

文章编号: 1000-7032(2025)07-1262-09

基于硫氰酸亚铜空穴注入层的量子点发光二极管的性能优化研究

廖明月, 何 敏, 陈 平*, 张巧明, 雷衍连*

(西南大学物理科学与技术学院 微纳结构与光电子学重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 量子点发光二极管(QLED)因其优异的光学性能和可溶液加工特性,成为下一代显示和照明技术的有力候选。然而,传统空穴注入材料(如 PEDOT:PSS)存在诸多问题,限制了其性能提升。本文采用硫氰酸亚铜(Copper thiocyanate, 简称为 CuSCN)作为空穴注入层,绿色 CdSe/ZnS 量子点作为发光层,结合不同空穴传输层(Hole transport layer, 简称为 HTL),如 PVK 和 Poly-TPD,通过溶液加工工艺制备了绿色 QLED 器件,并对比分析了交流驱动与直流驱动下器件的光电性能。研究发现,CuSCN 与 PVK 之间的能级势垒导致界面电荷束缚,降低了器件性能;而引入 poly-TPD 后,由于其更高的空穴迁移率和更浅的 HOMO 能级,有效减少了界面电荷束缚,显著提高了器件的发光亮度和电流效率,最大发光亮度和最大电流效率分别为 132 075 cd/m² 和 15.6 cd/A。本研究揭示了 CuSCN/HTL 界面电荷束缚对 QLED 性能的影响机制,为无机 CuSCN 在高效溶液加工 QLED 中的应用提供了理论支持和实践指导。

关键词: 硫氰酸亚铜;量子点发光二极管;空穴注入层;束缚电荷;交流驱动

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A

DOI: 10.37188/CJL.20250039

CSTR: 32170.14.CJL.20250039

Performance Optimization of Solution-processed QLEDs with CuSCN Hole Injection Layer

LIAO Mingyue, HE Min, CHEN Ping*, ZHANG Qiaoming, LEI Yanlian*

(School of Physical Science and Technology, Chongqing Key Lab of Micro&Nano Structure Optoelectronics, Southwest University, Chongqing 400715, China)

* Corresponding Authors, E-mail: pingchen@swu.edu.cn; yllei@swu.edu.cn

Abstract: Quantum dot light-emitting diodes (QLEDs) are promising for future display and lighting technologies due to their excellent optical properties and ease of fabrication. However, traditional hole injection materials like PEDOT:PSS limit QLED performance. This study explores copper thiocyanate (CuSCN) as the hole injection layer, paired with CdSe/ZnS green quantum dots and various hole transport layers (HTLs) such as PVK and Poly-TPD. We assessed the optoelectronic properties of these devices under both alternating current (AC) and direct current (DC) conditions. Our results reveal that the energy level barrier between CuSCN and PVK leads to charge trapping, which adversely affects performance. In contrast, Poly-TPD, with its higher hole mobility and shallower HOMO energy level, alleviates charge trapping, significantly enhancing brightness and current efficiency to peak values of 132 075 cd/m² and 15.6 cd/A, respectively. This research provides insights into the charge trapping mechanism at the CuSCN/HTL interface, highlighting CuSCN as a viable alternative to PEDOT:PSS for improving QLED efficiency.

Key words: copper thiocyanate (CuSCN); quantum dot light-emitting diodes (QLEDs); hole injection; trapped charge; alternating current

收稿日期: 2025-02-25; 修订日期: 2025-03-17

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTB2024NSCQ-QCXM0056, 2023NSCQ-MSX0888); 重庆市留学回国人员创新支持计划(cx2024035)
Supported by the Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2024NSCQ-QCXM0056, 2023NSCQ-MSX0888); the Venture and Innovation Support Program for Chongqing Overseas Returnees (cx2024035)

量子点发光二极管(Quantum dot light-emitting diode,简称为QLED)因其狭窄的发射带宽、高发光效率、可调发射波长和卓越的光稳定性,成为下一代高质量显示器和固态照明的理想候选者^[1-3]。其中,溶液加工的QLED因其低成本和适合大面积商业应用而受到广泛关注^[4-6]。在溶液加工的多层结构QLED中,氧化锌(Zinc oxide,简称为ZnO)纳米颗粒作为常用的电子注入材料,其能级与量子点导带高度匹配,能够有效地将电子注入到量子点发光层^[6-7]。然而,空穴的注入相对困难。这主要是由于量子点的价带能级较深,导致很难找到与之匹配的空穴注入和传输材料^[8-9]。常用的空穴注入材料Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate)(简称为PEDOT:PSS)具有酸性,容易腐蚀ITO衬底,从而影响空穴注入^[10-11]。此外,PEDOT:PSS为水溶液,而其他功能层通常需要在无水 and 无氧环境中制备,这种差异增加了工艺的复杂性,并显著影响器件的性能^[12]。因此,开发能够替代PEDOT:PSS的空穴注入材料对于提升溶液加工QLED的性能至关重要。

无机氧化物(如NiO_x、WO₃、V₂O₅和MoO_x)因优异的热稳定性、高载流子迁移率和宽带隙,被广泛用于光电器件以替代PEDOT:PSS^[13-16]。然而,这些材料的薄膜制备通常依赖真空热沉积或溶液加工后的高温处理,甚至需要额外的退火步骤来改善电学性能。近年来,硫氰酸亚铜(Copper thiocyanate,简称为CuSCN)作为一种新兴的无机空穴输运材料,因其高达0.01~0.1 cm²/(V·s)的空穴迁移率和约5.3 eV的深价带能级,以及在可见光和近红外光范围内的优异透光性,逐渐受到关注^[17-22]。鉴于其优异的光电性能,CuSCN被认为是替代PEDOT:PSS以实现高效溶液加工QLED的理想选择。尽管已有相关研究探讨了CuSCN在QLED中的应用^[23-25],但关于其在溶液加工QLED中的系统性分析和优化策略仍较为匮乏。

