

多功能钝化剂协同调控准二维蓝光钙钛矿发光二极管性能

陆 佳¹, 马健豪², 白志玮¹, 麻函薇¹, 刘海涛¹, 童兆辉²,
徐劲峰², 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 210044;

2. 南京信息工程大学 集成电路学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 蓝光钙钛矿发光二极管(Perovskite Light-Emitting Diodes, PeLEDs)因发光层内部 Br/Cl 分布不均、以及严重的非辐射复合现象导致较低的发光效率和稳定性。本文引入了多功能钝化剂[4-(3,6-二甲基-9H-咔唑-9-基)丁基]磷酸(Me-4PACz), 利用其磷氧基团(-P=O)与钙钛矿中未配位 Pb²⁺ 进行配位, 钝化缺陷, 同时 Me-4PACz 与苯乙胺溴化铵(PEABr)之间形成氢键作用, 从而协同调控钙钛矿结晶动力学过程, 优化相分布, 实现不同相间的高效能量传递。基于该优化策略的 PeLEDs 器件的最大亮度和外量子效率分别达到 2058 cd m⁻² 和 15.2%, 并展现出良好的光谱稳定性。

关键词: 钙钛矿发光二极管; 蓝光; 多功能钝化剂; 相分布

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10.37188/CJL.20260081

CSTR: 32170.14.CJL.20260081

Multifunctional Passivating Agent for Synergistic Regulation of Quasi-Two-Dimensional Blue Perovskite Light-Emitting Diodes Performance

LU Jia¹, MA Jianhao², BAI Zhiwei¹, MA Hanwei¹, LIU Haitao¹, TONG Zhaohui²,
XU Jinfeng², PAN Jiangyong^{1*}

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

Nanjing 210044, China;

2. School of Integrated Circuits, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

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

Abstract: Blue perovskite light-emitting diodes (PeLEDs) suffer from low luminescence efficiency and poor stability due to the uneven distribution of Br/Cl within the emissive layer and severe non-radiative recombination. Here, we introduce a multifunctional passivating agent, [4-(3,6-dimethyl-9H-carbazol-9-yl)butyl]phosphonic acid (Me-4PACz), whose phosphine oxide (-P=O) group coordinates with uncoordinated Pb²⁺ in the perovskite lattice to passivate defects, while simultaneously forming hydrogen bonds with phenethylammonium bromide (PEABr). This synergistically regulates the perovskite crystallization kinetics, optimizes phase distribution, and enables efficient energy transfer. The resulting PeLEDs devices achieve a maximum luminance of 2058 cd m⁻² and a peak external quantum efficiency of 15.2%, along with excellent spectral stability.

Keywords: perovskite light-emitting diodes; blue emission; multifunctional passivator; phase composition distribution

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

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

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

1 引 言

钙钛矿发光二极管(Perovskite Light-Emitting Diodes, PeLEDs)因其广色域、高效率以及可溶液加工优势而受到广泛关注^[1]。目前,绿光和近红外器件已取得显著进展,外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)超过 30%^[2-3]。相比之下,蓝光器件的发展仍相对滞后,而高效、稳定的蓝光器件是新一代显示与照明技术的重要基础。

实现钙钛矿蓝光发射的主要策略包括组分工程和维度工程^[4]。通过调控氯/溴混合卤素比例,可以连续调节钙钛矿带隙并获得蓝光发射^[5]。但混合卤素体系在光照或电激发下易发生离子迁移,导致发射峰红移,光谱稳定性较差^[6]。相比之下,准二维钙钛矿由于引入长链有机配体,通常具有更高的激子结合能和更好的结构稳定性,因此在蓝光器件中展现出更大潜力^[7]。

