

文章编号:1007-2780(2026)01-0150-13

## 光交联技术在钙钛矿量子点显示中的应用

徐雨竹, 刘鸿宾, 李 晴, 贾轻轩, 姚纪松\*, 宋继中\*  
(郑州大学 物理学院, 河南 郑州 450051)

**摘要:**金属卤化物钙钛矿量子点(QDs)具有优异的光电性质,包括高荧光效率、高色纯度、光谱连续可调以及溶液加工特性等,在下一代超高清、柔性显示等领域具有重要的应用前景。经过近 10 年的快速发展,钙钛矿 QDs 发光二极管(QLED)的器件性能取得显著的提升,红/绿/蓝光器件的外量子效率(EQE)均已经超过 20%。目前,钙钛矿 QDs 在显示应用中面临的核心问题是材料稳定性差以及如何在实现 QLED 高分辨率像素的同时保持器件的高发光效率。光交联技术是以特定波长光源(紫外光为主)触发含光敏基团的分子发生交联反应,形成三维网络结构,进而调控材料性质的技术,其有望解决钙钛矿 QDs 的稳定性问题,同时能够实现 QDs 的高分辨率图案。本文系统总结了近年来钙钛矿 QDs 中光交联技术的研究进展,重点阐述其在提升钙钛矿材料稳定性,实现高分辨率像素图案化,以及钙钛矿 QLED 制备与性能优化等方面的应用。

**关键词:**钙钛矿;光交联;稳定性;图案化;发光二极管

中图分类号:O482.31 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2025-0184 CSTR:32172.14.CJLCD.2025-0184

## Application of photocrosslinking technology in perovskite quantum dot displays

XU Yuzhu, LIU Hongbin, LI Qing, JIA Zhixuan, YAO Jisong\*, SONG Jizhong\*

(School of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450051, China)

**Abstract:** Metal halide perovskite quantum dots(QDs) exhibit outstanding optoelectronic properties, including high photoluminescence quantum yields(PLQYs), high color purity, widely tunable bandgap, and solution-processability. They hold significant application potential in next-generation high-definition and flexible displays. After nearly a decade of rapid development, the device performance of perovskite QD light-emitting diodes(QLEDs) has significantly improved, with external quantum efficiencies (EQEs) exceeding 20% for red, green, and blue devices. Currently, the main challenges for perovskite QDs in display applications are poor material stability and the fabrication of high-resolution pixels. Photocrosslinking technology—which uses specific wavelength light sources (primarily UV) to trigger crosslinking reactions in molecules containing photosensitive groups, forming three-dimensional network structures to regulate material properties—holds promise for addressing perovskite QD stability issues

收稿日期:2025-09-10;修订日期:2025-10-14.

基金项目:国家自然科学基金(No.52572185, No.22205214, No.52272166);河南省自然科学基金(No.242300421217)  
Supported by National Natural Science Foundation of China (No.52572185, No.22205214, No.52272166);  
Natural Science Foundation of Henan Province (No.242300421217)

\*通信联系人, E-mail: yaojisong@zzu.edu.cn; songjizhong@zzu.edu.cn

while enabling high-resolution patterning of QDs. This paper systematically reviews recent research advances in photocrosslinking technology within perovskite systems, focusing on design strategies for enhancing the environmental stability of perovskite materials, achieving sub-micron pixel patterning, and optimizing the performance of patterned perovskite QLEDs.

**Key words:** perovskite; photocrosslinking; stability; patterning; light-emitting diodes

## 1 引言

金属卤化物钙钛矿量子点(QDs)具有优异的光电性能,如高荧光量子效率(PLQY)、光谱易于调节、高色纯度、高载流子迁移率以及低成本的溶液加工特性等,在基础研究和光电器件应用方面受到了广泛的关注<sup>[1-5]</sup>。目前基于钙钛矿QDs制备的电致发光二极管(LED)器件的外量子效率(EQE)已经突破30%,能够与有机LED和传统量子点LED相媲美<sup>[6-11]</sup>,有望应用于新一代的超高清柔性显示技术<sup>[12-14]</sup>。然而,钙钛矿QDs目前仍面临着两大关键问题有待解决。一方面,钙钛矿QDs具有软离子型结构和低的晶格形成能,在氧气、水汽、光照、高温等外界环境刺激下极易发生表面配体脱附、离子迁移及晶体结构相变,导致发光效率下降与器件性能退化<sup>[15-18]</sup>。另一方面,高分辨率图案对于满足高清显示的应用也至关重要,而如何在实现QLED高分辨率像素的同时保持器件的高发光效率仍然存在挑战。

在提高钙钛矿QDs的稳定性方面,研究人员将钙钛矿封装于稳定的有机聚合物和无机氧化物等基质中,避免钙钛矿受外界环境影响而相变或降解<sup>[19-23]</sup>。在形成高分辨率图案方面,目前能够实现钙钛矿QDs图案化的技术主要有转移印刷、喷墨打印和光刻等技术,这些技术具有各自的特点和优势,但也都存在一定的技术难题,阻碍了规模化制造超高分辨率的QDs图案<sup>[24-28]</sup>。比如,喷墨打印通常会由于“咖啡环”效应而影响图案的质量,而且所制备图案的分辨率受打印机喷嘴尺寸和液滴尺寸的限制;转移印刷是利用中间载体将油墨通过加温、润湿、加压等方法转移到承印物上的过程,通常只适用于小面积图案,并且转移过程中易造成良率的损失;电泳沉积需要精细的微电极设计和像素之间的连接线,不适合制备复杂的QDs图案;传统光刻技术往往会破

坏钙钛矿QDs的光电性质<sup>[29-32]</sup>。

近年来,光交联技术作为一种可选方案被用来提高钙钛矿QDs的稳定性以及直接形成图案化。光交联后所形成的三维网络结构能够从物理层面阻隔氧气以及水汽的入侵,抑制钙钛矿QDs发生团聚以及配体脱附的现象,并且还可以凭借化学键的约束作用限制离子迁移的路径,最终使钙钛矿QDs的晶体结构稳定性得到显著提升<sup>[33-36]</sup>。不仅如此,在制作图案化QDs的过程中,光交联技术利用其光活性特性构建的三维网络结构,能够精准地控制钙钛矿QDs在基底上的分布与排列,实现高分辨率的多彩图案<sup>[37]</sup>。

本文围绕光交联技术展开综述,系统梳理其作用机制,以及如何提升钙钛矿量子点稳定性,阐述其在亚微米级像素化制备中的精准调控作用,深入分析其对电致发光效率的优化路径,旨在为高性能钙钛矿QDs光电器件研发与产业化提供理论参考。

## 2 光交联技术

光交联技术是指在特定光源(如紫外光、可见光)照射下,体系中的光引发剂(或光敏性基团)吸收光子能量后被激活,产生具有反应活性的物种(如自由基、阳离子、阴离子),进而引发含不饱和键(如双键、三键)或可反应官能团(如环氧基、羟基)的“交联剂”或“基材分子”发生化学连接,形成三维网状交联结构的技术<sup>[38-39]</sup>,如图1所示。在量子点应用中,该技术的目标是通过交联反应实现:(1)量子点表面包覆层的交联致密化(如聚合物包覆层交联,提升抗水氧能力);(2)量子点阵列的光控图案化(如光刻交联实现QLEDs的像素化)<sup>[37-40]</sup>。

