

文章编号: 1000-7032(2026)08-1405-07

基于缺陷钝化与载流子传输协同优化的 高效蓝光钙钛矿发光二极管

霍修伟¹, 马健豪², 朱 军¹, 刘海涛¹, 秦毓婕¹, 白志玮¹, 潘江涌^{1*}

(1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210000;

2. 南京信息工程大学 集成电路学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 尽管钙钛矿发光二极管的性能在红光和绿光波段已取得显著突破, 但实现高效的蓝光钙钛矿发光二极管仍受限于发光层严重的非辐射复合以及电荷注入不平衡等瓶颈。本研究采用钙钛矿层内部体相调控与功能层界面修饰相结合的协同优化策略提高蓝光钙钛矿发光二极管发光效率。实验结果表明, EABr 掺杂准二维钙钛矿 $\text{PEA}_2(\text{CsPbBr}_3)_2\text{PbBr}_4$ 使得发射光谱从 519 nm 蓝移至 480 nm, 并有效抑制了非辐射复合。此外, 在 PEDOT:PSS 引入 PSS-Na 并与 PVK 构成 m-PEDOT:PSS/PVK 双层空穴传输结构。PSS-Na 的引入提高了 PEDOT:PSS 的功函数, 从而降低了空穴注入势垒, 提高了空穴传输效率, 同时 PVK 中的咔唑基团能够有效钝化发光层中的缺陷并抑制激子猝灭。基于以上协同优化策略的钙钛矿发光二极管亮度从 258 cd/m^2 提升至 1 087 cd/m^2 , 外量子效率从 4.98% 提升至 12.7%。该协同优化策略为实现高性能蓝光钙钛矿发光二极管提供了新的思路。

关键词: 蓝光钙钛矿发光二极管; 体相-界面协同优化; EABr 掺杂; 双空穴传输层

中图分类号: TN312.8; O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260080

CSTR: 32170.14.CJL.20260080

Highly Efficient Blue Perovskite Light-emitting Diodes Based on Synergistic Optimization of Defect Passivation and Carrier Transport

HUO Xiuwei¹, MA Jianhao², ZHU Jun¹, LIU Haitao¹, QIN Yujie¹, BAI Zhiwei¹, PAN Jiangyong^{1*}

(1. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology,

Nanjing 210000, China;

2. School of Integrated Circuits, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210000, China)

* Corresponding Author, E-mail: 003051@nuist.edu.cn

Abstract: Although the performance of perovskite light-emitting diodes (PeLEDs) has seen significant breakthroughs in the red and green spectral bands, achieving efficient blue PeLEDs remains limited by severe non-radiative recombination in the emission layer and unbalanced charge injection. In this study, we propose a bulk-interface synergistic optimization strategy to improve the luminous efficiency of blue PeLEDs. Experimental results show that EABr doping in the quasi-2D perovskite $\text{PEA}_2(\text{CsPbBr}_3)_2\text{PbBr}_4$ blue-shifts the emission spectrum from 519 nm to 480 nm and effectively suppresses non-radiative recombination. Furthermore, PSS-Na is introduced into PEDOT:PSS to form an m-PEDOT:PSS/PVK bilayer hole transport structure with PVK. The incorporation of PSS-Na increases the work function of PEDOT:PSS, thereby reducing the hole injection barrier and enhancing hole transport efficiency. Meanwhile, the carbazole groups in PVK effectively passivate defects in the light-emitting layer and suppress exciton quenching. Based on this bulk-interface synergistic optimization strategy, the luminance of the PeLEDs increases from 258 cd/m^2 to 1 087 cd/m^2 , and the external quantum efficiency (EQE) increases from 4.98% to 12.7%. This work provides a promising pathway for realizing high-performance blue PeLEDs.

Keywords: blue PeLEDs; bulk-interface synergistic optimization; EABr doping; dual HTL

收稿日期: 2026-03-16; 修订日期: 2026-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(62205153); 江苏省研究生实践创新计划项目(SJGX25_0509)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62205153); Postgraduate Practice Innovation Program of Jiangsu Province(SJGX25_0509)