目前,PEA、iBA 和 IPA 等有机阳离子已被广泛用于准二维钙钛矿的构筑。单一配体虽然能够诱导准二维结构形成,但过量绝缘配体往往会削弱载流子传输,增加器件开启电压。因此,双配体协同调控逐渐成为优化相分布与电荷输运的重要策略。已有研究表明,混合配体有助于抑制小 n 相生长,改善薄膜中的能量传递过程,从而提升蓝光器件的亮度和效率^[8]。此外,具有特定官能团的极性添加剂也被用于进一步调控结晶过程、钝化缺陷并稳定混合卤素准二维结构,从而改善器件性能和光谱稳定性^[9]。例如,zou 等人引入了乙酰磺胺酸钾(Ace-K)与 NaBr 的组合策略,利用 Ace-K 中丰富的官能团(C=O、C-N 和 S=O)与钙钛矿中未配位的 Pb^{2+} 结合以有效钝化缺陷,同时借助 NaBr 抑制小 n 相的生成,成功构建了高效的能量级联通道,提升了蓝光 PeLEDs 的性能^[10]。此外,针对本文所使用的[4-(3,6-二甲基-9H-咪唑-9-基)丁基]磷酸(Me-4PACz)分子,最近的研究也表明其结构中的磷氧基团(-P=O)能够与未配位 Pb^{2+} 发生强相互作用,从而降低薄膜的缺陷密度^[11]。尽管如此,蓝光 PeLEDs 仍面临效率偏低和光谱稳定性较差等问题,其根源通常与相分布不合理、非辐射复合严重以及薄膜形貌欠佳密切相关^[12]。

基于此,本研究提出了一种基于多功能分子 Me-4PACz 的双重协同调控策略。具体而言,Me-4PACz 分子不仅能配位 Pb^{2+} 以实现缺陷钝化,而且其内部的氧原子还能与 PEABr 中的铵基形成

氢键作用。这种协同机制成功调控了准二维体系的结晶动力学,有效抑制小 n 相。实验结果表明,经过 Me-4PACz 优化后的蓝光 PeLEDs 的最大亮度从 161 cd m^{-2} 提高至 2058 cd m^{-2} ,峰值 EQE 从 2.3% 提高至 15.2%,并展现出优异的光谱稳定性。

2 实 验

2.1 样品制备

前驱体溶液制备:将 $PbBr_2$ 、CsBr 和 CsCl 溶解于二甲基亚砜(DMSO)溶剂中制备前驱体溶液,其中摩尔比为 CsCl:CsBr: $PbBr_2$:PEABr = 0.7:0.3:1:1, Pb^{2+} 的浓度控制在 0.2 M,随后,将 12 wt%(按前驱体溶液的总质量计算)的 Me-4PACz 加入前驱体溶液后在室温下搅拌至完全溶解。

器件制备:将涂有 ITO 的玻璃基板依次在洗洁精、去离子水、丙酮和异丙醇中进行超声清洗,随后进行 30 min 的紫外-臭氧处理。PEDOT:PSS 以 4000 rpm 的转速旋涂在 ITO 基板上,并在 140°C 下退火 20 min。然后将基板转移至手套箱中。PVK 以 5000 rpm 的转速旋涂 60 s,并在 120°C 下退火 10 分钟。旋涂上述配制的前驱体溶液制备钙钛矿薄膜(4500 rpm, 60 s),并在 60°C 下退火 5 min。最后,依次真空蒸镀厚度分别为 40 nm 的 TPBi 电子传输层、1 nm 的 LiF 电子注入层以及 100 nm 的 Al 电极。器件的有效发光面积为 4 mm^2 。

2.2 样品表征

傅里叶变换红外(FTIR)光谱采用 Nicolet iS20 光谱仪透射模式采集。X 射线衍射光谱(XRD)使用 X 射线衍射仪(SmartLab/3 kW)测试。薄膜的紫外-可见吸收光谱(UV-Vis)利用 UV-3600 Plus 分光光度计测量。稳态光致发光(PL)光谱和瞬态荧光光谱(TRPL)光谱采用爱丁堡仪器 FLS980 光谱仪进行测量。薄膜的表面形貌采用扫描电子显微镜(SEM, Zeiss G300)进行观察。PeLEDs 的电致发光性能通过 SpectraScan PR670 分光辐射亮度计和 Keithley 2400 数字源表组合测试系统进行表征。静电势分布密度泛函理论(DFT)计算采用 Gaussian 16W 软件包完成,并使用 GaussView 6.0 软件进行分子建模与结果可视化。在进行 PEA^+ 阳离子和 Me-4PACz 分子的静电势(ESP)分布计算时,采用了 B3LYP 杂化泛函,并结合了 6-31G* 极化基组。