具体来讲,通过反溶剂、热注入等液相合成技术制备的原始钙钛矿QDs,其表面通常修饰有油酸、油胺等长链配体以维持胶体分散性,但受

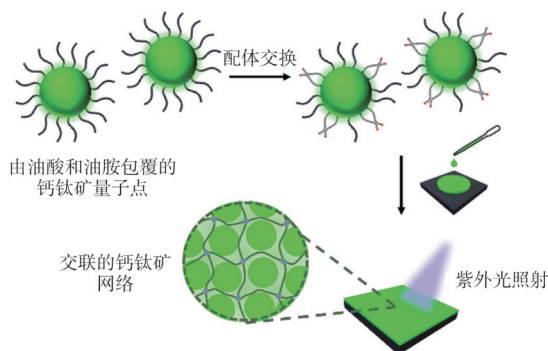


图1 光交联技术

Fig. 1 Photo-crosslinking technology

限于配体动态脱附易发生团聚现象,导致材料稳定性不足<sup>[41-42]</sup>。光交联分子能够借助羧基、氨基、硫醇基等官能团,与钙钛矿 QDs 表面未配位的  $\text{Pb}^{2+}$  形成稳定的配位键,可以对钙钛矿 QDs 的表面缺陷实现高效钝化,进而有效减少非辐射复合情况的发生。此外,可交联材料在特定条件下通过分子之间的相互作用形成具有三维网络结构的化合物,能够从物理层面阻隔氧气以及水汽的入侵,抑制钙钛矿 QDs 发生团聚以及配体脱附的现象,并且还可以凭借化学键的约束作用限制离子迁移的路径,最终使钙钛矿 QDs 的晶体结构稳定性得到显著提升,交联后的材料一般具有优异的光/热稳定性以及良好的耐溶剂腐蚀性<sup>[20]</sup>。

此外,光交联技术在实现高分辨率图案化 QDs 方面同样有着重要应用<sup>[43]</sup>。光交联技术实现 QDs 高分辨率图案化,核心是利用光化学反应使 QDs 表面配体或特定交联剂在光照下形成不溶的网状结构,从而实现图案化。其基本流程通常包括以下几个步骤:(1)制备 QDs 与光交联剂的混合溶液:将 QDs 与光敏交联剂(如含双吡啶基团的分子或能产生氮烯/卡宾的交联剂)在合适的溶剂中混合。(2)成膜:通过旋涂、喷涂等方式将混合溶液在基底上制成均匀薄膜。(3)曝光:在薄膜上覆盖具有特定图案的光掩膜版,然后用特定波长的紫外光或可见光进行照射。掩膜版透光区域下的光交联剂吸收光后发生化学反应(如生成自由基、氮烯或卡宾),这些活性中间体与 QDs 表面配体或周围分子发生碳氢插入等反应,形成交联网络,使该区域的 QDs 变得不溶于原有溶剂。(4)显影:用合适的溶剂(通常是非极性溶剂)洗脱未曝光区域的 QDs,这些区域

的 QDs 因为没有发生交联反应,保持可溶状态而被去除。于是,掩膜版上的图案就精确地转移到了 QDs 薄膜上。光交联技术为实现高分辨率、高性能的 QDs 图案化提供了一条有效的路径。它不仅能够满足未来显示技术对像素密度的极致追求,还能很好地保持 QDs 本身的优异特性<sup>[44]</sup>。

### 3 光交联技术在钙钛矿量子点中的应用

#### 3.1 光交联技术提高钙钛矿稳定性

金属卤化物钙钛矿 QDs 由于其优异的光电性能,在基础研究和光电器件应用,尤其是显示方面受到了广泛关注(图 2)。但由于金属卤化物钙钛矿本身具有低晶格形成能、软离子晶格的特性,在外部环境(如光、热、氧气、极性有机溶剂等)刺激下,钙钛矿的光学和电学性质会逐渐退化,严重阻碍了其实际应用<sup>[15-16]</sup>。此外,钙钛矿 QDs 中易形成多种离子缺陷,这些缺陷会因外部因素刺激而加剧,会出现相分离现象,甚至导致钙钛矿发生分解,如图 3 所示。其中,钙钛矿吸水后易水解,结构发生破坏;光照会引发光化学反应,增加非辐射复合中心,加速分解;氧气易与钙钛矿发生氧化反应<sup>[15]</sup>。这些环境问题会导致其电学性能变差、发光效率降低、寿命缩短等。2022 年, Jin 等人<sup>[45]</sup>通过加入多齿三硫碳酸酯作为光引发剂,丙烯酸甲酯(MA)作为聚合分子,在紫外光的照射下分子之间发生交联。研究证明,表面聚合反应既没有改变  $\text{CsPbBr}_3$  的晶体结构,也没有改变其光学性能。为了分析  $\text{CsPbBr}_3$ -PMA 在不同溶剂中的荧光稳定性,研究者分别监测了分散于不同极性溶剂中  $\text{CsPbBr}_3$ -PMA 在不同时间(0 天、1 天和 7 天)的荧光强度。丙酮分散的  $\text{CsPbBr}_3$ -PMA 经 1 天储存后未出现强度衰减,7 天后仍保持 70.7% 的原始荧光强度。当使用极性更强的丙酮/乙醇(体积比 50:50)混合溶剂时,分散的  $\text{CsPbBr}_3$ -PMA 在 7 天后仍保持 61% 的原始荧光强度。他们为了进一步评估  $\text{CsPbBr}_3$ -PMA 的胶体稳定性,监测并比较了极性溶剂中  $\text{CsPbBr}_3$ -PMA 与原始  $\text{CsPbBr}_3$  的尺寸变化。经 3 天储存后,  $\text{CsPbBr}_3$ -PMA 的尺寸变化很小,且溶液状态基本保持不变,而原始  $\text{CsPbBr}_3$  样品则显著

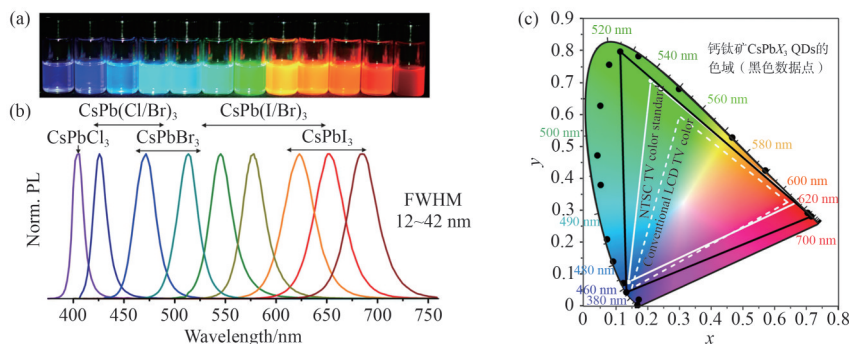


图2 钙钛矿  $\text{CsPbX}_3$  QDs ( $X=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ) 的发光特性。(a) 溶液在紫外灯 ( $\lambda=365\text{ nm}$ ) 照射下的发光谱;(b) 代表性光致发光光谱(除  $\text{CsPbCl}_3$  样品激发波长为  $350\text{ nm}$  外,其余激发波长均为  $400\text{ nm}$ );(c)  $\text{CsPbX}_3$  QDs (黑色数据点) 在 CIE 色度坐标上绘制的色域,并与最常见的颜色标准(LCD 电视:虚线白色三角形;NTSC 电视:实线白色三角形) 进行比较<sup>[1]</sup>。

Fig. 2 Luminescent properties of perovskite  $\text{CsPbX}_3$  QDs ( $X=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ). (a) Luminescence spectrum of the solution under UV light ( $\lambda=365\text{ nm}$ ); (b) Representative photoluminescence spectra (except for  $\text{CsPbCl}_3$  sample with an excitation wavelength of  $350\text{ nm}$ , all other excitation wavelengths are  $400\text{ nm}$ ); (c) Color gamut of  $\text{CsPbX}_3$  QDs (black data points) plotted on the CIE chromaticity coordinates, compared with the most common color standards (LCD TV: dashed white triangle; NTSC TV: solid white triangle)<sup>[1]</sup>.

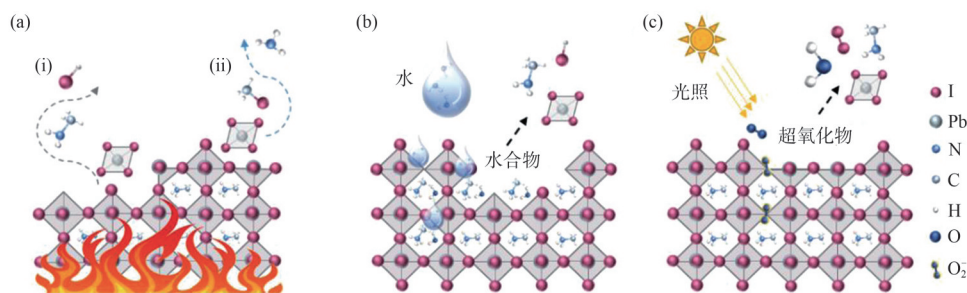


图3 钙钛矿 QDs 在热(a)、湿度(b)以及紫外线和氧气暴露(c)的影响下降解的示意图<sup>[15]</sup>。

Fig. 3 Schematic diagram of the degradation of perovskite QDs under the influence of heat (a), humidity (b), and exposure to UV light and oxygen (c)<sup>[15]</sup>.