此外,现有研究大多使用直流电源驱动电致发光器件以获得稳定的性能。然而,在电子和空穴注入不平衡的情况下,器件可能会积累过多电荷,导致稳定性变差^[26-27]。与此不同,交流驱动通过不断变化的电场,可有效消除电荷积累,促进电荷的转移,增加器件的稳定性并延长使用寿命^[26-28]。因此,在测试电致发光器件的光电性能时,交流驱动能够提供与直流驱动不同的注入模

式,通过对比分析,有利于深入理解器件的工作机制和微观过程。

本文采用CuSCN作为空穴注入层(Hole injection layer,简称为HIL),首先结合具有最深最高占据分子轨道(the highest occupied molecular orbital,简称为HOMO)能级的poly(9-vinylcarbazole)(简称为PVK)作为空穴传输层(Hole transport layer,简称为HTL),制备了溶液加工绿光QLED器件:ITO/CuSCN/PVK/QDs/ZnO/Al,并对比分析了其在交流驱动与直流驱动下的光电特性。研究发现,CuSCN/PVK结构中的界面电荷束缚是导致QLED性能低下的主要因素。为减少CuSCN层的电荷束缚,我们引入了HOMO能级较浅(与CuSCN具有更匹配的能级结构)且空穴迁移率高于PVK的poly(bis(4-phenyl-4-butylphenyl)amine)(简称为poly-TPD),构建了CuSCN/poly-TPD空穴注入/传输结构,并基于此制备了新的溶液加工绿光QLED器件,显著提升了器件性能。我们的研究表明,CuSCN/HTL界面的电荷束缚是影响QLED性能的关键因素。因此,在选择CuSCN作为空穴注入层时,应尽量排除界面累积电荷的影响,这为CuSCN在光电器件中的应用提供了指导意义。

制备器件所用材料包括CdSe/ZnS量子点、PEDOT:PSS、PVK、poly-TPD、CuSCN、ZnO,其中,CdSe/ZnS(10 mg/mL,PLQY=75%)量子点购买于苏州星烁科技有限公司;有机聚合物PEDOT:PSS、PVK、poly-TPD购买于西安宝莱特光电科技有限公司;CuSCN购买于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;ZnO(20 mg/mL)纳米颗粒按文献[29]方法合成。

器件制备前,将带有ITO图案的玻璃基片依次用洗洁剂、去离子水、乙醇、丙酮和异丙醇清洗,烘干后进行紫外臭氧处理。处理后的ITO玻璃基片传入手套箱(水氧含量<0.1×10⁻⁶),以3 000 r/min的速度旋涂溶于二乙硫醚的CuSCN溶液,并在120 °C下退火10 min。随后,以2 500 r/min的速度旋涂空穴传输层PVK或poly-TPD并退火。接着,以2 500 r/min的速度旋涂发光层CdSe/ZnS并退火处理,电子传输层ZnO以1 500 r/min的速度旋涂。最后,将样品推送至高真空蒸发腔(~10⁻⁴ Pa)进行铝电极蒸镀。

制备好的器件在手套箱内封装后,在大气环境下进行光电性能表征。将封装好的器件连接至发光二极管测试系统,测量电流-亮度-电压特性曲

线。电压/电流源表由泰克-吉时利源表(Keithley 2400)提供,亮度由柯尼卡-美能达色彩亮度计(CS-160)测量。量子点薄膜的吸收谱由紫外可见分光光度计测得,电致发光光谱(EL)及发光强度由PR650测得,光致发光谱(PL)由光纤光谱仪(海洋光学, Maya2000 Pro)测得。交流测试的电压函数/任意波形由发生器(Rigol DG4062)提供。

可溶液加工的有机空穴传输层 PVK 具有较深的 HOMO 能级,与量子点的价带能级较为匹配,常被用作溶液加工 QLED 的空穴传输层^[30-32]。我们首先基于 CuSCN 空穴注入层和 PVK 空穴传输

层制备了 QLED (ITO/CuSCN/PVK/QDs/ZnO/Al), 其能级结构示意图如图 1(a) 所示,发现 CuSCN 与 PVK 之间存在 0.5 eV 的能级势垒。同时,基于 PEDOT:PSS 空穴注入层制备相同结构的参考器件 (ITO/PEDOT:PSS/PVK/QDs/ZnO/Al)^[32]。图 1(b) 对比了 CuSCN 和 PEDOT:PSS 薄膜在可见光波段的透明度,二者相当,表明 CuSCN 作为空穴注入层不会影响器件透光率。原子力显微镜表面形貌测试结果显示 (如图 1(c)), CuSCN 薄膜表面的粗糙度 (1.7 nm) 要大于 PEDOT:PSS 薄膜表面粗糙度 (0.9 nm),说明表面有可能更容易束缚电荷。

