

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-09

基于能级调控的高效纯蓝光钙钛矿发光二极管

蒋 毅, 卢知轩*, 余福蓉, 施妤娴, 魏展画*

(华侨大学发光材料与信息显示研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 纯蓝光钙钛矿发光二极管的性能受限于空穴传输层与宽带隙钙钛矿发光层之间巨大的空穴注入势垒。针对此问题, 本工作提出了一种基于有机小分子苯基氯化硒(Ph-Se-Cl)掺杂空穴传输层聚(9-乙烯基咔唑)(PVK)的能级调控策略, 以同时优化界面载流子注入和薄膜质量。研究结果表明, Ph-Se-Cl的引入可使PVK的最高占据分子轨道能级从-5.91 eV显著下移至-6.11 eV, 有效缩小了与纯蓝光钙钛矿价带最大值的能级差, 降低了空穴注入势垒; 同时, 掺杂后的HTL薄膜表面电势分布更均匀, 有利于形成高质量钙钛矿薄膜并减少界面缺陷。最终, 基于Ph-Se-Cl掺杂的纯蓝光PeLEDs器件实现了11.18%的最大外量子效率, 相较于未掺杂的提升了41.5%, 且器件性能表现出优异的重复性。

关 键 词: 发光二极管; 钙钛矿; 纯蓝光; 薄膜; 器件

中图分类号: D510.3030

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260224

CSTR: 32170.14.CJL.20260224

Efficient Pure-Blue Perovskite Light-Emitting Diodes via Energy-Level Modulation

JIANG Yi, LU Zhixuan*, YU Furong, SHI Yuxian, WEI Zhanhua*

(Luminescent Materials and Information Displays, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zxl@hqu.edu.cn, weizhanhua@hqu.edu.cn

Abstract: The performance of pure-blue perovskite light-emitting diodes (PeLEDs) is severely hindered by the large hole injection barrier between the hole-transport layer (HTL) and the wide-bandgap perovskite emissive layer. To address this issue, this work proposes an energy-level modulation strategy based on doping the HTL material poly(9-vinyl-carbazole) (PVK) with the small organic molecule phenylselenium chloride (Ph-Se-Cl), aiming to simultaneously optimize interfacial carrier injection and perovskite film quality. The results demonstrate that the introduction of Ph-Se-Cl markedly shifts the highest occupied molecular orbital (HOMO) level of PVK downward from -5.91 eV to -6.11 eV, effectively narrowing the energy offset with the valence band maximum of the pure-blue perovskite and thus reducing the hole injection barrier. Moreover, the doped HTL film exhibits a more uniform surface potential distribution, which facilitates the formation of high-quality perovskite films and mitigates interfacial defects. Consequently, pure-blue PeLEDs based on the Ph-Se-Cl-doped HTL achieve a peak external quantum efficiency of 11.18%, representing a 41.5% enhancement compared with the undoped control device, along with excellent reproducibility.

Keywords: light-emitting diodes; perovskite; pure-blue; thin films; devices

1 引 言

金属卤化物钙钛矿因具备宽调谐发射波长、

窄光谱带宽及优异的光致发光量子效率(PLQY)等突出光电特性, 已成为发光二极管(LEDs)的理想候选材料^[1-3]。近年来, 钙钛矿LEDs(PeLEDs)

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFA1204800)、国家自然科学基金(52402186)、福建省自然科学基金(2026J008181)

Supported by National Key Research and Development Program of China(2022YFA1204800); National Natural Science Foundation of China(52402186); Natural Science Foundation of Fujian Province(2026J008181)

在绿光和红光波段取得了显著进展,其外量子效率(EQE)已分别超过42%^[4]和32%^[5],展现出优异的器件性能,蓝光PeLED的EQE也达到了26%^[6],但这一进展主要集中在天蓝光区域(475-495 nm)。对于发射峰位于460-475 nm的纯蓝光PeLED,其EQE明显落后于红、绿光器件,且器件稳定性差,这为实现全彩钙钛矿基显示技术带来了重大障碍^[7,8]。导致纯蓝光PeLED性能不足的关键因素在于,宽带隙钙钛矿中电子传输层(ETL)与空穴传输层(HTL)载流子迁移率不平衡、导致激子复合效率偏低^[9,10]。这一困难的根本原因是钙钛矿发光层价带最大值(VBM)与常规HTL之间存在巨大的空穴注入势垒^[11],严重限制了器件效率与稳定性的同步提升。

为解决空穴注入阻碍问题,器件结构调控策略已得到广泛应用,例如构建具有梯度能级的双HTL或多HTL体系,以实现注入势垒的逐步降低^[12,13]。即便如此,现有HTL材料在能级匹配与空穴迁移率方面仍难以适配纯蓝光准二维钙钛矿器件的性能要求。尤其值得注意的是,准二维钙钛矿体系中量子限域效应显著增强,会使VBM进一步下移,这对HTL的最高占据分子轨道(HOMO)能级提出了更为严苛的要求^[8,14]。近年来,通过功能材料插层改性或界面修饰调控HTL与钙钛矿活性层之间的接触特性,已成为提升蓝光PeLEDs器件性能的有效策略^[15-17]。例如,将咔唑类小分子作为插入层构筑于HTL与钙钛矿活性层之间,可优化界面能级排布、降低界面缺陷态密度^[12]。然而,已报道的小分子插层在准二维钙钛矿体系中会影响钙钛矿薄膜结晶质量,且对深能级能级匹配的调控能力存在局限。

