

文章编号: 1007-2780(2026)01-0065-09

多功能配体修饰实现高性能蓝光量子点 发光二极管

王源坤, 张东康[#], 夏梦洋, 钟秉霖, 吴倩倩, 王 林, 杨绪勇*, 王 胜*
(上海大学 新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072)

摘要:量子点发光二极管(QLED)因其优异的光电特性,被视为下一代显示与照明技术的有力候选者。然而蓝光 QLED 在性能上仍显著落后于绿光和红光器件,严重制约了 QLED 全彩显示技术的商业化进程。一方面,蓝光量子点较深的价带能级使其与空穴传输层之间存在较高的空穴注入势垒,且表面长链油酸配体不利于载流子传输。另一方面,蓝光量子点核、壳材料的能级差较小,导致载流子容易与表面缺陷态发生耦合,引起非辐射复合,降低器件效率。本研究采用多功能配体盐酸苄基羟胺(BHACl)修饰蓝光量子点的表面。BHACl 取代原有的长链油酸配体,提升了量子点薄膜中的载流子传输性能;其分子中的 NH_3^+ 基团能够钝化表面悬挂键,抑制非辐射复合;BHACl 具有的大偶极矩使量子点能级整体上移,提高了空穴注入效率。基于此,制备的蓝光 QLED 器件实现了外量子效率(EQE)为 19.2%,峰值亮度为 $28\,237\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,在 $100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 初始亮度下器件寿命为 8 986 h,各项性能显著优于对照器件。

关键词:量子点发光二极管;多功能配体;载流子传输;外量子效率

中图分类号: O482.31; TN383⁺.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2025-0225 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2025-0225

收稿日期: 2025-11-07; **修订日期:** 2025-12-23.

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2024YFB3612404); 国家自然科学基金 (No. T2525035, No. 62174104, No. 12404479, No. 62204214); 上海市学术/技术科研带头人计划 (No. 22XD1421200); 上海市自然科学基金 (No. 23ZR1423300); 上海市科学技术委员会项目 (No. 22YF1413500); 河南省自然科学基金 (No. 242300420681); 中国博士后科学基金 (No. GZC20240971, No. GZB20240416)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFB3612404); National Natural Science Foundation of China (No. T2525035, No. 62174104, No. 12404479, No. 62204214); Program of Shanghai Academic/Technology Research Leader (No. 22XD1421200); Natural Science Foundation of Shanghai (No. 23ZR1423300); Program of Shanghai Science and Technology Committee (No. 22YF1413500); Henan Provincial Natural Science Foundation (No. 242300420681); China Postdoctoral Science Foundation (No. GZC20240971, No. GZB20240416)

[#]共同第一作者

*通信联系人, E-mail: yangxy@shu.edu.cn; nanocrystal@shu.edu.cn

High-performance blue quantum dot light-emitting diodes enabled by multifunctional ligand modification

WANG Yuankun, ZHANG Dongkang[#], XIA Mengyang, ZHONG Binglin, WU Qianqian,
WANG Lin, YANG Xuyong^{*}, WANG Sheng^{*}

(Key Laboratory of Advanced Display and System Applications, Ministry of Education,
Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Quantum dot (QD) light-emitting diodes (QLEDs) are regarded as promising candidates for next-generation display and lighting technologies due to their excellent optoelectronic properties. However, the performance of blue QLEDs still lags far behind green and red counterparts, which seriously hinders the commercialization of QLED full-color displays. The main challenges arise from the deep valence band energy level of blue QDs, which leads to a large hole injection barrier at the QD/hole-transport layer (HTL) interface, as well as the insulating nature of long-chain oleic acid ligands that hinder charge transport. Moreover, the small energy offset between the core and shell materials in blue QDs facilitates carrier trapping at surface defect states, resulting in non-radiative recombination and thus reducing device efficiency. In this work, we introduce a multifunctional ligand, benzylhydroxylamine hydrochloride (BHACl), to modify the surface of blue QDs. The BHACl molecules replace the native long-chain oleic acid ligands, significantly improving the carrier transport within QD films. Meanwhile, the NH_3^+ groups effectively passivate surface sulfur dangling bonds, suppressing non-radiative recombination. In addition, the large dipole moment of BHACl upshifts the QD energy levels, thereby reducing the hole injection barrier. Benefiting from these synergistic effects, the fabricated blue QLEDs exhibit an external quantum efficiency (EQE) of 19.2%, a peak luminance of $8\,986\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, and an operational lifetime of 18 170 h at an initial luminance of $100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, representing substantial improvements over the control devices.