金属卤化物钙钛矿发光二极管 (Perovskite light emitting diodes, PeLEDs) 的性能在绿光和红光波段进展迅速,但制备高效、稳定的蓝光 PeLEDs 仍面临挑战^[1-3]。目前,获得蓝光 PeLEDs 的主要手段之一是通过使用大尺寸阳离子构建准二维钙钛矿以生成量子阱结构。Bao 等通过引入阳离子 2-溴乙胺 (BEA⁺),利用 PEA⁺ 和 BEA⁺ 的协同作用形成了连续且集中的相分布^[4]。相应的蓝色准二维 PeLEDs 器件实现了 16.98% 的峰值外量子效率 (External quantum efficiency, EQE)。然而,这些策略仍集中于对形成准二维钙钛矿结构的大阳离子进行修饰。此外,尽管蓝光钙钛矿发光层本身的质量得到了显著改善,仅靠单一的体相优化仍难以完全弥合蓝光器件与先进红/绿光器件之间的效率差距。事实上,限制当前蓝光 PeLEDs 性能的另一大瓶颈在于界面处电荷注入不平衡。一方面,蓝光钙钛矿较深的价带顶 (Valence band maximum, VBM) 与传统的空穴传输层 (Hole Transport Layer, HTL) PEDOT:PSS 之间会形成较大的能级势垒^[5],阻碍空穴高效传输;另一方面, PEDOT:PSS 和发光层的直接接触还会猝灭激子发光^[6]。目前,许多研究对 PEDOT:PSS 进行修饰,如掺杂碱金属盐^[7]、碳点^[8]等,这虽然能部分改善能级失配,却无法抑制界面处的激子猝灭。

因此,本文提出了一种钙钛矿内部体相调控与功能层界面修饰相结合的协同优化策略。在发光层内部,本研究通过掺杂乙基溴化铵 (EABr),构建了纯溴体系的准二维蓝光钙钛矿发光层。EABr 可以进入钙钛矿晶体内部以扩大带隙,使发射光谱从 519 nm 蓝移至 480 nm,并同时钝化缺陷,抑制非辐射复合。此外,针对空穴注入势垒和界面激子猝灭问题,本研究在 PEDOT:PSS 中引入 PSS-Na (记为 m-PEDOT:PSS),并与 PVK 构成 m-PEDOT:PSS/PVK 双层空穴传输结构。引入 PSS-Na 可以有效降低空穴注入势垒,同时利用 PVK 分子中的咪唑基团钝化界面缺陷并抑制激子猝灭。最终,蓝光 PeLEDs 的峰值 EQE 由 3.17% 提升至 12.7%,为制备高性能蓝光 PeLEDs 提供了实用的参考。

PEA₂(Cs_{1-x}EA_xPbBr₃)₂PbBr₄ 前驱体溶液是将 CsBr、PbBr₂、PEABr、EABr 按照量比 EABr:PEABr:CsBr:PbBr₂=x:0.67:0.93:1 (x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8) 溶解于无水 DMSO 中,其中 PbBr₂=0.12 mol/L,并在室温下搅拌过夜。

m-PEDOT:PSS 溶液是将 PSS-Na 粉末溶解于去离子水中,配制成水溶液。随后,将上述 PSS-Na 水溶液与 PEDOT:PSS 原液 (AI 4083) 按 1:3 的体积比混合。PVK 溶液浓度为 4 mg/mL (溶剂为氯苯)。

ITO 玻璃衬底依次在洗涤剂、去离子水、丙酮和异丙醇中进行 15 min 超声清洗。将清洗后的衬底进行紫外-臭氧处理 15 min。对于 HTL 的制备,原始 PEDOT:PSS 和 m-PEDOT:PSS 溶液均以 4 000 r/min 的转速旋涂在 ITO 衬底上 (40 s),并在 140 °C 下退火 15 min。而 m-PEDOT:PSS/PVK 双层器件,在完成上述 m-PEDOT:PSS 层制备后,继续在其表面以 4 000 r/min 的转速旋涂 PVK 溶液 (4 mg/mL, 氯苯),并在 120 °C 条件下退火 10 min。随后,前驱体溶液 (90 mg/mL, DMSO) 以 4 000 r/min 旋涂 55 s,随后在 60 °C 条件下热退火 20 min。最后,在钙钛矿薄膜顶部沉积 40 nm 的 TPBi 层、1.0 nm 的 LiF 层和 100 nm 的 Al 电极。

使用 Keithley 2400 源表和 SpectraScan PR-670 分光辐射亮度计测量 PeLEDs 的电致发光性能。X 射线衍射光谱 (XRD) 使用 X 射线衍射仪 (Smart-Lab/3 kW) 测量。稳态光致发光光谱 (PL) 通过 Shimadzu, RF-6000 进行测量。瞬态荧光光谱 (TRPL) 光谱采用爱丁堡仪器 FLS980 光谱仪进行测量。X 射线光电子能谱 (XPS) 使用 Thermo Scientific ESCALAB 250Xi 光谱仪测量。