针对上述挑战,本工作提出了一种基于有机小分子苯基氯化硒(Ph-Se-Cl)掺杂HTL聚(9-乙基基咔唑)(PVK)的能级调控策略,旨在同步优化界面空穴注入与钙钛矿薄膜结晶质量。Ph-Se-Cl分子结构兼具强电负性硒原子与可极化苯环,可与PVK主链发生电荷转移相互作用,调控PVK电子能级结构;且Ph-Se-Cl分子尺寸小,利于在PVK基质中均匀分散,避免宏观相分离。基于此,本文考察了Ph-Se-Cl掺杂对PVK电子结构,钙钛矿薄膜激子结合和PeLEDs器件性能的影响,为实现高效纯蓝光PeLEDs提供新思路。

2 实 验

2.1 试剂与材料

实验中使用主要原料包括:溴化锂(LiBr, 99.998%)、溴化铯(CsBr, 99.999%)、溴化铅(PbBr₂, 99.999%)、二甲基亚砜(DMSO, 99.9%)、三氧化钼(MoO₃, 99.5%)、氯苯(99.5%)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF, 99.8%)、苯基氯化硒(Ph-Se-Cl, 98%)和1,4,7,10,13,16-六氧杂环十八烷(18-冠-6, 99%)购自Sigma-Aldrich;溴化甲脒(FABr, 99.5%)和对氟苯乙基溴化铵(p-FPEABr)购自Great Cell Solar Materials;氯化铅(PbCl₂, 99.9%)、2,4,6-三[3-(二苯基氧磷基)苯基]-1,3,5-三嗪(POT2T, 99.5%)和聚[双(4-苯基)(2,4,6-三甲基苯基)胺](PTAA)购自西安浴日光能;聚(9-乙基基咔唑)(PVK)和1,3,5-三(1-苯基-1H-苯并咪唑-2-基)苯(TPBi, 99.5%)购自台湾机光科技股份有限公司。所有化学试剂均直接使用,未经进一步纯化。

2.2 PeLEDs的制备

钙钛矿前驱体溶液通过将PbBr₂/PbCl₂、CsBr、FABr、LiBr、p-FPEABr和18-冠-6溶解于DMSO中配制而成,各组分相对于Pb的摩尔比分别为1:0.9:0.15:0.15:0.15:0.16,总Pb浓度为0.2 mmol mL⁻¹,PbCl₂与PbBr₂的摩尔比为3:1。该溶液在使用前连续搅拌24小时。

图案化的ITO衬底依次在洗涤剂、去离子水、异丙醇和乙醇中超声清洗各15分钟,随后进行紫外臭氧处理15分钟。所有后续步骤均在氮气填充的手套箱中进行。对于PeLEDs器件,首先将PTAA(11 mg mL⁻¹,溶于氯苯)以1500 rpm的转速旋涂30秒,并在130 °C下退火15分钟。随后,将Ph-Se-Cl溶解于PVK溶液中(PVK浓度为1.7 mg mL⁻¹,Ph-Se-Cl浓度为1.6 mg mL⁻¹),以3700 rpm的转速旋涂30秒,并在130 °C下退火10分钟。冷却后,将钙钛矿前驱体溶液以3000 rpm旋涂沉积在ITO/PTAA/PVK基板上。薄膜在90 °C下退火10分钟。最后,将薄膜样品转移至热蒸镀腔室(本底真空<2×10⁻⁴ Pa)中,依次沉积POT2T(≈20 nm)、TPBi(≈3 nm)、POT2T(≈20 nm)、LiF(≈1 nm)和Al(≈140 nm)。

2.3 测试与表征

采用光谱仪(QE-Pro型,中国犀谱光电公司)获得紫外可见吸收光谱和稳态光致发光(PL)光

谱。采用荧光分光光度计(Edinburgh FLS1000-DD-STM型,英国爱丁堡仪器公司),在375 nm脉冲激发激光,获得时间分辨光致发光(TRPL)光谱。采用开尔文探针力显微镜(KPFM)与原子力显微镜(AFM)(Bruker Multimode 8型,美国牛津仪器庇护研究公司)获得AFM图像与KPFM图像。采用X射线电子能谱仪(ESCALAB Xi+,美国赛默飞世尔科技公司)获得紫外光电子能谱(UPS)。采用积分球(3P-GPS-033-SL型,美国蓝菲光学公司)、分光光度计(QE Pro型,中国犀谱光电公司)和光源计(Keithley 2450型,美国吉时利公司)组成PeLEDs性能测试仪,在驱动电压为0-7 V时测试LED器件的发光强度、光子总数、电致发光等光电输出特性。

3 结果与讨论

3.1 Ph-Se-Cl掺杂对PVK电子结构的影响

为了深入探究Ph-Se-Cl掺杂对HTL电子结构性能的影响,在完全一致的实验条件下,制备了两组对比样品:一组是不含任何掺杂剂的纯PVK薄膜(照样品),另一组则是引入了Ph-Se-Cl掺杂剂

的目标PVK薄膜(目标样品)。图1(a)与图1(b)分别展示了通过UPS测得的未掺杂对照PVK薄膜与Ph-Se-Cl掺杂目标PVK薄膜的二次电子截止边及价带边区域的高分辨谱可以计算得到^[10]:未掺杂对照PVK薄膜的HOMO能级位于-5.91 eV;而经过Ph-Se-Cl掺杂后,PVK薄膜的HOMO能级发生了明显的下移,达到了-6.11 eV。这一显著的0.20 eV的能级偏移,有力地证明了Ph-Se-Cl分子的引入能够有效地调控PVK的电子结构,使其HOMO能级向更负的方向移动,从而与宽带隙准二维蓝光钙钛矿发光层的VBM能级更加匹配,为后续的空穴注入创造了更有利的能级条件。

