

叠层量子点发光二极管的研究进展

钟 鸿, 张宇豪, 单青松, 胡天璠, 曾海波

(南京理工大学 材料科学与工程学院, 新型显示材料与器件工信部重点实验室, 南京 210094)

摘要: 叠层量子点发光二极管(Tandem quantum-dot light-emitting diodes, TQLED)作为量子点发光二极管(Quantum-dot light-emitting diodes, QLED)技术的重要延伸, 通过引入多发光单元与电荷产生层结构, 实现了外量子效率、亮度及寿命的显著提升, 成为新一代高性能显示器件的研究热点。尽管 TQLED 的研究已经取得了巨大进展, 其仍面临着电荷注入不平衡、溶液工艺兼容性差、材料环保性及器件长期工作下稳定性不足等问题。本文首先介绍了 TQLED 的基本结构与工作原理, 对比了其相对于普通单层 QLED 存在的优势, 并详细介绍了电荷产生层的工作原理及其在多发光单元协同工作中发挥的关键作用。随后, 围绕倒置、正置、多发光材料以及其他创新叠层器件结构, 对不同材料体系、加工工艺以及结构设计在提升器件性能方面的研究进展进行了系统分析, 总结了叠层量子点发光二极管在效率、亮度及稳定性等方面实现的突破。最后, 指出了当前 TQLED 仍面临的挑战, 并从材料创新、结构优化和工艺革新等方面提出了未来可能的发展路径与研究重点。特别强调了开发环境友好型量子点材料、创新溶液加工工艺以及构建稳定的界面结构的重要性。这些分析旨在为 TQLED 的后续技术开发提供理论指导和技术参考, 推动其从实验室研究向产业化应用加速迈进。

关键词: 叠层; 量子点; 发光二极管; 电荷产生层

中图分类号: O47

文献标识码: A

Research Progress of Tandem Quantum-dot Light-emitting Diodes

ZHONG Hong, ZHANG Yuhao, SHAN Qingsong, HU Tianjun, ZENG Haibo

(MIT Key Laboratory of Advanced Display Materials and Devices, School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Tandem quantum-dot light-emitting diodes (TQLED), as an important extension of quantum-dot light-emitting diodes (QLED) technology, have achieved remarkable improvements in external quantum efficiency, brightness, and operational lifetime through the introduction of multiple emission units and charge generation layers. They have thus become a major research focus in the development of next-generation high-performance display devices. However, despite the substantial progress made in TQLED research, it still faces several critical challenges, such as imbalanced charge injection, poor compatibility with solution-processing techniques, insufficient environmental friendliness of

收稿日期: 2025-10-11; 收到修改稿日期: 2025-11-13; 网上出版日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB3612400, 2024YFA1210002); 国家自然科学基金(62574111, 62204120, 52533012, U24A20286, 52131304, 62261160392); 江苏省国际合作项目(BZ2024038); 中央高校基本科研业务费专项资金(30925010415).

National Key Research and Development Program of China(2024YFB3612400, 2024YFA1210002); National Natural Science Foundation of China(62574111, 62204120, 52533012, U24A20286, 52131304, 62261160392); International Cooperation Program of Jiangsu Province of China(BZ2024038); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.30925010415).

作者简介: 钟 鸿(2001-), 男, 硕士. E-mail: zhonghong@njjust.edu.cn

ZHONG Hong(2001-), male, Master candidate. E-mail: zhonghong@njjust.edu.cn

通信作者: 单青松, 副研究员. E-mail: shanqingsong@njjust.edu.cn; 曾海波, 教授. E-mail: zeng.haibo@njjust.edu.cn