图 1(a) 展示了原始薄膜的 PL 发光峰位位于 519 nm,而在引入 EABr 后,PL 峰位随 EABr 掺杂浓度的上升逐渐蓝移至 480 nm。在高掺杂浓度下,PL 光谱在 435 nm 和 465 nm 处出现了代表 $n=2$ 和 $n=3$ 等小 n 相的寄生峰^[9],这可能归因于过量的 EABr 充当间隔阳离子,导致小 n 相过度形成。

通过 XRD 测试阐明了 EA⁺ 阳离子的作用机理。如图 1(b) 所示,未掺杂 EABr 的原始薄膜在 $2\theta=15.5^\circ$ 、 30.45° 、 31.06° 处表现出强衍射峰,分别对应三维钙钛矿相的 (100) 晶面、(200) 晶面以及零维钙钛矿相 Cs₄PbBr₆ 的 (006) 晶面^[10-11]。随着 EA⁺ 阳离子含量的增加,零维钙钛矿相 Cs₄PbBr₆ (006) 晶面的衍射峰逐渐减弱,这表明,EA⁺ 阳离子的引入成功抑制了 Cs₄PbBr₆ 杂相,显著提升了钙钛矿薄膜的相纯度。此外, 30.45° 处的主衍射峰逐渐偏移至 30.32° ,表明晶面间距变大,晶格发生膨胀。由于 EA⁺ 阳离子 (EA⁺, 274 pm) 的分子

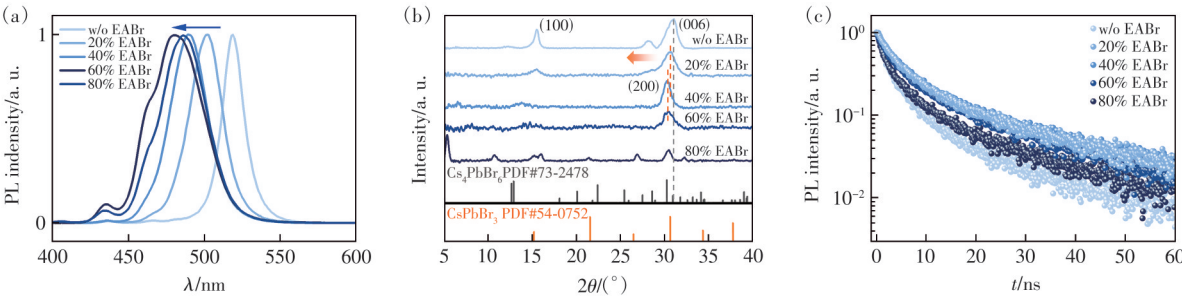


图1 不同浓度EABr掺杂钙钛矿薄膜的(a)PL光谱、(b)XRD光谱、(c)TRPL光谱

Fig.1 (a)PL spectra, (b)XRD spectra, (c)TRPL spectra of perovskite films doped with different concentrations of EABr

尺寸大于铯阳离子(Cs^+ , 177 pm)^[12], 推测 EA^+ 阳离子可能填充至钙钛矿晶格中, 形成准二维结构的 $\text{PEA}_2(\text{Cs}_{1-x}\text{EA}_x\text{PbBr}_3)_2\text{PbBr}_4$ ($0 \leq x \leq 1$) 钙钛矿相。

进一步通过 TRPL 测试, 探究了 EABr 对钙钛矿薄膜光生载流子复合的影响。如图 1(c) 所示, TRPL 衰减曲线可通过双指数速率方程进行拟合, 拟合结果汇总于表 1。随着 EABr 掺杂浓度的升高, 平均寿命 τ_{avg} 从原始薄膜的 6.02 ns 提升至 40% EABr 掺杂薄膜的 11.13 ns, 而随着掺杂浓度的继续升高平均寿命 τ_{avg} 出现下降趋势。此外, τ_1 组分(非辐射复合部分)的占比(F_1)随着掺杂浓度的增加呈现出先减小后增大的趋势, 40% EABr 掺杂薄膜表现出相对最小的 F_1 值。 τ_{avg} 和 F_1 结果表明 EABr 能够有效钝化钙钛矿中的缺陷。这可能归因于 EABr 中的 Br 阴离子可以填补进钙钛矿八面体结构中的卤素空位, 抑制了由卤素空位引起的空位缺陷^[13-14]。而随着过量的 EABr 加入, 未进入钙钛矿结构的 EA^+ 阳离子可能会形成非辐射复合中心, 导致载流子严重猝灭, 降低激子平均寿命。