3 结果与讨论

3.1 分子间相互作用分析

图1示意了掺杂Me-4PACz对准二维钙钛矿的作用机制。Me-4PACz具有双重作用:一方面,其-P=O官能团可与钙钛矿中未配位的 Pb^{2+} 发生配位,从而钝化薄膜缺陷;另一方面,Me-4PACz可与PEABr产生氢键作用,调控相分布,促进能量的快速传递。

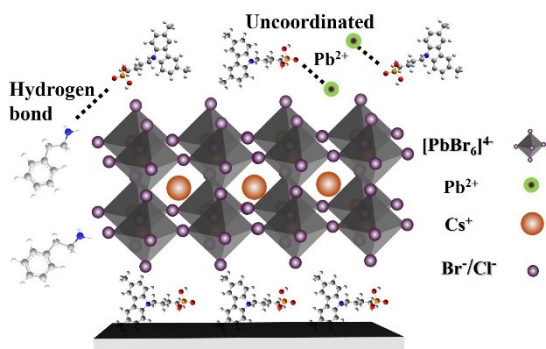


图1 Me-4PACz对准二维钙钛矿薄膜作用机制示意图
Fig.1 Schematic illustration of the formation mechanism for quasi-2D perovskite films with Me-4PACz incorporating

本研究利用DFT计算从分子层面揭示Me-4PACz与准二维钙钛矿组分之间的相互作用。图2a为PEA⁺和Me-4PACz分子的ESP分布。Me-

4PACz中的-P=O基团的电子云密度较高,具有较强的电负性,可以与钙钛矿中未配位的 Pb^{2+} 相互作用。而PEA⁺阳离子的-NH₃⁺区域电子云密度较低,表明Me-4PACz与PEABr之间可能会产生相互作用。为探究配体与钙钛矿之间的相互作用,本研究通过FTIR光谱分析薄膜的化学键合环境,图2b为含有及不含PbBr₂的Me-4PACz的FTIR光谱。在此选择PbBr₂进行测试,是为了排除钙钛矿体系中复杂的有机阳离子(如PEA⁺、Cs⁺)对光谱吸收的干扰,从而准确验证Me-4PACz中的-P=O基团与未配位 Pb^{2+} 之间存在的配位作用^[13]。Me-4PACz在1112 cm⁻¹附近的强吸收峰归属于-P=O键伸缩振动^[14]。与PbBr₂作用后,该峰向低波数位移至1110 cm⁻¹且强度显著减弱,表明氧原子与未配位 Pb^{2+} 之间存在配位,从而实现缺陷钝化。图2c为Me-4PACz、PEABr以及Me-4PACz与PEABr混合体系的FTIR光谱。在纯PEABr光谱中,3202 cm⁻¹附近的特征峰归属于N-H伸缩振动,1577 cm⁻¹归属于N-H弯曲振动^[15]。加入Me-4PACz后,氨基相关的特征峰向低波数位移且强度减弱,同时N-H弯曲振动也显著减弱,说明分子间相互作用限制了氨基(-NH₃⁺)的自由振动。上述结果表明Me-4PACz与PEABr之间形成了氢键,从而可以调控薄膜的结晶动力学过程。