Key words: quantum dot light-emitting diodes; multifunctional ligand; carrier transport; external quantum efficiency

1 引言

半导体量子点(QD)具有色纯度高、发射波长可调、荧光量子产率(PLQY)高以及可低成本溶液加工等优点,因此基于QD的发光二极管(QLED)被认为是下一代显示技术的有力候选者^[1-11]。目前,红、绿QLED的最高外量子效率(EQE)已分别达到38.2%^[12]和29.2%^[13],工作寿命($T_{95}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$)分别达到72 968 h^[14]和24 800 h^[15],满足商业化指标要求。然而蓝光QLED在效率和工作寿命上仍显著落后于红、绿光QLED^[4,16-17],已成为制约QLED全彩显示技术发展的关键瓶颈。

蓝光QDs性能受限的主要原因在于其表面与能级特性。一方面,与红、绿色QDs相比,蓝光QDs较宽的带隙导致核与ZnS壳层之间的势垒更小,载流子容易隧穿到表面,被缺陷捕获^[16]。另一方面,蓝光QD的价带能级深,与空穴传输层存在较大的势垒,导致器件空穴注入效率低。此外,QD表面的长链油酸(OA)配体阻碍了载流子传输。这些问题最终降低了器件效率和运行稳定性^[18-20]。表面配体不仅维持了QD的胶体稳定性,同时对QD的光学和电学性质具有关键的调控作用。Zou等人使用硫醇配体钝化QD的表面缺陷^[21]。三星电子Jang等人采用己酸配体(HA)^[22]及 ZnCl_2 ^[16]取代QD表面的OA,通过缩

短烷基链长度提升了电荷传输性能。Shen等利用油胺配体钝化量子点的缺陷,减少非辐射复合损失^[15]。然而,现有策略中所采用的配体功能较为单一,往往难以兼顾缺陷钝化与能级调控。因此,开发具有多重功能的表面配体,同时实现缺陷钝化与空穴注入效率提升,成为实现高性能蓝光QLED的关键途径。

我们采用盐酸苄基羟胺(BHACl)来修饰蓝光量子点。 Cl^- 离子部分取代长链OA配体,而有机 NH_3^+ 基团钝化量子表面裸露的硫离子,减少深能级缺陷。此外,BHACl分子的偶极特性,使蓝色QD的能级向上移动,降低了空穴传输层(HTL)与QD层的界面势垒,从而促进了空穴注入,改善载流子平衡。基于BHACl修饰的QD制备的蓝色QLED实现了19.2%的EQE和 $28\,237\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 的亮度。在初始亮度为 $100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 的条件下,工作寿命 T_{50} (亮度降低到50%的时间)为8 986 h,以上性能明显优于对照器件。

2 实验

2.1 实验药品

无水乙醇($\geq 99\%$)、氯苯(99.8%)、正己烷($\geq 99\%$)和正辛烷($\geq 99\%$)购自Acros公司,BHACl(97%)购自Alfa公司;PEDOT:PSS购自西安宝莱特光电科技有限公司;PF8Cz购自东莞伏安光电科技有限公司。ZnMgO纳米颗粒(NPs)及ZnCdSe/ZnS QDs购自浙江臻纳科技有限公司。

2.2 实验过程

BHACl配体溶液的制备:称量2 mmol的BHACl粉末,将其加入5 mL的无水乙醇中。将配制的溶液放在磁力搅拌器上,设定温度为 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 、转速为800 r/min,直到溶液搅拌到澄清的状态,停止搅拌待用。

ZnCdSe/ZnS QDs的配体交换:向含有60 mg QDs的环己烷溶液中加入 $20\text{ }\mu\text{L}$ BHACl溶液,将其放置于磁力搅拌加热台上,设置温度为 $80\text{ }^\circ\text{C}$,搅拌30 min。随后将配体交换后QDs的环己烷溶液加入15 mL正己烷和无水乙醇(1:4)混合物,以8 000 r/min离心法净化3次,持续3 min。最后将纯化后的量子点分散在正辛烷中。

本文制备的QLED均采用氧化铟锡(ITO)/

PEDOT:PSS/PF8Cz/QDs/ZnMgO/Al的结构。首先将ITO基板依次放在去污液、去离子水、丙酮和异丙醇中超声清洗20 min。使用氮气吹干基底后,经氧等离子体处理15 min以提升表面能和功函数,有利于空穴注入与薄膜成膜质量。处理后,在空气环境下以3 000 r/min转速旋涂PEDOT:PSS溶液40 s, $150\text{ }^\circ\text{C}$ 下退火20 min形成均匀薄膜,随后将样品转入氮气手套箱中以沉积其他功能层。将浓度为8 mg/mL的PF8Cz氯苯溶液以3 000 r/min旋涂40 s,并在 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 下退火15 min。之后将浓度为15 mg/mL的蓝光QDs(溶于辛烷)以3 000 r/min旋涂40 s,并在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 下热处理10 min。然后使用30 mg/mL的ZnMgO溶液以2 000 r/min旋涂40 s,于 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 退火20 min。最后,将器件置于真空蒸镀系统中,在低于 $1.0\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 的真空条件下沉积100 nm厚的铝电极,从而完成器件的制备过程。

2.3 测试与表征

使用Edinburgh FLS920 PL光谱仪测量PL、PLQY及PL寿命。使用JEM2010(JEOL)透射电子显微镜进行TEM测试,且在200 kV电压下成像。使用吸收红外光谱仪(VERTEX 70)进行傅里叶变换红外(FT-IR)光谱。Perkin-Elmer PHI5600仪器测试X射线光电子能谱(XPS)。采用配备氦放电灯He(I)紫外辐射源(21.22 eV)的Thermo Scientific ESCALAB 250 XI设备进行紫外光电子能谱(UPS)测量。低温恒温器(Janis ST-100)和液氮用于温度依赖性光致发光测量。使用Agilent 4282 A精密LCR仪表进行C-V测量。采用Keithley 2400源测量仪和积分球系统研究QLED性能。使用广州晶合设备有限公司老化寿命测试仪进行寿命测试。