SHAN Qingsong, associate professor. E-mail: shanqingsong@njjust.edu.cn; ZENG Haibo, professor. E-mail: zeng.haibo@njjust.edu.cn

materials, and inadequate stability of devices during long-term operation. This paper first introduces the basic structure and working principles of TQLED, compares its advantages over conventional single-layer QLED, and elaborates on the working principle of the charge generation layer as well as its key role in the collaborative operation of multiple emission units. Subsequently, focusing on inverted, conventional, multiple emission material-based, and other innovative tandem device structures, the paper conducts a systematic analysis of the research progress in improving device performance through different material systems, processing technologies, and structural designs. It also summarizes the breakthroughs achieved by TQLED in terms of efficiency, brightness, and stability. Finally, it identifies current challenges in TQLEDs and proposes potential future development pathways alongside research priorities from perspectives such as material innovation, structural optimization, and process refinement. Special emphasis is placed on the importance of developing environmentally friendly quantum dot materials, innovating solution-processing techniques, and constructing stable interface structures. These analyses aim to provide theoretical guidance and technical references for the subsequent technological development of TQLED, accelerating their transition from laboratory research to industrial application.

Key words: tandem; quantum-dots; light-emitting diodes; charge generation layer

量子点(Quantum Dots, QDs)有着高色纯度、可调发射光谱、高荧光量子效率和较长的荧光寿命等优点^[1-11], 在显示^[12-17]、光电探测^[18-20]、太阳能转换^[21-26]、生物成像^[27-29]及靶向治疗^[30]等多个前沿领域中有着广阔的应用前景。通过精准调控量子点的尺寸、组成以及表面配体, 可以实现从紫外到近红外全波段的光发射, 特别适用于宽色域、高还原度的显示场景^[31-33]。而量子点发光二极管(Quantum-Dot Light-Emitting Diodes, QLED)是一种以量子点为发光层的新颖半导体显示技术^[34-35], 与传统液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)以及有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diodes, OLED)相比, QLED 在色域覆盖、功耗效率等方面展现出显著的优势, 在高对比度和高分辨率显示领域的表现也尤为出色^[36-38]。尽管 QLED 技术在实验层面取得了巨大进展, 但在商业化道路上仍面临一些关键挑战, 比如蓝光量子点的化学稳定性与寿命过低、常见的高性能量子点多含有 Cd、Pb 等重金属剧毒元素、器件在高亮度条件下会出现严重的效率滚降等^[39-41]。在此背景下, 为进一步提升 QLED 器件的效率、工作寿命以及稳定性, 研究者们开始探索新的器件结构, 其中叠层量子点发光二极管 (Tandem Quantum-Dot Light-Emitting Diodes, TQLED), 在亮度、外量子效率 (External Quantum Efficiency, EQE)、寿命与色彩控制方面有着显著的优势, 迅速成为了高性能 QLED 的研究热点。TQLED 指的是利用特殊的中间连接层 (Intermediate Connection Layer, ICL) 将两个或多个量子点发光单元垂直叠加在一起并串联连接而构建出的一种多层发光器件^[42]。中间连接层通常由一对 N 型和 P 型半导

体构成, 在外加偏压下其界面可产生电子-空穴对, 因此也被称为电荷产生层 (Charge Generation Layer, CGL)^[43-45]。

如今照明显示行业对于高性能器件的追求日益增长, 然而, 传统单发光层 QLED 虽然在亮度和效率方面均取得了一定的进展, 但在寿命方面仍然存在显著的短板。因此, 为了解决目前诸如蓝光 QLED 器件寿命较短等问题^[46-48], 以进一步推动显示技术的性能突破与能效提升, TQLED 的研究显得尤为重要^[49-50]。叠层结构通过引入多发光单元与电荷产生层, 在相同亮度下, 整个器件所需的电流密度以及相应产生的焦耳热将大幅降低, 其寿命相比于单层器件也将更长。同时, TQLED 能够在同一驱动电流密度下实现更高的光输出效率, 可显著改善电荷复合均衡性与器件稳定性, 从而突破单层结构在高亮度条件下的效率衰减瓶颈。此外, 叠层结构在多色发射、白光调控及柔性显示等方面具备独特优势, 为构建新一代高性能、长寿命和低功耗的量子点显示器件提供了有效路径。因此, 深入开展 TQLED 的结构设计与机理研究, 对于推动高端显示技术的持续发展与产业化具有重要的科学意义与应用价值。在本文中, 将对 TQLED 的工作原理进行简要介绍, 并系统回顾近年来 TQLED 在材料、结构及性能优化等方面的研究进展。