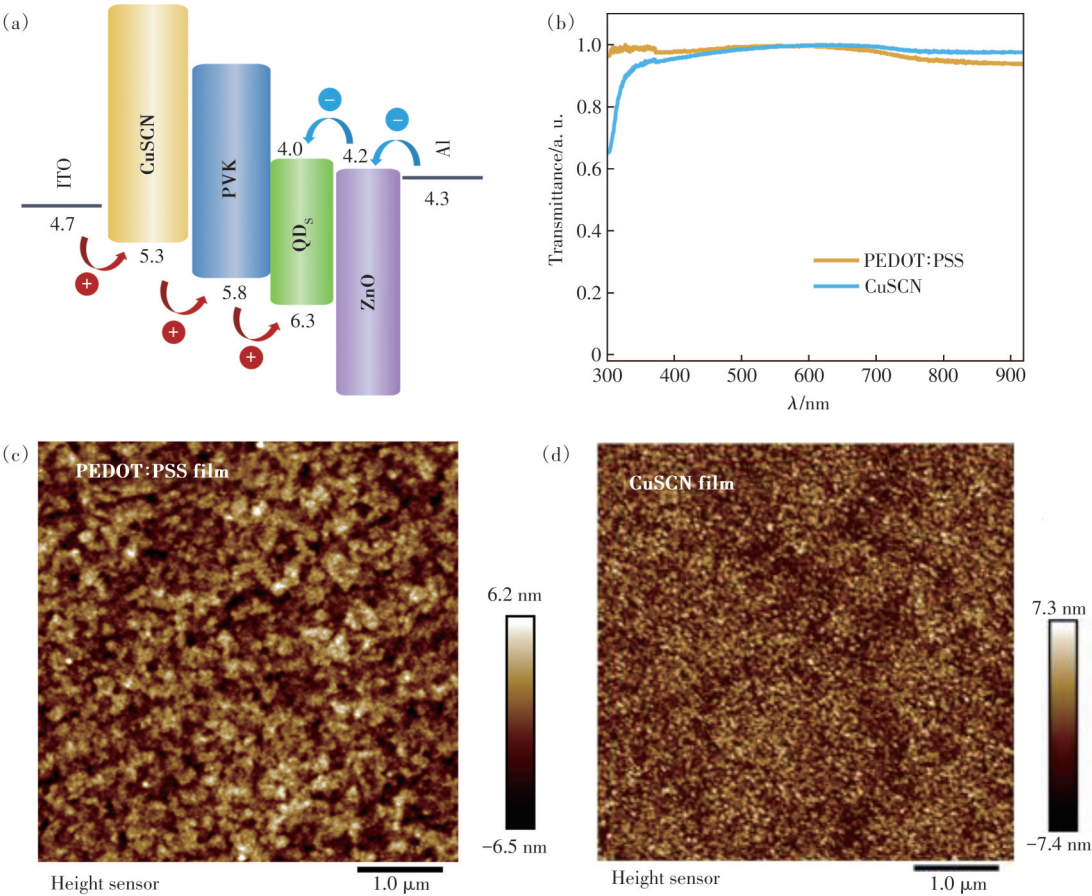


图 1 (a)溶液加工 QLED 的能级结构示意图;(b)CuSCN 和 PEDOT:PSS 在可见光波段的透明度;(c)PEDOT:PSS 和 (d)CuSCN 薄膜的原子力显微镜高度图

Fig.1 (a) Schematic energy level diagram of solution-processed QLEDs. (b) Transmittance of CuSCN and PEDOT:PSS in the visible light range. AFM height image of (c) PEDOT:PSS and (d) CuSCN films

为充分说明 CuSCN 对器件性能的影响,我们通过改变 CuSCN 厚度对器件性能进行了优化。分别采用浓度为 10, 15, 20 mg/mL 的 CuSCN 溶液制备不同厚度的空穴注入层,并对比了基于 CuSCN/PVK 和 PEDOT:PSS/PVK 的溶液加工 QLED 在直流驱动下的光电性能。图 2(a)展示了电流密度随电压的变化曲线(J - V 曲线)。从图中可知,基

于 CuSCN 的 QLED 电流密度均低于基于 PEDOT:PSS 的 QLED,表明 CuSCN 在直流驱动下注入空穴的能力较差。图 2(b)显示,随着 CuSCN 浓度从 10 mg/mL 增加到 20 mg/mL,基于 CuSCN/PVK 的 QLED 发光亮度先增加后降低,但仍低于基于 PEDOT:PSS/PVK 的 QLED。图 2(c)中,基于 CuSCN/PVK 的 QLED 电流效率也呈现类似变化趋势,且

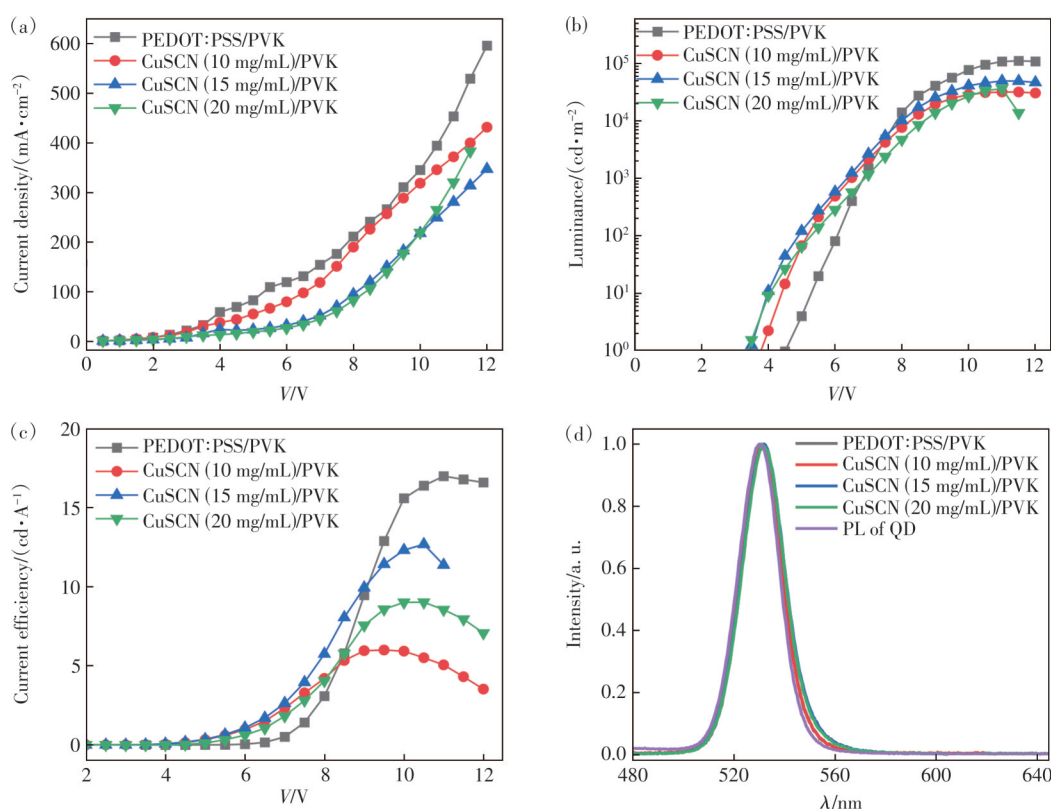


图2 基于CuSCN/PVK的QLED光电性能。(a) J - V 特性曲线;(b)发光亮度-电压特性曲线;(c)电流效率-电压变化特性曲线;(d)归一化EL谱和量子点的PL谱