同时,利用KPFM对薄膜的表面电势分布进行了微观尺度的表征。KPFM图像(图2c和2d)清晰地显示,Ph-Se-Cl掺杂的PVK薄膜相较于未掺杂的PVK薄膜,呈现出显著更加均匀、连续且平滑的表面电势分布。这种均匀性的提升,直观地表明掺杂剂分子在PVK主体材料中实现了高度均匀的分散与良好的相容性,有效地减少了由于材料不均匀或团聚可能引起的局域电势波动和缺陷态密度。这种均匀的电势环境,为空穴在HTL

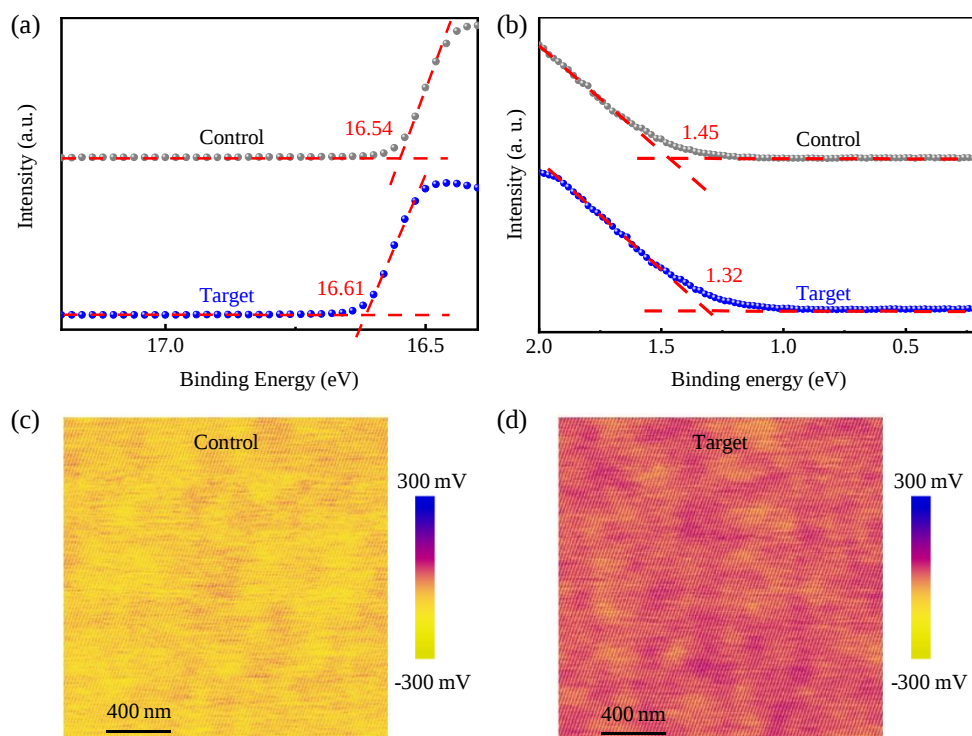


图1 Ph-Se-Cl对PVK薄膜能级的影响。(a)UPS能谱二次电子截止区域;(b)UPS能谱价带边缘区域;(c)未掺杂的PVK薄膜的KPFM图;(d)掺杂Pe-Se-Cl的PVK薄膜的KPFM图。

Fig.1 The impact of Ph-Se-Cl on the energy levels of PVK thin films. (a) Secondary electron cut-off region of the UPS spectra; (b) Valence band edge region of the UPS spectra; (c) KPFM image of undoped PVK thin films; (d) KPFM image of PVK thin films doped with Ph-Se-Cl.

内部的传输提供了更为平滑、低阻的路径,有助于降低传输过程中的散射和复合损失。通过测量扫描针尖与 HTL 表面之间的接触电势差(CPD),可以进一步定量估算不同 HTL 的功函数。实验结果表明,Ph-Se-Cl 掺杂后 PVK 薄膜的 CPD 值相较于未掺杂样品出现了明显的增大。值得注意的是,CPD 的增大是一个关键且直接的物理信号,它明确地表明 Ph-Se-Cl 掺杂后的 PVK 功函数得到了有效提升。而 CPD 和 UPS 测试结果核心纽带都是功函数,UPS 测试得到的功函数,直接决定了 PVK 薄膜与 KPFM 针尖接触时 CPD 的大小。CPD 和 UPS 测试结果的一致性,在物理本质上意味着 HTL 的费米能级相对于真空能级的位置发生了变化,使其更接近真空能级。这一变化直接促使 HTL 的 HOMO 能级与钙钛矿发光层的 VBM 能级之间的能量差值减小。这种能级差的优化,使得

HTL 与宽带隙钙钛矿界面处的能级对齐达到了更优、更匹配的状态。这种优化的能级匹配是降低界面处电荷注入能量损耗、提升空穴注入效率、并最终实现器件高性能输出的核心物理机制之一^[18]。基于上述 UPS 能谱分析和 KPFM 表面电势表征的综合结果,绘制了未掺杂对照器件与 Ph-Se-Cl 掺杂目标器件的详细的能级结构示意图(图 2)。从图 2 中可以清晰地观察到,在目标器件中,经过 Ph-Se-Cl 掺杂优化的 HTL 与钙钛矿发光层之间的空穴注入势垒得到了显著的降低。这种降低极大地减小了空穴从 HTL 注入到钙钛矿活性层所需克服的能量门槛和激活能。这种经过精心设计和实验验证的优化能级结构,为空穴的高效、快速、低损耗注入过程提供了坚实且可靠的热力学可行性基础,从能级匹配的源头上为提升蓝光 PeLEDs 的器件效率与性能扫除了关键障碍^[19]。