1 叠层量子点发光二极管工作机理

1.1 传统 QLED 与 TQLED 工作原理对比

传统的只具有单层发光层的 QLED 与引入 CGL 的具有双发光单元结构的 TQLED 在工作原理上存在显著差异。如图 1(a,b)所示,在传统 QLED 中,电子与空穴分别从阴极和阳极注入,经过电子传输层与空穴传输层到达量子点发光层,在该层内辐射复合发射光子。这种结构并不具备电荷产生能力,电荷仅来源于外部电源。而在 TQLED 结构中,器件内部包含两个发光单元(QD 1 与 QD 2),并由 CGL 连接。该结构不仅具备外部电荷注入功能,还引入了内部电荷产生机制^[51]。在外加偏压作用下,CGL 中产生的电子被传输至下方的发光单元 QD 1,与自阳极注入的空穴复合发光;与此同时,CGL 中产生的空穴则向上传输至上方的发光单元 QD 2,并与自阴极注入的电子结合,同样产生光子,这一内部电荷产生机制使两个发光单元几乎同时复合发光。在相同的电流密度下,TQLED 实现了两次电荷复合发光过程,复合的载流子数量远多于单层 QLED,从而显著提高了器件的亮度与 EQE,图 1(c)对比了单层与叠层器件的几个核心参数。

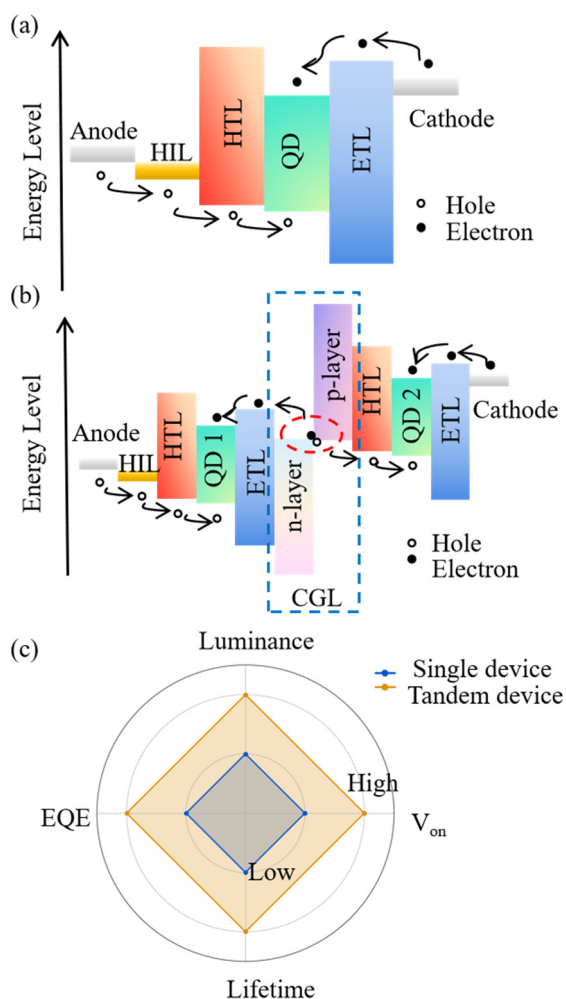


图 1 普通单层 QLED 与双层 TQLED 工作原理及参数对比

Fig. 1 Comparison of working principles and parameters between conventional single-layer QLED and two-layer TQLED

(a) Single emissive layer device; (b) Tandem device with two emissive layers; (c) Comparison of core parameters between two types of light-emitting devices

