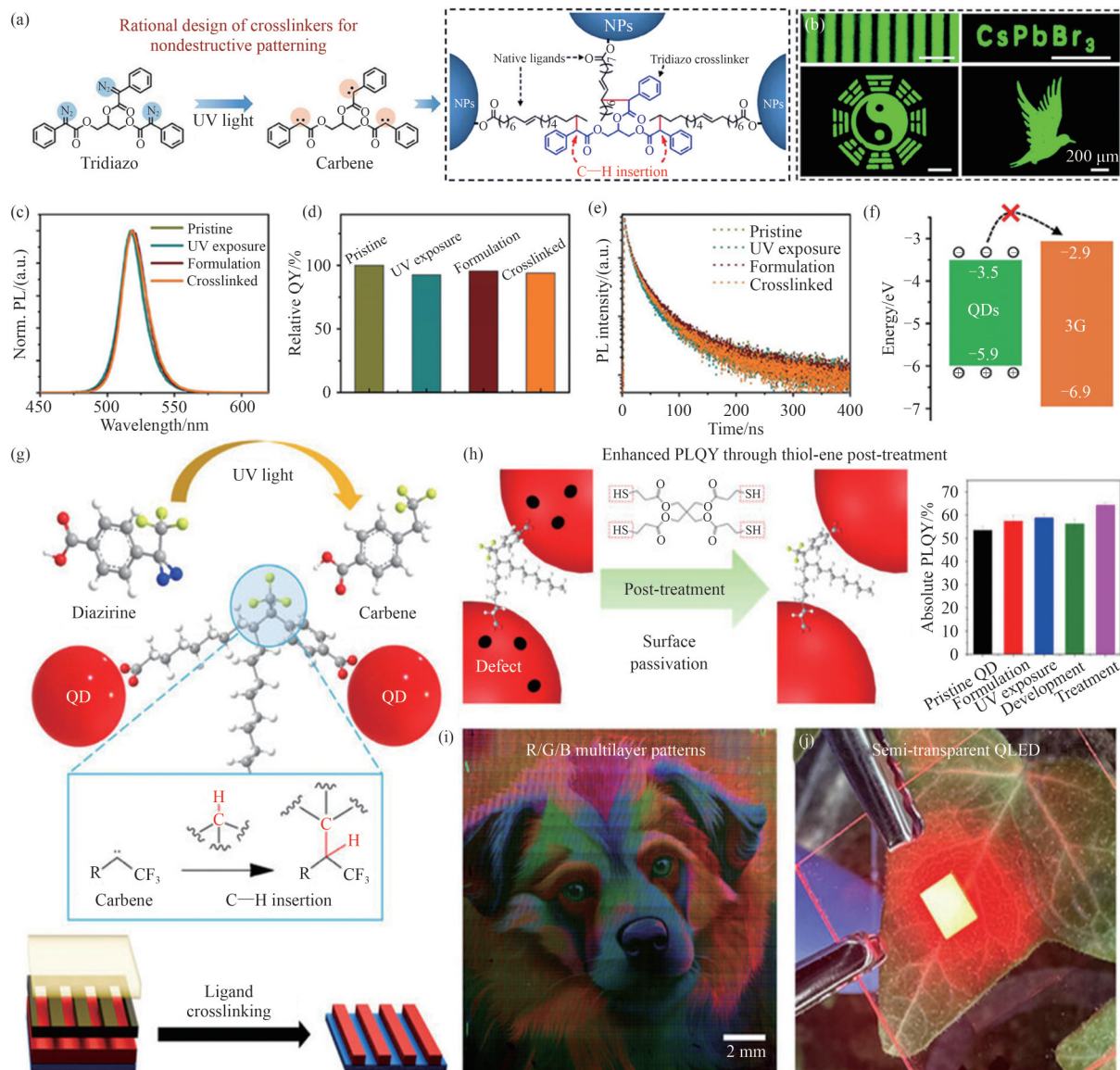


图3 (a)3G 交联剂光刻机制;(b)CsPbBr₃量子点图案化;不同光刻阶段样品(c)光谱、(d)PLQY 和(e)寿命的变化;(f)3G 与量子点能级结构;(g)量子点与 TDBA 反应示意图;(h)使用 PETMP 进行后处理示意图及光刻各阶段 PLQY 的变化;(i)全彩图案照片;(j)半透明 QLED 在光开/关条件下的照片^[12,17]。