聚集且溶液呈黄色浑浊状(图4(a))。他们还评估了  $\text{CsPbBr}_3$ -PMA 在长期紫外照射下的光稳定性。将原始  $\text{CsPbBr}_3$  和  $\text{CsPbBr}_3$ -PMA 溶液密封于比色皿中,在室温下经  $254\text{ nm}$  紫外照射长达  $16\text{ h}$ 。研究者通过定期监测这两种样品的荧光强度发现:原始  $\text{CsPbBr}_3$  对紫外辐射耐受性极差,  $4\text{ h}$  后其荧光强度下降超过  $50\%$ ,  $16\text{ h}$  后仅保留原始荧光强度的  $2.2\%$ (图4(b)),而  $\text{CsPbBr}_3$ -PMA 样品的光稳定性则显著改善。

同年, Yang 等人<sup>[46]</sup>设计了一种新的可交联表面活性剂配体(NOSVC),其具有多齿 L-半胱氨酸头部、长酰基尾部及可交联的苯乙烯基。NOSVC 具有的羧基、酰胺基和硫醚基团,可以与钙钛矿 QDs 表面的金属离子发生强烈相互作用。

此外,它还具有可交联的苯乙烯基团以及长链油酰基团,在溶液中充当钙钛矿 QDs 的配体时,可以提供良好的分散性和耐湿性。研究者们还测试了 NOSVC 处理的  $\text{CsPbBr}_3$  的稳定性。总体而言,经 NOSVC 处理的  $\text{CsPbBr}_3$  QDs 相较于采用油酸和油胺的原始 QDs,在极性溶剂、湿度及紫外线照射条件下展现出显著更优的稳定性。显然,这种优异的稳定性可归因于设计的多齿配体 NOSVC(具有疏水性长链基团和苯乙烯基团)的保护作用,它有效地阻止了钙钛矿量子点与水或氧气的直接接触。聚合的量子点薄膜的稳定性进一步增强,是因为薄膜表面形成了更致密的交联网状结构,水分或氧气从薄膜表面扩散到内部破坏钙钛矿 QDs 需要更长的时间。

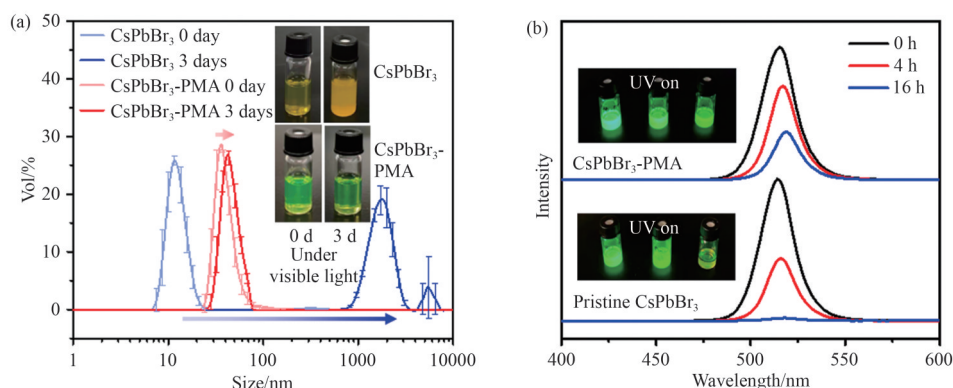


图4 (a)分别在0天和3天时, THF中原始CsPbBr<sub>3</sub>与CsPbBr<sub>3</sub>-PMA的流体动力尺寸分布, 插图为原始CsPbBr<sub>3</sub>与CsPbBr<sub>3</sub>-PMA在THF中分散的数码照片, 以及经储存3天后的老化样品; (b)未处理的CsPbBr<sub>3</sub>样品以及经0 h、4 h和16 h紫外线照射后的CsPbBr<sub>3</sub>-PMA样品的荧光光谱<sup>[45]</sup>。

Fig. 4 (a) Hydrodynamic size distribution of the original CsPbBr<sub>3</sub> and CsPbBr<sub>3</sub>-PMA in THF at 0 day and 3 days, insets are digital photos of dispersed original CsPbBr<sub>3</sub> and CsPbBr<sub>3</sub>-PMA in THF, as well as aged samples after 3 days of storage; (b) Fluorescence spectra of untreated CsPbBr<sub>3</sub> samples and CsPbBr<sub>3</sub>-PMA samples after 0 h, 4 h, and 16 h of ultraviolet irradiation<sup>[45]</sup>.

同时, 钙钛矿 QDs 需要加工成多种形式以满足多种应用需求, 各种加工技术需要钙钛矿 QDs 在特定介质中分散并保持稳定。2025 年, Huang 等人<sup>[47]</sup>提出了一种用于钙钛矿 QDs 的紫外诱导两步硫醇烯“点击化学”的新策略。第一步, 通过引入少量硫醇支链单体, 在钙钛矿 QDs 核心周围形成保护壳, 增强了 PLQY 和胶体分散性。该策略能够同时实现卓越的加工性能、效率和稳定性。钙钛矿 QDs 在恶劣刺激下的稳定性对其应用至关重要。在对比样品薄膜中, 其表面配体的动态脱附导致缺陷形成, 从而影响其光学性能。在实验样品薄膜中, 硫醇-CsPbBr<sub>3</sub>、三烯丙基异氰脲酸酯与四(3-巯基丙酸)季戊四醇酯形成的交联网络最大限度抑制了配体脱附。研究者通过“双 85”老化测试评估其热稳定性与湿度稳定性, 实验样品薄膜的  $T_{95}$  值 (PLQY 降至初始值 95% 所需时间) 高达 288 h, 是对比样品薄膜的 10 倍。他们也展示了浸入去离子水中的实验样品薄膜的发光演变过程, 浸泡 2 h 后仍保持超过 98% 的初始发光强度, 这种强韧稳定性归因于接触角达 106° 的疏水交联网络。

综上所述, 光交联技术在提升钙钛矿稳定性方面, 通过引发特定的化学反应来构建交联网络, 基于这样的致密结构去增强钙钛矿整体的结构稳定性, 使其能够更好地抵御外界各类因素带来的影响, 有效避免钙钛矿轻易出现变形、分解

等不良情况。

### 3.2 光交联实现像素化

传统光刻利用光刻胶作为图案化的核心材料, 涉及光刻胶 (PR) 涂层、曝光、PR 显影、图案转移和去除 PR 等步骤, 如图 5 所示<sup>[48]</sup>。然而, 由于钙钛矿 QDs 的离子晶体特性, 其对极性溶剂非常敏感, 因此, 在传统光刻技术中光刻胶的沉积及显影的溶液处理都可能会损坏下方的 QDs 材料。Ko 等人<sup>[48]</sup>简化了上述方法, 采用配体辅助直接光刻 (LADP) 技术图案化 QDs, 其过程仅包括涂层和显影步骤。与传统的光学光刻技术类似, 使用阴影掩模的选择性 UV 曝光可用于对薄膜进行图案化。这种方法是将光敏配体整合到钙钛矿 QDs 中, 在紫外线照射下, 这些配体会迅速发生反应, 形成可溶解或不溶解区域。随后用显影试剂清洗, 未暴露区域的钙钛矿 QDs 即被清除, 从而形成微图案。与半导体工艺中常用的传统光刻工艺相比, 直接光刻的方法大幅简化了光刻过程, 并减少了溶剂对量子点的损伤。受益于配体聚合反应的选择性, 还可以制造复杂的图案。此外, 由于钙钛矿量子点表面周围聚合物配体的交联封装层, 制造的微图案具有较好的稳定性。

