

文章编号: 1007-2780(2024)07-0875-08

2-己基癸酸改性的全溶液制备的 CsPbBr₃ 量子点发光二极管

吴加其^{1,2}, 王程杨^{1,2}, 陆红波^{1,2}, 朱俊^{1,2*}

(1. 合肥工业大学 化学与化工学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 光电技术研究院 特种显示技术国家工程实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要: 钙钛矿量子点发光二极管是极具发展潜力的新型显示技术。全无机 CsPbX₃ (X=Cl, Br, I) 钙钛矿量子点具有优异的光电性能, 然而合成 CsPbX₃ 量子点时往往需要油酸(OA)和油胺(OAm)等配体的参与, 这些配体和量子点之间的动态结合方式使其极易从量子点表面脱落, 进而引发量子点的不稳定性现象。此外, 油酸油胺的绝缘特性会阻碍发光二极管中载流子的传输并恶化器件性能。鉴于此, 本文以 CsPbBr₃ 量子点为研究对象, 采用短链配体 2-己基癸酸(DA)部分取代长链 OA 配体, 系统探究了不同 DA/OA 摩尔比对 CsPbBr₃ 量子点光学性能的影响。结果表明, 经 DA 修饰的 CsPbBr₃ 量子点表现出高达 88.64% 的光致发光量子产率。随后, 将优化后的 CsPbBr₃ 量子点应用到全溶液制备的发光二极管中, 器件的最高亮度和最大外量子效率分别从 9 cd·m⁻² 和 0.04% 提升至 155 cd·m⁻² 和 0.14%。接着, 通过优化钙钛矿发光层和空穴传输层之间的能级匹配, 进一步将器件的亮度和外量子效率提升至 436 cd·m⁻² 和 0.20%。

关键词: CsPbBr₃ 量子点; 新型显示技术; 发光二极管; 配体取代; 全溶液制备

中图分类号: TN383⁺.2 文献标识码: A doi: 10.37188/CJLCD.2024-0144

All-solution-processed CsPbBr₃ quantum dot light-emitting diodes modified with 2-hexyldecanoic acid ligand

WU Jiaqi^{1,2}, WANG Chengyang^{1,2}, LU Hongbo^{1,2}, ZHU Jun^{1,2*}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. National Engineering Laboratory of Special Display Technology, Academy of Opto-electric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Perovskite quantum dot (QD) light-emitting diodes are novel generation display technique with great potential. All-inorganic CsPbX₃ (X=Cl, Br, I) QDs exhibit excellent optoelectronic properties. However, the synthesis of CsPbX₃ QDs usually requires the long-chain ligands such as oleic acid (OA) and oleylamine (OAm). The dynamic binding between these ligands and QDs makes them easily detach from the QD surface, thereby leading to the poor stability. In addition, the insulating properties of OA and OAm are not conducive to the charge transfer. In this work, we adopt the strategy of replacing OA with 2-hexyldecanoic acid (DA) partially, systematically studying the influence of DA/OA molar ratios on the

收稿日期: 2024-05-15; 修订日期: 2024-06-08.

基金项目: 国家自然科学基金(No.52302237); 安徽省自然科学基金(No.2308085ME137)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.52302237); Natural Science Foundation of Anhui Province (No.2308085ME137)

*通信联系人, E-mail: jzhu@hfut.edu.cn

optical properties of CsPbBr₃ QDs. The results show that CsPbBr₃ QDs modified by DA exhibit a high photoluminescence quantum yield of 88.64%. Based on this strategy, the all-solution-processed light-emitting diodes achieve the luminance of 155 cd·m⁻² and external quantum efficiency (EQE) of 0.14%. Subsequently, by optimizing the energy levels between the perovskite layer and the hole transport layer, the luminance and EQE are further improved to 436 cd·m⁻² and 0.20%.

Key words: CsPbBr₃ quantum dots; novel generation display technique; light-emitting diodes; ligand replacement; all-solution-processing

1 引言

全无机 CsPbX₃ (X=Cl, Br, I) 钙钛矿量子点因其优异的光电性质, 如发光光谱可调节、高的光致发光量子产率和优异的色纯度等, 被视作下一代显示器件的有力候选者^[1-2]。自 2015 年 Kovalenko 等人首次采用热注入法合成 CsPbX₃ 量子点以来^[3], 其在光电领域, 尤其是发光二极管中有着广泛的应用^[4-9]。