3 结果与讨论

图1(a)展示了对照样品(pristine QD)和经BHACl修饰的QDs(BHACl-QD)的配体交换过程。原有的OA配体被 Cl^- 取代,同时 BHA^+ 能够与量子点表面的硫悬空键配位,实现有效钝化。

图1(b)显示了pristine QD和BHACl-QD的PL对比。两者PL发射峰均位于456 nm,但

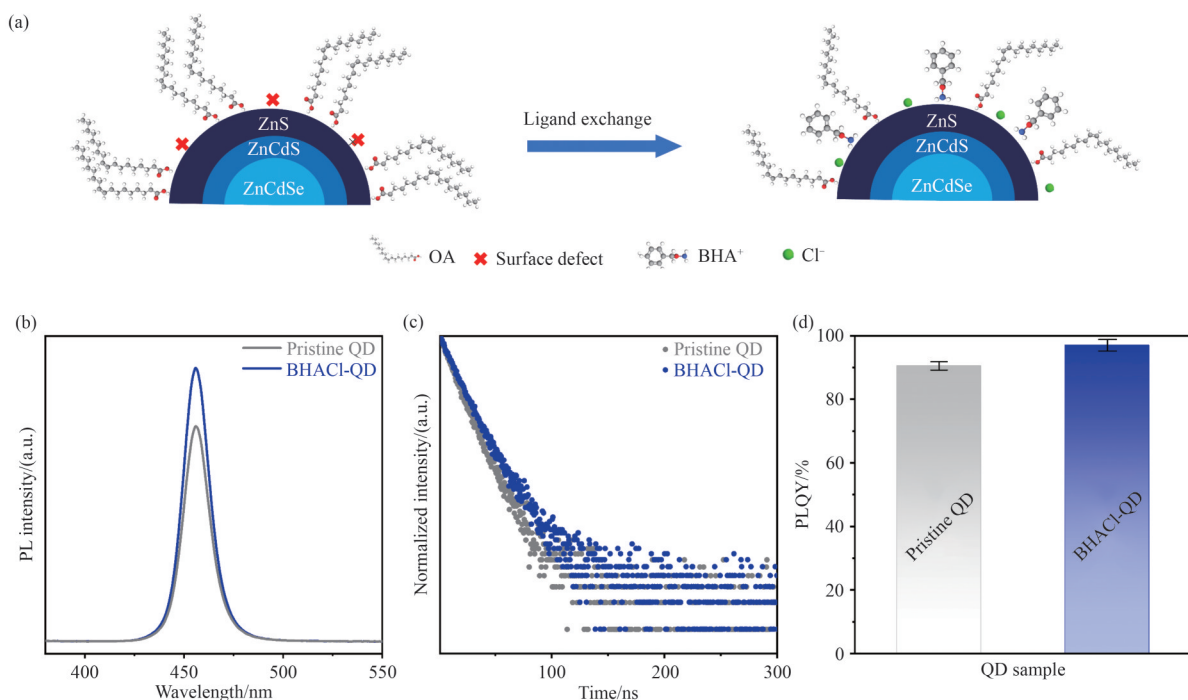


图1 (a)配体交换示意图;QD配体交换前后的(b)PL光谱、(c)TRPL光谱和(d)PL QY对比。

Fig. 1 (a) Schematic illustration of ligand exchange process; (b) PL spectra, (c) TRPL spectra and (d) PL QY of both QDs.

BHACl-QD 的 PL 发射显著增强。瞬态 PL (TRPL) 光谱显示, BHACl-QD 具有更长的 PL 寿命 (13.4 ns) (图 1(c)), 表明 BHACl 可以有效钝化量子点的表面缺陷, 增强载流子辐射复合^[23-24]。此外, QDs 经过 BHACl 处理过后, PL QY 从 90.5% 增加到 97%, 表明 QDs 的非辐射复合被抑制 (图 1(d)), 与 TRPL 的结果一致^[23]。

使用透射电子显微镜 (TEM) 研究配体交换前后 QDs 形态的变化 (图 2(a, b)), pristine QD 的长链 OA 配体对周围 QDs 有排斥作用, 使 QD 的间隔更宽。相比之下, BHACl-QD 之间的距离缩短。傅里叶变换红外 (FT-IR) 光谱 (图 2(c)) 观察到在 $1\,120\text{ cm}^{-1}$ 处 C—N 键的特征信号峰, 以及 OA 的 C=O 特征峰强度显著降低, 表明 OA 配体被 BHACl 部分取代^[25-26]。X 射线光电子能谱 (XPS) 显示, BHACl-QD 在约 404 eV 处有明显的 N 1s 峰, 约 198 eV 处有明显 Cl 2p 峰, 而 pristine QD 在该范围内没有显示出可观察到的信号 (图 2(d, e)), 进一步说明 BHACl 配体被引入量子点的表面, 与 FT-IR 结果相一致。此外, BHACl-QD 的 Zn 2p 峰的位置向更高的结合能移动, 这与 BHACl 钝化了表面缺陷有关