Fig.2 (a) Optoelectronic performance of CuSCN/PVK-based QLEDs. (a) J - V characteristics. (b) Luminance-voltage characteristics. (c) Current efficiency-voltage characteristics. (d) Normalized EL and PL spectra

均低于基于PEDOT:PSS/PVK的QLED。当CuSCN浓度为15 mg/mL时,基于CuSCN/PVK的QLED光电性能最佳。器件的EL谱表明(图2(d)),基于CuSCN/PVK的溶液加工QLED的EL光谱不随CuSCN空穴注入层的厚度改变而变化,且与基于PEDOT:PSS/PVK的溶液加工QLED的EL几乎重合。同时,这些EL的峰位与量子点的PL光谱的峰位相对应。这些结果表明CuSCN空穴注入层的厚度不影响激子复合区域,均限制在量子点发光层。

为找出基于CuSCN/PVK结构的QLED性能低下的原因,我们测试了优化后的器件在交流驱动下的光电性能,并与直流驱动下的性能进行对比。如图3(a)、(c)所示,基于CuSCN/PVK的QLED在交流驱动下的最大发光亮度和电流效率均显著高于直流驱动下的结果。相反,基于PEDOT:PSS/PVK的QLED在交流驱动下的发光亮度和电流效率则均低于直流驱动下的结果,如图3(b)、(d)所示。

为深入分析这一差异,我们采用HOMO能级更浅、空穴迁移率更高的poly-TPD替代PVK,制

备了结构为ITO/CuSCN/poly-TPD/QDs/ZnO/Al的QLED(图4(a))。基于PEDOT:PSS/poly-TPD的对照器件也在相同条件下制备,并分别对比了两种器件在直流(DC)和交流(AC)驱动下的光电性能。如图4(a)所示,在直流驱动下,基于CuSCN/poly-TPD的QLED电流密度低于基于PEDOT:PSS/poly-TPD的QLED,表明CuSCN的高导带可有效阻挡电子,减少漏电流,有助于提高激子复合效率。图4(b)显示,基于CuSCN/poly-TPD的QLED最大发光亮度达132 075 cd/m^2 ,显著高于基于PEDOT:PSS/poly-TPD的QLED(99 976 cd/m^2)。进一步对比测试表明,与基于PEDOT:PSS/poly-TPD的QLED情况类似,基于CuSCN/poly-TPD的QLED在交流驱动下的启亮电压(定义为亮度为1 cd/m^2 时给器件施加的电压)高于直流驱动下的结果。这主要是因为直流驱动时,电场持续存在,载流子能稳定地注入发光层,启亮电压低;交流驱动时,电场方向周期性改变,载流子注入受限,需要更高的电压克服注入障碍,导致启亮电压升高。此外还发现,基于两种结构的QLED在交流驱动下的

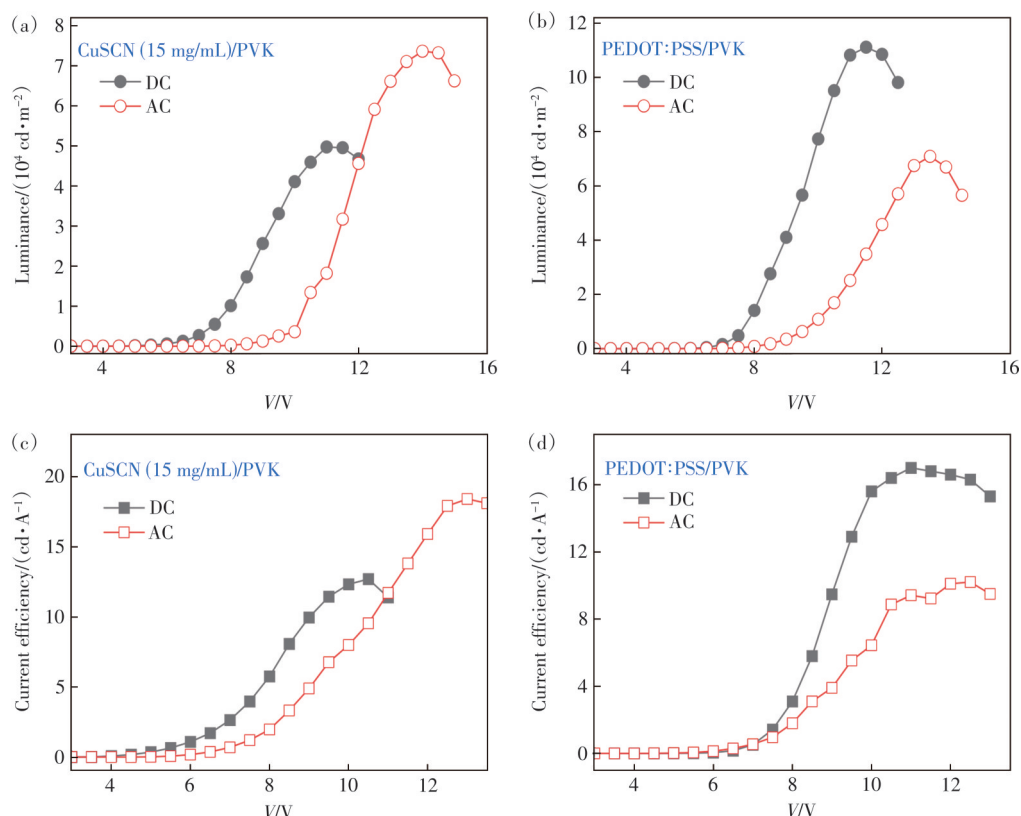


图3 基于CuSCN/PVK((a)、(c))和PEDOT:PSS/PVK((b)、(d))的QLEDs在交流驱动和直流驱动下发光性能对比
Fig. 3 Comparison of EL performance of QLEDs based on CuSCN/PVK((a), (c)) and PEDOT:PSS/PVK((b), (d)) under AC and DC driving