其中, 包括空穴传输层和电子传输层在内全部由溶液方法制备的发光二极管具有工艺简单及成本低廉的优势, 近年来吸引了研究者的兴趣。Sargent 等人率先报道了全溶液法制备的 CsPbX₃ 量子点发光二极管的研究工作, 相应的红光、绿光和蓝光器件的最大外量子效率分别为 0.05%、0.325% 和 0.075%^[10]。同年, Tan 等人通过使用三甲基铝蒸汽交联的方法改善了 CsPbX₃ 量子点膜的耐溶剂性。在不需要使用正交溶剂的情况下, 获得了红光(5.7%)、橙光(1.4%)、绿光(0.19%)和蓝光(0.0074%)的全溶液处理的 CsPbX₃ 量子点发光二极管^[11]。最近, Ding 等人使用芳基膦化物 2,7-双(二苯基磷酰基)-9,9'-螺二芴和膦酸盐三苯基氧化膦作为电子传输层, 成功实现了高性能全溶液处理的钙钛矿量子点发光二极管。实验结果表明, 得益于 P=O 和 Pb²⁺ 离子之间强烈的相互作用, 钙钛矿量子点薄膜表现出显著增强的光致发光量子产率和荧光寿命, 最终器件获得了 6.47% 的最大外量子效率^[12]。

尽管如此, 基于全溶液法制备的器件性能仍处于较低水平, 这主要归因于两个方面: (1) CsPbX₃ 量子点发光层极易受到上层极性溶剂的破坏而导致荧光猝灭^[13-17]; (2) CsPbX₃ 量子点的稳定性和单分散性需要靠油酸(OA)油胺(OAm)等配体来维持, 然而配体和量子点之间不稳定的结合

方式会导致量子点表面会产生大量的空位缺陷, 且 OA、OAm 的绝缘特性也限制了载流子向发光层的注入, 严重影响着器件的性能^[18-21]。

本文介绍了一种原位配体取代的策略提高全溶液处理的 CsPbBr₃ 量子点发光二极管的性能, 该策略是通过在 CsPbBr₃ 量子点的合成过程中使用短链 2-己基癸酸(DA)部分取代长链 OA 实现的。结果表明, 当 DA 和 OA 的摩尔比为 1.5 时, CsPbBr₃ 量子点具有高达 88.64% 的光致发光量子产率。相应的器件获得了 155 cd·m⁻² 的最高亮度和 0.14% 的最大外量子效率。接着通过采用 ITO/PEDOT:PSS/Poly-TPD/CsPbBr₃ QDs/TPBi/Ag 的双空穴传输层的结构进一步将器件的亮度和外量子效率优化至 436 cd·m⁻² 和 0.20%。

2 实验

2.1 CsPbBr₃ 量子点的合成与发光二极管器件制备

(1) 油酸铯前体的制备: 称取 1 mmol 碳酸铯, 并加入 14 mL 十八烯以及 2 mL OA, 氮气气氛下升温至 150 °C 溶解。

(2) CsPbBr₃ 量子点的合成与纯化: 称取 0.752 mmol 溴化铅, 加入 20 mL 十八烯、2 mL OA 和 2 mL OAm, 升温至 170 °C 注入 1.6 mL 油酸铯前体, 5 s 后冰浴终止反应, 反应在无水无氧条件下进行。配体被 DA 部分取代的量子点在 OA 中加入不同摩尔比的 DA 获得。向量子点粗溶液中加入乙酸甲酯(乙酸甲酯的体积为量子点溶液体积的 2 倍), 离心, 向沉淀中加入 5 mL 正己烷分散溶解, 再次加入 15 mL 乙酸甲酯, 离心, 沉淀重新分散在正辛烷中, 浓度为 15 mg·mL⁻¹。

(3) CsPbBr₃ 量子点发光二极管的制备: 将洗净的 ITO 玻璃臭氧处理 20 min, 将聚(3,4-亚乙

基二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸)(PEDOT:PSS)溶液以3 000 r/min、40 s旋涂在ITO衬底上,150 °C下退火15 min,转移至手套箱中进行后续制备。以3 000 r/min、30 s旋涂CsPbBr₃量子点溶液,以4 000 rpm、30 s旋涂4 mg·mL⁻¹的1,3,5-三(1-苯基-1H-苯并咪唑-2-基)苯(TPBi)乙酸乙酯溶液,热蒸发Ag电极。

2.2 测试与表征

采用X射线衍射仪(PANalytical X-Pert PRO MPD)测试CsPbBr₃量子点的晶体结构;采用透射电子显微镜(JEM-2100F)对CsPbBr₃量子点的形貌进行表征;采用扫描电子显微镜(Regulus 8230, Hitachi)观察CsPbBr₃量子点薄膜的表面形貌;采用原子力显微镜(Dimension Icon, Bruker)测试CsPbBr₃量子点薄膜的表面粗糙度;采用紫外-可见分光光度计(UV2550, 岛津)测试CsPbBr₃量子点的吸收光谱;采用光致发光光谱仪(FluoroMax-4, Horiba)测试CsPbBr₃量子点的光致发光光谱;CsPbBr₃量子点发光二极管的发光性能由实验室自行搭建的测试系统进行测试,主要由分光辐射计(SR-UL1R)、数字源表(Keithley 2400)和计算机组成。