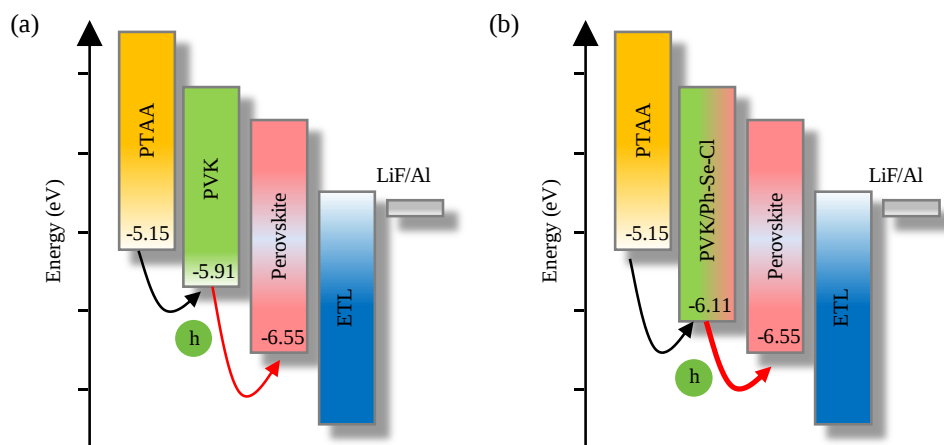


图 2 纯蓝光 PeLEDs 器件结构能级图。(a)对照器件;(b)目标器件。

Fig.2 Energy level diagram of the pure-blue PeLEDs device structure. (a) Control devices; (b) Target devices.

3.2 Ph-Se-Cl 掺杂对钙钛矿激子行为的影响

为了深入探究 Ph-Se-Cl 掺杂对钙钛矿薄膜性能的影响,通过稳态 PL 和 TRPL 光谱,对未掺杂的对照钙钛矿薄膜和掺杂 Ph-Se-Cl 的目标钙钛矿薄膜进行了表征。如图 3(a)所示,目标薄膜的稳态 PL 发射峰位置相较于对照薄膜发生了明显的蓝移,偏移量约为 2.6 nm(表 S1)。这一光谱蓝移现象可能主要归因于 Ph-Se-Cl 掺杂后的 PVK 表面电势更加均匀,对钙钛矿薄膜结晶过程的优化作用,具体表现为晶粒尺寸和取向的改善,以及由此带来的薄膜内部缺陷态密度的显著降低^[20]。更重要的是,图 3(b)展示的 TRPL 衰减曲线定量揭示了薄膜内部的激子复合动力学差异。采用双指数函数 $I(t) = A_1 \exp(-t/\tau_1) + A_2 \exp(-t/\tau_2)$ 对 TRPL 衰减曲线进行拟

合,并按加权公式 $\tau_{avg} = (A_1 \tau_1^2 + A_2 \tau_2^2) / (A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2)$ 计算平均寿命。各拟合参数汇总于表 S2。其中,快组分 τ_1 归因于缺陷辅助的非辐射复合,慢组分 τ_2 对应自由激子的辐射复合。拟合结果表明,目标器件的快组分权重降低,慢组分权重相应增加,进一步验证了 Ph-Se-Cl 掺杂有效降低了钙钛矿薄膜缺陷密度,抑制了非辐射复合通道。目标薄膜的激子平均寿命达到了 106.43 ns,这一数值显著长于对照薄膜的 72.20 ns。更长的激子寿命直观地表明,在目标薄膜中,由缺陷和陷阱态所主导的非辐射复合通道被有效抑制^[21]。这得益于 Ph-Se-Cl 掺杂所带来的更匹配的能级排布,它优化了界面处的电荷转移过程,减少了界面缺陷和深能级陷阱态的产生,从而使得光生激子更倾向于通过辐射复合的方式衰减,

提升了发光效率。同时,为了从形貌角度佐证性能提升,进一步分析了薄膜的表面形貌。如图3(c)和(d)的AFM图像所示,目标薄膜的表面均方根粗糙度(RMS)仅为2.99 nm,显著低于对照薄膜的5.48 nm。更光滑、更均匀的表面形貌直接证实了Ph-Se-

Cl掺杂的HTL有效改善了钙钛矿薄膜的结晶质量,形成了更为致密和平整的薄膜。这种均匀的形貌有助于实现更均匀的电势分布,减少局域电场起伏,从而为电荷的平衡注入与传输创造了有利条件,最终协同促进了器件性能的提升^[22]。