2022 年, Zhang 等人<sup>[49]</sup>提出了一种无损直接光刻方法, 可以直接使用钙钛矿前驱体溶液进行光刻, 然后原位生长钙钛矿 QDs。他们使用的三羟甲基丙烷三(3-巯基丙酸酯) (TTMP) 是

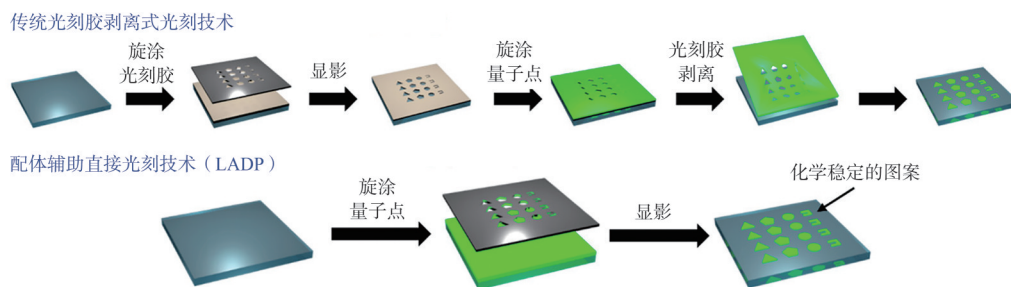


图 5 与需要多个步骤的传统光刻胶(PR)剥离光刻相比,所简化的图案化策略被称为配体辅助直接光刻(LADP)<sup>[48]</sup>。  
Fig. 5 Compared to the traditional photolithography (PR) stripping that requires multiple steps, the simplified patterning strategy is known as ligand-assisted direct photolithography (LADP)<sup>[48]</sup>.

一种多硫醇交联试剂,用作硫醇单体,而异氰脲酸三烷基酯(TAIC)提供富电子乙烯基。他们证明了紫外照射下的光交联是基于催化硫醇-烯自由基反应的溴化铅络合物,无需任何对图案稳定性有害的外部引发剂或催化剂即可实现快速光刻。与传统的光刻方法不同,钙钛矿 QDs 是在光刻工艺后生成的,省去了预先制备钙钛矿 QDs 所需的复杂工艺,同时有效避免了光刻过程中溶剂和紫外光对钙钛矿 QDs 的降解。通过控制聚合和原位制备条件,可以获得无损高效的

钙钛矿 QDs,像素图案如图 6 所示,其中图 6(f) 为直径为  $5\ \mu\text{m}$  的圆形图案,对应的像素分辨率高达 2 450 PPI,并且其对光、热和溶剂具有良好的稳定性。2023 年, Maeng 等人<sup>[50]</sup>报道了一种使用硫醇-碳点击化学的钙钛矿 QDs 和其他纳米材料通用的直接光催化图案化技术。钙钛矿 QDs 的光催化活性有效帮助硫醇基团生成硫基自由基,从而实现硫醇-烯交联反应形成图案,而无需额外添加光引发剂。季戊四醇四基(3-巯基丙酸酯)(PTMP)既作为高效交联剂实现直接光催

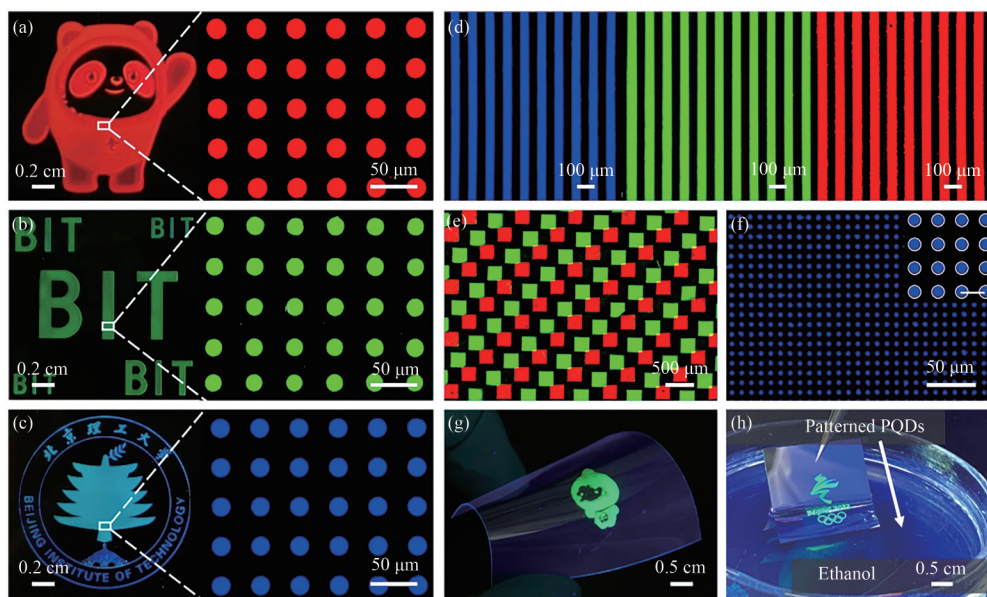


图 6 红色卡通图案(a)、绿色字母(b)、蓝色标识(c)及对应像素的荧光图像;(d)红、绿、蓝三色条纹图案;(e)250  $\mu\text{m}$  正方形的红绿双色图案薄膜;(f)直径  $5\ \mu\text{m}$  蓝色圆形图案,插图中的比例尺为  $10\ \mu\text{m}$ ;(g)紫外光下柔性 PET 基材上绿色卡通图案照片;(h)绿色标志在紫外线下浸入乙醇的照片<sup>[49]</sup>。

Fig. 6 Red cartoon pattern (a), green letters (b), blue label (c) and corresponding pixel fluorescence images; (d) Red, green, and blue striped patterns; (e) Red-green bi-color patterned film with  $250\ \mu\text{m}$  square; (f) Blue circular pattern with a diameter of  $5\ \mu\text{m}$ , the scale in the illustration is  $10\ \mu\text{m}$ ; (g) Photo of green cartoon pattern on flexible PET substrate under ultraviolet light; (h) Photo of green logo submerged in ethanol under UV light<sup>[49]</sup>.

化图案化,又作为钙钛矿 QDs 的硫醇配体增强表面钝化,从而提升钙钛矿 QDs 图案的 PLQY 与光稳定性。最终,仅使用微量 PTMP 便成功制备出具有  $\geq 560\text{ nm}$  特征尺寸和  $2\text{ }\mu\text{m}$  间距的高分辨率钙钛矿 QDs 图案,呈现多样化形态与色彩。该技术对应单色像素阵列的分辨率大于  $12\text{ }000\text{ PPI}$ 。此外,经图案化处理的样品在常温条件下储存超过 150 天后,其质量仍与刚制备时相当。2024 年,Yuan 等人<sup>[51]</sup>设计全无机钙钛矿 QDs 与 UV 交联型丙烯酸酯聚合物整合,他们通过精密设计与一锅法合成,成功制备出具有卓越环境稳定性的紫外交联型  $\text{CsPbX}_3$  QDs ( $X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ )。利用所得的 UV 交联钙钛矿 QDs 的溶液可加工特性,通过喷墨打印与光刻技术,可轻松实现高分辨率( $2\text{ }\mu\text{m}$ ,  $7\text{ }608\text{ PPI}$ )彩色钙钛矿 QDs 微阵列的精密图案化,满足 AR 和 VR 显示器要求。

因此,光交联技术凭借其配体分子对溶剂的选择性来达成对钙钛矿微小区域的精细操作。

通过控制光照的强度、时长等各项参数,提升钙钛矿在像素呈现方面的效果,进一步提高成像的分辨率与显示质量。

4 光交联应用于电致发光钙钛矿 QLED

光交联技术应用于电致发光器件时,需要兼顾考虑交联 QDs 的光学与电学性质。因为光交联形成的网络结构虽然有助于提升量子点的稳定性,但同时也可能会阻碍载流子的传输。一方面,可能会增加电荷传输的电阻;另一方面,容易造成电子和空穴注入不平衡,影响发光效率和显色性能。这为高性能的钙钛矿 QLED 带来了挑战。近年来,研究人员通过在量子点表面包覆更适合于电致发光的功能性配体,使形成的交联网络既能提升钙钛矿的稳定性,又不会影响其载流子传输,进而来实现电致发光钙钛矿 QLED 的制备与性能优化(表 1)。