Fig. 3 (a) Photolithography mechanism of the 3G crosslinker; (b) Patterning of CsPbBr₃ QDs; Samples at different lithography stages, (c) spectra, (d) PLQY, and (e) lifetime evolution; (f) Energy-level alignment of 3G and QDs; (g) Scheme of the reaction of quantum dots and TDBA; (h) Schematic illustration of the PETMP post-treatment process and the corresponding PLQY evolution at different stages of photolithography; (i) Photograph of the full-color patterned structures; (j) Photograph of the semitransparent QLED under light on/off conditions^[12,17].

PLQY 从 53.6% 提高到 64.2%, 相较于原始量子点明显提高。作为概念验证, 该团队成功制备了基于红光交联量子点的 QLED, 器件的 EQE 达到 10.3%。他们进一步构建了结合红、绿、蓝量子点的半透明 QLED, 展示了该方法在下一代显示器件中的应用潜力。整体而言, 该策略提供了一种可扩展的、高性能的图案化技术, 在先进光电

子器件领域具有广阔的应用前景(图 3(i~j))。

3.3 二硫键类交联剂

2025 年, 韩国汉阳大学 Nuri Oh 团队提出了一种基于硫辛酸(LA)作为可聚合配体组装体的直接光学图案化新方法^[18]。利用 LA 在紫外光照射下的开环聚合(ROP)反应, 显著提升了 QD 薄膜的耐溶剂性与光致发光稳定性(图 4(a))。该方