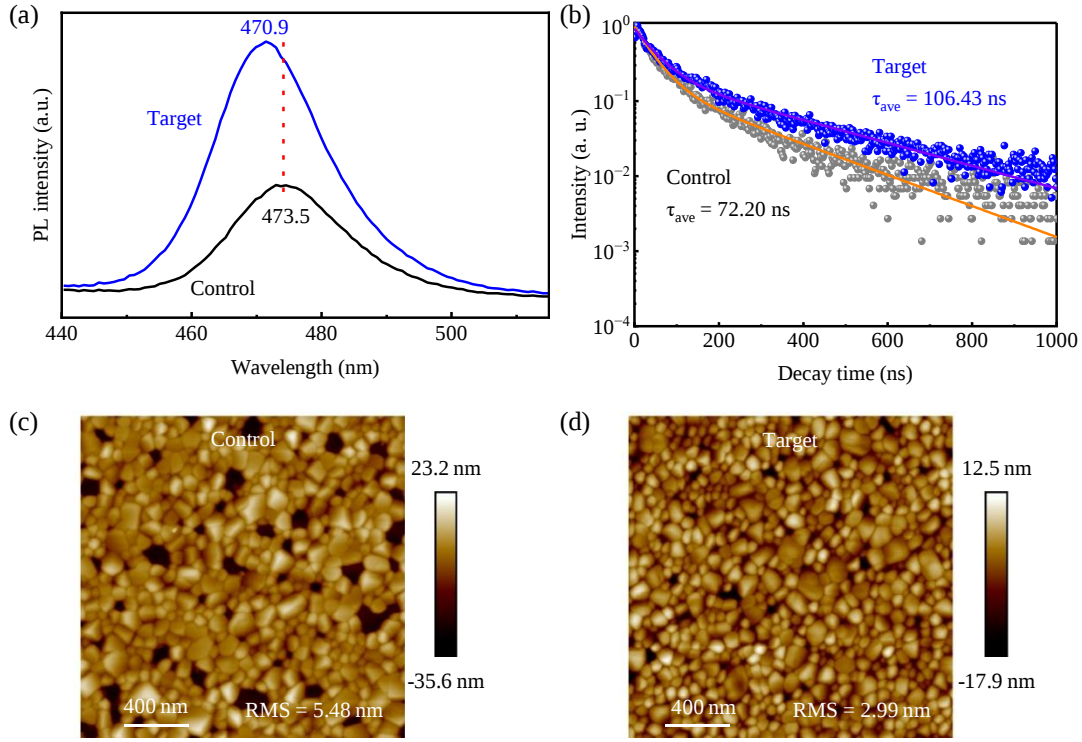


图3 Ph-Se-Cl对钙钛矿薄膜光学性质和结构的影响。(a)未掺杂(黑线)和掺杂Ph-Se-Cl(蓝线)钙钛矿薄膜的PL光谱;(b)未掺杂(黑点)和掺杂Ph-Se-Cl(蓝点)钙钛矿薄膜的TRPL光谱;(c)未掺杂的钙钛矿薄膜的AFM图;(d)掺杂Pe-Se-Cl的钙钛矿薄膜的AFM图。

Fig.3 Effect of Ph-Se-Cl on the optical properties and structure of perovskite thin films. (a) PL spectra of perovskite films without doping (black line) and doped with Ph-Se-Cl (blue line); (b) TRPL spectra of perovskite films without doping (black line) and doped with Ph-Se-Cl (blue line); (c) AFM image of undoped perovskite thin films; (d) AFM image of perovskite thin films doped with Ph-Se-Cl.

为了直接验证Ph-Se-Cl掺杂对电荷传输行为的影响,测量了单空穴器件的电流-电压(J - V)特性。图4(a)表明,在相同电压下,掺杂Ph-Se-Cl的PVK薄膜的空穴电流密度远高于未掺杂的对照薄膜,证明其空穴迁移率得到了有效提升,从而增强了空穴的注入与传输能力。为进一步定量分析载流子复合行为,采用等效电路模型 $R_s(R_1)(R_2)$ 对EIS谱图进行了拟合(图S1)。其中 R_1 为复合电阻,其数值大小直接反映器件内部非辐射复合损失程度。拟合结果表明,图4(b)的奈奎斯特图显示,目标器件的复合电阻显著小于对照器件,意味着在器件工作过程中,注入的空穴和电子在发光层中更倾向于形成激子并辐射复合,而不是被缺陷捕获或发生非辐射复合,即Ph-Se-Cl掺杂有效

抑制了非辐射复合通道^[23]。综上,如图5所示,Ph-Se-Cl掺杂一方面通过能级调控降低了空穴注入势垒,另一方面通过优化钙钛矿结晶质量降低了缺陷密度,协同地抑制了非辐射复合损失。

3.3 高效纯蓝光PeLEDs的性能

为确定Ph-Se-Cl的掺杂浓度对PeLEDs器件性能的影响,设置了0、0.8、1.2、1.6、2.0、2.4 mg mL⁻¹掺杂浓度梯度进行系统优化。如图S2所示,器件EQE随掺杂浓度增加呈先升后降的火山型趋势:当浓度低于1.6 mg mL⁻¹时,HOMO能级下移不足,空穴注入势垒降低有限;当浓度高于1.6 mg mL⁻¹时,过量掺杂影响薄膜的结晶质量,导致缺陷态密度上升,器件效率下降。因此,最优掺杂浓度确定为1.6 mg mL⁻¹。同时,为进一步排除Ph-