表 1 不同交联分子 LED 的制备与图案化的实现  
Tab. 1 Preparation and patterning of LEDs with different cross-linked molecules

| 年份                   | 器件结构                                              | 交联分子                                               | 分辨率/<br>PPI | EQE/<br>% | 亮度/<br>( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | PL 波长/<br>nm |
|----------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------|-----------|------------------------------------------|--------------|
| 2020 <sup>[53]</sup> | ITO/PEDOT:PSS/polyTPD/<br>QDs/TPBi/LiF/Al         | 共轭亚油酸(CLA)                                         | —           | 1.34      | 2 470                                    | 513          |
| 2021 <sup>[52]</sup> | ITO/PEDOT:PSS/PVK/<br>QDs/TPBi/LiF/Al             | 6-庚炔酸                                              | —           | —         | 9 700                                    | 511          |
| 2021 <sup>[48]</sup> | —                                                 | 聚(2-肉桂酰氧基甲基丙烯酸酯)                                   | 465         | —         | —                                        | 512          |
| 2021 <sup>[58]</sup> | —                                                 | 肟磺酸酯醚(PA-480)                                      | —           | —         | —                                        | 517          |
| 2021 <sup>[59]</sup> | ITO/PEDOT:PSS/poly-TPD/<br>QDs/TPBi/LiF/Al        | 10-((2-苯甲酰苯甲酰)氧基)癸酸                                | —           | —         | 10 917                                   | 512          |
| 2022 <sup>[49]</sup> | —                                                 | 三羟甲基丙烷三(3-巯基丙酸酯)                                   | 2 450       | —         | —                                        | —            |
| 2022 <sup>[60]</sup> | ITO/PEDOT:PSS/Poly-TPD/<br>PQDs/TPBi/LiF/Al       | 乙烯双(4-叠氮基-2,3,5,6-四氟苯甲酸酯)                          | 400         | 6.8       | 20 000                                   | 514          |
| 2023 <sup>[50]</sup> | ITO/PEDOT:PSS/poly-TPD/<br>PFNBr/PQDs/TPBi/LiF/Al | 季戊四醇四基(3-巯基丙酸酯)                                    | 12 700      | 1         | 1 000                                    | 508          |
| 2023 <sup>[54]</sup> | ITO/PEDOT:PSS/TFB/<br>PQDs/OLA-ZnO/Al             | 9-癸烯酸                                              | —           | —         | 1 628                                    | 512          |
| 2024 <sup>[51]</sup> | —                                                 | 3-(三甲氧基硅基)丙基甲基丙烯酸酯                                 | 7 608       | —         | —                                        | 512          |
| 2024 <sup>[56]</sup> | ITO/PEDOT:PSS/PVK/<br>PQDs/TPBi/LiF/Al            | (3,3'-(4,4'-(全氟丁烷-1,4-二基)双(4,1-苯))双(3-(三氟甲基)-3H-二噻 | 4 000       | 16        | 64 726                                   | 530          |
| 2025 <sup>[61]</sup> | ITO/MgNiO/PQDs/MgZnO/Al                           | 季戊四醇四曲基(3-巯基丙酸酯)                                   | —           | 18.6      | 30 500                                   | 518          |
| 2025 <sup>[57]</sup> | ITO/PEDOT:PSS/Poly-TPD/<br>PQDs/PMMA/TPBi/LiF/Al  | 乙烯基膦酸                                              | 1 707       | 13.09     | 29 968                                   | 516          |

#### 4.1 光交联技术应用于电致钙钛矿 QLED 器件

2020, Wei 等人<sup>[53]</sup>通过将可聚合分子共轭亚油酸(CLA)作为表面配体掺入,实现对钙钛矿 QDs 的钝化。聚合后的 CLA 可形成交联量子点薄膜,为后续电荷传输层的溶液沉积创造条件。理论计算表明,聚合 CLA 与量子点的结合能显著增强,强配体的结合状态能更有效地钝化表面并提升量子点稳定性。研究者们由此制备的全溶液加工多层 QLED 器件表现出优异性能:基于 CsPbBr<sub>3</sub> 的器件最大亮度达 2 470 cd/m<sup>2</sup>, 基于 CsPbI<sub>3</sub> 的器件峰值量子效率达 2.67%。2021 年, Lee 等人<sup>[52]</sup>设计了一种具有缓慢解离速率的新型可交联配位体系,溶液由钙钛矿量子点、可交联表面配体、活化剂和溶剂组成,形成稳定配位体系(Stable LS)。他们通过精心筛选交联表面配体,确保钙钛矿量子点在溶液及薄膜状态下均能保持光电特性。在钙钛矿量子点中引入炔基配体,在光引发剂(2-羟基-2-甲基苯丙酮)的催化下,炔基间桥接反应迅速发生。器件表征采用的器件结构为 ITO/PEDOT:PSS(40 nm)/PVK

(30 nm)/钙钛矿 QDs(50 nm)/TPBi(40 nm)/LiF(1 nm)/Al(150 nm)(图 7(a))。为评估钙钛矿量子点的化学稳定性,在  $p(\text{O}_2) > 3 \times 10^{-4}$  /  $p(\text{H}_2\text{O}) > 1 \times 10^{-4}$  环境中沉积量子点薄膜,随后经 10 min 紫外光照进行交联固化。图 7(b)展示了不同烷基链长度炔烃酸作为发光层时 QLED 的亮度曲线,采用 6-庚炔酸作为发光层组装的 QLED 展现出最高亮度,随着炔烃酸烷基链长度从 3-丁炔酸增加至 6-庚炔酸, QLED 最大亮度从 480 cd/m<sup>2</sup> 提升至 3 600 cd/m<sup>2</sup>, 随后在 9-十一炔酸配体时降至 1 550 cd/m<sup>2</sup>。这是由于长烷基链的炔烃酸具有绝缘特性,导致其 PLQY 较低且电荷注入效率差。使用 6-庚炔酸进行器件优化后,器件的电流效率约为 6.7 cd/A(在 100 cd/m<sup>2</sup> 时获得), 导通电压约为 4.5 V, 亮度为 9 700 cd/m<sup>2</sup>(在 370 mA/cm<sup>2</sup> 时获得)。后续在此基础上进行了喷墨打印的 QLED, 如图 7(d~f)所示。2023 年, Shin 等人<sup>[54]</sup>类似地引入烯烃配体, 配体中的不饱和键可以通过在光引发剂存在下的紫外线照射激活, 从而诱导配体的链式反应, 进而能够交联单个钙

