

文章编号: 1000-7032(2026)05-0828-07

基于乙二醇亚相 Langmuir-Blodgett 技术的高性能量子点发光二极管

池瑾轩¹, 谢潇婷¹, 刘 洋^{2*}, 李福山^{1,3*}

(1. 福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福建师范大学 海峡柔性电子(未来科技)学院(研究院), 福建 福州 350117;

3. 中国福建省光电信息科技创新实验室, 福建 福州 350108)

摘要: 采用乙二醇(EG)替代水作为 Langmuir-blodgett(LB)技术的亚相, 制备了高质量量子点薄膜, 以解决传统 LB 工艺中水相接触导致的量子点性能退化及器件漏电流问题。通过优化 LB 成膜参数, 获得了均匀致密的量子点单层膜, 并以其作为发光层构建了红色 QLED 器件。使用 EG 亚相有效避免了水分残留对量子点器件性能的负面影响, 同时优化后的 LB 膜有效抑制了器件的漏电流, 表现出优异的电致发光性能: 在 630 nm 处发射半峰宽 22 nm 的红光, 最大外量子效率达 26.1%, 且在 1 000 cd·m⁻² 初始亮度下 T_{95} 寿命提升至 3 272 h, 远优于传统水相 LB 器件和旋涂器件。研究表明, EG 亚相的 LB 技术通过抑制界面缺陷和漏电流, 为实现高效率、长寿命的量子点显示器件提供了可行的工艺路径。

关键词: 量子点发光二极管(QLEDs); 朗缪尔-布洛杰特技术; 单层量子点

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20260023

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260023

High-performance Quantum Dot Light-emitting Diode Based on Ethylene Glycol Subphase Langmuir-Blodgett Technique

CHI Jinxuan¹, XIE Xiaoting¹, LIU Yang^{2*}, LI Fushan^{1,3*}

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Institute of Flexible Electronics, Strait Institute of Flexible Electronics (SIFE Future Technologies), Fuzhou 350117, China;

3. Fujian Science and Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350108, China)

* Corresponding Authors, E-mail: ifeyliu@fjnu.edu.cn; fsli@fzu.edu.cn

Abstract: This study introduces ethylene glycol (EG) as an alternative subphase to water in the Langmuir-Blodgett (LB) technique for fabricating high-quality quantum dot (QD) films, aiming to overcome the limitations of conventional aqueous-phase LB processes, such as QD degradation and increased device leakage current. By optimizing LB deposition parameters, a uniform and densely packed monolayer QD film was achieved and employed as the emitting layer in red QLEDs. The use of an EG subphase effectively prevents water-induced erosion of QDs, while the optimized LB film significantly suppresses leakage current. As a result, the device exhibits outstanding electroluminescence performance: red emission peaked at 630 nm with a narrow full width at half maximum of 22 nm, a maximum external quantum efficiency of 26.1%, and an operational lifetime (T_{95}) of 3 272 h at an initial luminance of 1 000 cd·m⁻², markedly surpassing both conventional aqueous-phase LB devices and spin-coated reference devices. These findings demonstrate that the EG subphase LB strategy, through the mitigation of interfacial defects and leakage pathways, offers a promising fabrication route toward high-efficiency and long-lifetime QLEDs.

Keywords: quantum-dot light-emitting diodes (QLEDs); Langmuir-Blodgett technique; monolayer quantum dot

收稿日期: 2026-01-22; 修订日期: 2026-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(52572156)

Supported by National Natural Science Foundation of China (52572156)

1 引言

胶体量子点(QD)在显示领域已展现出显著的产业化前景。量子点在发光效率、色纯度与器件寿命等关键性能上均已达到或接近商业化应用水平^[1-3]。量子点发光二极管(QLED)凭借其高外量子效率、窄发射线宽、宽色域以及已得到验证的规模化制备能力,成为下一代高性能显示技术的有力候选者^[4-11]。然而,传统沉积工艺(如旋涂、喷墨打印)所制备的量子点薄膜容易发生无序堆叠,不可避免会引入大量缺陷,进而在外加偏压下产生显著漏电流,制约了器件性能的进一步提升^[12]。