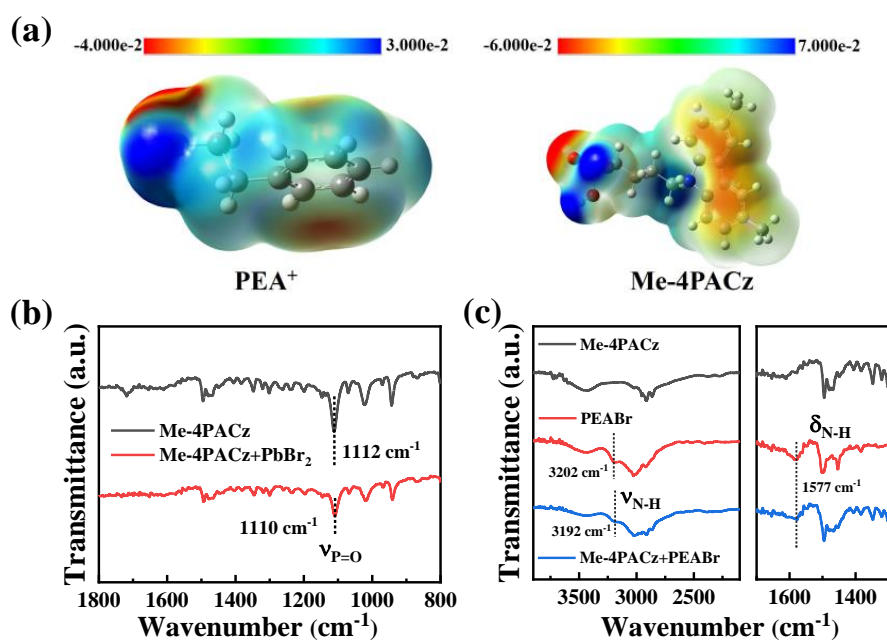


图2 (a) PEA⁺和Me-4PACz的分子结构和静电势构型;(b)含有及不含PbBr₂的Me-4PACz的FTIR光谱;(c) Me-4PACz、PEABr以及Me-4PACz与PEABr混合体系的FTIR光谱

Fig.2 (a) Molecular structures and electrostatic potential maps of PEA⁺ and Me-4PACz; (b) FTIR spectra of Me-4PACz with and without PbBr₂; (c) FTIR spectra of Me-4PACz, PEABr, and the Me-4PACz:PEABr mixed system

3.2 钙钛矿相分布调控与发光特性分析

在本文中,未掺杂 Me-4PACz 的薄膜记为对照组,而掺杂 Me-4PACz 的薄膜记为掺杂组。

图 3a 为两组准二维钙钛矿薄膜的 XRD 图谱。对照组在 $2\theta=5.3^\circ$ 和 10.7° 显示 $n=1$ 相衍射

峰, $2\theta=15.84^\circ$ 对应 $n=2$ 相衍射峰^[16]。掺杂组中,这些小 n 相 ($n=1$ 和 $n=2$) 的衍射峰强度明显减弱,表明 Me-4PACz 有效抑制了小 n 相,促进相分布更集中,从而提高不同相之间的能量传递效率。

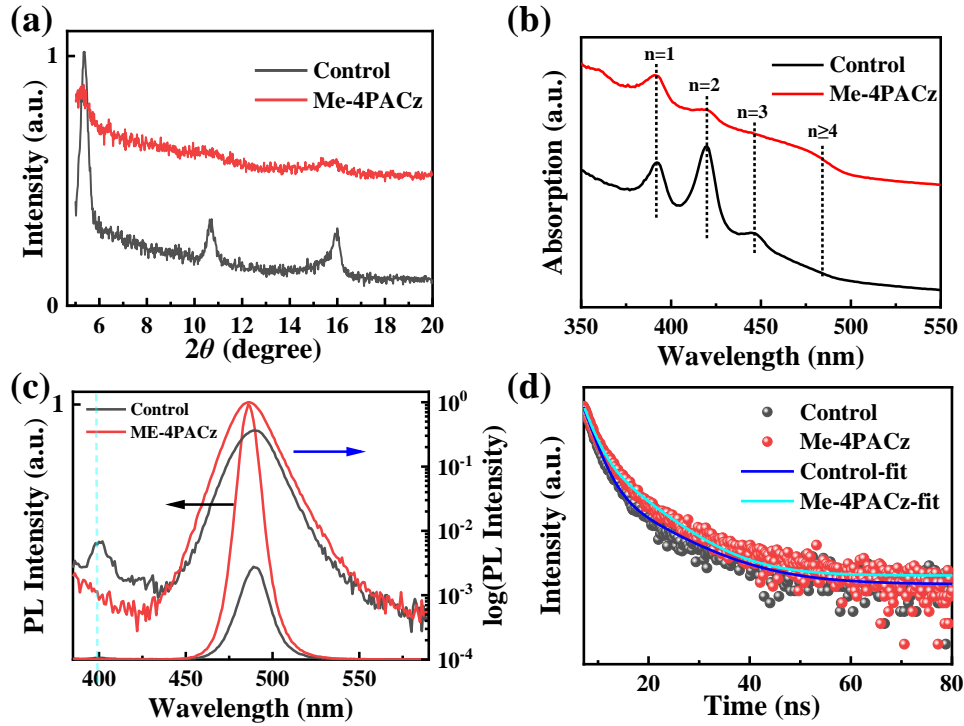


图 3 (a)准二维钙钛矿薄膜的 XRD 图谱;(d) UV-Vis 光谱;(c)稳态 PL 光谱;(d) TRPL 衰减曲线

Fig.3 (a) XRD patterns; (b) UV-Vis absorption spectra; (c) Steady-state PL spectra; (d) TRPL decay curves