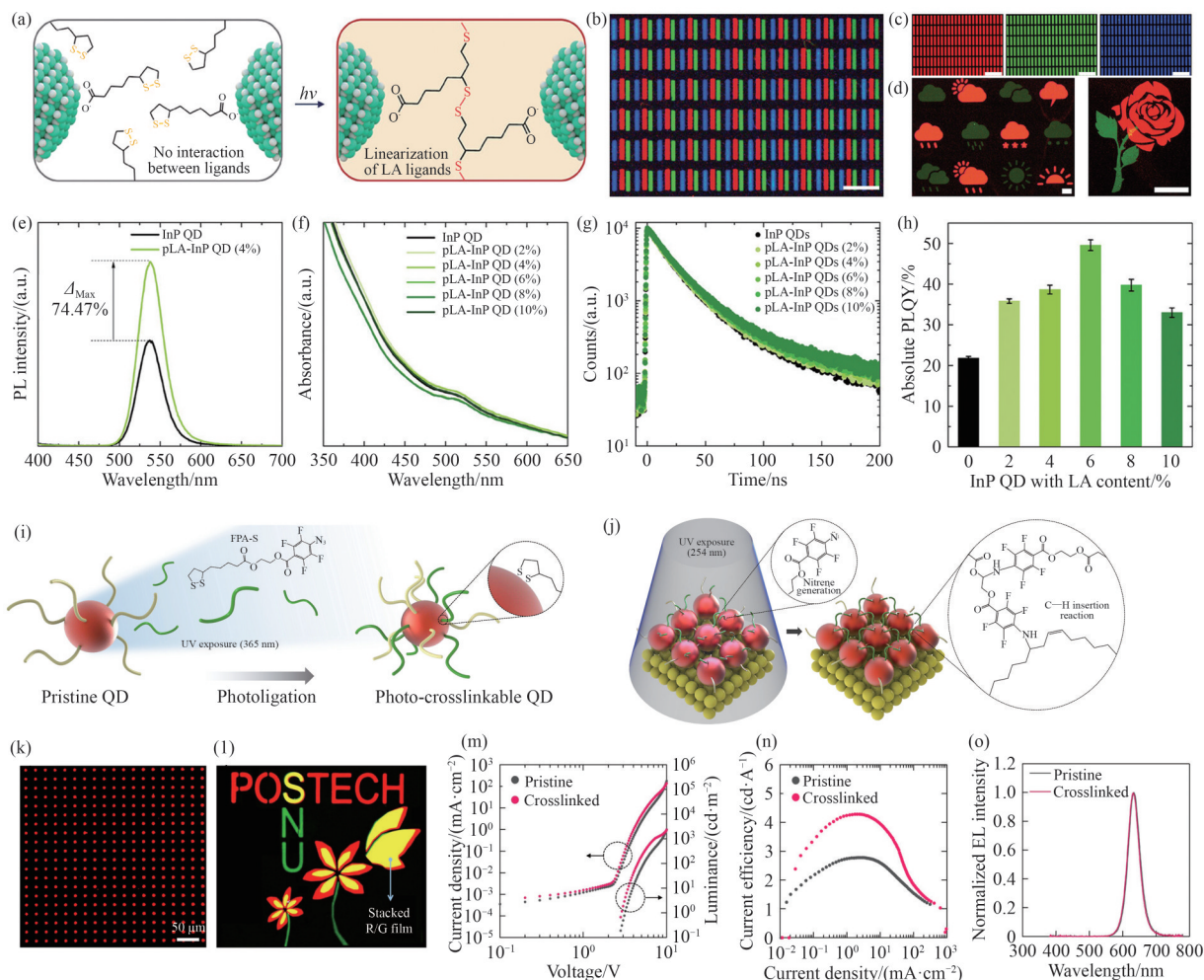


图4 (a) 硫辛酸光刻机制; (b) 宽度为 $10\ \mu\text{m}$, 高度为 $50\ \mu\text{m}$ 的 RGB QD 条纹的荧光图像; (c, d) 单色和双色图案; 交联前后 (e) 发射光谱、(f) 吸收光谱、(g) 瞬态寿命、(h) PLQY 的变化; (i) FPA-S 光化过程示意图; (j) 量子点的光交联原理图; (k) 点阵和 (l) 多色 InP 量子点的荧光图像; 原始和交联 QLED 的 (m) J - V - L 特性、(n) 电流效率和 (o) 归一化 EL 光谱^[18-19]。

Fig. 4 (a) Photolithography mechanism of lipoic acid; (b) Fluorescence image of RGB QD stripes with a width of $10\ \mu\text{m}$ and a height of $50\ \mu\text{m}$; (c, d) Monochromatic and bichromatic patterns; (e) Emission spectra, (f) absorption spectra, (g) transient lifetimes, and (h) PLQY variations before and after crosslinking; Schematic illustration of the (i) photochemical process of FPA-S and (j) photochemical crosslinking mechanism of quantum dots; (k) Dot-patterned and (l) multicolor fluorescence images of InP quantum dots; (m) J - V - L characteristics, (n) current efficiency and (o) normalized EL spectra of the pristine and crosslinked QLEDs^[18-19].

法能够实现高分辨率($10\ \mu\text{m}$)的 RGB 图案化(图4(b)),展示了其在先进微显示领域的应用潜力。基于 LA 的成像能力,使用红色 InP 量子点、绿色 InP 量子点和基于 Cd 的蓝色量子点制备了方形图案,尺寸为 $20\ \mu\text{m}$,间距为 $4\ \mu\text{m}$,对应于 1 000 PPI 分辨率。该方法可以轻松制备 $10\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 图案,并可实现双色图案集成(图4(c,d))。光物理研究发现,光刻前后的量子点光物理性质保留率较高,甚至 PLQY 提升明显(图4(e~h))。

此外,引入 LA 衍生单体还可构筑具备可拉伸性与自愈特性的 QD 复合材料,以满足柔性可持续显示材料的需求。值得注意的是,可逆的 ROP 过程还支持 QD 的回收与再利用,有助于环境友好型发展。研究结果表明,基于 LA 的 QD 组装体不仅提升了传统 QD 图案化技术的性能,还为其在增强现实/虚拟现实显示与可穿戴电子等新兴技术中的应用开辟了新途径。