采用 Langmuir-Blodgett(LB)技术制备有序紧密排列的量子点薄膜,可以有效改善量子点的无序堆叠问题,提升量子点薄膜质量^[13-17]。LB技术在QLED制备中的核心优势体现在其能够实现量子点单分子层的可控自组装,从而显著提升薄膜的结构有序性与致密性。该技术通过调控气-液界面的表面压力,引导量子点形成高度规整的二维阵列,有效减少由无序堆叠引起的薄膜缺陷与孔隙。这种结构优化不仅显著降低了器件的漏电流,也为电荷的高效注入与复合提供了理想载体,从而整体提升QLED的光电性能与工作稳定性^[18-19]。例如,Zhao等利用LB技术系统调节表面压力,成功实现了量子点在亚相界面上的高度有序排列,克服了传统旋涂法中常见的聚集与孔洞问题,制备出大面积、超均匀的单层量子点薄膜,为高性能QLED奠定了基础^[20]。

进一步地,Meng等将LB与转移印刷技术相结合,提出了Langmuir-Blodgett Transfer-Printing(LB-TP)集成工艺,实现了微米级量子点图案的高保真、高精度转印,在此基础上成功制备出兼具高分辨率与优异发光性能的QLED器件,为推动该技术在超高分辨率显示中的应用提供了重要路径^[21]。LB技术不仅能够通过界面工程优化量子点薄膜的形态与电学特性,还能与图案化工艺灵活集成,在提升QLED器件性能的同时,支持其向高像素密度、高功能集成方向演进,显示出良好的技术兼容性与应用潜力。然而,由于LB技术通常以水作为亚相,对于水氧敏感的量子点材料而言,限制了器件性能及寿命。因此,如何在制备高质量的量子点薄膜的同时避免量子点与水相的接触,对于器件性能的提升至关重要。

本工作基于LB技术,针对传统水基亚相对QLED器件性能与稳定性的潜在影响,创新性地采用乙二醇(EG)作为成膜亚相,避免了功能层与水的接触,从而显著提升了器件的性能与寿命。通过系统优化成膜参数,我们成功制备出高性能QLED器件,其外部量子效率(EQE)达到26.1%,在 $1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 初始亮度下器件亮度降到95%的时间(T_{95})提升至3\,272 h。该结果证实了通过亚相工程避免水接触能够有效优化器件的综合性能。

2 实验

2.1 材料准备

聚3,4-乙烯二氧噻吩:聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)、聚(9,9-二辛基芴-共-N-(4-丁基苯基)二苯胺)(TFB)购于西安浴日光能有限公司。ZnMgO纳米颗粒购自广东普加福光电科技有限公司。正己烷(99.5%)购自阿拉丁。氯苯(99.8%)购自Sigma Aldrich。红色CdSe/ZnS量子点来自合肥福纳科技公司。所有的化学品都直接使用,无需进一步净化。实验前,需要将TFB溶于氯苯中配成 $8\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的溶液。

2.2 QLED制备

ITO玻璃在使用前需要分别用去离子水、丙酮、异丙醇分别超声清洗20 min以去除表面杂质,然后将ITO基板放入UV-ozone中照射20 min以增加表面亲水性。接着,按照 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速旋涂30 s以将PEDOT:PSS沉积在ITO玻璃上,并在 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下加热20 min。然后,将TFB按照 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速旋涂30 s以沉积在PEDOT:PSS上,并在 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下加热20 min。接下来,配制 $5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的量子点溶液(正己烷溶剂),利用拉膜机,分别以EG或水为亚相,在气-液界面组装形成单层量子点薄膜(EG相成膜膜压范围: $8\sim 13\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$)。随后,采用水平提拉法,将基板平行贴近量子点薄膜,待接触稳定后缓慢抬升,从而将量子点薄膜完整转移至TFB表面;作为对比,旋涂法制备的量子点薄膜则是将浓度为 $20\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的量子点正辛烷溶液以 $2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速旋涂30 s沉积在TFB上。所有样品在完成QD层沉积后,均在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下热处理5 min。随后,将ZnMgO溶液(乙醇, $25\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)以 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 旋转涂覆30 s,并在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘烤10 min。最后,在约为 $8\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 真空下热蒸发沉积100 nm Ag电极。