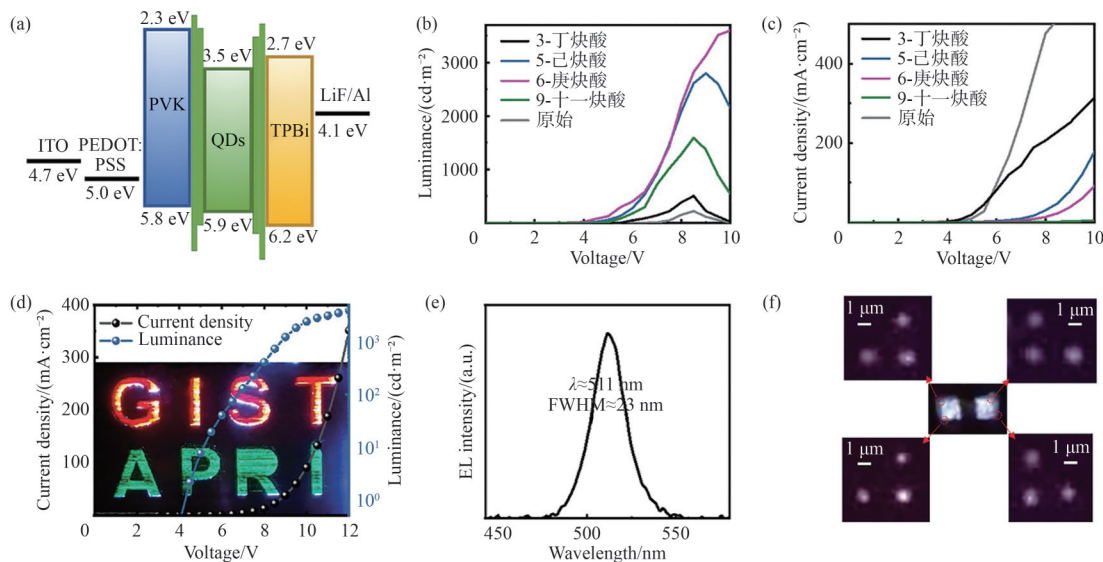


图 7 (a)QLED 中使用的材料和器件结构的能级图;用不同炔烃酸制造的 QLED 的亮度-电压(b)和电流密度-电压图(c);(d)喷墨打印的 QLED 的电流密度-电压-亮度图,插图显示了通过喷墨打印制造的双色 EL 器件;(e)采用量子点/稳定液晶材料的喷墨打印 QLED 的 EL 光谱;(f)具有绿色和红色 QDs/稳定 LS(6-庚炔酸)的约 1 μm 图案 QLED 的 EL 图像(用于白色发射)<sup>[52]</sup>。

Fig. 7 (a) Energy level diagram of materials and device structure used in QLED; Brightness-voltage (b) and current density-voltage (c) graphs of QLEDs made with different alkynoic acids; (d) Current density-voltage-brightness graph of inkjet-printed QLEDs, the illustration shows the bimodal EL devices fabricated through inkjet printing; (e) EL spectrum of inkjet printed QLED using quantum dots/stable liquid crystalline materials; (f) EL image of QLED with about 1 μm patterned green and red QDs/stable LS (6-heptyne acid) for white emission<sup>[52]</sup>.

钛矿量子点。所制备的 QLED 器件在 512 nm 处观察到绿色发光钙钛矿 QDs 溶液的 PL 发射峰, 在 514 nm 处观察到 EL 发射峰, 实现了 0.64 cd/A 的最大电流效率, 最大亮度为 1 628 cd/m<sup>2</sup>。

目前, 一些交联分子被应用于制备钙钛矿 QLED, 但其性能远低于目前非交联钙钛矿 QLED 的性能, 主要可能由于链状有机聚合物分子会阻碍载流子传输, 进而导致 QLED 的性能较低。

#### 4.2 光交联电致发光性能优化

研究表明, 一些光交联反应对 II-VI 族与 III-V 族 QDs 的光物理特性损伤较小, 可使图案化 QDs 维持高的 PLQY 与 EL 性能, 其器件性能已接近未图案化体系<sup>[48]</sup>。然而, 钙钛矿 QDs 容易受光化学反应的影响, 使其无损直接光学图案化的实现难度更高, 这是因为图案化过程中的配体光化学反应通常依赖与光敏配体的交换, 该过程易改变钙钛矿 QDs 的核/表面状态及周围微环境, 进而导致其荧光或 EL 性能衰减<sup>[52]</sup>。例如, 紫外光下利用光固化单体/聚合物配体对 QDs 进行图案化, 虽可基本保留其发光特性, 但绝缘性聚合物基质会抑制载流子注入/传输, 故不适用于 EL 器件。相比之下, 光分解配体虽能增强图案化纳米

晶的电子耦合, 却需以牺牲光致发光性能为代价<sup>[55]</sup>。

2024 年, Liu 等人<sup>[56]</sup>通过设计碳烯基交联剂 (3,3'-(4,4'-(全氟丁烷-1,4-二基)双(4,1-亚苯基))双(3-(三氟甲基)-3H-二氮杂环丁烷)), 开发出非破坏性直接光学图案化工艺。该交联剂经紫外光激发后可生成碳烯自由基, 通过非特异性 C-H 插入反应与钙钛矿 QDs 表面的天然配体结合, 实现无损交联。此方法为构建高性能 EL 显示器提供了应用潜力, 其核心优势在于可实现兼具高效电荷注入/传输特性与高亮度的钙钛矿 QDs 薄膜图案化。作为概念验证, 研究者们进一步制备了以交联 FAPbBr<sub>3</sub> QDs 为活性层的原型图案化 EL 器件: 整个 QDs 层经紫外光照射后, 采用辛烷进行显影。图 8(a) 展示了器件结构: ITO/PEDOT:PSS (25 nm)/PVK (8 nm)/FAPbBr<sub>3</sub> QDs/TPBi (35 nm)/LiF (1 nm)/Al; 图 8(b) 为各功能层对应的能级图; 图 8(c~f) 对比了原始器件与图案化器件的 EL 特性: 具有图案化/交联 QDs 层的发光二极管的最大亮度超过 60 000 cd/m<sup>2</sup>, 峰值 EQE 为 16%, 在图案化钙钛矿电致发光器件中名列前茅。2025 年, Huo 等人<sup>[57]</sup>通过在钙钛矿 QDs

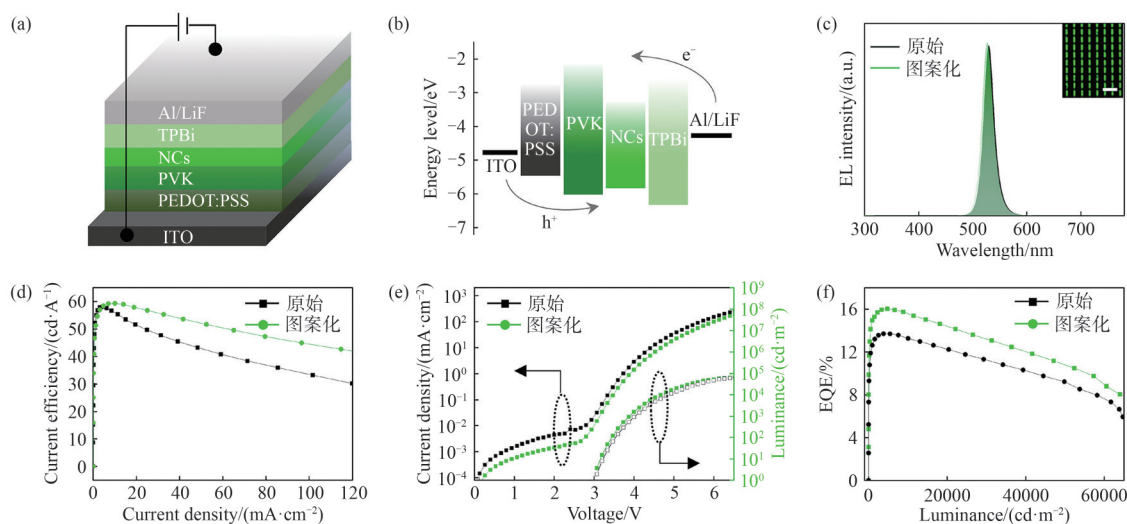


图 8 原始与图案化 FAPbBr<sub>3</sub> QLED 的电致发光特性。典型 LED 器件的示意结构图(a)与能带图(b);(c)原始器件(黑线)与图案化器件(绿阴影区)的电致发光光谱(插图为像素化 QLED 的电致发光图像, 比例尺 50 μm);未图案化与图案化器件的电流效率-电流密度曲线(d)、电流密度-电压-亮度曲线(e)以及 EQE 特性(f)<sup>[56]</sup>。

Fig. 8 Electroluminescence characteristics of pristine and patterned FAPbBr<sub>3</sub> QLEDs. Schematic structure diagram of a typical LED device (a) and energy band diagram (b); (c) Electroluminescence spectra of pristine device (black line) and patterned device (green shaded area) (the inset shows an electroluminescence image of the pixelated QLED, scale bar 50 μm); Current efficiency-current density curves (d), current density-voltage-brightness curves (e) and EQE characteristics (f) of non-patterned and patterned devices<sup>[56]</sup>.