(图 2(f))^[20]。

我们进一步研究了 BHACl 配体交换前后 QD 的温度依赖的荧光特性 (图 3(a, b))。随着温度的升高, 两个样品都表现出 PL 光谱的红移和半高全宽 (FWHM) 的展宽, 这主要归因于带隙收缩和激子-声子耦合效应。随温度相关的相对发射强度拟合为:

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + A e^{-E_b/k_B T}}, \quad (1)$$

其中: I_0 是 0 K 时的强度, E_b 是激子结合能, k_B 是玻尔兹曼常数^[27]。图 3(c) 显示了激子结合能的拟合结果, 经计算 BHACl-QD 表现出更高的激子结合能 ($E_b = 94.52\text{ meV}$), 高于 pristine QD ($E_b = 64.34\text{ meV}$)。这表明 BHACl 配体交换后, QDs 的载流子可以更有效地实现辐射复合, 抑制了载流子与表面缺陷的耦合作用, 从而获得高发光特性^[28]。

为了进一步研究载流子注入行为, 我们开展了单空穴器件 (HOD) 的电流密度-电压 (J - V) 特性研究 (图 4(a)), 结果表明短链 BHACl 配体增强了空穴注入能力。QLED 的电容-电压 (C - V) 测试可以揭示器件中电荷积累情况。当施加电

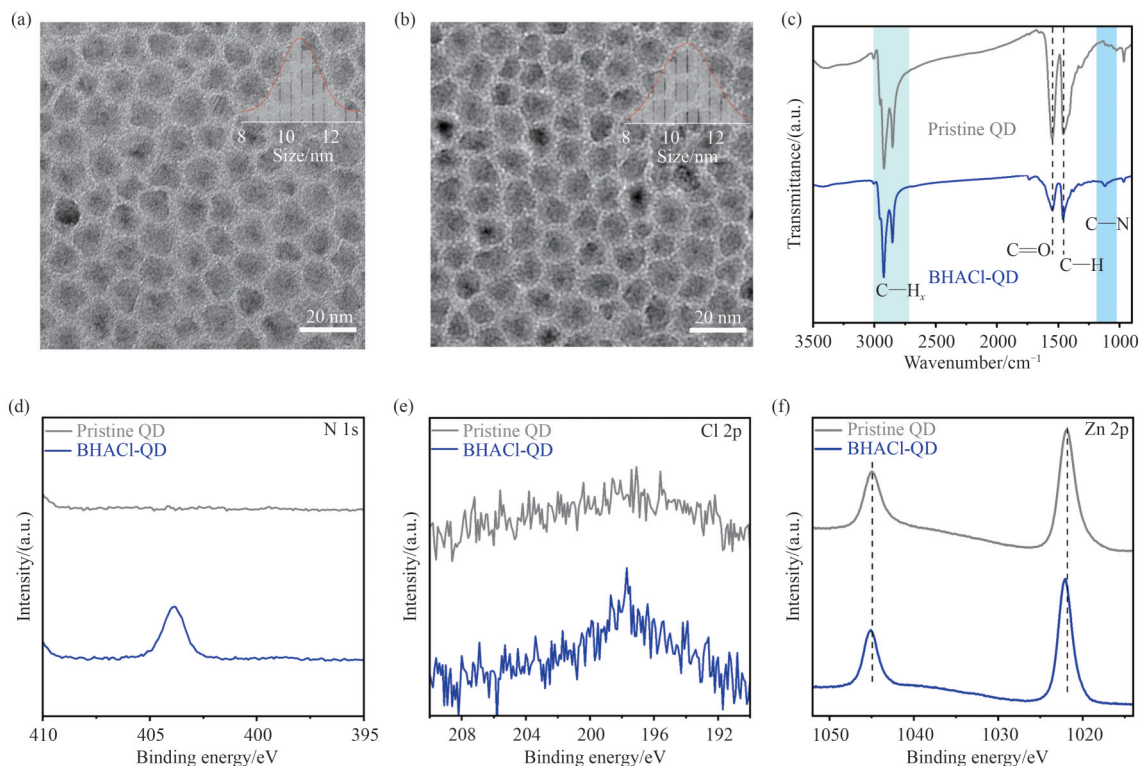


图2 (a)pristine QD 和(b)BHACl-QD 的 TEM 图像;pristine QD 和 BHACl-QD 的(c)FT-IR 光谱对比,(d) N 1s、(e)Cl 2p 和(f)Zn 2p 的 XPS 光谱对比。

Fig. 2 TEM images of (a) pristine QD and (b) BHACl-QD; (c) Comparison of FT-IR spectra, XPS spectra of (d) N 1s, (e) Cl 2p and (f) Zn 2p for pristine QD and BHACl-QD.