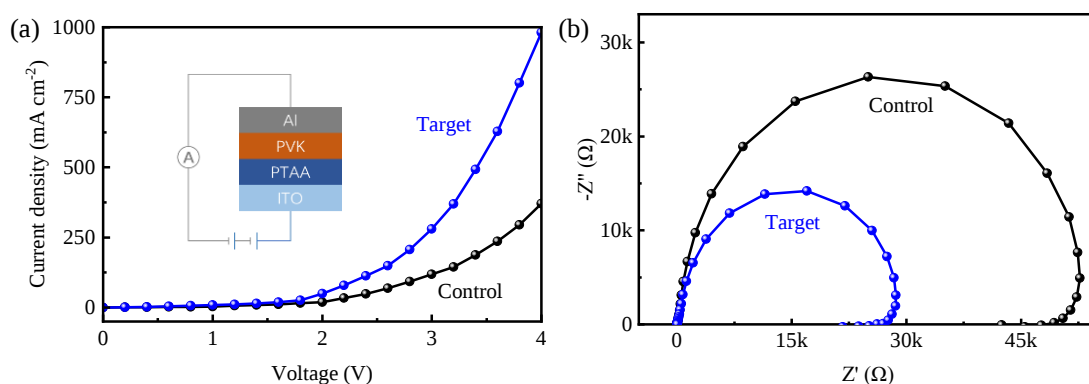


图4 Ph-Se-Cl对薄膜和器件的电学性质的影响。(a)未掺杂(黑线)和掺杂Ph-Se-Cl(蓝线)PVK薄膜的电流-电压曲线;(b)未掺杂(黑线)和掺杂Ph-Se-Cl(蓝线)PeLEDs的EIS谱图。

Fig.4 Effect of Ph-Se-Cl on the electrical properties of thin films and devices. (a) Current-voltage curves of PVK films without doping (black line) and doped with Ph-Se-Cl (blue line); (b) EIS spectra of PeLEDs without doping (black line) and doped with Ph-Se-Cl (blue line).

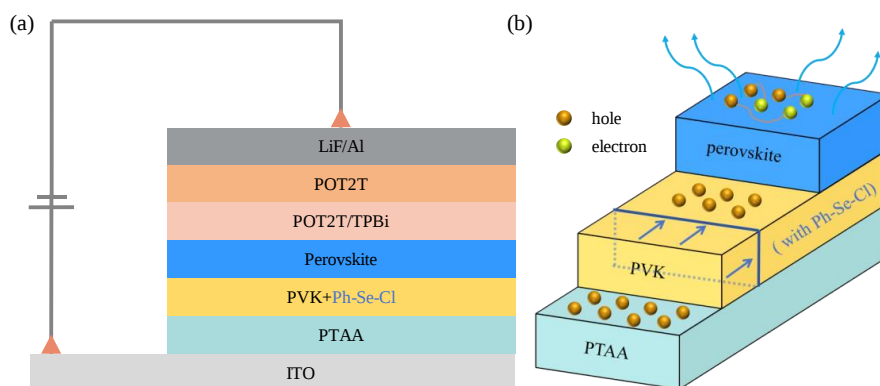


图5 (a)纯蓝光PeLEDs器件结构示意图;(b)掺杂Ph-Se-Cl对PeLEDs的激子结合影响的示意图。

Fig.5 (a) Schematic diagram of the structure of pure-blue PeLEDs devices; (b) Schematic diagram of the influence of doping Ph-Se-Cl on exciton binding in PeLEDs.

Se-Cl本身作为独立界面修饰层而非体相掺杂剂的可能性,我们增设了对照器件:在PVK与钙钛矿层之间,以相同浓度(1.6 mg mL^{-1} , 氯苯为溶剂)旋涂一层Ph-Se-Cl薄层,其余工艺条件与目标器件完全一致。该界面层对照器件效率虽略有提升,但显著低于掺杂目标器件(图S3)。这一结果表明,Ph-Se-Cl作为界面层虽能通过界面偶极效应部分改善空穴注入接触,但无法像体相掺杂那样实现对PVK的HOMO能级的整体调控及薄膜质量的同步优化。

如图6所示,对完整的纯蓝光PeLEDs器件性能进行了全面评估。图6(a)展示了器件的电流密度-电压-亮度(J-V-L)特性曲线,该曲线清晰表明,基于Ph-Se-Cl掺杂策略制备的目标器件,在相同驱动电压下能够实现更高的发光亮度,同时其开启电压显著低于未掺杂的对照器件,这印证了

掺杂对器件电学性能的优化作用。同时,图6(b)的EQE曲线提供了更直接的性能对比,优化后目标器件的最大EQE达到了11.18%,这一数值远高于对照器件的7.90%,如此显著的提升直接有力地证明了Ph-Se-Cl掺杂策略有效改善了空穴注入效率,并显著提升了器件内部的辐射复合效率。图6(c)进一步呈现了目标器件在不同驱动电压下的电致发光(EL)光谱,其EL峰稳定地保持在约471 nm的波长位置,CIE 1931色坐标值为(0.144, 0.087)(图S4),该波长属于纯蓝光发射区域。更为重要的是,在2.6到7.0 V电压扫描范围内,目标器件的光谱形状与峰值位置均保持高度稳定,未出现明显的偏移或展宽,而对照器件的EL峰位置出现了约3 nm的红移,并且在峰的右侧出现了肩峰(图S5),这充分显示了Ph-Se-Cl掺杂策略改善了PeLEDs器件的EL光谱稳定性。为