通过对钙钛矿薄膜进行 SEM 测试以探究 EABr 对钙钛矿薄膜质量的影响, 如图 2 所示。原始钙钛矿薄膜呈现粗糙的表面形貌, 且薄膜表面孔洞较多。而掺杂 EABr 后, 薄膜变得致密且孔洞减少, 表明 EABr 可以有效改善钙钛矿的结晶质量。

表 1 不同浓度 EABr 掺杂薄膜的 TRPL 拟合数据表

Tab. 1 TRPL fitting data of films doped with different concentrations of EABr

Perovskites	$F_1/\%$	τ_1/ns	$F_2/\%$	τ_2/ns	$\tau_{\text{avg}}/\text{ns}$
w/o EABr	29.36	1.49	70.64	7.90	6.02
20% EABr	25.44	2.76	74.56	13.33	10.64
40% EABr	22.21	2.63	77.79	13.56	11.13
60% EABr	22.53	2.42	77.47	12.40	10.15
80% EABr	23.73	1.47	76.27	9.39	7.51

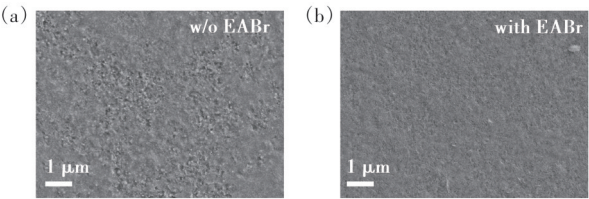


图2 添加与未添加 EABr 的钙钛矿薄膜 SEM 图像

Fig.2 SEM images of perovskite films with and without EABr

将未掺杂与 40% EABr 掺杂的钙钛矿薄膜制备成 PeLEDs 器件, 以探究 EABr 对 PeLEDs 器件电致发光性能的影响。其器件结构为 ITO/PEDOT:PSS/Perovskite/TPBi/LiF/Al。如图 3(a) 所示, 在引入 EABr 后, EL 光谱从原始薄膜的 514 nm 蓝移至 490 nm, 这与 PL 结果保持一致。EL 光谱的蓝移进一步证实 EA^+ 阳离子可以进入到钙钛矿八面体结构内部, 使得钙钛矿的晶格膨胀, 带隙展宽。

图 3(b) 展示了不同器件的 J - V - L 曲线。实验

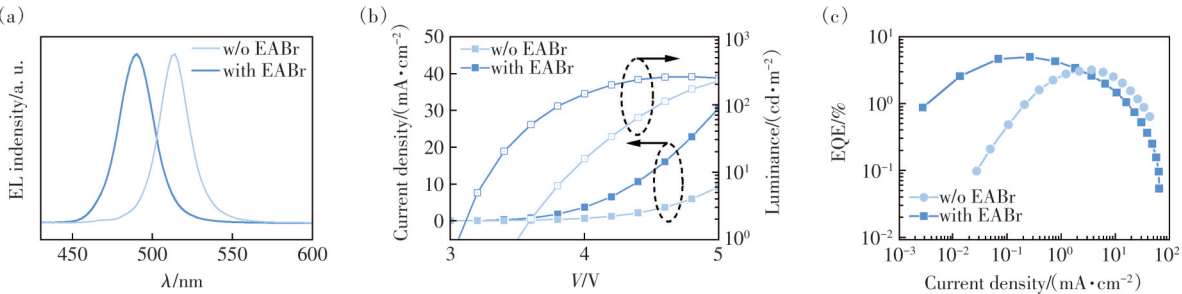


图3 添加与未添加 EABr 的 LED 器件的(a)EL光谱、(b) J - V - L 曲线、(c)EQE- J 曲线

Fig.3 (a)EL spectra, (b) J - V - L curves, (c)EQE- J curves of LED devices with and without EABr

结果表明,优化后的PeLEDs器件的亮度更高,同时开启电压(V_{on})从原始器件的3.5 V降低至3.1 V。器件的峰值EQE也从3.17%提升至4.98%,如图3(c)所示。这证明EABr的引入有效钝化了钙钛矿薄膜的缺陷,促进了激子辐射复合,提高了器件性能。

对PEDOT:PSS薄膜进行UPS测试以探究PSS-Na掺杂对PEDOT:PSS薄膜能级结构的影响,结

果如图4(a)与图4(b)所示。PEDOT:PSS的二次电子截止边能量(E_{cutoff})为16.12 eV,而m-PEDOT:PSS的 E_{cutoff} 降低至15.89 eV,相关功函数可以计算为^[15]:

$$\Phi = h\nu - E_{cutoff}, \tag{1}$$

其中, $h\nu$ 为入射光子能量(He I, 21.22 eV)。因此,PEDOT:PSS的功函数 W_F 由5.10 eV提高至5.33 eV,证实PSS-Na提高了PEDOT:PSS功函数。