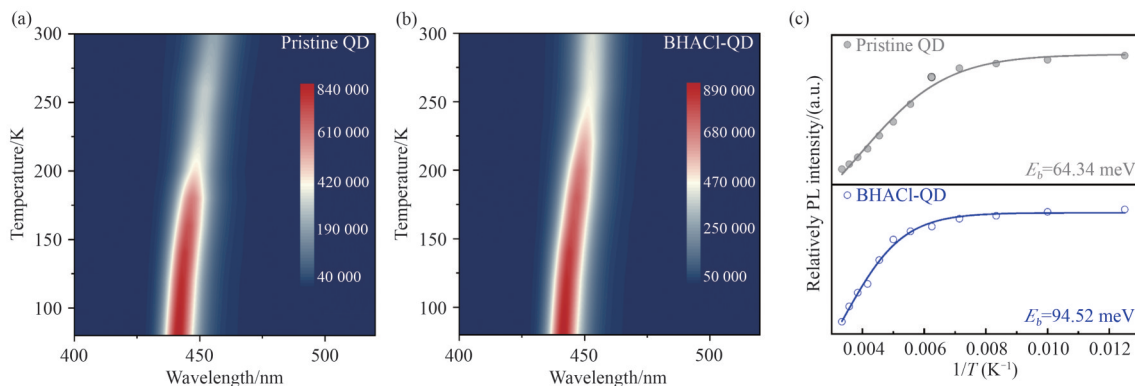


图3 (a)pristine QD 和(b)BHACl-QD 的温度依赖性 PL 光谱;(c)PL 强度随温度的函数关系。

Fig. 3 Temperature-dependent PL spectra of (a) pristine QD and (b) BHACl-QD; (c) Temperature-dependent integrated PL intensity of pristine QD and BHACl-QD.

压为 3 V 以上时,两个器件的电容迅速增加,表明电子开始积累;随后电容开始减小,表明空穴开始注入并与积累的电子复合。值得注意的是,基于 BHACl-QD 的器件较 pristine QD 的电容更小(图 4(b)),表明电荷积累更少,载流子注入更平衡^[29]。此外,紫外光电子能谱(UPS)显示,BHACl-

QD 的价带最大值(VBM)从 -6.7 eV 上移到 -6.3 eV,导带最小值(CBM)从 -3.8 eV 上移到 -3.5 eV(图 4(c~f))。这种能级的上移源自于偶极分子修饰的 QDs 的特征,有助于降低空穴注入势垒^[30]。