发光亮度和电流效率均略有降低(图4(c)~(f))。这一结果与基于CuSCN/PVK器件的发光亮度和电流效率结果(图3(a)、(c))明显不同,表明基于CuSCN/poly-TPD结构中的空穴注入/输运机制与CuSCN/PVK结构中的情形存在较大差异。

进一步分析发现,CuSCN/HTL界面是否产生束缚电荷是导致上述结果的主要原因。如图5(a)所示,PVK的空穴迁移率较低($\sim 2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$),HOMO能级较深($\sim 5.8 \text{ eV}$)^[32],导致CuSCN/PVK界面处空穴注入势垒较大。在直流驱动下,CuSCN/PVK界面处大量电荷累积,形成束缚电荷并产生焦耳热,降低器件性能和稳定性。而poly-TPD的空穴迁移率高($\sim 1.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$),HOMO能级浅($\sim 5.4 \text{ eV}$)^[32],CuSCN/Poly-TPD界面处空穴注入势垒小,在直流驱动下几乎无电荷累积,CuSCN/Poly-TPD界面处无束缚电荷。在交流驱动下,反偏压条件下可有效释放CuSCN/PVK结构在正偏压下形成的束缚电荷累积,减少焦耳热的持续产生,同时为器件提供散热时间,从而提升器件性能(图5(b))。这与图3所示的交流驱动下QLED发光亮度和电流效率显著提升的结果一致。

从器件的寿命对比结果来看(图6(a)、(b)),CuSCN/PVK的QLED器件在直流驱动下的 T_{50} 寿命仅83 s,远低于PEDOT:PSS/PVK器件的 $\sim 10^3 \text{ s}$ 。但在交流驱动下,CuSCN/PVK器件 T_{50} 寿命增至2440 s,优于PEDOT:PSS/PVK器件直流寿命。这证实了CuSCN/PVK界面处存在大量电荷累积,直流驱动下焦耳热效应明显,严重影响器件的稳定性。相反,对于基于CuSCN/poly-TPD的QLED器件,在正偏压下几乎无电荷束缚,而反偏压下电荷反向运动,阻碍后续电荷注入,导致器件性能降低。图5(d)显示,该器件在交流驱动下的亮度衰退时间与直流驱动下相当(超过了 10^4 s),进一步证明CuSCN/poly-TPD界面处电荷累积较少,焦耳热影响不明显,对器件稳定性的影响甚微。

为了更深入地对比分析器件的工作机理,我们测量了单载流子器件的 J - V 特性(图6(c))。其中,单电子器件(EOD)的结构为ITO/ZnO/QD/ZnO/Al,单空穴器件(HOD)的结构为ITO/HIL/HTL/QD/MoO₃/Al。HIL分别采用PEDOT:PSS和CuSCN,HTL分别采用PVK和Poly-TPD。从图中可以发现,基于CuSCN/poly-TPD的单空穴器件相