与单层 QLED 相比,在相同总亮度下,TQLED 的工作电流密度显著降低,热量生成减少,有利于提升器件热稳定性与色彩一致性。除此之外,叠层结构还具有众多优势,如支持多色量子点分层布局,可缓解能量转移问题,为器件结构提供更广阔的调控空间,实现更优秀的能级匹配与电荷平衡等^[52]。

1.2 电荷产生层工作机理

电荷产生层是叠层器件实现多发光单元串联运行的关键,其核心作用是在上下发光单元之间实现电荷的产生与注入,从而维持整体器件连续统一的工作。CGL 的 P 层通常由 HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital)能级较浅的空穴传输材料组成,便于空穴的产生并注入阴极侧发光单元;N 层则由 LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital)能级较深的电子传输材料构成,有利于电子的产生以及注入到阳极侧发光单元^[53]。理想的 CGL 结构应具备优异的电荷产生能力、匹配的界面能级、优秀的溶剂稳定性以及较高的工艺兼容性,以便于生产过程中的多层叠加与大面积制备^[54-56]。CGL 中的 P 层与 N 层形成的内部电场,在外加电压作用下由于能级排列的差异,会表现出不同的电荷行为,其工作机理如图 2 所示。

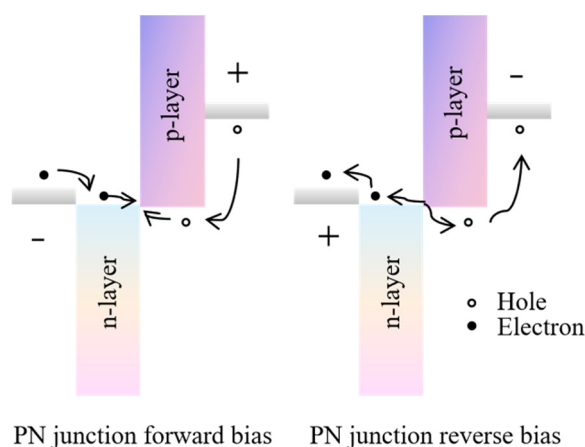


图 2 CGL 工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CGL working principle

在正向偏压下(P 层接正,N 层接负),电子和空穴分别由外电极注入 N 层的 LUMO 能级和 P 层的 HOMO 能级中,但由于此时电场方向与内建电场相

反, PN 结无法实现电荷对的产生与分离, 更多表现为普通的电荷传输与复合过程^[57-58]。

在反向偏压下(P 层接负, N 层接正), P 层的 HOMO 能级与 N 层的 LUMO 能级之间的能级差非常小, 使得 P 层 HOMO 能级中的电子能够较容易地跃迁至 N 层的 LUMO 能级, 同时在 P 层的 HOMO 能级中留下空穴, 随后在电场的作用下向发光单元移动。该过程实现了电子-空穴对的有效生成与分离, 并使得空穴注入到阴极侧发光单元, 电子注入到阳极侧发光单元, 驱动两个发光单元同时工作, 是 CGL 发挥电荷产生作用的关键^[54, 57-58]。

在实际测试中, 研究者通常通过对比 CGL 在正反向偏压下的电流密度差异, 来评估其电荷产生能力。当反向偏压下电流密度接近或者明显高于正向偏压时, 说明 CGL 具有较强的电荷产生能力^[59]。理想的 CGL 还需兼顾能级匹配、界面兼容性与成膜质量, 以减少非辐射复合与能量损耗^[60-61]。在表 1 列出了 CGL 常用的几种材料。

表 1 电荷产生层常用材料

Table 1 Common materials for charge generation layer		
Processing Methods	Materials	Type
Vacuum deposition	FeCl ₃ :NPB	P type
	Li:Alq	N type
	HATCN、MoO ₃	Electron acceptor
	IZO、Ag、Al	Ultra thin conductive layer
Solution method	PEDOT:PSS	P type
	ZnO、ZnMgO	N type