3 结果与讨论

3.1 DA取代对CsPbBr₃量子点表面形貌的影响

为了探索最佳的实验条件,将DA和OA的

摩尔比按照0、0.5、1和1.5进行投料,得到的量子点分别记作CsPbBr₃ QDs、CsPbBr₃ QDs-0.5、CsPbBr₃ QDs-1、CsPbBr₃ QDs-1.5。在合成过程中发现,当DA和OA的摩尔比进一步增加到2时,溴化铅无法完全溶解,因此不考虑更大的摩尔比。

首先,通过透射电子显微镜对4种量子点进行形貌测试。图1(a)显示了CsPbBr₃ QDs、CsPbBr₃ QDs-0.5、CsPbBr₃ QDs-1和CsPbBr₃ QDs-1.5的4种样品的透射电子显微镜图像。从图中可看出,所有样品均呈现立方体形状,且排列规整。插图中的高分辨透射电子显微镜图像显示,合成的量子点具有良好的结晶性,并且随着DA和OA的摩尔比从0.5逐渐增加至1.5,CsPbBr₃量子点(100)的晶面间距保持在0.58 nm没有变化,说明短链配体DA的引入没有引起CsPbBr₃量子点的晶格膨胀或收缩^[22]。对于CsPbBr₃量子点而言,其尺寸范围可以明显分为两部分:当量子点尺寸大于7 nm(对应于CsPbBr₃材料的激子波尔半径)时,量子限域效应不明显;当量子点尺寸从7 nm减小至4 nm时,其相应的禁带宽度由2.37 eV增加至2.50 eV,量子限域效应较为明显^[23]。如图1(b)所示,经DA改性后的CsPbBr₃量子点的平均晶粒尺寸略有减小,分别为10.50,7.65,7.88,8.00 nm,大于其激子波尔半径,此时的量子限域效应不强,因而在后续的紫外-可见吸收光谱和光致发光光谱没有观察到明显的蓝移现象。

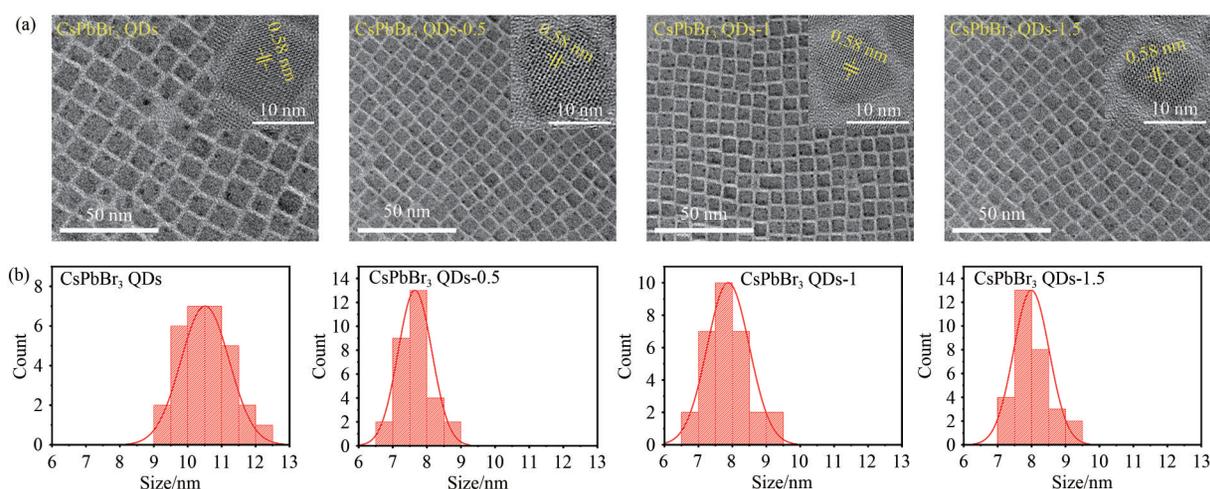


图1 CsPbBr₃ QDs、CsPbBr₃ QDs-0.5、CsPbBr₃ QDs-1、CsPbBr₃ QDs-1.5的(a)透射电子显微镜图像和(b)尺寸分布直方图。
Fig. 1 (a) Transmission electron microscope images and (b) size distribution histograms of CsPbBr₃ QDs, CsPbBr₃ QDs-0.5, CsPbBr₃ QDs-1, CsPbBr₃ QDs-1.5.