3 结果与讨论

3.1 基于LB的QD单层制备与表征

为制备无水接触的量子点LB膜,本研究采用EG作为亚相。该方法在完全避免量子点与水接触的同时,利用EG与量子点溶剂互相正交,使量子点在气-液界面上实现均匀且稳定的铺展。图1(a)展示了EG亚相的量子点LB膜的制备流程。首先将150 mL的EG注入聚四氟乙烯(PTFE)槽中,随后取50 μL 量子点(正己烷, $5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$),逐滴滴加并使其铺展于EG表面。等待10 min使溶剂完全挥发,滑障挤压量子点得到单层均匀有序的薄膜,通过水平提拉法将其转移到目标基板上,随后放置在100 $^{\circ}\text{C}$ 加热台上加热5 min。需要注

意的是,EG与水的表面张力不同,并不能直接采用相同的制膜参数来制备EG亚相的量子点LB膜,而需通过压缩过程中获得的表面压-面积(π -A)等温曲线得到薄膜不同表面压力下的状态,从而确定最佳的制膜参数(图1(b))。图1(b)展示了滑障挤压时量子点薄膜的状态。还未挤压薄膜时,量子点薄膜处于一种无外力作用的二维气相状态,量子点在EG的表面随机分布。随后,当滑障以缓慢的速度挤压该薄膜时,其表面压力会逐渐升高,随着滑障的挤压,量子点彼此接触,量子点薄膜逐渐从气相转变为二维液相。由于紧凑有序的排列方式能使更多粒子在更小的空间内存在,因此,当滑障之间的距离缩小时,量子点会自发地组装成紧凑有序的薄膜。进一步压缩量子点薄膜进

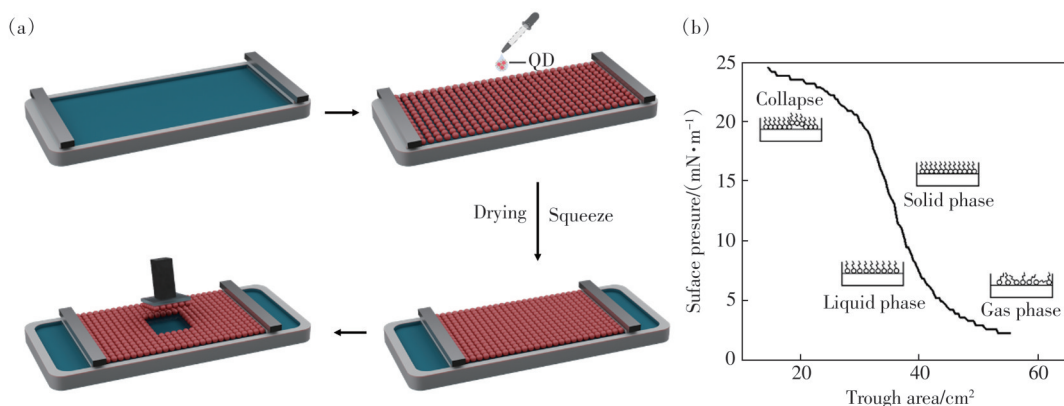


图1 (a)量子点LB膜的制备流程;(b)量子点薄膜在EG亚相上的 π -A曲线

Fig.1 (a)Schematic illustration of fabricating QD films. (b) π -A curves of QD films on EG subphase

入二维固相,此时,量子点已无法自由移动。然而,一旦表面压力超过其所能承受的范围($18\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$),量子点便会发生堆叠^[22]。因此,我们选择在表面压力为 $13\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ 时将量子点转移至目标基板上以形成致密的单层且不会出现堆叠的情况。通过该策略制备的QD薄膜具备均匀且无空隙的形貌。不同工艺制备的量子点薄膜,其原子力显微镜(AFM)图像如图2(a)、(b)所示。旋涂法制备的量子点薄膜均方根粗糙度为 2.8 nm 且有明显的空隙,而EG亚相制备的LB膜均方根粗糙度降低至 1.3 nm ,薄膜的质量得到了极大的提升。此外,如图2(c)、(d)所示,量子点薄膜的扫描电子显微镜(SEM)图像进一步证实了基于旋涂工艺制备的量子点薄膜存在明显的孔洞和缺陷,而采用LB技术制备的量子点薄膜则展现出有序且均匀的表面形貌且SEM图像中量子点边界清晰,证明LB膜上没有EG残留。