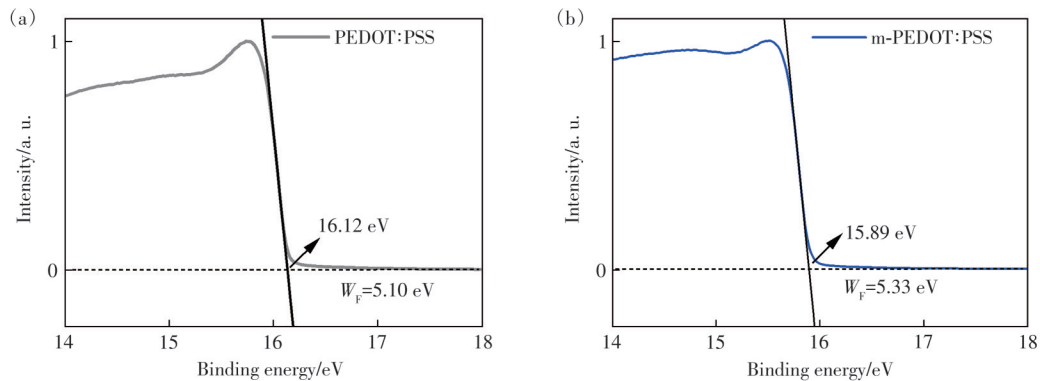


图4 (a)PEDOT:PSS和(b)m-PEDOT:PSS的UPS能谱
Fig.4 UPS spectra of (a)PEDOT:PSS and (b)m-PEDOT:PSS

进一步利用XPS光谱探究PEDOT:PSS能带改变的原因,如图5(a)、(b)所示。在XPS谱图中,结合能较低的双峰(约163.9 eV和165.0 eV)归属于PEDOT聚合物链条噻吩环中的硫原子(即S—C键的 $S 2p_{3/2}$ 和 $S 2p_{1/2}$ 轨道),代表了体系中的PEDOT组分;而结合能较高的双峰(约168.3 eV和169.4 eV)则对应于PSS聚合物链条磺酸基团($—SO_3^-$)中的硫原子(即S—O键的 $S 2p_{3/2}$ 和 $S 2p_{1/2}$ 轨道),代表了体系中的PSS组分^[16]。随着PSS-Na的加入,PSS组分的峰强度增强,而PEDOT组分的

峰强度减弱。通过对S 2p峰面积进行积分可以发现,PEDOT:PSS薄膜的PSS/PEDOT积分面积比为89.52%,而m-PEDOT:PSS薄膜提升至93.68%。这一结果证明了PSS-Na的引入导致薄膜表面PSS组分富集,成功构建了富含PSS的表面层。这可能归因于两个方面,一方面,PSS-Na引入了额外的一 SO_3^- ,导致PSS组分增加;另一方面,PSS-Na中解离出的 Na^+ 离子会促进PSS链与PEDOT链的分离,进一步导致薄膜表面PSS组分富集。这种PSS富集层有效提高了PEDOT:PSS的功函数^[7]。

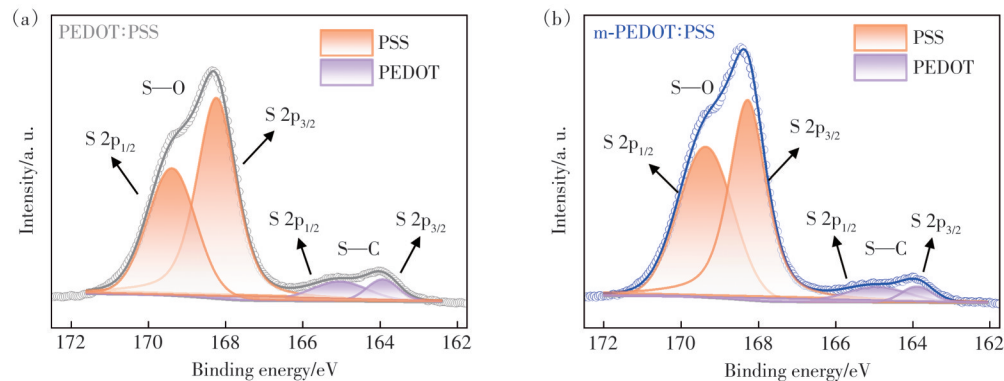


图5 (a)PEDOT:PSS和(b)m-PEDOT:PSS的XPS能谱
Fig.5 XPS spectra of (a)PEDOT:PSS and (b)m-PEDOT:PSS