图 3b 为不同准二维钙钛矿薄膜的 UV-Vis 光谱。对照组中可观察到小 n 相 ($n=1, 2, 3$) 的吸收特征峰。在引入 Me-4PACz 后,薄膜在约 484 nm 处出现了明显的三维 (3D) 钙钛矿特征吸收峰,同时上述小 n 相的吸收峰减弱。这一变化说明 Me-4PACz 有效抑制了小 n 相形成,并提高不同相之间的能量传递效率^[17]。图 3c 为薄膜的稳态 PL 光谱。对比可知,掺杂 Me-4PACz 后 $n=1$ 相对应的峰强度显著减弱,同时主发射峰强度大幅提升并伴随约 4 nm 的蓝移。这表明掺杂不仅优化了相分布,还有效钝化了缺陷,提高了辐射复合效率。此外,Me-4PACz 掺杂后可以将薄膜的光致发光量子产率从 6.73% 提升至 28.84%,进一步说明 Me-4PACz 能有效抑制非辐射复合,增强发光效率。图 3d 为不同准二维钙钛矿薄膜的 TRPL 衰减曲线,其中散点为原始测试数据,实线为双指数衰减拟合曲线。拟合公式为^[18]:

$$I(t) = A_1 \exp(-t/\tau_1) + A_2 \exp(-t/\tau_2) \quad (1)$$

其中, A_1 和 A_2 分别为快速衰减分量 (τ_1) 和慢速衰减分量 (τ_2) 的相对振幅。平均载流子寿命 (τ_{avg}) 通过以下公式计算得出^[18]:

$$\tau_{avg} = \frac{A_1 \tau_1^2 + A_2 \tau_2^2}{A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2} \quad (2)$$

结果显示 Me-4PACz 掺杂后可以将薄膜的 τ_{avg} 从 1.29 ns 延长至 4.04 ns,证明 Me-4PACz 能够有效抑制非辐射复合过程。

3.3 钙钛矿薄膜形貌与缺陷分析

为了直观反映修饰前后薄膜形貌的变化,我们对钙钛矿薄膜进行了扫描电子显微镜 (SEM) 表征 (图 4a 和 4b)。对照组薄膜晶粒堆积较为疏松,晶界处可见明显空隙,掺杂组的薄膜晶粒间结合较为紧密,薄膜表面连续且致密。证明了 Me-4PACz 优化了钙钛矿结晶动力学过程,提高了成膜质量。此外图 4c 和 4d 展示了利用空间电荷限制电流 (SCLC) 技术定量表征薄膜内部缺陷密度 (n_{trap}) 的变化情况。我们制备并测量了单空穴器