为了评估 BHACl 配体对 QLED 性能的影响,

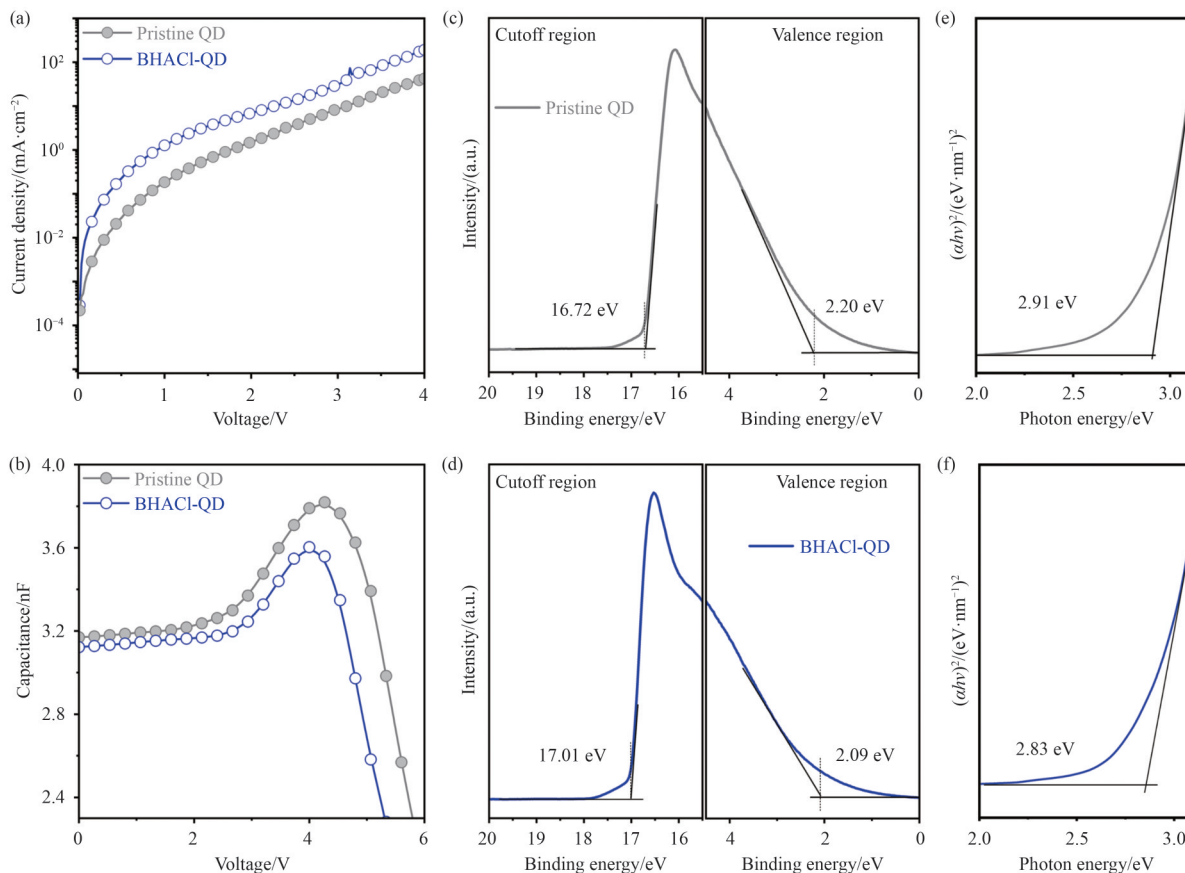


图 4 (a)基于pristine QD 和BHACl-QD的单空穴器件的 J - V 特性曲线;(b)基于pristine QD 和BHACl-QD的QLED的 C - V 特性曲线;(c)pristine QD 和(d)BHACl-QD的次级电子截止和价带边缘区域的UPS光谱; $(ah\nu)^2$ 与入射光子能量($h\nu$)对(e)pristine QD 和(f)BHACl-QD的依赖性。

Fig. 4 (a) J - V characteristic curves of hole-only devices based on the pristine QD and BHACl-QD; (b) C - V characteristic curves of QLED devices based on the pristine QD and BHACl-QD; UPS spectra of the secondary electronic cutoff and valence band edge regions for (c) the the pristine QD and (d) BHACl-QD; Dependence of $(ah\nu)^2$ versus incident photon energy ($h\nu$) for (e) the pristine QD and BHACl-QD.

我们采用氧化铟锡(ITO)/聚(3,4-乙烯二氧噻吩)-聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)/PF8Cz/QDs/氧化锌镁(ZnMgO)/铝(Al)的结构制备标准QLED器件(图5(a))。器件能级示意图如图5(b)所示。在5 V电压下工作的pristine QD和BHACl-QD基QLED都表现出相似的电致发光(EL)光谱,峰位为462 nm,FWHM为21 nm(图5(c))。BHACl-QD的QLED显示出更高的EL强度,主要归因于更有效的电子-空穴复合,图5(c)插图BHACl-QD基QLED的发光实物图。图5(d~f)显示了pristine QD和BHACl-QD基QLED的 J - V 、亮度-电压(L - V)和外部量子效率-电流密度(EQE- J)特性曲线。BHACl-QD基QLED的峰值EQE为19.2%,最大亮度为

$28,237 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$,明显优于pristine QD基器件(EQE为10.27%,最大亮度为 $9804 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$)。图5(g)表明器件具有良好的可重复性。我们通过监测QLED在恒定电流密度下的亮度演变来评估器件的运行稳定性(图5(h))。BHACl-QD基QLED器件的工作半衰期(T_{50})显著改善,由pristine QD基器件的16.1 h提升至40.9 h。初始亮度为 $2000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$,根据 $n=1.8$ 的经验加速度系数,相当于 $100 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时的8.986 h,比对照器件长2倍以上($3537 \text{ h}@100 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$)。器件稳定性的显著提高归因于BHACl分子减少了HTL-QD界面处的势垒,增强了空穴注入并减轻了电子积累。