3.2 DA 取代对 CsPbBr₃ 量子点晶体结构和表面配体的影响

为研究 DA 取代对 CsPbBr₃ 量子点晶体结构的影响,对上述 4 种样品进行 X 射线衍射测试。测试结果如图 2(a)所示,原始的 CsPbBr₃ 量子点与不同摩尔比的 DA 和 OA 合成的 CsPbBr₃ 量子点在 15.2°和 30.7°均出现了相似的衍射峰,它们

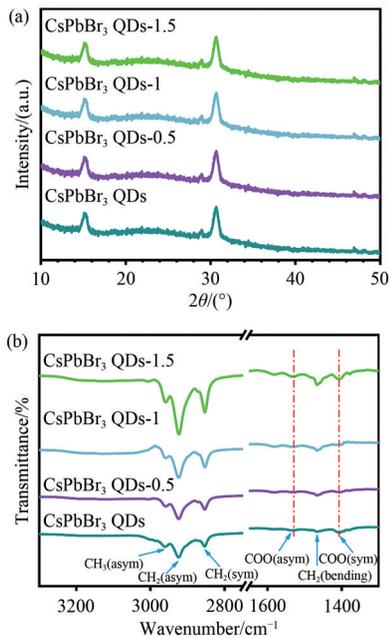


图 2 CsPbBr₃ QDs、CsPbBr₃ QDs-0.5、CsPbBr₃ QDs-1 和 CsPbBr₃ QDs-1.5 的 (a) X 射线衍射图和 (b) 傅里叶变换红外光谱图。

Fig. 2 (a) X-ray diffraction patterns and (b) Fourier transform infrared spectra of CsPbBr₃ QDs, CsPbBr₃ QDs-0.5, CsPbBr₃ QDs-1 and CsPbBr₃ QDs-1.5.

分别对应着 CsPbBr₃ 量子点的 (100) 和 (200) 晶面,这说明 DA 的引入对 CsPbBr₃ 量子点的晶体结构不会产生影响^[24]。随后,对 4 种样品进行傅里叶红外光谱测试,测试结果如图 2(b)所示。在 CsPbBr₃ QDs 样品中,位于 2 923 cm⁻¹和 2 856 cm⁻¹的信号分别对应于长链配体 OA 和 OAm 分子中—CH₂—的不对称伸缩振动和对称伸缩振动峰,位于 2 963 cm⁻¹和 1 466 cm⁻¹的特征峰则分别属于 OA 和 OAm 分子中—CH₃—的不对称伸缩振动和—CH₂—的弯曲振动。随着 DA 含量的逐渐增加,位于 1 531 cm⁻¹和 1 410 cm⁻¹处属于油酸分子中—COOH 的对称和不对称伸缩振动峰均明显增强,说明 DA 和 OA 配体可以很好地结合在量子点表面^[25]。

3.3 DA 取代对 CsPbBr₃ 量子点光学性能的影响

为了深入了解 DA 取代对 CsPbBr₃ 量子点光学性质的影响,对不同投料比合成的 CsPbBr₃ 量子点进行了紫外-可见吸收和光致发光光谱测试。如图 3(a~b)所示,CsPbBr₃ QDs、CsPbBr₃ QDs-0.5、CsPbBr₃ QDs-1 和 CsPbBr₃ QDs-1.5 的吸收峰位和发光峰位分别位于 500 nm 和 516 nm,发光峰位相对于吸收峰位置发生的红移源于斯托克斯位移^[26]。如图 3(c)所示,当 DA 和 OA 的投料比从 0 逐渐增加到 0.5、1 和 1.5 时,相应 CsPbBr₃ 量子点的光致发光量子产率从 54.62% 增加到 72.38%、78.93% 和 88.64%。相较于 OA 而言,短链的 DA 能够更紧密地结合在量子点表面,形成稳定的表面层,钝化量子点的表面