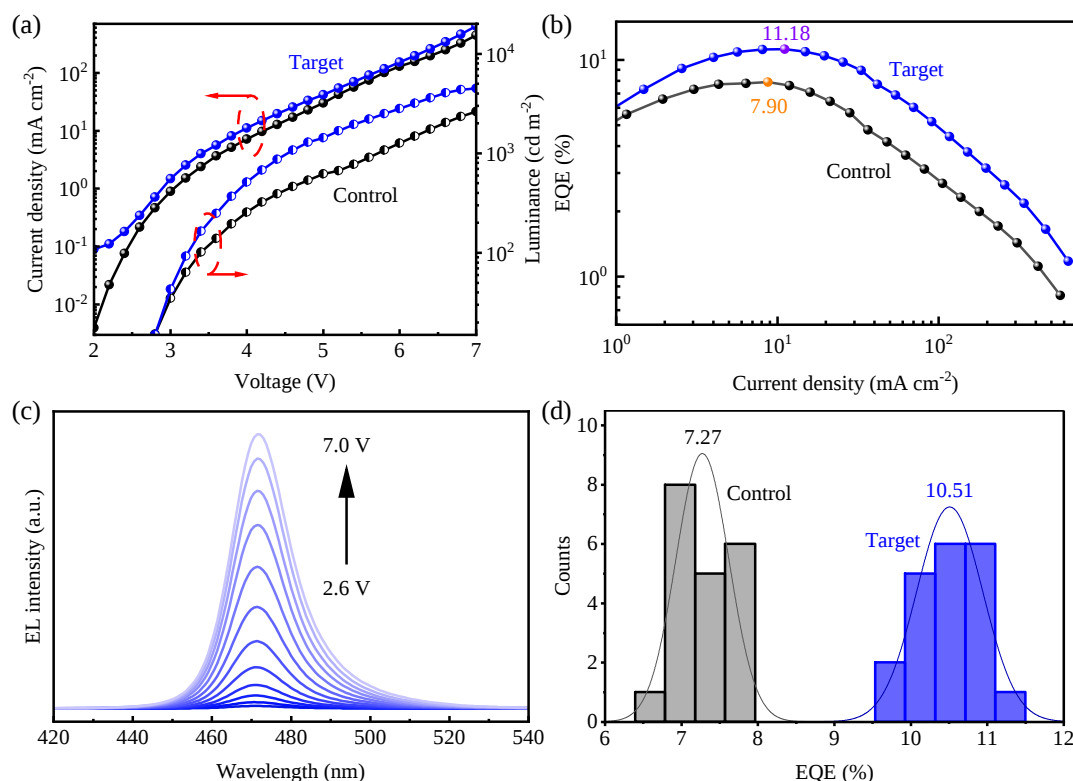


图6 Ph-Se-Cl对PeLEDs器件性能的影响。(a)电流密度-电压-亮度曲线;(b)EQE-电流密度曲线;(c)不同电压下目标PeLEDs器件的EL光谱;(d)纯蓝光PeLEDs器件峰值EQE统计直方图。

Fig.6 Impact of Ph-Se-Cl on the performance of PeLEDs devices. (a) Current density-voltage-luminance curves; (b) EQE versus current density curve; (c) EL spectra of target PeLEDs devices at various voltages; (d) Statistical histogram of peak EQE for PeLEDs devices.

评估 Ph-Se-Cl 掺杂对器件工作稳定性的影响,选取初始亮度为 50 cd m^{-2} ,对 PeLEDs 器件进行恒流驱动下的连续老化测试。如图 S6 所示,目标器件的 T_{50} 为 151 s,较对照器件的 106 s 提升了约 42.5%。此外,图 6(d)通过 20 个独立制备器件的 EQE 统计直方图,从工艺重复性的角度进一步证实了该掺杂策略的优越性,所有目标器件的峰值 EQE 均显著优于对应的对照器件,且目标器件组的平均 EQE 高达 10.51%,相较于对照器件平均值的提升幅度达到了 44.56%,这充分证明了该策略不仅性能优异,而且具备极佳的工艺可重复性与器件可靠性。

4 结 论

本研究提出并验证了一种通过在 PVK 中掺杂 Ph-Se-Cl 来有效提升纯蓝光准二维 PeLEDs 性

能的有效策略。研究结果表明,Ph-Se-Cl 掺杂具有双重调控作用:其一,它能够有效调控 PVK 的能级结构,使其 HOMO 能级从 -5.91 eV 下移至 -6.11 eV ,显著降低了与宽带隙钙钛矿发光层之间的空穴注入势垒,促进了空穴的有效注入;其二,掺杂的 HTL 层能够诱导钙钛矿薄膜形成更为均匀、平滑的形貌,降低了薄膜缺陷态密度,从而抑制了非辐射复合损失。最终,基于 Ph-Se-Cl 掺杂的目标 PeLEDs 器件实现了峰值为 11.18% 的 EQE,并保持了稳定的纯蓝光 EL 光谱。该工作为通过简单、有效的有机分子掺杂策略,协同优化器件能级排布和薄膜结晶质量,从而推动高性能蓝光 PeLEDs 的发展提供了一条新思路。

本文专家审稿意见和作者回复内容下载地址:[http://cjl.lightpublishing.cn/****\(2026****为文章稿号\)](http://cjl.lightpublishing.cn/****(2026****为文章稿号))。

参 考 文 献:

[1] YUAN L, XUE Q, WANG F, *et al.* Perovskite solar cells and light emitting diodes: materials chemistry, device physics