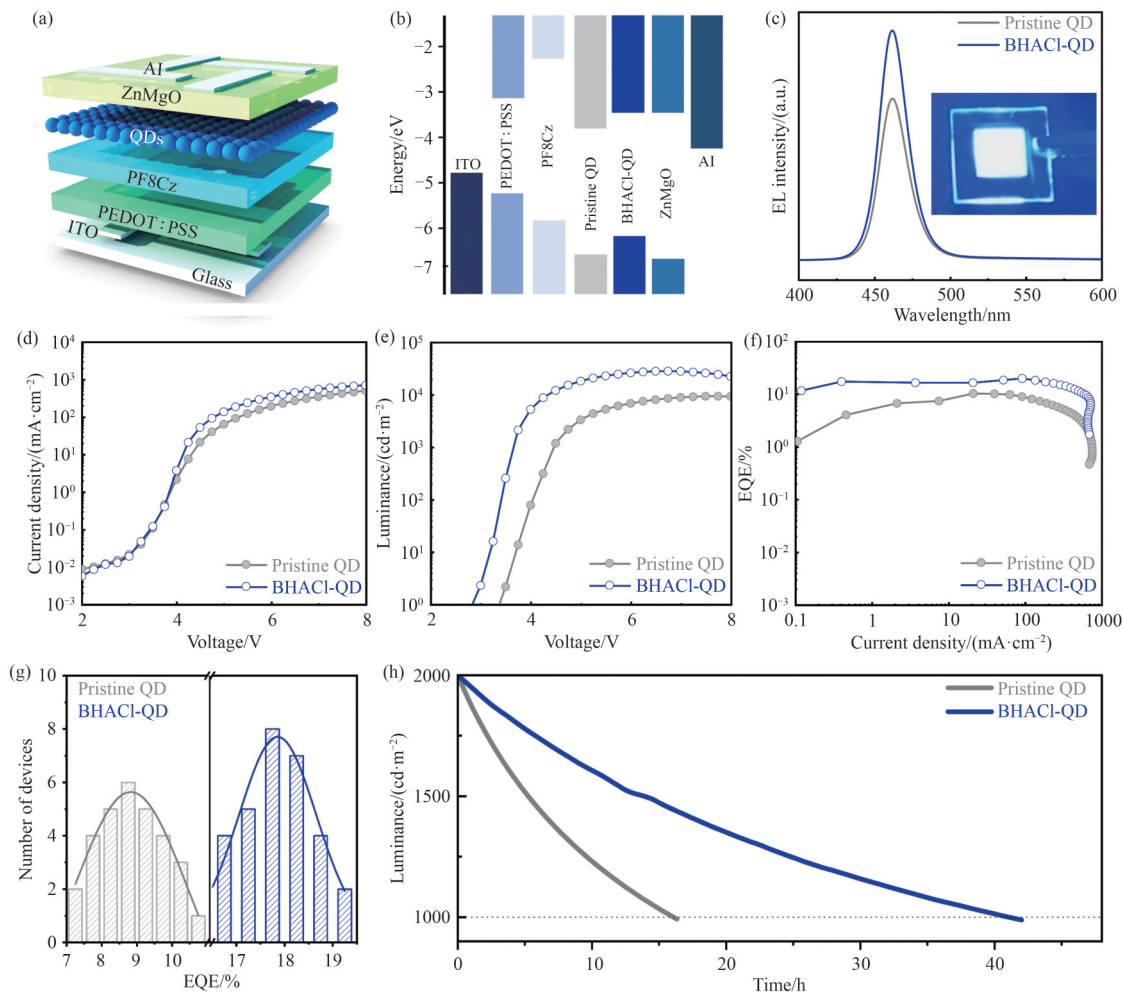


图5 (a)QLED的器件结构;(b)器件能级图;(c)pristine QD和BHACl-QD基QLED的EL光谱,插图: BHACl-QD的QLED发光实物图;两种QLED的(d) J - V 、(e) L - V 和(f)EQE- J 特性曲线;(g)30个QLED器件的效率直方图;(h)两种QLED的使用寿命。

Fig. 5 (a) Device structure scheme of standard QLED; (b) Device energy level diagram; (c) EL spectra of QLEDs based on pristine QD and BHACl-QD, inset: Optical image of the BHACl-treated QLED under operation; (d) J - V , (e) L - V and (f) EQE- J characteristics curves of the two types of QLEDs; (g) Efficiency histogram of 30 QLED devices; (h) Operational lifetimes of both QLEDs.

4 结 论

本文采用多功能配体BHACl修饰蓝光QD显著提升了QLED器件性能。BHACl取代长

链OA配体增强了载流子的传输,钝化表面硫缺陷,使QD能级上移减少了空穴注入势垒。最终实现了19.2%的EQE和8 986 h的器件寿命。

参 考 文 献:

- [1] COLVIN V L, SCHLAMP M C, ALIVISATOS A P. Light-emitting diodes made from cadmium selenide nanocrystals and a semiconducting polymer [J]. *Nature*, 1994, 370(6488): 354-357.
- [2] CHEN O, ZHAO J, CHAUHAN V P, *et al.* Compact high-quality CdSe-CdS core-shell nanocrystals with narrow emission linewidths and suppressed blinking [J]. *Nature Materials*, 2013, 12(5): 445-451.
- [3] CAO F, WANG S, WANG F J, *et al.* A layer-by-layer growth strategy for large-size InP/ZnSe/ZnS core-shell