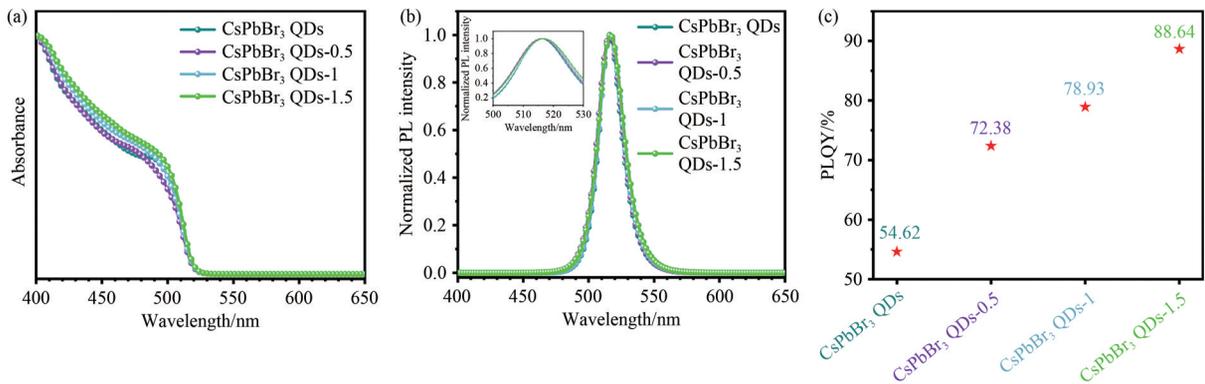


图 3 CsPbBr₃ QDs、CsPbBr₃ QDs-0.5、CsPbBr₃ QDs-1、CsPbBr₃ QDs-1.5 的 (a) 紫外-可见吸收光谱、(b) 归一化光致发光光谱和 (c) 光致发光量子产率。

Fig. 3 (a) UV-visible absorption spectra, (b) normalized photoluminescence spectra and (c) PLQY of CsPbBr₃ QDs, CsPbBr₃ QDs-0.5, CsPbBr₃ QDs-1 and CsPbBr₃ QDs-1.5.

缺陷,进而提升量子点的光学性能^[24]。值得注意的是,为了满足后续制备器件的要求,这里的光致发光量子产率都是在用反溶剂乙酸甲酯纯化两次后测得的^[27]。

3.4 DA取代对CsPbBr₃量子点薄膜表面形貌的影响

为了探究DA取代对CsPbBr₃量子点薄膜表面形貌的影响,将相同浓度的4种量子点旋涂至ITO/PEDOT:PSS衬底上进行扫描电子显微镜测试。测试结果如图4(a)所示,所有样品都呈现相似的形貌,对衬底都有较好的覆盖,且均匀致密,说明短链配体DA的引入并不会改变CsPbBr₃

量子点薄膜的表面形貌。然而,与扫描电子显微镜的测试结果相比,在图4(b)的原子力显微镜图像中观察到了不同的趋势,CsPbBr₃ QDs、CsPbBr₃ QDs-0.5、CsPbBr₃ QDs-1和CsPbBr₃ QDs-1.5的4种量子点薄膜的均方根粗糙度分别为6.15, 3.85, 3.82, 3.64 nm。这是由于较短链长的DA会取代OA,使得量子点之间的距离减小,电子耦合增强,更有利于形成光滑、平整的薄膜。光滑、平整的钙钛矿量子点薄膜能够确保发光层与电荷传输层之间的界面更加均匀和连续,减少因界面不平整而导致的电荷传输障碍,这对于提升器件的发光性能是有利的^[28]。

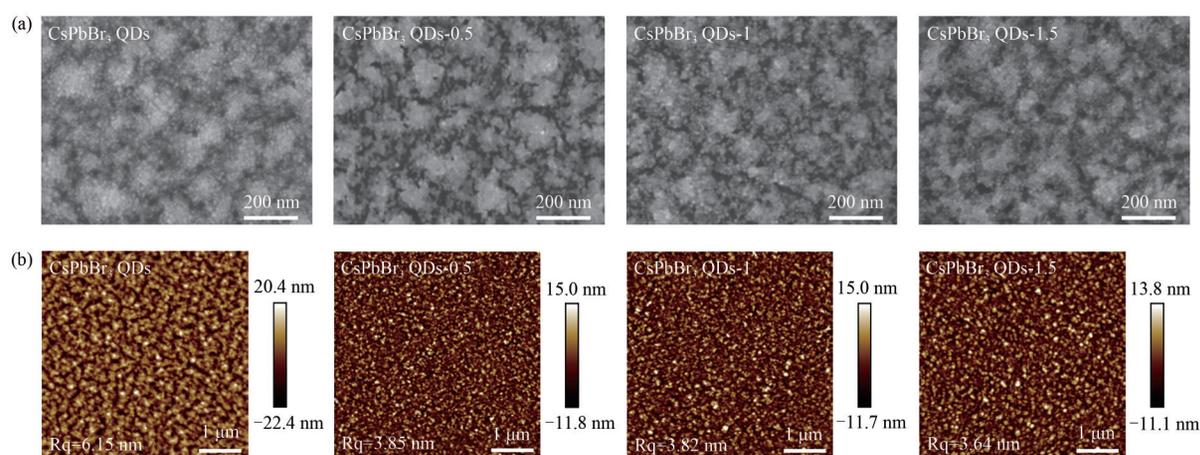


图4 CsPbBr₃ QDs、CsPbBr₃ QDs-0.5、CsPbBr₃ QDs-1和CsPbBr₃ QDs-1.5薄膜的(a)扫描电子显微镜图像和(b)原子力显微镜图像。

Fig. 4 (a) Scanning electron microscope and (b) atomic force microscope images of CsPbBr₃ QDs, CsPbBr₃ QDs-0.5, CsPbBr₃ QDs-1 and CsPbBr₃ QDs-1.5 films.