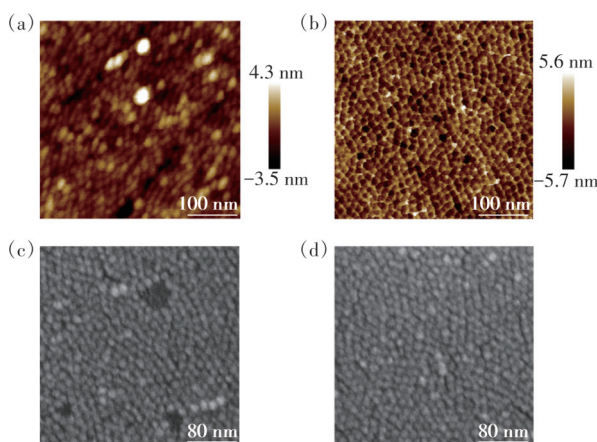


图2 (a)旋涂制备的QD薄膜的AFM图像;(b)LB技术制备的QD薄膜的AFM图像;(c)旋涂制备的QD薄膜的SEM图像;(d)LB技术制备的QD薄膜的SEM图像

Fig.2 (a)AFM image of QD films prepared by spin coating. (b)AFM image of QD films prepared by LB. (c)SEM image of QD films prepared by spin coating. (d)SEM image of QD films prepared by LB

3.2 基于量子点LB膜的QLED制备与表征

在成功制备了以EG为亚相的量子点LB膜的基础上,为进一步提升其在QLED中的性能,我们系统地对成膜过程中的关键参数进行了精细调控。首先,使用不同起始与终止膜压的组合制备QLED并测试其电学性能以确定最佳参数。这两个参数决定了量子点薄膜的致密度与均匀性,过低的膜压会导致薄膜松散使器件漏电流增大,而过高的膜压则会导致量子点薄膜的堆积使器件效率降低。如图3(a)、(b)所示,固定起始膜压为 $8 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$,终止膜压从 $11 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$,逐步提升至 $15 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$,当终止膜压为 $13 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 时器件效率达到最高;随后,如图3(c)、(d)所示,固定终止膜压

为 $13 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$,将起始膜压在 $6 \sim 10 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 范围内调整,结果表明起始膜压为 $8 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 时性能最优。在此基础上,进一步对滑障压缩速度进行了系统优化,测试速度分别为 $0.15, 0.2, 0.25, 0.3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。滑障通过施加横向压力驱使量子点在气-液界面有序组装,因此其压缩速度的调控至关重要。滑障速度过快时量子点缺乏充分时间进行有序自组装,导致量子点之间相互堆叠;而速度过慢则会延长界面暴露时间,使薄膜易受空气中的杂质干扰,进而影响成膜质量。如图3(e)、(f)所示,当滑障压缩的速度为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时器件性能表现最佳。最终确定的最优制膜参数为:起始膜压 $8 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 、终止膜压 $13 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 、滑障压缩速度 $0.20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