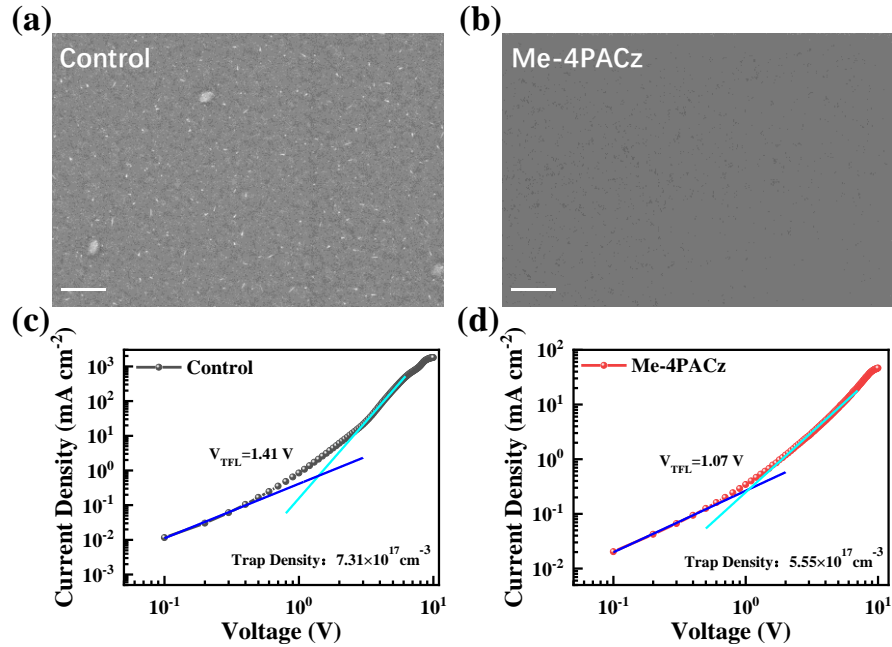


图4 (a)含及(b)不含 Me-4PACz 的准二维钙钛矿薄膜的 SEM 表面形貌图(比例尺:1 μm);(c)含及(d)不含 Me-4PACz 掺杂的钙钛矿薄膜的 HOD 器件的 J - V 曲线

Fig.4 (a) SEM surface morphology images of quasi-2D perovskite films with and (b) without Me-4PACz (scale bar: 1 μm); J - V curves of hole-only devices based on perovskite films (c) with and (d) without Me-4PACz doping

件(HOD)的电流密度-电压(J - V)曲线(结构:ITO/PEDOT:PSS/PVK/Pero/MoO₃/Al),并提取了曲线上欧姆接触区和陷阱填充限制区的交界电压(V_{TFL})。缺陷密度的计算公式如下^[19]:

$$n_{trap} = \frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 V_{TFL}}{qL^2} \quad (3)$$

其中相对介电常数 $\varepsilon_r = 9.5$ ^[20],钙钛矿薄膜厚度 $L = 45 \text{ nm}$,真空介电常数 $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$,单位电荷 $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。结果显示对照组的 V_{TFL} 为 1.41 V,对应 $n_{trap} = 7.31 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。掺杂组的 V_{TFL} 降低至 1.07 V, n_{trap} 降至 $5.55 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,表明掺杂降低薄膜缺陷密度,进一步验证 Me-4PACz 对准二维钙钛矿薄膜的缺陷钝化作用。

3.4 器件电致发光性能测试

图 5a 为 PeLED 器件的结构示意图(ITO/PEDOT:PSS/PVK/Pero/TPBi/LiF/Al)。图 5b 为器件的电流密度-电压-亮度(J - V - L)特性,随着 Me-4PACz 的加入,器件最大亮度从 161 cd m^{-2} 提升至约 2058 cd m^{-2} 。图 5c 为器件的 EQE 特性,掺杂 Me-4PACz 后器件的 EQE 从 2.3% 提高到 15.2%,这一性能提升可归因于 Me-4PACz 中的 -P=O 基团与 Pb²⁺ 的配位钝化,降低缺陷密度,提高辐射复合效率,同时 Me-4PACz 和 PEABr 的相互作用可以抑制小 n 相,调控相分布,促进不同相之间的能量

传递^[21]。图 5d 展示了对照组与掺杂组器件在不同工作电压下的标准电致发光(EL)光谱。从图中可以看出,对照组器件的 EL 峰值波长位于 494 nm,半峰宽(FWHM)为 28 nm。引入 Me-4PACz 后,器件的 EL 中心波长轻微蓝移至 492 nm,且 FWHM 显著缩窄至 21 nm,表现出更高的色纯度,这是因为 Me-4PACz 调控了相分布,使相分布更

集中。同时,随着电压从 4 V 提升至 6 V,对照组器件的 EL 峰表现出明显的红移和光谱展宽,这归因于混合卤素钙钛矿在电场下发生的离子迁移。相比之下,掺杂组器件在此过程中 EL 峰位未出现明显位移,证明了 Me-4PACz 能够有效抑制偏压诱导的卤素离子迁移,从而显著增强了器件的光谱稳定性。

为了验证 Me-4PACz 策略的可靠性,我们对随机抽取的 20 个独立 Me-4PACz 处理器件进行了测试,并统计了其最高 EQE 的分布情况(图 5e)。统计结果表明,掺杂组器件效率分布集中,平均 EQE 为 14.3%,证明该策略的有效性。此外,我们评估了器件的工作寿命(图 5f)。在恒定电流驱动条件下(初始亮度约为 100 cd m^{-2}),掺杂组器件的稳定性明显提升,其工作寿命(T_{50})从 249 s 延长至 1020 s。这说明 Me-4PACz 降低了缺陷密度,抑制了电场诱导下的卤素离子迁移,从而提高了器件工作稳定性。