表面引入具有不同功能的配体,包括促进电荷转移的乙烯基膦酸(VPA)和确保钙钛矿 QDs 在非极性溶剂中的分散的 1,10-癸二硫醇(DE),由此实现了稳定的钙钛矿 QDs。VPA 中短链和双键基团(C=C)的协同作用实现了优异的电荷转移能力。同时,DE 及其官能团(-SH)显著改善了钙钛矿 QDs 的分散性。为了验证其在电致发光中的作用,制备了 QLED 并且实现了出色的器件性能,亮度高达 29 968 cd/m<sup>2</sup>,像素尺寸为 10 μm,对应像素分辨率为 1 707 PPI,EQE 高达 13.09%。

尽管光交联技术在电致 QLED 应用中面临诸多挑战,但随着相关研究的不断深入,该技术有望逐步得到实施和完善,通过选择合适的交联分子在不影响电荷传输的条件下实现高性能 QLED,将进一步拓展光交联技术在光电器件领域的应用范围,推动整个行业的持续创新与发展。

## 5 结 论

光交联技术在钙钛矿 QDs 中的应用是通过

光敏交联分子与钙钛矿材料间的光化学反应,构建三维交联网络,在钙钛矿材料的稳定性提升和高分辨率图案化的实现两方面展现出重要的技术优势。在稳定性提升方面,三维交联网络可物理阻隔水汽、氧气等环境侵蚀性介质,同时交联分子的活性官能团(如羧基、氨基)能与钙钛矿表面未配位 Pb<sup>2+</sup> 形成稳定配位键,钝化表面缺陷与晶界陷阱;在图案制备方面,该技术依托光触发的精准调控,结合光刻掩膜可实现亚微米级 RGB 像素图案化。但是目前仍缺少能够同时保持钙钛矿 QDs 优异的光学与电学性能的直接交联图案化方案。一方面,加入电绝缘性的光活性剂会影响 QDs 薄膜的电荷传输性能,从而降低其电致发光性能。另一方面,钙钛矿 QDs 具有离子键特性与表面结构不稳定性,而且光化学反应可能会产生具有破坏性的副产物,容易在钙钛矿 QDs 表面引入缺陷,从而降低 QDs 的发光效率。因此,开发一种无损的光学图案化技术需要同时关注光敏分子对钙钛矿 QDs 的光学和电学性质的影响,这对于制备可以图案化的高性能钙钛矿 QLED 器件是至关重要的。

## 参 考 文 献:

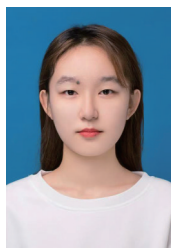
- [1] PROTESCU L, YAKUNIN S, BODNARCHUK M I, *et al.* Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX<sub>3</sub>, X = Cl, Br, and I): novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(6): 3692-3696.
- [2] LIU X K, XU W D, BAI S, *et al.* Metal halide perovskites for light-emitting diodes [J]. *Nature Materials*, 2021, 20(1): 10-21.
- [3] SHAMSI J, URBAN A S, IMRAN M, *et al.* Metal halide perovskite nanocrystals: synthesis, post-synthesis modifications, and their optical properties [J]. *Chemical Reviews*, 2019, 119(5): 3296-3348.
- [4] ZHAO B D, GUO B B, XING S Y, *et al.* Highly stable perovskite light-emitting diodes [J]. *Matter*, 2024, 7(3): 772-793.
- [5] SUN Y Q, GE L S, DAI L J, *et al.* Bright and stable perovskite light-emitting diodes in the near-infrared range [J]. *Nature*, 2023, 615(7954): 830-835.
- [6] YUAN S, DAI L, SUN Y QJ, *et al.* Efficient blue electroluminescence from reduced-dimensional perovskites [J]. *Nature Photonics*, 2024, 18(5): 425-431.
- [7] LI H J, FENG Y F, ZHU M Y, *et al.* Nanosurface-reconstructed perovskite for highly efficient and stable active-matrix light-emitting diode display [J]. *Nature Nanotechnology*, 2024, 19(5): 638-645.
- [8] GAO Y, LI H J, DAI X L, *et al.* Microsecond-response perovskite light-emitting diodes for active-matrix displays [J]. *Nature Electronics*, 2024, 7(6): 487-496.
- [9] HU J C, BI C H, REN K, *et al.* High-efficiency pure-red CsPbI<sub>3</sub> quantum dot light-emitting diodes enabled by strongly electrostatic potential solvent and sequential ligand post-treatment process [J]. *Nano Letters*, 2024, 24(15): 4571-4579.
- [10] FENG Y F, LI H J, ZHU M Y, *et al.* Nucleophilic reaction-enabled chloride modification on CsPbI<sub>3</sub> quantum dots

- for pure red light-emitting diodes with efficiency exceeding 26% [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(11): e202318777.
- [11] WANG J D, LI M Y, CAI B, *et al.* Matched electron-transport materials enabling efficient and stable perovskite quantum-dot-based light-emitting diodes [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(42): e202410689.
- [12] YANG F, ZENG Q S, DONG W, *et al.* Rational adjustment to interfacial interaction with carbonized polymer dots enabling efficient large-area perovskite light-emitting diodes [J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 119.
- [13] 瞿壮静, 张淑兰, 段嘉欣, 等. 基于 HEDTA 配体修饰的纯红色 CsPb(Br/I)<sub>3</sub> 钙钛矿发光二极管[J]. *发光学报*, 2024, 45(9): 1399-1409.
- QU M J, ZHANG S L, DUAN J X, *et al.* Pure red lead-based perovskite light-emitting diodes modified with HEDTA ligands [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2024, 45(9): 1399-1409. (in Chinese)
- [14] 吴加其, 王程杨, 陆红波, 等. 2-己基癸酸改性的全溶液制备的 CsPbBr<sub>3</sub> 量子点发光二极管[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(7): 875-882.
- WU J Q, WANG C Y, LU H B, *et al.* All-solution-processed CsPbBr<sub>3</sub> quantum dot light-emitting diodes modified with 2-hexyldecanoic acid ligand [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(7): 875-882. (in Chinese)
- [15] KONG L M, ZHANG X Y, ZHANG C X, *et al.* Stability of perovskite light-emitting diodes: existing issues and mitigation strategies related to both material and device aspects [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(43): 2205217.
- [16] MIAO Y, XIE R Z, KAN Q H, *et al.* Silica-stabilized lead halide perovskite nanocrystals: advantages, progress, and future directions [J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(4): 2402320.
- [17] CHEN R H, WANG Y K, NIE S Q, *et al.* Sulfonate-assisted surface iodide management for high-performance perovskite solar cells and modules [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2021, 143(28): 10624-10632.
- [18] DUFFY J A, INGRAM M D. An interpretation of glass chemistry in terms of the optical basicity concept [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1976, 21(3): 373-410.
- [19] LI Y, LV Y, GUO Z Q, *et al.* One-step preparation of long-term stable and flexible CsPbBr<sub>3</sub> Perovskite quantum dots/ethylene vinyl acetate copolymer composite films for white light-emitting diodes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(18): 15888-15894.
- [20] XIN Y M, ZHAO H J, ZHANG J Y. Highly stable and luminescent perovskite-polymer composites from a convenient and universal strategy [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(5): 4971-4980.
- [21] WEI Y, DENG X R, XIE Z X, *et al.* Enhancing the stability of perovskite quantum dots by encapsulation in crosslinked polystyrene beads via a swelling-shrinking strategy toward superior water resistance [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(39): 1703535.
- [22] ZHANG K S, FAN W X, YAO T L, *et al.* Polymer-surface-mediated mechanochemical reaction for rapid and scalable manufacture of perovskite qd phosphors [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(14): 2310521.
- [23] FAN W X, WANG S L, YANG Z, *et al.* In situ formation of luminescent perovskite quantum dot/polymer composites: scalable synthesis, continuous processing and functional applications [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(39): 2505600.
- [24] WANG L, ZHU Y Y, LIU H, *et al.* Giant stability enhancement of CsPbX<sub>3</sub> nanocrystal films by plasma-induced ligand polymerization [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(38): 35270-35276.
- [25] PALAZON F, AKKERMAN Q A, PRATO M, *et al.* X-ray lithography on perovskite nanocrystals films: from patterning with anion-exchange reactions to enhanced stability in air and water [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(1): 1224-1230.
- [26] JEONG B, HAN H, PARK C. Micro- and nanopatterning of halide perovskites where crystal engineering for emerging photoelectronics meets integrated device array technology [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(30): 2000597.
- [27] MINH D N, EOM S, NGUYEN L A T, *et al.* Perovskite nanoparticle composite films by size exclusion lithography [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(39): 1802555.
- [28] KIM G, AN S, HYEONG S K, *et al.* Perovskite pattern formation by chemical vapor deposition using