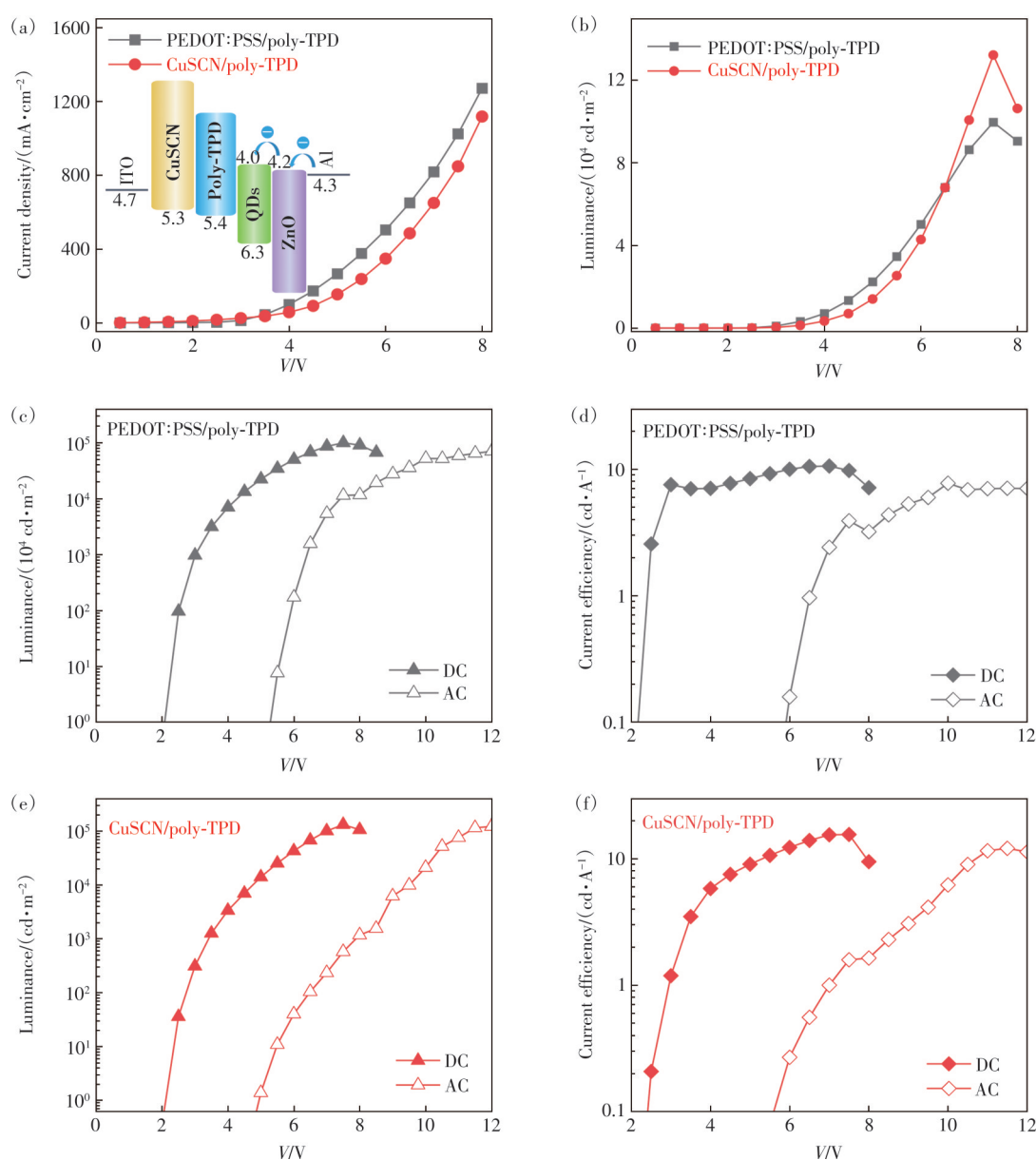


图4 基于CuSCN/poly-TPD和PEDOT:PSS/poly-TPD的QLED光电性能对比。(a) J - V 特性曲线, 插图为器件的能级结构示意图; (b) 发光亮度-电压特性曲线; 基于(c)~(d) PEDOT:PSS/poly-TPD和(e)~(f) CuSCN/poly-TPD的QLEDs在交流驱动和直流驱动下发光性能对比

Fig.4 Comparison of optoelectronic performance of QLEDs using CuSCN/poly-TPD and PEDOT:PSS/poly-TPD. (a) J - V curves with energy level diagram inset. (b) Luminance-voltage curves. Comparison of EL performance between two device structures under AC and DC conditions. (c)~(d) PEDOT:PSS/poly-TPD. (e)~(f) CuSCN/poly-TPD

对于基于CuSCN/PVK的单空穴器件来说, 具有更高的空穴电流, 并与单电子器件的电流密度最为匹配。这说明poly-TPD与CuSCN之间的能级匹配有助于形成更稳定的界面接触。尽管poly-TPD与量子点层存在0.9 eV的势垒, 但poly-TPD的高迁移率能够克服这一势垒, 从而实现高效的空穴注入。

图6(d)进一步比较了基于CuSCN/PVK和CuSCN/poly-TPD结构QLEDs的阻抗谱。从图中可知, 基于CuSCN/poly-TPD的QLED复合电阻明显

小于基于CuSCN/PVK的QLED, 表明其复合效率更高。由此, 可以判断出基于CuSCN/PVK结构QLED性能低下的主要原因包括: (1) 由于PVK与CuSCN之间的能级势垒以及PVK较低的空穴迁移率使得在CuSCN/PVK界面产生大量电荷累积, 影响后续空穴注入; (2) 大量束缚电荷产生焦耳热, 在直流驱动下无法及时释放, 降低器件稳定性和发光效率。因此, 采用CuSCN作为空穴注入层时, 减少CuSCN/HTL界面的电荷束缚是必须考虑的首要因素。

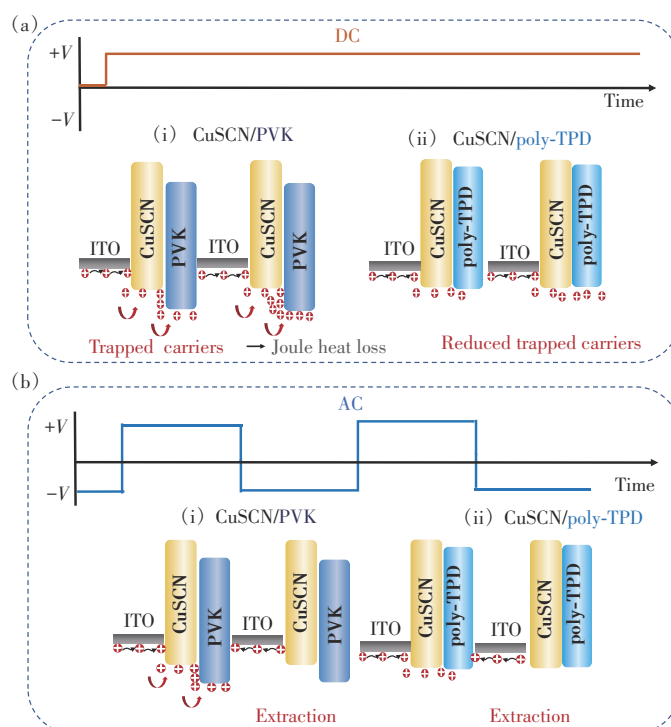


图5 不同驱动模式下,电荷在CuSCN/PVK和CuSCN/poly-TPD界面的束缚和输运过程:(a)直流驱动下;(b)交流驱动下
Fig.5 Charge trapping and transport processes at the CuSCN/PVK and CuSCN/poly-TPD interfaces under (a) direct current (DC) and (b) alternating current (AC)