- quantum dots enabling high-efficiency light-emitting diodes [J]. *Chemistry of Materials*, 2018, 30(21): 8002-8007.
- [4] DENG Y Z, PENG F, LU Y, *et al.* Solution-processed green and blue quantum-dot light-emitting diodes with eliminated charge leakage [J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(7): 505-511.
- [5] WU Q Q, GONG X W, ZHAO D W, *et al.* Efficient tandem quantum-dot LEDs enabled by an inorganic semiconductor-metal-dielectric interconnecting layer stack [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(4): 2108150.
- [6] SHEN H B, GAO Q, ZHANG Y B, *et al.* Visible quantum dot light-emitting diodes with simultaneous high brightness and efficiency [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(3): 192-197.
- [7] WU Q Q, CAO F, YU W K, *et al.* Homogeneous ZnSeTeS quantum dots for efficient and stable pure-blue leds [J]. *Nature*, 2025, 639(8055): 633-638.
- [8] ROTA M B, KRIEGER T M, BUCHINGER Q, *et al.* A source of entangled photons based on a cavity-enhanced and strain-tuned GaAs quantum dot [J]. *eLight*, 2024, 4(1): 13.
- [9] 王艳林, 曹松, 余春燕, 等. LiCl掺杂 PEDOT:PSS 提高蓝光量子点发光二极管的性能[J]. 液晶与显示, 2024, 39(6): 771-780.
- WANG Y L, CAO S, YU C Y, *et al.* Performance enhancement of blue quantum dot light-emitting diodes via LiCl doped PEDOT:PSS [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(6): 771-780. (in Chinese)
- [10] 李恭明, 蔡俊虎, 赖文宗, 等. 双短链配体调控提升 MAPbBr₃ 量子点性能及广色域 LED 显示应用[J]. 发光学报, 2025, 46(1): 1-11.
- LI G M, CAI J H, LAI W Z, *et al.* Performance enhancement of MAPbBr₃ perovskite quantum dot for wide color gamut LED via double short-chain ligand modification [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2025, 46(1): 1-11. (in Chinese)
- [11] 李力, 耿会娟, 张天昊, 等. 基于 PbS 量子点光电探测器的脉搏检测系统研究[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(5): 1236-1243.
- LI L, GENG H J, ZHANG T H, *et al.* Research on pulse detection system based on PbS quantum dot photodetector [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 1236-1243. (in Chinese)
- [12] LIU B C, LIN Q Z, SUN S Q, *et al.* Tailored large-particle quantum dots with high color purity and excellent electroluminescent efficiency [J]. *Science Bulletin*, 2025, 70(6): 905-913.
- [13] LI M Q, LI R, WU L J, *et al.* Ultrabright and stable top-emitting quantum-dot light-emitting diodes with negligible angular color shift [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 5161.
- [14] LIU Y T, SUN Y Y, YAN X H, *et al.* Realizing low voltage-driven bright and stable quantum dot light-emitting diodes through energy landscape flattening [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 50.
- [15] ZHAO L L, ZHANG H, WANG L, *et al.* Bright and stable green quantum dot light-emitting diodes via increasing electron concentration [J]. *Nano Research*, 2025, 18(9): 94907978.
- [16] KIM T, KIM K H, KIM S, *et al.* Efficient and stable blue quantum dot light-emitting diode [J]. *Nature*, 2020, 586(7829): 385-389.
- [17] ZHANG W J, LI B, CHANG C, *et al.* Stable and efficient pure blue quantum-dot LEDs enabled by inserting an anti-oxidation layer [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 783.
- [18] SHEN H B, BAI X W, WANG A Q, *et al.* High-efficient deep-blue light-emitting diodes by using high quality Zn_{0.5}Cd_{0.5}S/ZnS core/shell quantum dots [J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(16): 2367-2373.
- [19] GHORBANI A, CHEN J F, CHUN P, *et al.* Changes in hole and electron injection under electrical stress and the rapid electroluminescence loss in blue quantum-dot light-emitting devices [J]. *Small*, 2024, 20(1): 2304580.
- [20] CHO H, PARK S, SHIN H, *et al.* Highly efficient deep blue Cd-free quantum dot light-emitting diodes by a p-type doped emissive layer [J]. *Small*, 2020, 16(40): 2002109.
- [21] WANG L S, LV Y, LIN J, *et al.* Surface organic ligand-passivated quantum dots: toward high-performance light-emitting diodes with long lifetimes [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(7): 2483-2490.
- [22] WON Y H, CHO O, KIM T, *et al.* Highly efficient and stable InP/ZnSe/ZnS quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nature*, 2019, 575(7784): 634-638.
- [23] FEI W L, LI S N, XIE J C, *et al.* X-type ligands effect on the operational stability of heavy-metal-free quantum dot

- light-emitting diodes [J]. *Nano Letters*, 2024, 24(44): 14066-14072.
- [24] ZHANG C X, WANG S, LI X M, *et al.* Core/Shell perovskite nanocrystals: synthesis of highly efficient and environmentally stable FAPbBr₃/CsPbBr₃ for led applications [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(31): 1910582.
- [25] WANG R L, SHANG Y Q, KANJANABOOS P, *et al.* Colloidal quantum dot ligand engineering for high performance solar cells [J]. *Energy & Environmental Science*, 2016, 9(4): 1130-1143.
- [26] ZHAO F, DUAN H W, LI S N, *et al.* Iodotrimethylsilane as a reactive ligand for surface etching and passivation of perovskite nanocrystals toward efficient pure-red to deep-red LEDs [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(46): e202311089.
- [27] SHI Z F, LI Y, ZHANG Y T, *et al.* High-efficiency and air-stable perovskite quantum dots light-emitting diodes with an all-inorganic heterostructure [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(1): 313-321.
- [28] WANG Y K, WANG S, LI R, *et al.* Quantum-confined perovskite nanocrystals enabled by negative catalyst strategy for efficient light-emitting diodes [J]. *Small*, 2024, 20(44): 2402825.
- [29] QU X W, MA J R, WANG K, *et al.* Characteristic voltages and times from capacitance-voltage analysis of quantum dot light-emitting diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 124(26): 263503.
- [30] CAO W R, XIANG C Y, YANG Y X, *et al.* Highly stable QLEDs with improved hole injection via quantum dot structure tailoring [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2608.

作者简介:



王源坤,男,博士研究生,2024年于新疆大学获得硕士学位,主要从事量子点发光二极管制备及性能的研究。E-mail: ykwang@shu.edu.cn



杨绪勇,男,博士,教授,2014年于新加坡南洋理工大学获得博士学位,主要从事光电材料与器件的研究。E-mail: yangxy@shu.edu.cn



张东康,男,硕士研究生,2024年于山东交通学院获得学士学位,主要从事量子点材料制备及性能的研究。E-mail: 853223639@shu.edu.cn



王胜,男,博士,讲师,2017年于吉林大学获得博士学位,主要从事半导体材料合成及器件性能的研究。E-mail: nanocrystal@shu.edu.cn