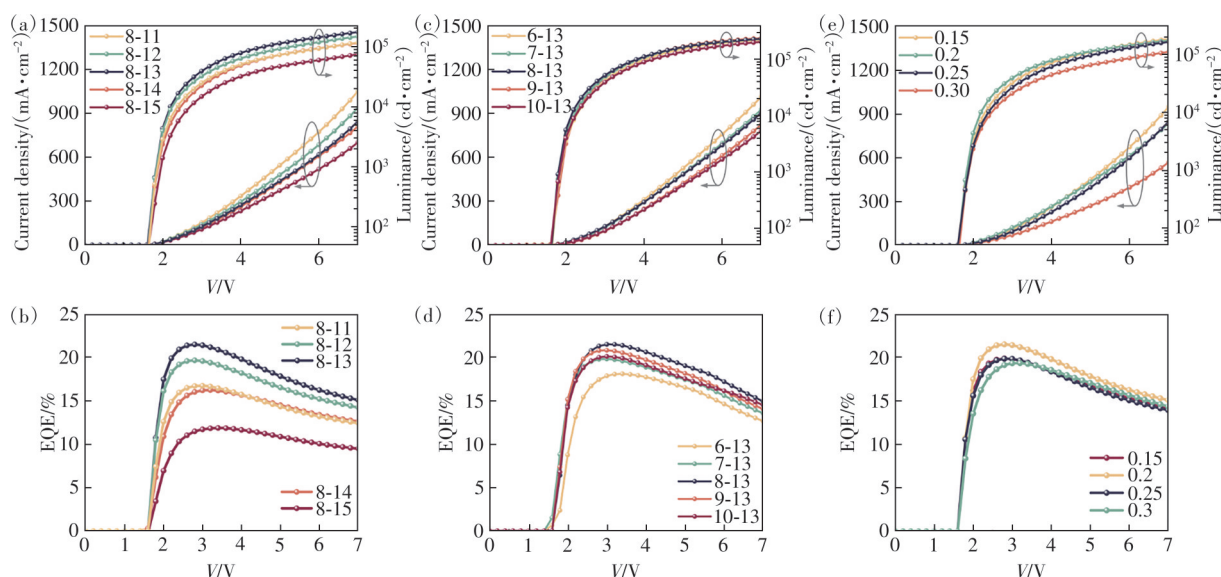


图3 不同制膜参数对器件性能的影响。(a)不同终止膜压下所制备器件的 J - V - L 曲线和(b)其EQE曲线,其中初始膜压保持不变;(c)不同起始膜压下所制备器件的 J - V - L 曲线和(d)其EQE曲线,其中终止膜压保持不变;(e)不同滑障速度下所制备器件的 J - V - L 曲线和(f)其EQE曲线

Fig.3 Influence of different film-forming parameters on device performance. (a) J - V - L curves and (b) EQE curves devices fabricated with different final surface pressures while keeping the initial surface pressure constant. (c) J - V - L curves and (d) EQE curves devices fabricated with different initial surface pressures while keeping the final surface pressure constant. (e) J - V - L curves and (f) EQE curves of the device with different barrier sliding speeds

如图4(a)所示,我们将以最优制膜参数所制备的量子点LB膜作为QLED器件的发光层,并按照ITO/PEDOT:PSS/TFB/QD-LB/ZnMgO/Ag的结构制备了QLED器件。器件的各个功能层的能级排列如图4(b)所示。图4(c)为器件的归一化电致发光光谱(EL),其波峰在 630 nm ,半峰宽为 22 nm ,可以看出利用LB法制备的QLED器件发出的光依旧是标准的红光,且具有窄的半峰宽,说明工艺的改变不会影响到QD的发光特性。且光致发光光谱(PL)中EG亚相制备的QD薄膜的荧光强度

高于水相LB,证明EG亚相避免了QD薄膜因水分残留导致的猝灭。图4(d)对比了EG相LB膜、水相LB膜和旋涂QD膜所制备的QLED器件的 J - V - L 特性曲线,其中旋涂器件由于量子点薄膜的孔洞和缺陷较多,因此需要增加膜厚以抑制漏电流,从而达到较高的EQE。然而,量子点层厚度的增加会引入更高的电阻,导致器件在相同亮度下需要更大的驱动电流^[23]。而本工作的器件得益于均匀一致的量子点发光层,仅需单层量子点即可有效抑制漏电流,同时避免了功能层与水接触,从而