图6为基于PEDOT:PSS与m-PEDOT:PSS结构的单空穴器件(Hole only devices, HODs)的 J - V

曲线,其器件结构为ITO/HTL/Perovskite/ MoO_3 /Al。在0~6 V电压下,基于m-PEDOT:PSS的HOD器

件的电流高于基于 PEDOT:PSS 的 HOD 器件,证明了 PSS-Na 可以提高空穴传输效率。

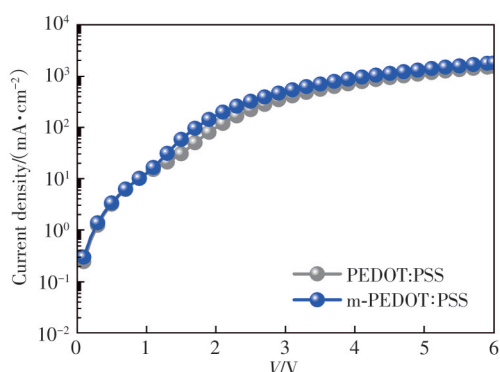


图6 基于 PEDOT:PSS 和 m-PEDOT:PSS HOD 器件的 J - V 曲线

Fig.6 J - V curves of HOD devices based on PEDOT:PSS and m-PEDOT:PSS

在此基础上,在 m-PEDOT:PSS 上引入 PVK 层,构筑 m-PEDOT:PSS/PVK 双层 HTL 体系。我们制备了 HOD 器件以探究双 HTL 对钙钛矿薄膜的缺陷钝化作用,其器件结构为 ITO/HTL/Perovskite/MoO₃/Al。图 7 展示了 HOD 器件的 SCLC 特性曲线。基于 SCLC 理论,可以将 J - V 曲线划分为欧姆导电区、缺陷填充限制区和空间电荷限制电流区。欧姆导电区和缺陷填充限制区交界处的电压被定义为缺陷填充限制电压 (V_{TFL}),其与缺陷态密度 (N_t) 的关系遵循公式^[17]:

$$N_t = \frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 V_{\text{TFL}}}{eL^2}, \quad (2)$$

其中, ε_r 为钙钛矿的相对介电常数 (7.9)^[8], ε_0 为真空介电常数, L 为钙钛矿薄膜厚度 (30 nm), e 为单位电荷。对于 m-PEDOT:PSS-HOD, V_{TFL} 为 0.37 V, 对应的 N_t 为 $3.59 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; 而构筑 m-PEDOT:PSS/PVK 双层 HTL 后, V_{TFL} 降低至 0.28 V, 对应的 N_t 为 $2.72 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。这可能归因于 PVK 中的咪唑基团带有孤对电子,可以与钙钛矿中未配位的 Pb²⁺ 形成配位键,钝化了界面缺陷^[16]。同时, m-PEDOT:PSS/PVK-HOD 的电流更大,表明引入 PVK 也可以通过形成阶梯势垒结构促进器件中的空穴传输。

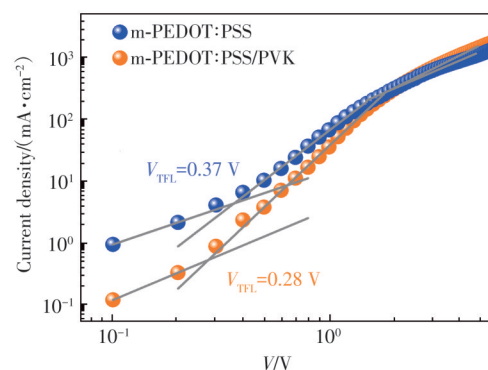


图7 基于 m-PEDOT:PSS 和 m-PEDOT:PSS/PVK 的 HOD 器件的 SCLC 特性曲线

Fig.7 SCLC curves of HOD devices based on m-PEDOT:PSS and m-PEDOT:PSS/PVK

PeLEDs 器件结构及能级排布示意图如图 8(a)、(b) 所示。当原始 PEDOT:PSS 作为 HTL 时,器件 EL 峰位位于 490 nm; 而采用 m-PEDOT:PSS 和 m-PEDOT:PSS/PVK 作为 HTL 时,EL 峰位分别红移