3.5 DA取代对CsPbBr₃量子点发光二极管性能的影响

为了验证不同摩尔比的DA/OA合成的CsPbBr₃量子点对器件性能的影响,制备了结构为ITO/PEDOT:PSS/CsPbBr₃ QDs/TPBi/Ag的全溶液处理的CsPbBr₃量子点发光二极管。值得注意的是,在采用全溶液法制备器件时,钙钛矿发光层会因上层极性溶剂的破坏而导致荧光猝灭现象,这极大地限制了其发展。本文选用极性相对较弱的乙酸乙酯作为钙钛矿发光层的正交溶剂,可以有效避免此问题。图5显示了CsPbBr₃量子点发光二极管的电流密度、亮度、电流效率和外量子效率随电压变化的特性曲线,详细的性能参数见表1。从图5(a)可以看出,尽管基于CsPbBr₃

QDs器件的电流密度显著高于其他条件,然而其最高亮度和最大外量子效率仅有9 cd·m⁻²和0.04%,这是由于量子点表面长链配体的存在阻碍了电荷传输。随着DA投料比的逐渐增加,器件的亮度、电流效率和外量子效率均逐步增加。最终,基于CsPbBr₃ QDs-1.5制备的器件获得了156 cd·m⁻²的最高亮度和0.14%的最大外量子效率。

接着,以CsPbBr₃ QDs-1.5样品作为对照组,采用双空穴传输层策略进一步优化器件性能。相较于聚(9-乙基咔唑)(PVK),聚(双(4-苯基(4-丁基苯基)胺)(Poly-TPD)具有更高的空穴迁移率(10⁻⁴ cm²·V⁻¹·s⁻¹),可以提高空穴的注入速率,而PVK则拥有更深的价带能级(-5.8 eV),可以有效降低空穴的注入势垒^[29]。图6显示了双空

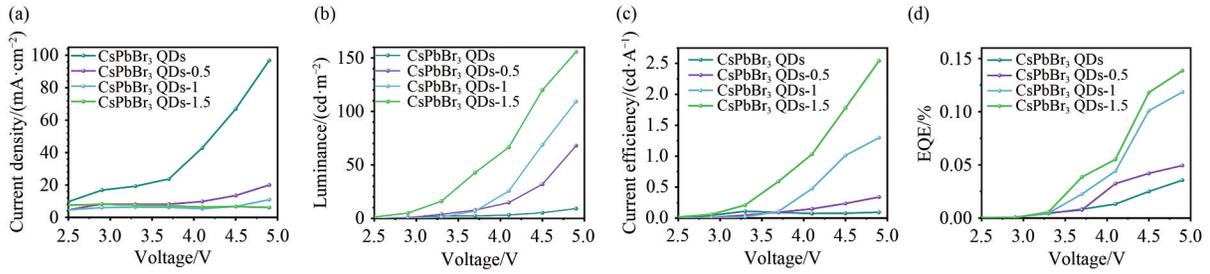


图5 CsPbBr₃量子点发光二极管的(a) 电流密度-电压,(b) 亮度-电压,(c) 电流效率-电压,(d) 外量子效率-电压特性曲线。
Fig. 5 (a) J - V , (b) L - V , (c) CE- V and (d) EQE- V characteristic curves of CsPbBr₃ QD light-emitting diodes.

表1 CsPbBr₃量子点发光二极管的性能参数

Tab. 1 Performance parameters of CsPbBr₃ QD light-emitting diodes

样品	V_{on}/V	EL peak/nm	FWHM/nm	$L_{max}/(cd \cdot m^{-2})$	$CE_{max}/(cd \cdot A^{-1})$	$EQE_{max}/\%$
CsPbBr ₃ QDs	2.8	515	21	9	0.09	0.04
CsPbBr ₃ QDs-0.5	2.6	517	22	68	0.34	0.05
CsPbBr ₃ QDs-1	2.7	517	20	110	1.30	0.12
CsPbBr ₃ QDs-1.5	2.6	519	21	156	2.54	0.14