- photolithographically defined templates [J]. *Chemistry of Materials*, 2019, 31(19): 8212-8221.
- [29] HARWELL J, BURCH J, FIKOURAS A, *et al.* Patterning multicolor hybrid perovskite films *via* top-down lithography [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(4): 3823-3829.
- [30] ZOU C, CHANG C, SUN D, *et al.* Photolithographic patterning of perovskite thin films for multicolor display applications [J]. *Nano Letters*, 2020, 20(5): 3710-3717.
- [31] XING D, LIN C C, HO Y L, *et al.* Self-healing lithographic patterning of perovskite nanocrystals for large-area single-mode laser array [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(1): 2006283.
- [32] SUN W C, LI F, TAO J, *et al.* Micropore filling fabrication of high resolution patterned PQDS with a pixel size less than 5  $\mu\text{m}$  [J]. *Nanoscale*, 2022, 14(16): 5994-5998.
- [33] CHEN J X, JIA D L, QIU J M, *et al.* Multidentate passivation crosslinking perovskite quantum dots for efficient solar cells [J]. *Nano Energy*, 2022, 96: 107140.
- [34] LI X, IBRAHIM DAR M, YI C Y, *et al.* Improved performance and stability of perovskite solar cells by crystal crosslinking with alkylphosphonic acid  $\omega$ -ammonium chlorides [J]. *Nature Chemistry*, 2015, 7(9): 703-711.
- [35] HAN B N, YUAN S C, CAI B, *et al.* Green perovskite light-emitting diodes with 200 hours stability and 16% efficiency: cross-linking strategy and mechanism [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(26): 2011003.
- [36] LI Y W, ALAM A, ZHOU T, *et al.* Functional ligand-modified perovskite quantum dots for stable full-color microarrays via photopolymerization [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(4): 2413963.
- [37] CHO H, PAN J A, WU H Q, *et al.* Direct optical patterning of quantum dot light-emitting diodes via in situ ligand exchange [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(46): 2003805.
- [38] WU W B, WONG Y C, TAN Z K, *et al.* Photo-induced thiol coupling and C—H activation using nanocrystalline lead-halide perovskite catalysts [J]. *Catalysis Science & Technology*, 2018, 8(16): 4257-4263.
- [39] ZHU X L, LIN Y X, MARTIN JSAN, *et al.* Lead halide perovskites for photocatalytic organic synthesis [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2843.
- [40] ZHANG Z J, LI L, LIU L H, *et al.* Water-stable and photoelectrochemically active CsPbBr<sub>3</sub>/polyaniline composite by a photocatalytic polymerization process [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2020, 124(40): 22228-22234.
- [41] YASSITEPE E, YANG Z Y, VOZNYI O, *et al.* Amine-free synthesis of cesium lead halide perovskite quantum dots for efficient light-emitting diodes [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(47): 8757-8763.
- [42] TAN Y S, ZOU Y T, WU L Z, *et al.* Highly luminescent and stable perovskite nanocrystals with octylphosphonic acid as a ligand for efficient light-emitting diodes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(4): 3784-3792.
- [43] KO J, CHANG J H, JEONG B G, *et al.* Direct photolithographic patterning of colloidal quantum dots enabled by uv-crosslinkable and hole-transporting polymer ligands [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(37): 42153-42160.
- [44] ZHOU X C, GAO Z Y, SHI J B, *et al.* Direct synthesis of perovskite quantum dot photoresist for direct photolithography [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(1): e202413741.
- [45] JIN X Y, MA K L, CHAKKAMALAYATH J, *et al.* In situ photocatalyzed polymerization to stabilize perovskite nanocrystals in protic solvents [J]. *ACS Energy Letters*, 2022, 7(2): 610-616.
- [46] YANG R C, ZANG S S, ZHU Q Y, *et al.* Polymerizable surfactant ligand for stabilization and film formation of CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals [J]. *Langmuir*, 2022, 38(49): 15253-15262.
- [47] HUANG G G, ZHANG F Y, XIONG X Y, *et al.* Tailorable fluorescent perovskite quantum dots for multiform manufacturing via two-step thiol-ene click chemistry [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(5): 2411453.
- [48] KO J, MA K, JOUNG J F, *et al.* Ligand-assisted direct photolithography of perovskite nanocrystals encapsulated with multifunctional polymer ligands for stable, full-colored, high-resolution displays [J]. *Nano Letters*, 2021, 21(5): 2288-2295.
- [49] ZHANG P P, YANG G L, LI F, *et al.* Direct in situ photolithography of perovskite quantum dots based on photocatalysis of lead bromide complexes [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 6713.
- [50] MAENG S, PARK S J, LEE J, *et al.* Direct photocatalytic patterning of colloidal emissive nanomaterials [J]. *Science Advances*, 2023, 9(33): eadi6950.

- [51] YUAN L F, CHEN D J, HE K, *et al.* Advancing microarray fabrication: one-pot synthesis and high-resolution patterning of uv-crosslinkable perovskite quantum dots [J]. *Nano Research*, 2024, 17(9): 8600-8609.
- [52] LEE H, JEONG J W, SO M G, *et al.* Design of chemically stable organic perovskite quantum dots for micropatterned light-emitting diodes through kinetic control of a cross-linkable ligand system [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(23): 2007855.
- [53] WEI Y, LI X F, CHEN Y Q, *et al.* In situ light-initiated ligands cross-linking enables efficient all-solution-processed perovskite light-emitting diodes [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2020, 11(3): 1154-1161.
- [54] SHIN S, KIM Y, GWAK N, *et al.* Light-induced crosslinking of perovskite nanocrystals for all-solution-processed electroluminescent devices [J]. *Applied Surface Science*, 2023, 608: 155016.
- [55] KIM H, HIGHT-HUF N, KANG J H, *et al.* Polymer zwitterions for stabilization of CsPbBr<sub>3</sub> perovskite nanoparticles and nanocomposite films [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(27): 10802-10806.
- [56] LIU D, WENG K K, ZHAO H F, *et al.* Nondestructive direct optical patterning of perovskite nanocrystals with carbene-based ligand cross-linkers [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(9): 6896-6907.
- [57] HUO Y H, LUO C Z, WU C L, *et al.* Ambient direct lithography patterning of ultra-stable perovskite quantum dots for high-resolution light-emitting diodes [J]. *Advanced Functional Materials*, doi: 10.1002/adfm.202504261.
- [58] PAN J A, ONDRY J C, TALAPIN D V. Direct optical lithography of CsPbX<sub>3</sub> nanocrystals via photoinduced ligand cleavage with postpatterning chemical modification and electronic coupling [J]. *Nano Letters*, 2021, 21(18): 7609-7616.
- [59] LEE H, LEE S, LEE H. Energy/charge transfer modulation with spacer ligands for highly emissive quantum dot-polymer blend [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(18): 21534-21543.
- [60] LIU D, WENG K K, LU S Y, *et al.* Direct optical patterning of perovskite nanocrystals with ligand cross-linkers [J]. *Science Advances*, 2022, 8(11): eabm8433.
- [61] LIU R R, LI M J, WANG X, *et al.* Solution-processed high-performance green perovskite QLEDs enabled by pseudohalide passivation and photo-triggered ligand crosslinking [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 522: 167211.

#### 作者简介:



徐雨竹,女,硕士研究生,2019年于长江大学获得学士学位,主要从事钙钛矿量子点合成的研究。E-mail: xuyuzhu@gs.zzu.edu.cn



宋继中,男,博士,教授,2015年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事量子点发光材料与光电器件的研究。E-mail: songjizhong@zzu.edu.cn



姚纪松,男,博士,2021年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事钙钛矿量子点发光材料与LED器件的研究。E-mail: yaojisong@zzu.edu.cn