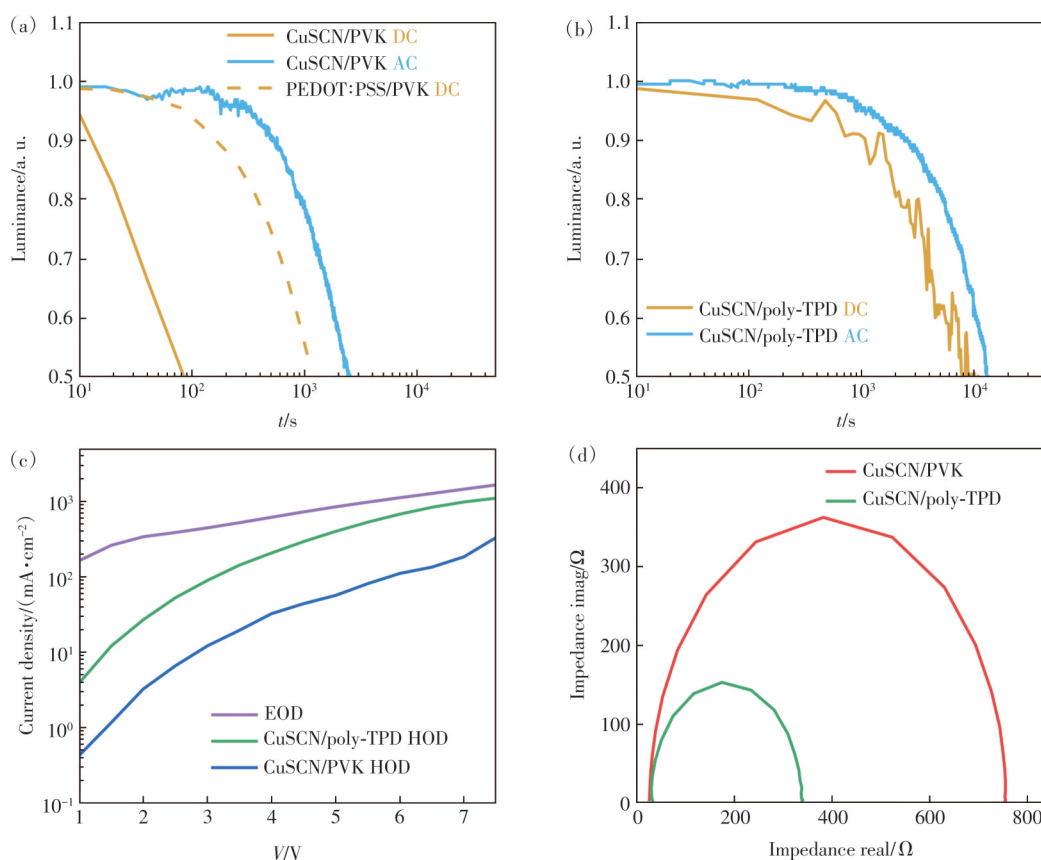


图6 基于(a)CuSCN/PVK和(b)CuSCN/poly-TPD的两种器件电致发光强度在直流和交流驱动下的衰减曲线(寿命测试),初始亮度为1 000 cd/m^2 ;(c)单电子和单空穴 J - V 特性曲线对比;(d)两种发光器件的阻抗谱
Fig.6 EL decay curves for devices using (a) CuSCN/PVK and (b) CuSCN/poly-TPD under DC and AC driving at 1 000 cd/m^2 . (c) Comparison of J - V characteristics for single-electron and single-hole currents. (d) Impedance spectra

本文基于 CuSCN 空穴注入层制备了溶液加工 QLEDs, 并通过对比分析交流驱动和直流驱动下的光电性能, 揭示了 CuSCN 与 HTL 界面处的电荷束缚对器件性能的影响机制。通过引入 poly-TPD 作为 HTL, 成功减少了界面电荷束缚, 显著提高了器件的发光亮度和电流效率。本研究为无机 CuSCN 在高效溶液加工 QLED 中的应用提供了新

的视角, 展现了其作为 PEDOT:PSS 替代材料的潜力, 为未来光电器件的设计提供了理论基础和实践指导。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250039>

参 考 文 献:

- [1] FAN J P, HAN C F, YANG G J, *et al.* Recent progress of quantum dots light-emitting diodes: materials, device structures, and display applications [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(37): 2312948.
- [2] SHU Y F, LIN X, QIN H Y, *et al.* Quantum dots for display applications [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2020, 59(50): 22312-22323.
- [3] JANG H J, LEE J Y, BAEK G W, *et al.* Progress in the development of the display performance of AR, VR, QLED and OLED devices in recent years [J]. *J. Inf. Disp.*, 2022, 23(1): 1-17.
- [4] 黄启章, 孙思琦, 刘铭泽, 等. 面向显示应用的胶体量子点电致发光二极管: 进展与挑战 [J]. *发光学报*, 2023, 44(5): 739-758.
HUANG Q Z, SUN S Q, LIU M Z, *et al.* Colloidal quantum dot electroluminescent diodes for display applications: progress and challenges [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(5): 739-758. (in Chinese)
- [5] 李梦娇, 王晔, 王亚坤, 等. 高效钙钛矿量子点发光二极管: 挑战和优化 [J]. *发光学报*, 2025, 46(3): 452-461.
LI M J, WANG Y, WANG Y K, *et al.* Efficient perovskite quantum dots light-emitting diodes: challenges and optimization [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(3): 452-461. (in Chinese)
- [6] DAI X L, DENG Y Z, PENG X G, *et al.* Quantum-dot light-emitting diodes for large-area displays: towards the dawn of commercialization [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(14): 1607022.
- [7] KIRKWOOD N, SINGH B, MULVANEY P. Enhancing quantum dot LED efficiency by tuning electron mobility in the ZnO electron transport layer [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2016, 3(22): 1600868.
- [8] JING J P, LIN L H, YANG K Y, *et al.* Highly efficient inverted quantum dot light-emitting diodes employing sol-gel derived Li-doped ZnO as electron transport layer [J]. *Org. Electronics*, 2022, 103: 106466.
- [9] 梅开元, 霍斯铭, 于荣梅, 等. 基于 MoO₃/ZnO 无机电荷产生层的量子点电致发光器件 [J]. *发光学报*, 2023, 44(11): 1885-1893.
MEI K Y, HUO S M, YU R M, *et al.* Quantum-dot light-emitting diodes based on MoO₃/ZnO inorganic charge-generation layer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(11): 1885-1893. (in Chinese)
- [10] ZHAO Y S, WU J L, CHEN L X, *et al.* Efficient solution-processed green InP-based quantum dot light-emitting diodes with a stepwise hole injection layer [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2022, 43(3): 410-413.
- [11] CAMERON J, SKABARA P J. The damaging effects of the acidity in PEDOT:PSS on semiconductor device performance and solutions based on non-acidic alternatives [J]. *Mater. Horiz.*, 2020, 7(7): 1759-1772.
- [12] SYED A A, POON C Y, LI H W, *et al.* A sodium citrate-modified-PEDOT:PSS hole transporting layer for performance enhancement in inverted planar perovskite solar cells [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(18): 5260-5266.
- [13] KIM S K, YANG H, KIM Y S. Effects of double heat treatment of NiO hole transport layer on the performance of QLEDs [J]. *J. Mater. Sci.*, 2020, 55(36): 17046-17060.
- [14] KIM H S, LEE D, KIM B, *et al.* Improved performance of quantum dot light-emitting diodes by introducing WO₃ hole injection layers [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2022, 735(1): 51-60.
- [15] CHOI S G, SEOK H J, RHEE S, *et al.* Magnetron-sputtered amorphous V₂O₅ hole injection layer for high performance quantum dot light-emitting diode [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 878: 160303.
- [16] BORAH D J, MOSTAKO A T T, SAIKIA P K, *et al.* Effect of thickness and post deposition annealing temperature on the structural and optical properties of thermally evaporated molybdenum oxide films [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2019, 93: 111-122.
- [17] SEPALAGE G A, MEYER S, PASCOE A R, *et al.* A facile deposition method for CuSCN: exploring the influence of