- and relationship [J]. *Chemical Reviews*, 2025, 125(11): 5057-5162.
- [2] 曹雨, 王娜娜, 伊昌, *et al.* 钙钛矿发光二极管: 下一代发光与显示技术 [J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 1733001.
CAO Y, WANG N, YIN C, *et al.* Perovskite light-emitting diodes: next-generation lighting and display technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(17): 1733001. (in Chinese)
- [3] WANG Q, XIE J, HUANG H, *et al.* Enhanced ambient-stability and charge transport property of the CsPbBr₃@Polyaniline [J]. *Journal of Luminescence*, 2024, 275: 120770.
- [4] PENG J, XUE X, LIU S, *et al.* Maximizing perovskite electroluminescence with ordered 3D/2D heterojunction [J]. *Nature*, 2026, 651(8104): 76-82.
- [5] FENG S C, SHEN Y, HU X M, *et al.* Efficient and stable red perovskite light-emitting diodes via thermodynamic crystallization control [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(44): 2410255.
- [6] GAO Y, CAI Q, HE Y, *et al.* Highly efficient blue light-emitting diodes based on mixed-halide perovskites with reduced chlorine defects [J]. *Science Advances*, 2024, 10(29): eado5645.
- [7] SHI Y, YANG J, LU Z. Perovskite quantum dots-based blue light-emitting diodes: Advantages, strategies, and prospects [J]. *Photonics*, 2026, 13(2): 151.
- [8] CHU Z, YOU J. Blue light-emitting diodes based on pure bromide perovskites [J]. *Advanced Materials*, 2024, 37(25): 2409867.
- [9] GUO K, REN L, CHEN C, *et al.* High-brightness blue perovskite light-emitting diodes with low efficiency roll-off enabled by dual-ETL and hole transport regulation [J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(14): 2403483.
- [10] LU Z, LI Y, WEI L, *et al.* Spectral ultra-stable perovskite quantum dots for pure-blue light-emitting diodes [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 519: 165202.
- [11] LI Y, GUAN X, ZHAO Y, *et al.* Modulation of charge transport layer for perovskite light-emitting diodes [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(25): 2410535.
- [12] ZHU Z, ZOU G, WANG Y, *et al.* Rational molecular design of soluble carbazole phosphonic acid for hybrid hole transport layers enabling high-efficiency sky-blue perovskite LEDs [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(35): 2500310.
- [13] ZHANG J, YAN C, ZHAO H, *et al.* Modulations of quasi-two-dimensional metal halide perovskites toward high-performance blue light-emitting diodes [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 36(22): 2509226.
- [14] ZENG Y, XIE J, XUE Q, *et al.* The synthesis of metal halide perovskite nanocrystals: surface and interface engineering [J]. *CrystEngComm*, 2022, 24(42): 7345-7359.
- [15] 周慧琳, 马玥珑, 刘利会, *et al.* 氟化添加剂 NFSI 协同优化 PEDOT:PSS 空穴传输层实现的高效蓝光钙钛矿发光二极管 [J]. *激光与光电子学进展*, 2026, 63(1): 504-513.
ZHOU H, MA Y, LIU L, *et al.* Synergistic optimization of PEDOT:PSS hole transport layer via fluorinated additive nfsi for high-efficiency blue perovskite light-emitting diodes [J]. *Laser and Optoelectronics Progress* [J]. 2026, 63(1): 504-513. (in Chinese)
- [16] 汤文韬, 张建恩, 李润庭, *et al.* 基于苯基膦酸界面修饰的钙钛矿发光二极管 [J]. *发光学报*, 2026: 1-11.
TANG W, ZHAN J, LI R, *et al.* Perovskite light-emitting diodes based on phenylphosphonic acid interfacial modification [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2026: 1-11. (in Chinese)
- [17] 秦向前, 黎明亮, 赵亚萍, *et al.* 新型钴基空穴传输层助力高效钙钛矿发光二极管 [J]. *发光学报*, 2023, 44(3): 548-558.
QIN X, LI M, ZHAO Y, *et al.* High-efficiency perovskite light-emitting diodes via novel cobalt-based hole transporter layer [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(3): 548-558. (in Chinese)
- [18] LEE J, XIE Z, WANG L, *et al.* Advancements in interfacial engineering for perovskite light-emitting diodes [J]. *Chemistry - A European Journal*, 2024, 30(32): e202400372.
- [19] YUAN S, FANG T, HUANG J, *et al.* Balancing charge injection via a tailor-made electron-transporting material for high performance blue perovskite QLEDs [J]. *ACS Energy Letters*, 2023, 8(1): 818-826.
- [20] CHENG H, FENG Y, FU Y, *et al.* Understanding and minimizing non-radiative recombination losses in perovskite light-emitting diodes [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(37): 13590-13610.
- [21] 张志清, 罗忠明, 朱明超, *et al.* 基于维度调制的准二维蓝色钙钛矿发光二极管 [J]. *发光学报*, 2023, 44(6):

1013-1022.

ZHANG Z, LUO Z, ZHU M, *et al.* Quasi-two-dimensional blue perovskite light-emitting diodes based on phase modulation [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(6): 1013-1022. (in Chinese)

[22] XIAO Z, KERNER R A, ZHAO L, *et al.* Efficient perovskite light-emitting diodes featuring nanometre-sized crystallites [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(2): 108-115.

[23] GUAN X, LI Y, SU Y, *et al.* Elongated grain morphology for efficient and radiant NIR-II Sn-based perovskite light-emitting diodes [J]. *Nature Communications*, 2026, DOI: 10. 1038/s41467-026-72625-z.



蒋毅(2000—),男,四川眉山人,博士研究生,2023年于西南石油大学获得学士学位,主要从事蓝光钙钛矿发光二极管的研究。

E-mail: 23013081040@stu. hqu. edu. cn



魏展画(1989—),男,福建清流人,博士,教授。2015年于香港科技大学获得理学博士学位,主要从事光电功能材料的研究。

E-mail: weizhanhua@hqu. edu. cn



卢知轩(1992—),男,河南淮阳人,博士,副研究员。2022年于厦门大学获得理学博士学位,主要从事等离激元的制备及其在钙钛矿发光领域的应用研究。

E-mail: zxlu@hqu. edu. cn