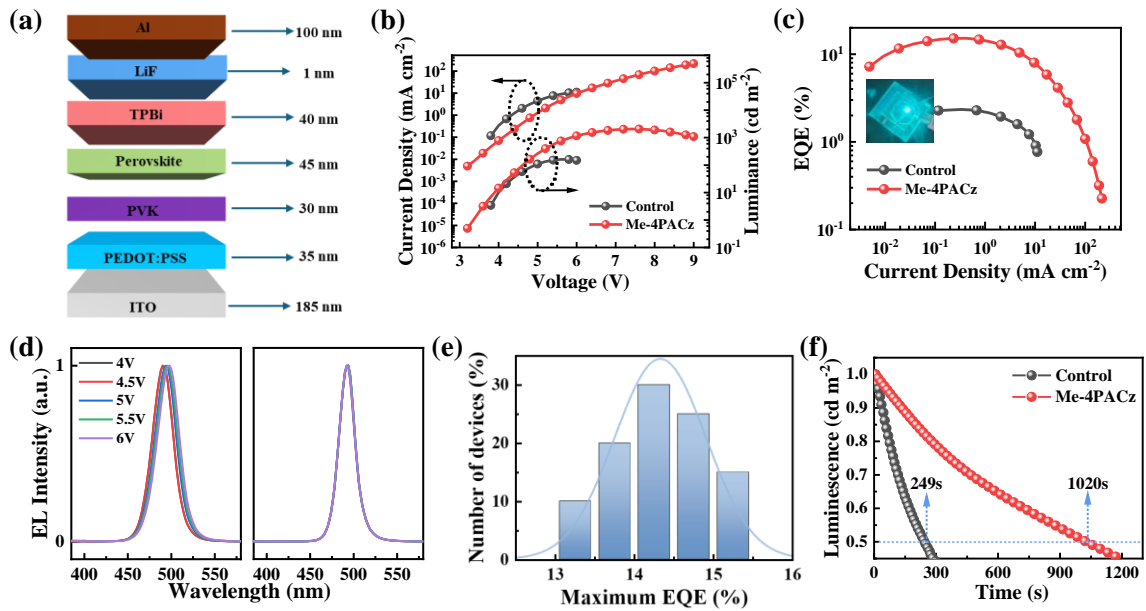


图5 (a)PeLEDs器件及各功能层膜厚;对照组与掺杂组器件的(b) $J-V-L$ 曲线,(c) $EQE-J$ 曲线,(d)EL光谱图,(e)掺杂组器件最高EQEs统计分布直方图,(f)工作寿命测试曲线

Fig.5 (a) Device structure and corresponding thickness of functional layers for PeLEDs; (b) $J-V-L$ curves, (c) $EQE-J$ curves, (d) EL spectra, (e) the statistical distribution of peak EQEs for doped devices, (f) T_{50} lifetime curves of the control and doped devices

4 结 论

本研究开发了一种利用多功能分子 Me-4PACz 协同调控准二维蓝光钙钛矿发光性能的策略。结果表明, Me-4PACz 通过其 -P=O 官能团与钙钛矿中未配位的 Pb^{2+} 产生配位作用, 从而钝化

缺陷, 提高辐射复合效率, 同时 Me-4PACz 与 PEABr 之间形成氢键, 实现对薄膜结晶动力学的调控, 有效抑制了小 n 相的形成, 从而改善不同相之间的能量传递效率。最终优化得到的 PeLEDs 器件的最大亮度和外量子效率分别达到 2058 $cd m^{-2}$ 和 15.2%, 并表现出优异的光谱稳定性。

参 考 文 献:

- [1] 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]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* 2021, 36(1): 105-112. (in Chinese)
- [2] LI M M, YANG Y G, KUANG Z Y, *et al.* Acceleration of radiative recombination for efficient perovskite LEDs [J]. *Nature*, 2024, 630(8017): 631-635.
- [3] SONG Y H, LI B, WANG Z J, *et al.* Intragrain 3D perovskite heterostructure for high-performance pure-red perovskite LEDs [J]. *Nature*, 2025, 641, 352-357.
- [4] KUMAWAT N K, DEY A, KUMAR A, *et al.* Band gap tuning of $CH_3NH_3Pb(Br_{1-x}Cl_x)_3$ hybrid perovskite for blue electroluminescence [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, 7(24): 13119-13124.
- [5] 许玉帅, 王海龙, 陈良, 等. 蓝光钙钛矿材料及其电致发光器件 [J]. 液晶与显示, 2021, 36(1): 113-122.
XU Y S, WANG H L, CHEN L, *et al.* Blue perovskite materials for light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* 2021, 36(1): 113-122. (in Chinese)
- [6] QUAN L N, ZHAO Y B A, DE ARQUER F P G, *et al.* Tailoring the energy landscape in quasi-2D halide perovskites enables efficient green-light emission [J]. *Nano Lett.*, 2017, 17(6): 3701-3709.
- [7] WANG F Z, WANG Z Y, SUN W D, *et al.* High performance quasi-2D perovskite sky-blue light-emitting diodes using a dual-ligand strategy [J]. *Small*, 2020, 16(32): 2002940.

- [8] LI Y H, XIA Y, ZHANG Z P, *et al.* In situ hydrolysis of phosphate enabling sky-blue perovskite light-emitting diode with EQE approaching 16.32% [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(8): 6513-6522.
- [9] PANG P Y, ZHANG Z P, WANG B Z, *et al.* Efficient and color stable blue perovskite light-emitting diodes achieved via dual-additive phase modulation [J]. *Nanoscale*, 2025, 17(25): 15223-15230.
- [10] ZOU S, FAN K, LIU Z, *et al.* Additive-stabilized emission centers for blue perovskite light-emitting diodes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(22): 26778-26786.
- [11] LI N, XIA Y, LOU Y H, *et al.* Dual-functional self-assembled molecule enabling high-performance deep-blue perovskite light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(52): 2411227.
- [12] ZOU G R X, CHEN Z M, LI Z C, *et al.* Blue perovskite light-emitting diodes: Opportunities and challenges [J]. *Acta Phys.-Chim. Sin.*, 2021, 37(4): 200900.
- [13] ZHANG X, LIU Z, WANG L, *et al.* Manipulating charge transfer dynamics and stabilizing lead bromide octahedra for efficient blue perovskite light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2026, 17(1): 1610.
- [14] YUAN F, XUE T Y, DU M Z, *et al.* Post-assembled dipole benzoic acids modified me-4pacz for efficient and stable inverted perovskite solar cells [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(28): 2425145.
- [15] ACIK M, ALAM T M, GUO F, *et al.* Substitutional growth of methylammonium lead iodide perovskites in alcohols [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2018, 8(5): 1701726.
- [16] LIU H X, HE M, ZHANG S J. Energy transfer-dominated quasi-2D blue perovskite light-emitting diodes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(18): 23525-23535.
- [17] CAO L X, ZHANG Y H, SHEN Y, *et al.* Crystallization regulation of solution-processed metal halide perovskite light-emitting diodes [J]. *Chem. Sci.*, 2026, 17(1): 118-136.
- [18] LIU S, GUO Z, WU X, *et al.* Zwitterions narrow distribution of perovskite quantum wells for blue light-emitting diodes with efficiency exceeding 15% [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(3): 2208078.
- [19] PAN J, ZHAO Z, FANG F, *et al.* Multiple cations enhanced defect passivation of blue perovskite quantum dots enabling efficient light-emitting diodes [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(24): 2001494.
- [20] LI Z, CHEN Z, YANG Y, *et al.* Modulation of recombination zone position for quasi-two-dimensional blue perovskite light-emitting diodes with efficiency exceeding 5% [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 1027.
- [21] LI Z Q, REN Z W, LIANG Q, *et al.* Eliminating the adverse impact of composition modulation in perovskite light-emitting diodes toward ultra-high brightness and stability [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(27): 2313981.



陆佳(2000-),男,江苏苏州人,硕士研究生,2026年于南京信息工程大学在读,主要从事发光材料与器件方面的研究

Email: 202312490199@nuist.edu.cn



潘江涌(1991-),男,安徽黄山人,博士,副教授,2018年博士毕业于东南大学,主要从事光电集成器件和系统的研究工作。

Email: 003051@nuist.edu.cn