同年,韩国首尔国立大学的 Jeonghun Kwak

团队创新性地将硫辛酸基团与叠氮基团通过乙二醇桥联基团偶联,构筑了双光活化位点的交联剂FPA-S^[19]。使用该交联剂需要两步交联。第一步在365 nm紫外光照射下发生二硫键开环反应,量子点在溶液分散状态中通过光配体化反应实现原位配体交换,大幅缩短了配体交换时间,并通过将配体牢固锚定在QD表面并显著提高了QD溶液的稳定性(图4(i))。第二步,在254 nm紫外光照射下,配体中的叠氮官能团能够选择性地与邻近QD配体发生C—H插入交联(图4(j)),从而实现最小分辨率达5 μm 的高精度图案化(图4(k))和多色集成(图4(l)),同时保持QDs的优异光学性质。进一步地,基于交联QDs构筑的QLED表现出显著提升的器件性能,其电流效率由2.8 cd/A提升至4.3 cd/A,器件在初始亮度150 cd/m²下的工作寿命由100 h延长至940 h(图4(m,n)),同时保持光谱稳定性(图4(o))。这些性能改善归因于能级上移、QD稳定性增强以及器件中电荷平衡的改善。该方法为直接QD图案化提供了一种高效且可扩展的策略,通过创新的配体设计与简化的工艺流程,为下一代显示技术的发展开辟了新途径。

4 直接光刻发展方向

在显示领域,传统量子点图案化方法往往伴随溶剂侵蚀、能量注入过高和界面不稳定等问题,导致量子点的光致发光效率降低和色纯度劣化。国内外正加速对新型光刻技术,特别是直接光刻技术的研发。京东方公司(BOE)在2025国际显示周上发布了基于量子点直接光刻技术及大面积涂布工艺的7.9 in (1 in=2.54 cm)4K主动矩阵式量子点发光二极管(AMQLED)平板样机,标志着我国已经开始布局直接光刻产业线,这就必然需要我

们加速自主设计性能优异的光刻交联剂。然而,目前交联剂的设计仍存在光刻后光物理性能损失严重以及高分辨率全彩,特别是电致全彩器件工艺的优化困难等问题^[16,20],需要开发更多的直接光刻交联剂并揭示分子结构、能级结构等与无损光刻间的作用规律,发展高分辨率全彩器件制备工艺,推动直接光刻在QLED显示领域中的应用。

此外,随着Micro-LED等新型显示技术和“元宇宙”AR/VR/MR等概念的迅猛发展^[21],直接光刻技术适用于超高像素密度的AR/VR/MR微显示,能够满足10 000 PPI的需求,并保持低功耗和高色彩饱和度。低温工艺与柔性基底兼容性也为可穿戴与卷曲显示带来新机遇。在器件集成层面,该技术还能与光子晶体、微透镜及芯片级封装结合,实现出光增强与系统集成。

5 总 结

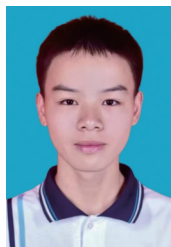
经过十余年的发展,量子点材料在显示等领域得到了充分的发展,配套的产业链等已经逐步成熟,并成为未来显示领域最具潜力的发光材料之一,而如何实现图案化是研究的热点问题。直接光刻技术在量子点图案化工艺中的可行性已经得到了充分的验证。本文系统地总结了基于叠氮、偶氮和二硫键3种经典的交联剂的光刻原理及研究进展,发现目前直接光刻交联剂发展中亟需解决的问题主要有以下两点:(i)光物理性质损失严重;(ii)全彩特别是电致全彩工艺优化不足。本文指出了直接光刻交联剂的发展方向及应用前景。值得庆幸的是,越来越多的研究表明,通过优化交联剂的分子结构,如桥联基团的类型、光敏基团的数量等,光刻性能得到了显著提升。未来随着更多交联剂的开发,现存的问题有望得到有效解决。

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]. *Advanced Materials*, 2024, 36(37): 2312948.
- [2] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, *et al.* Mini-LED, micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 105.
- [3] WANG L J, YIN Z, TANG A W. Component engineering in multinary alloyed I-III-VI type semiconductor nanocrystals for photoluminescence and electroluminescence [J]. *Accounts of Materials Research*, 2024, 5(10): 1210-1220.
- [4] SONG O, RHEE D, KIM J, *et al.* All inkjet-printed electronics based on electrochemically exfoliated two-