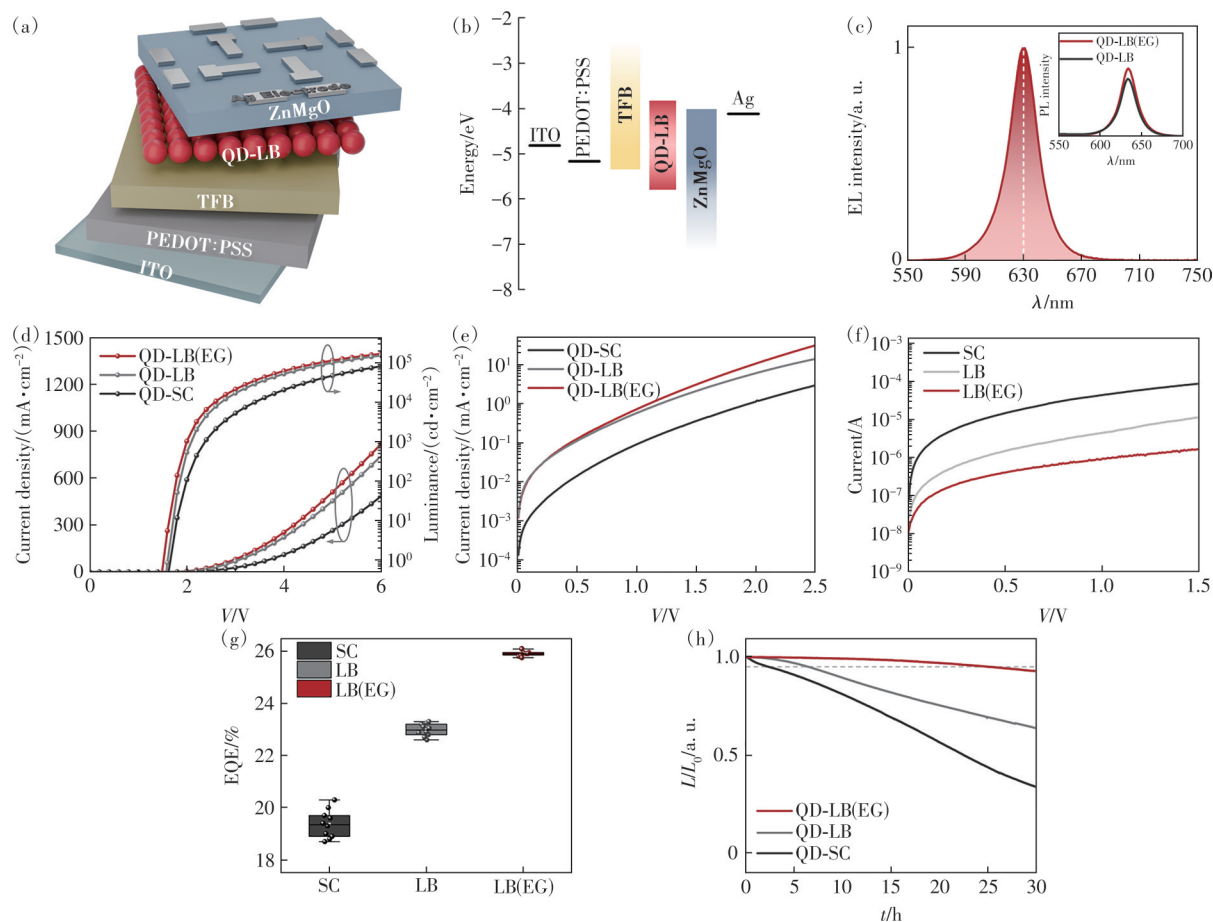


图 4 (a)QLED 器件结构;(b)QLED 器件能级图;(c)器件的 EL 光谱(插图:QD 薄膜的 PL 光谱);(d)器件的 J - V - L 曲线;(e)单电子器件的 J - V 曲线;(f)器件启亮电压前的 I - V 曲线;(g)器件的 EQE 统计图;(h)器件的寿命曲线

Fig.4 (a) Schematic structure of the QLEDs. (b) Energy diagram of the QLEDs. (c) EL spectra of QLEDs (Inset: PL spectra of QD films). (d) J - V - L curves of QLEDs. (e) J - V curves of the electron-only devices. (f) Sub-threshold I - V curves of QLEDs. (g) EQE box plot of QLEDs. (h) Life span curves

显著提升了量子点的稳定性,降低了非辐射复合的概率,使我们的器件在相同电流密度下能够实现更高的发光亮度。

为探究载流子传输特性,我们制备了结构为 ITO/ZnMgO/QDs/ZnMgO/Ag 的单电子器件。如图 4(e)、(f)所示,基于 EG 相 LB 膜的器件在启亮电压前表现出更低的漏电流与更高的载流子迁移率。这一结果证明,相较于旋涂及水相 LB 工艺,本工作的工艺能有效抑制漏电流并提升载流子传输效率^[26]。图 4(g)展示了基于三种不同成膜工艺所制备的 10 个器件的峰值 EQE 统计图,采用 EG 作为亚相的 LB 器件的峰值 EQE 为 26.1%,显著优于旋涂及水相 LB 器件,且其数据分布集中,表明该工艺具备良好的重复性与一致性。使用 EG 替换水相使 QD 在制备 LB 膜的过程中有效避免了水分残留对量子点器件性能的负面影响,明显提高了器件的性能以及工作寿命,图 4(h)展示了基