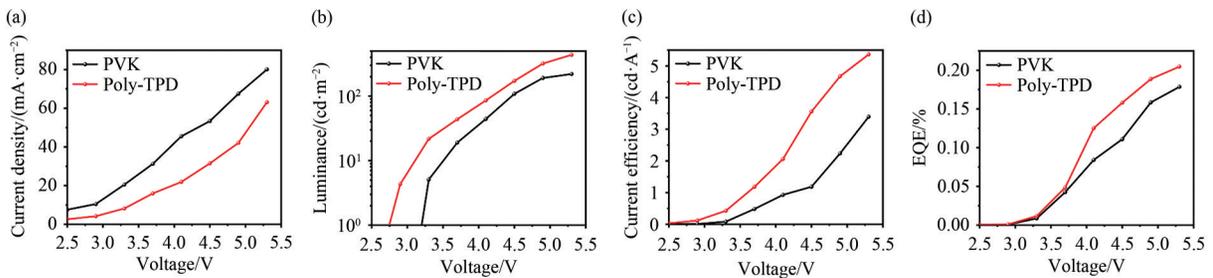


图6 基于 Poly-TPD 或 PVK 双空穴传输层的 CsPbBr₃量子点发光二极管的(a) 电流密度-电压,(b) 亮度-电压,(c) 电流效率-电压,(d) 外量子效率-电压特性曲线。
Fig. 6 (a) J - V , (b) L - V , (c) CE- V and (d) EQE- V curves of the devices prepared based on Poly-TPD or PVK double hole transport layers.

穴传输层器件的电流密度、亮度、电流效率和外量子效率随电压变化的特性曲线。基于 Poly-TPD 制备的器件拥有更低的启亮电压、更高的亮度以

及外量子效率,详细的性能参数见表2。最终,器件的亮度和外量子效率被进一步优化至 $436 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 0.20% 。

表2 基于 Poly-TPD 和 PVK 双空穴传输层的 CsPbBr₃量子点发光二极管的性能参数

Tab. 2 Performance parameters of the devices based on Poly-TPD and PVK double hole transport layer

样品	V_{on}/V	EL peak/nm	FWHM/nm	$L_{max}/(cd \cdot m^{-2})$	$CE_{max}/(cd \cdot A^{-1})$	$EQE_{max}/\%$
PVK	3.6	515	21	220	3.38	0.17
Poly-TPD	2.8	517	22	436	5.37	0.20

4 结 论

本文提出了一种简单易行的原位配体取代策略来提高 CsPbBr₃量子点的光学性能,该策略

是通过在 CsPbBr₃量子点的合成过程中使用短链 DA 部分取代长链 OA 实现的。结果表明,改性后的 CsPbBr₃量子点拥有高达 88.64% 的光致发光量子产率,相应的薄膜粗糙度也从 6.15 nm 降

低至3.64 nm。不仅如此,全溶液处理的CsPbBr₃量子点发光二极管的性能也得到了提升,最高亮度和最大外量子效率分别从9.13 cd·m⁻²和0.04%提升至156 cd·m⁻²和0.14%。随后,通过采用PEDOT:PSS/Poly-TPD双空穴传输层

结构以减小载流子的注入势垒,进一步将器件的亮度和外量子效率提升至436 cd·m⁻²和0.20%。这项工作对于实现简单且低成本的全溶液制备的CsPbX₃量子点发光二极管具有参考意义。

参 考 文 献:

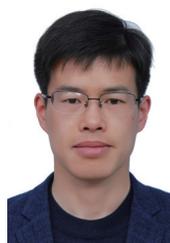
- [1] 方庆,吴有肇,王峰,等.量子点液晶显示技术发展趋势与展望[J].液晶与显示,2023,38(3):267-275.
FANG Q, WU Y Z, WANG F, *et al.* Development trend and prospect of quantum dot liquid crystal display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(3): 267-275. (in Chinese)
- [2] 卜世啸,葛子义.钙钛矿发光二极管的研究进展[J].液晶与显示,2021,36(1):105-112.
BU S X, GE Z Y. Research progress of perovskite light-emitting diodes [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2021, 36(1): 105-112. (in Chinese)
- [3] PROTESESCU L, YAKUNIN S, BODNARCHUK M I, *et al.* Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX₃, X=Cl, Br, and I): novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(6): 3692-3696.
- [4] XU L M, LI J H, CAI B, *et al.* A bilateral interfacial passivation strategy promoting efficiency and stability of perovskite quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3902.
- [5] YANG K Y, ZHENG J P, MAO J L, *et al.* Interface-induced crystallinity enhancement of perovskite quantum dots for highly efficient light-emitting diodes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(33): 40062-40069.
- [6] ZHAO C J, ZHU C R, YU Y, *et al.* Multifunctional short-chain 2-thiophenealkylammonium bromide ligand-assisted perovskite quantum dots for efficient light-emitting diodes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(33): 40080-40087.
- [7] HAO M M, DING S S, GAZNAGHI S, *et al.* Perovskite quantum dot solar cells: current status and future outlook [J]. *ACS Energy Letters*, 2024, 9(1): 308-322.
- [8] TIAN J Y, TAN Q Y, WANG Y T, *et al.* Perovskite quantum dot one-dimensional topological laser [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1433.
- [9] ZHAO C Y, CAZORLA C, ZHANG X L, *et al.* Fast organic cation exchange in colloidal perovskite quantum dots toward functional optoelectronic applications [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, 146(7): 4913-4921.
- [10] 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.
- [11] LI G R, RIVAROLA F W R, DAVIS N J L K, *et al.* Highly efficient perovskite nanocrystal light-emitting diodes enabled by a universal crosslinking method [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(18): 3528-3534.
- [12] LI X F, TIAN Y T, YANG L Q, *et al.* In situ interfacial passivation with an arylphosphine oxide and phosphonate electron transporting layer for efficient all-solution-processed PeQLEDs [J]. *Nanoscale*, 2022, 14(46): 17230-17236.
- [13] ZHANG J F, WANG H R, CAO F, *et al.* Efficient all-solution-processed perovskite light-emitting diodes enabled by small-molecule doped electron injection layers [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(2): 1900567.
- [14] 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.
- [15] LIU A Q, BI C H, TIAN J J. All solution-processed high performance pure-blue perovskite quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(44): 2207069.
- [16] YANG K Y, LI F S, LIU Y, *et al.* All-solution-processed perovskite quantum dots light-emitting diodes based on the solvent engineering strategy [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(32): 27374-27380.
- [17] ZHANG C Y, WANG B, ZHENG W L, *et al.* Hydrofluoroethers as orthogonal solvents for all-solution processed perovskite quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Nano Energy*, 2018, 51: 358-365.