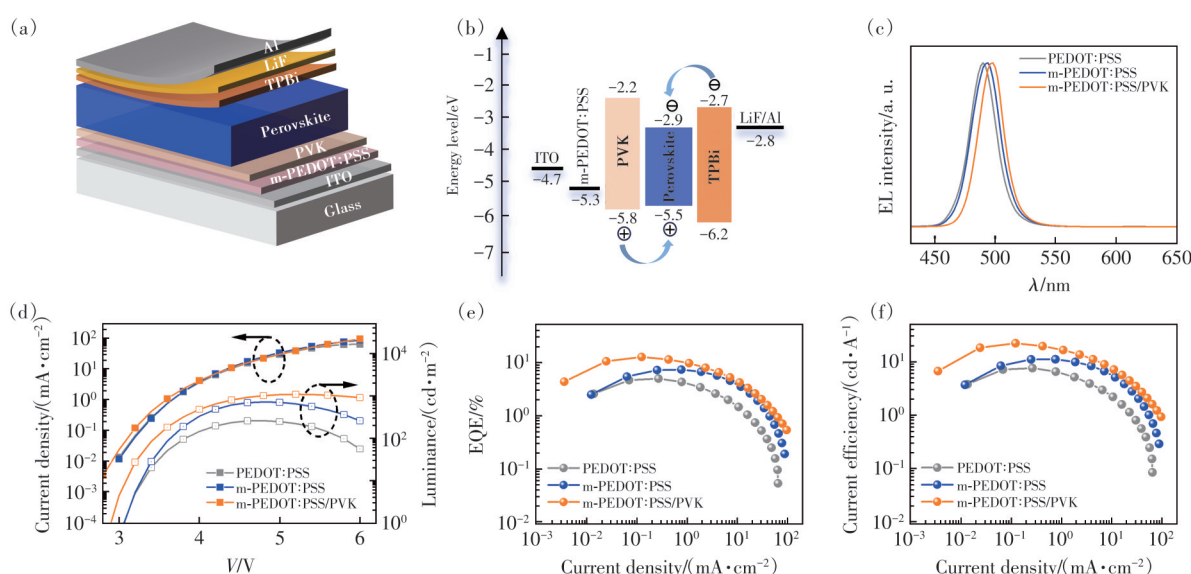


图8 器件的(a)结构示意图、(b)能带示意图、(c)EL光谱、(d) J - V - L 曲线、(e)EQE- J 曲线、(f)CE- J 曲线

Fig.8 (a) Schematic structure, (b) energy band diagram, (c) EL spectra, (d) J - V - L curves, (e) EQE- J curves, and (f) CE- J curves of the device

至 494 nm 和 498 nm,如图 8(c)所示。EL 光谱的红移可能归因于 PVK 的引入调控了上方准二维钙钛矿薄膜的结晶动力学,有效抑制了小 n 相(特别是 $n=1$ 相)生成,促使激子通过能量漏斗向带隙更窄的大 n 相汇聚并发生辐射复合^[18]。此外, J - V - L 测试结果显示,相比于 PEDOT:PSS,m-PEDOT:PSS/PVK 双 HTL 器件的峰值亮度从 258 cd/m² 提升至 1 087 cd/m²,如图 8(d)所示。优化后的双层 HTL 器件的峰值 EQE 由 4.98% 提升至 12.7%,电流效率从 7.60 cd/A 提升至 22.16 cd/A,如图 8(e)~(f)所示。这表明 PVK 可以有效钝化钙钛矿中的缺陷以提高辐射复合效率,同时提高空穴传输效率。各器件的性能指标汇总于表 2。

表 2 基于不同 HTL 的 PeLEDs 器件性能汇总
Tab. 2 Summary of device performance of PeLEDs based on different HTLs

	EL/nm	$L_{\max}/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$	$\text{EQE}_{\max}/\%$	V_{on}/V
PEDOT:PSS	490	258	4.98	3.1
m-PEDOT:PSS	494	718	7.36	3.1
m-PEDOT:PSS/PVK	498	1 087	12.71	2.9

此外,原始器件出现严重的效率滚降,这是由于 PEDOT:PSS 与发光层界面之间的激子猝灭,而双层 HTL 有效抑制了界面处激子猝灭并缓解了滚降效应。

本研究提出了一种内部体相调控与功能层界面修饰相结合的协同优化策略,显著提升了蓝光 PeLEDs 的性能。在体相优化方面,通过 EABr 掺杂不仅将发射光谱蓝移至 480 nm,还有效抑制了非辐射复合,将器件的峰值 EQE 从 3.17% 提高到 4.98%。在界面修饰方面,构建了 m-PEDOT:PSS/PVK 双层 HTL 结构,降低了空穴注入势垒,并同时钝化了界面缺陷和抑制激子猝灭。通过这种协同优化策略,最终蓝光 PeLEDs 的 EQE 提升至 12.7%。本工作为实现高性能蓝光钙钛矿发光二极管提供了一种实用的设计思路。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260080>

参 考 文 献:

[1] NONG Y Y, YAO J S, LI J Q, *et al.* Boosting external quantum efficiency of blue perovskite QLEDs exceeding 23% by trifluoroacetate passivation and mixed hole transportation design [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(27): 2402325.