于 EG 亚相的 LB 器件在稳定性方面相较于水相 LB 器件的显著提升。假设加速因子为 $n=1.8$ ^[27],在 $1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 下 QLED 器件的 T_{95} 寿命由水相的 916 h (初始亮度 $14\,890\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$) 大幅提升至 3 272 h (初始亮度 $15\,012\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$)。我们在表 1 中进一步对比了已有文献与本工作的器件性能。结果显示,

表 1 硒化镉量子点电致发光器件性能对比			
Tab. 1 Performance comparison of CdSe QLEDs			
器件结构	EQE/ %	Life time	Ref.
ITO/PEDOT:PSS/TFB/ RQD/ZnMgO/Ag	18.9	$T_{95}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}=2\,407\text{ h}$	2022 ^[24]
ITO/PEDOT:PSS/TFB/ LB-RQD/ZnMgO/Ag	19.0	$T_{95}@100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}=13\,324\text{ h}$	2022 ^[20]
ITO/PEDOT:PSS/TFB/ RQD/ZnO/Ag	16.5	$T_{95}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}=2\,258\text{ h}$	2025 ^[25]
ITO/PEDOT:PSS/TFB/ QD-LB/ZnMgO/Ag	26.1	$T_{95}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}=3\,272\text{ h}$ $T_{95}@100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}=206\,492\text{ h}$	This work

我们的器件的峰值EQE和寿命均有显著优势,这一对比进一步印证了无水接触的LB技术对QLED器件性能提升的重要性。

4 结 论

本研究采用EG替代水作为LB技术的亚相有效避免了水分残留对量子点器件性能的负面影响。通过对LB成膜参数进行系统优化,显著提升了器件的发光性能。对比研究进一步表明,基于EG亚相的LB器件在综合性能上全面优于传统水相LB

器件及旋涂法制备的器件。优化后的器件最大外量子效率达到26.1%,在 $1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 初始亮度下的 T_{95} 寿命从916 h显著延长至3 272 h。该工作成功突破了传统LB工艺中因与水相接触所导致的QLED器件稳定性瓶颈,为开发兼具高效率与长寿命的量子点显示器件提供了一条可行的技术路径。