- [18] ZHU X L, PAN Z C, XU T Y, *et al.* Capping ligand engineering enables stable CsPbBr₃ perovskite quantum dots toward white-light-emitting diodes [J]. *Inorganic Chemistry*, 2023, 62(23): 9190-9198.
- [19] GAO Z J, SHAO X W, HUANG Z J, *et al.* Short-chain ligand achieves ultra-stable CsPbX₃ perovskite quantum dots for white light-emitting diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 124(4): 041106.
- [20] LI G P, HUANG J S, ZHU H W, *et al.* Surface ligand engineering for near-unity quantum yield inorganic halide perovskite QDs and high-performance QLEDs [J]. *Chemistry of Materials*, 2018, 30(17): 6099-6107.
- [21] PARK J H, LEE A Y, YU J C, *et al.* Surface ligand engineering for efficient perovskite nanocrystal-based light-emitting diodes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(8): 8428-8435.
- [22] YAN D D, ZHAO S Y, WANG H X, *et al.* Ultrapure and highly efficient green light emitting devices based on ligand-modified CsPbBr₃ quantum dots [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(7): 1086-1092.
- [23] BUTKUS J, VASHISHTHA P, CHEN K, *et al.* The evolution of quantum confinement in CsPbBr₃ perovskite nanocrystals [J]. *Chemistry of Materials*, 2017, 29(8): 3644-3652.
- [24] YAN D D, SHI T C, ZANG Z G, *et al.* Ultrastable CsPbBr₃ perovskite quantum dot and their enhanced amplified spontaneous emission by surface ligand modification [J]. *Small*, 2019, 15(23): 1901173.
- [25] YAN D D, SHI T C, ZANG Z G, *et al.* Stable and low-threshold whispering-gallery-mode lasing from modified CsPbBr₃ perovskite quantum dots@SiO₂ sphere [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 401: 126066.
- [26] ZHANG H D, LV Y, CHANG Y L, *et al.* Ultra-small-size, highly efficient and stable CsPbBr₃ quantum dots synthesized by using a cesium-dodecyl benzene sulfonic acid solution [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 473: 145213.
- [27] XU Y Y, WANG Q, ZHANG L, *et al.* Strontium-doped CsPbI₃ quantum dots as an interfacial layer for efficient inorganic perovskite solar cells [J]. *Solar RRL*, 2021, 5(12): 2100669.
- [28] WANG Q, XU Y Y, ZHANG L, *et al.* Aromatic carboxylic acid ligand management for CsPbBr₃ quantum dot light-emitting solar cells [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(8): 10495-10503.
- [29] QIN F S, LU M, LU P, *et al.* Luminescence and degeneration mechanism of perovskite light-emitting diodes and strategies for improving device performance [J]. *Small Methods*, 2023, 7(10): 2300434.

作者简介:



吴加其,男,硕士研究生,2021年于南京工业大学获得学士学位,主要从事CsPbX₃钙钛矿量子点的合成及发光二极管性能研究。E-mail:3296235644@qq.com



朱俊,男,博士,研究员,2005年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事钙钛矿/量子点光电材料与器件的研究。E-mail:jzhu@hfut.edu.cn