- CuSCN on *J-V* hysteresis in planar perovskite solar cells [J]. *Nano Energy*, 2017, 32: 310-319.
- [18] WORAKAJIT P, HAMADA F, SAHU D, *et al.* Elucidating the coordination of diethyl sulfide molecules in copper(I) thiocyanate (CuSCN) thin films and improving hole transport by antisolvent treatment [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(36): 2002355.
- [19] WORAKAJIT P, SUDYOADSUK T, PROMARAK V, *et al.* Antisolvent treatment of copper(I) thiocyanate (CuSCN) hole transport layer for efficiency improvements in organic solar cells and light-emitting diodes [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(32): 10435-10442.
- [20] PERUMAL A, FABER H, YAACOBI-GROSS N, *et al.* High-efficiency, solution-processed, multilayer phosphorescent organic light-emitting diodes with a copper thiocyanate hole-injection/hole-transport layer [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(1): 93-100.
- [21] DING T, WANG N, WANG C, *et al.* Solution-processed inorganic copper(I) thiocyanate as a hole injection layer for high-performance quantum dot-based light-emitting diodes [J]. *RSC Adv.*, 2017, 7(42): 26322-26327.
- [22] ZHU Y B, HU H L, LIU Y, *et al.* All-solution-processed high-performance quantum dot light emitting devices employing an inorganic thiocyanate as hole injection layer [J]. *Org. Electron.*, 2019, 70: 279-285.
- [23] WEN M R, YANG S H, CHEN W S. Solution-processed smooth copper thiocyanate layer with improved hole injection ability for the fabrication of quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(1): 154
- [24] QU X W, MA J R, LI D P, *et al.* Space charge-induced capacitance recovery in blue quantum dot light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 125(11): 113502.
- [25] YAN X C, WU B N, CHEN C L, *et al.* Elucidating the impact of electron accumulation in quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Nano Lett.*, 2024, 24(42): 13374-13380.
- [26] LV S H, YANG K Y, WU C X, *et al.* Operating mechanism of quantum-dot light-emitting diodes under alternating current-drive [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2022, 43(2): 256-259.
- [27] XU J W, CARROLL D L, SMITH G M, *et al.* Achieving high performance in AC-field driven organic light sources [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 24116.
- [28] LEE S, KIM E H, YU S, *et al.* Alternating-current Mxene polymer light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(32): 2001224.
- [29] KWAK J, BAE W K, LEE D, *et al.* Bright and efficient full-color colloidal quantum dot light-emitting diodes using an inverted device structure [J]. *Nano Lett.*, 2012, 12(5): 2362-2366.
- [30] WU J L, HU Y H, CHEN L X, *et al.* Universal flexible lamination encapsulation strategy toward underwater-operation electroluminescence devices [J]. *ACS Appl. Mater. Interface*, 2022, 14(45): 51175-51182.
- [31] WU J L, CHEN L X, ZHAO Y S, *et al.* Temperature-dependent recombination dynamics and electroluminescence characteristics of colloidal CdSe/ZnS core/shell quantum dots [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 119(7): 073303.
- [32] ZHENG L L, ZHAI G M, ZHANG Y, *et al.* Solution-processed blue quantum-dot light-emitting diodes based on double hole transport layers: charge injection balance, solvent erosion control and performance improvement [J]. *Superlattices Microstruct.*, 2020, 140: 106460.



廖明月(1999-),女,四川德阳人,硕士研究生,2022年于西华师范大学获得学士学位,主要从事量子点发光二极管的制备和性能优化研究。

E-mail: lmyyy79@email.swu.edu.cn



雷衍连(1984-),男,湖南永州人,博士,副教授,2016年于中国香港浸会大学获得博士学位,主要从事半导体光电器件与物理方面的研究。

E-mail: yllel@swu.edu.cn



陈平(1986-),男,福建福州人,博士,副教授,2014年于吉林大学获得博士学位,主要从事发光材料与物理方面的研究。

E-mail: pingchen@swu.edu.cn