[2] YUAN S, DAI L J, SUN Y Q, *et al.* Efficient blue electroluminescence from reduced-dimensional perovskites [J]. *Nat. Photonics*, 2024, 18(5): 425 - 431.

[3] YU B F, XING Z H, ZHANG D L, *et al.* Spacer cation engineering enables blue quasi-2D perovskites to achieve highly efficient and spectrally stable electroluminescence [J]. *Small*, 2025, 21(18): 2501333.

[4] BAO Z Q, YU S L, GUO X Y, *et al.* Regulating the continuous and concentrated distribution of quasi-2D perovskite phases to achieve sky-blue light-emitting diodes with efficiency approaching 17% [J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 482: 148875.

[5] ZHANG K, SHEN Y, CAO L X, *et al.* Nondestructive halide exchange *via* $\text{S}_{\text{N}}2$ -like mechanism for efficient blue perovskite light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 10621.

[6] CHUA H M, YANTARA N, TAY Y B, *et al.* Influence of ionic additives in the PEDOT:PSS hole transport layers for efficient blue perovskite light emitting diodes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(11): 14614-14623.

[7] LIU W Z, WANG Y, XU J Z, *et al.* Enhancing carrier balance in blade-coated near-infrared quantum dot light-emitting diodes by a PSS-rich PEDOT:PSS hole-buffering layer [J]. *Small*, 2025, 21(44): e04662.

[8] WANG H W, ZHANG B W, WANG B Y, *et al.* Efficient quasi-2D perovskite based blue light-emitting diodes with carbon dots modified hole transport layer [J]. *Nano Lett.*, 2024, 24(28): 8702-8708.

[9] TAM H W, LEUNG T L, SUN W T, *et al.* Phase control for quasi-2D blue emitters by spacer cation engineering [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(32): 11052-11060.

[10] CHU Z M, ZHAO Y, MA F, *et al.* Large cation ethylammonium incorporated perovskite for efficient and spectra stable blue light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 4165.

[11] TONG Y F, BI X Y, XU S, *et al.* *In situ* halide exchange of cesium lead halide perovskites for blue light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(3): 2207111.

[12] GHOLIPOUR S, ALI A M, CORREA-BAENA J P, *et al.* Globularity-selected large molecules for a new generation of

- multiplication perovskites [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(38): 1702005.
- [13] KIM M S, SADHUKHAN P, MYOUNG J M. High-performance blue perovskite films and micro-arrays for light-emitting diodes with ionic liquid interlayer [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(1): 2309436.
- [14] DONG J C, LU F F, HAN D Y, *et al.* Deep-blue electroluminescence of perovskites with reduced dimensionality achieved by manipulating adsorption-energy differences [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2022, 61(40): e202210322.
- [15] CHEN S, CHEN Y, ZHANG H H, *et al.* (Zn, Ti)O electron transport layer enables the highest conversion efficiency in Cd-free Sb_2Se_3 photocathodes for stable solar hydrogen production [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(11): e18202.
- [16] ZHANG Y, WANG Q, HU F Y, *et al.* Photoelectron spectroscopy reveals the impact of solvent additives on poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) thin film formation [J]. *ACS Phys. Chem. Au*, 2023, 3(3): 311-319.
- [17] JIANG Y Z, QIN C C, CUI M H, *et al.* Spectra stable blue perovskite light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 1868.
- [18] YU M B, QIN T X, GAO G, *et al.* Charge environment and perovskite crystallization regulation interface engineering with molecular bridge for efficient deep-blue (448 nm) light-emitting diodes [J]. *ACS Nano*, 2025, 19(45): 39181-39191.



霍修伟(2001–),男,安徽六安人,硕士,2026年于南京信息工程大学获得硕士学位,主要从事量子点和钙钛矿LED的研究。
E-mail: 202312700007@nuist.edu.cn



潘江涌(1991–),男,安徽黄山人,博士,副教授,2018年于东南大学获得博士学位,主要从事光电集成器件和系统的研究。
E-mail: 003051@nuist.edu.cn