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.20260023>

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] ZHANG L, YU K, YANG Y S, *et al.* Development of CdSe magic-size clusters displaying optical absorption singlets from one prenucleation-stage sample in dispersion under mild conditions [J]. *Nano Res.*, 2025, 18(9): 94907837.
- [3] LIU Z K, MA W L. Preface to special topic on quantum dot semiconductor optoelectronic materials, devices, and characterization [J]. *J. Semicond.*, 2025, 46(4): 040101.
- [4] 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.
- [5] SHIRASAKI Y, SUPRAN G J, BAWENDI M G, *et al.* Emergence of colloidal quantum-dot light-emitting technologies [J]. *Nat. Photonics*, 2013, 7(1): 13-23.
- [6] MURRAY C B, NORRIS D J, BAWENDI M G. Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E =sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 1993, 115(19): 8706-8715.
- [7] KIM T H, CHUNG D Y, KU J, *et al.* Heterogeneous stacking of nanodot monolayers by dry pick-and-place transfer and its applications in quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2013, 4(1): 2637.
- [8] ZHAO J L, ZHANG J Y, JIANG C Y, *et al.* Electroluminescence from isolated CdSe/ZnS quantum dots in multilayered light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 96(6): 3206-3210.
- [9] COE S, WOO W K, BAWENDI M, *et al.* Electroluminescence from single monolayers of nanocrystals in molecular organic devices [J]. *Nature*, 2002, 420(6917): 800-803.
- [10] SUN Q J, WANG Y A, LI L S, *et al.* Bright, multicoloured light-emitting diodes based on quantum dots [J]. *Nat. Photonics*, 2007, 1(12): 717-722.
- [11] LIU Y, HAN F, LI F S, *et al.* Inkjet-printed unclonable quantum dot fluorescent anti-counterfeiting labels with artificial intelligence authentication [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 2409.
- [12] XU L M, LI J H, CAI B, *et al.* A bilateral interfacial passivation strategy promoting efficiency and stability of perovskite quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 3902.
- [13] SCHWARTZ D K. Langmuir-Blodgett film structure [J]. *Surf. Sci. Rep.*, 1997, 27(7-8): 245-334.
- [14] NOTOT V, WALRAVENS W, BERTHE M, *et al.* Quantum dot acceptors in two-dimensional epitaxially fused PbSe quantum dot superlattices [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(2): 3081-3091.
- [15] ARIGA K, YAMAUCHI Y, MORI T, *et al.* 25th anniversary article: what can be done with the Langmuir-Blodgett method? Recent developments and its critical role in materials science [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25(45): 6477-6512.
- [16] BOURVON H, LE CALVEZ S, KANAAN H, *et al.* Langmuir-Schaeffer monolayers of colloidal nanocrystals for cost-efficient quantum dot light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(32): 4414-4418.
- [17] WANG J Y, YAN H, LIU Z Q, *et al.* Langmuir-Blodgett self-assembly of ultrathin graphene quantum dot films with modulated optical properties [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(41): 19612-19620.
- [18] LAMBERT K, ČAPEK R K, BODNARCHUK M I, *et al.* Langmuir-schaeffer deposition of quantum dot multilayers [J].

- Langmuir*, 2010, 26(11): 7732-7736.
- [19] CRAWFORD N F, LEBLANC R M. CdSe and CdSe(ZnS) quantum dots in 2D: a Langmuir monolayer approach [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2014, 263-264: 13-24.
- [20] ZHAO D L, ZHENG Y T, MENG T T, *et al.* Efficient quantum dot light-emitting diodes with ultra-homogeneous and highly ordered quantum dot monolayer [J]. *Sci. China Mater.*, 2022, 65(3): 757-763.
- [21] MENG T T, ZHENG Y T, ZHAO D L, *et al.* Ultrahigh-resolution quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Nat. Photonics*, 2022, 16(4): 297-303.
- [22] LAMBERT K, JUSTO Y, KAMAL J S, *et al.* Phase transitions in quantum-dot Langmuir films [J]. *Angew. Chem.*, 2011, 123(50): 12264-12267.
- [23] CHAUDHARY S, OZKAN M, CHAN W C W. Trilayer hybrid polymer-quantum dot light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(15): 2925-2927.
- [24] CHENG C Y, SUN X J, YAO Z W, *et al.* Balancing charge injection in quantum dot light-emitting diodes to achieve high efficiency of over 21% [J]. *Sci. China Mater.*, 2022, 65(7): 1882-1889.
- [25] ZHAI Z X, GU C, WANG W X, *et al.* Nondestructive direct photolithography of colloidal quantum dots enabled by benzophenone-based crosslinkers [J]. *Nano Res.*, 2025, 18(9): 94907980.
- [26] LI H, ZHANG J Y, WEN W, *et al.* Highly efficient light-emitting diodes *via* self-assembled InP quantum dots [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 4257.
- [27] WELLMANN P, HOFMANN M, ZEIKA O, *et al.* High-efficiency p-i-n organic light-emitting diodes with long lifetime [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2005, 13(5): 393-397.



池瑾轩(2001-),男,福建福州人,硕士研究生,2023年于武汉理工大学获得学士学位,主要从事量子点发光器件制备及性能提升的研究。
E-mail: jinxuan_chi@163.com



李福山(1978-),男,福建莆田人,博士,研究员,2005年于北京大学获得博士学位,主要从事量子点光电材料与器件的相关研究。
E-mail: fsli@fzu.edu.cn



刘洋(1991-),男,河南许昌人,博士,教授,2019年于福州大学获得博士学位,主要从事量子点的微纳组装及新型发光传感等器件开发的研究。
E-mail: ifeyliu@fjnu.edu.cn