- dimensional metal, semiconductor, and dielectric [J]. *npj 2D Materials and Applications*, 2022, 6(1): 64.
- [5] LIU X, CAO Y, ZHENG K W, *et al.* Liquid droplet stamp transfer printing [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(52): 2105407.
- [6] HUO F W, ZHENG Z J, ZHENG G F, *et al.* Polymer pen lithography [J]. *Science*, 2008, 321(5896): 1658-1660.
- [7] LIU W F, WANG J B, XU X Z, *et al.* Single-step dual-layer photolithography for tunable and scalable nanopatterning [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(7): 12180-12188.
- [8] BOLES M A, LING D S, HYEON T, *et al.* The surface science of nanocrystals [J]. *Nature Materials*, 2016, 15(2): 141-153.
- [9] CHEN Z, LI Y, MAN Z W, *et al.* Research progress of quantum dot photolithography patterning and direct photolithography application [J]. *Nano Research*, 2024, 17(12): 10386-10411.
- [10] LU S Y, FU Z, LI F, *et al.* Beyond a linker: the role of photochemistry of crosslinkers in the direct optical patterning of colloidal nanocrystals [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(23): e202202633.
- [11] QING W Y, SI Y L, CAI M F, *et al.* Photosensitizer-assisted direct 2D patterning and 3D printing of colloidal quantum dots [J]. *Nano Research*, 2024, 17(12): 10460-10466.
- [12] LEE N, CHOI D, KO K J, *et al.* Direct optical lithography using diazirine cross-linker for quantum dot light emitting diodes and enhancing photoluminescence quantum yield through post-treatment [J]. *ACS Nano*, 2025, 19(24): 22253-22261.
- [13] CHEN R, DAS K, FENG J, *et al.* Photo-regulated disulfide crosslinking: a versatile approach to construct mucus-inspired hydrogels [J]. *Chemical Science*, 2025, 16(13): 5528-5537.
- [14] ZHU Z H, LI F, LI J W, *et al.* Direct optical patterning of metal-organic frameworks via photoacid-induced etching [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(30): 19628-19635.
- [15] SIEREDZINSKA B, ZHANG Q, VAN DEN BERG K J, *et al.* Photo-crosslinking polymers by dynamic covalent disulfide bonds [J]. *Chemical Communications*, 2021, 57(77): 9838-9841.
- [16] CHEN Z, MAN Z W, RAO S C, *et al.* Rigid crosslinker-assisted nondestructive direct photolithograph for patterned QLED displays [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 251.
- [17] DAI L W, YI S Y, CHEN Z H, *et al.* Nondestructive patterning of upconverting and down-shifting luminescent nanoparticles for information encryption [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(37): e202506972.
- [18] LEE Y, SHIN J, SHIN S, *et al.* Ring-opening polymerization of surface ligands enables versatile optical patterning and form factor flexibility in quantum dot assemblies [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(9): 2415436.
- [19] SEO H, HASSAN S Z, KIM Y J, *et al.* Direct photolithography of colloidal InP-based quantum dots utilizing the photoligation method [J]. *Chemistry of Materials*, 2025, 37(4): 1424-1431.
- [20] XUE X, LI C, YU X B, *et al.* Photo-patternable and healable polymer semiconductor enabled by dynamic covalent disulfide bonding [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(16): e202425172.
- [21] KO S H, ROGERS J. Functional materials and devices for XR (VR/AR/MR) applications [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(39): 2106546.

作者简介:



黄凌祥,男,在读本科生,主要从事发光材料、器件及应用方面的研究。E-mail: 24341005@bjtu.edu.cn



唐爱伟,男,博士,教授,2009年于北京交通大学获得博士学位,主要从事发光材料、器件及应用方面的研究。E-mail: awtang@bjtu.edu.cn



满忠伟,男,博士,讲师,2023年于天津大学获得博士学位,主要从事发光材料、器件及应用方面的研究。E-mail: zwman@bjtu.edu.cn