2 叠层量子点发光二极管器件结构研究进展

经过多年的发展, TQLED 不仅在传统的倒置和正置结构方面取得了显著进展, 还开发出了集成多种发光材料的混合结构以及功能性的创新结构, 本文接下来将按照不同结构类型对 TQLED 的研究进展进行总结分析。

2.1 倒置结构

倒置结构通常以底电极作为阴极以注入电子。在实际显示应用中, 倒置结构器件因为易与 N 型薄

膜晶体管集成的特点, 受到了广大研究者的青睐, 因此也成为了 TQLED 技术最早探索和应用的体系之一^[62-64]。早在 2016 年, Jin 等^[65]就报道了倒置结构的 TQLED。全溶液法制备的 PN 结 CGL 串联了红光与绿光两个发光单元, 从而实现了黄光发射。该工作验证了倒置串联量子点发光器件的可行性, 但由于 CGL 的电荷注入效率较低, 两个发光单元的性能未能充分叠加, 器件电流效率仅为 15.9 cd/A, 距离理论极限仍有较大差距。因此, 研究者们开始从 CGL 材料选择与结构设计入手, 探索更高效、更稳定的界面构建策略。

2.1.1 电荷产生层材料优化

近年来, PEDOT:PSS/ZnO 结构凭借高导电性、高透明度以及优秀的电荷产生能力, 逐渐成为倒置 TQLED 中 CGL 的首选。但由于酸性的 PEDOT:PSS 会与 ZnO 发生反应, 最终导致器件性能恶化, 为此 Zhang 等^[58]引入了化学稳定性更高的 ZnMgO 替代传统 ZnO, 构建出 PEDOT:PSS/ZnMgO 的异质结结构作为 CGL, 其器件能级排列如图 3(a)所示。得益于 ZnMgO 更优秀的稳定性与更加匹配的界面能级, 所制备的倒置绿光 TQLED 的 EQE 超过了 23%, 首次实现了性能优异的全溶液叠层器件。

同时, 在倒置 QLED 器件中, 常见的空穴传输层大多由疏水性的有机材料组成, 这也导致亲水性的 PEDOT:PSS 难以旋涂到下方的空穴传输层上。而通过在 PEDOT:PSS 中添加异丙醇, 不仅能增强 CGL 的电荷产生能力, 还能在不产生杂质残留的情况下有效改善界面润湿性, Wu 等^[66]就使用异丙醇作为添加剂来解决水基 PEDOT:PSS 难以在疏水 HTL 上均匀成膜的问题(图 3(b))。同时, 选用高黏度的氯苯作为溶剂, 以最大限度地减少上方功能层旋涂时对下方 QD 层的损伤。基于这些优化方式, 使用 PEDOT:PSS/ZnO 作为 CGL, 制备出了全溶液法的倒置 TQLED, 且相比单发光单元器件有着更高的稳定性。

白光在照明和背光显示领域有着重要的作用, 而传统的白光 QLED 仅是直接将不同的红、绿和蓝光量子点混合, 需要对量子点比例进行精确调控, 才能实现高性能白光发射^[67]。为了解决白光 QLED 效率不高及工艺困难的问题, Cao 等^[68]通过串联不同颜色的发光单元, 制备了倒置白光 TQLED, 将每种发光颜色限制在了各自独立的发光单元中, 有效地降

低了混合 QD 间的非辐射荧光共振能量转移。同时，通过在 ZnO 电子传输层上旋涂一层聚乙烯亚胺乙氧基化物(PEIE)，可以有效地让 PEIE 渗入 ZnO 纳米颗粒中，起到降低 ZnO 电子迁移率以及缺陷态密度的

作用，最终实现电荷注入平衡并抑制发光淬灭(图 3(c))。这种由红/绿/蓝单元串联堆叠的白光器件发出了 CIE 坐标为(0.34,0.33)的纯正白光，其峰值电流效率和 EQE 分别高达 79.9 cd/A 和 28.0%。

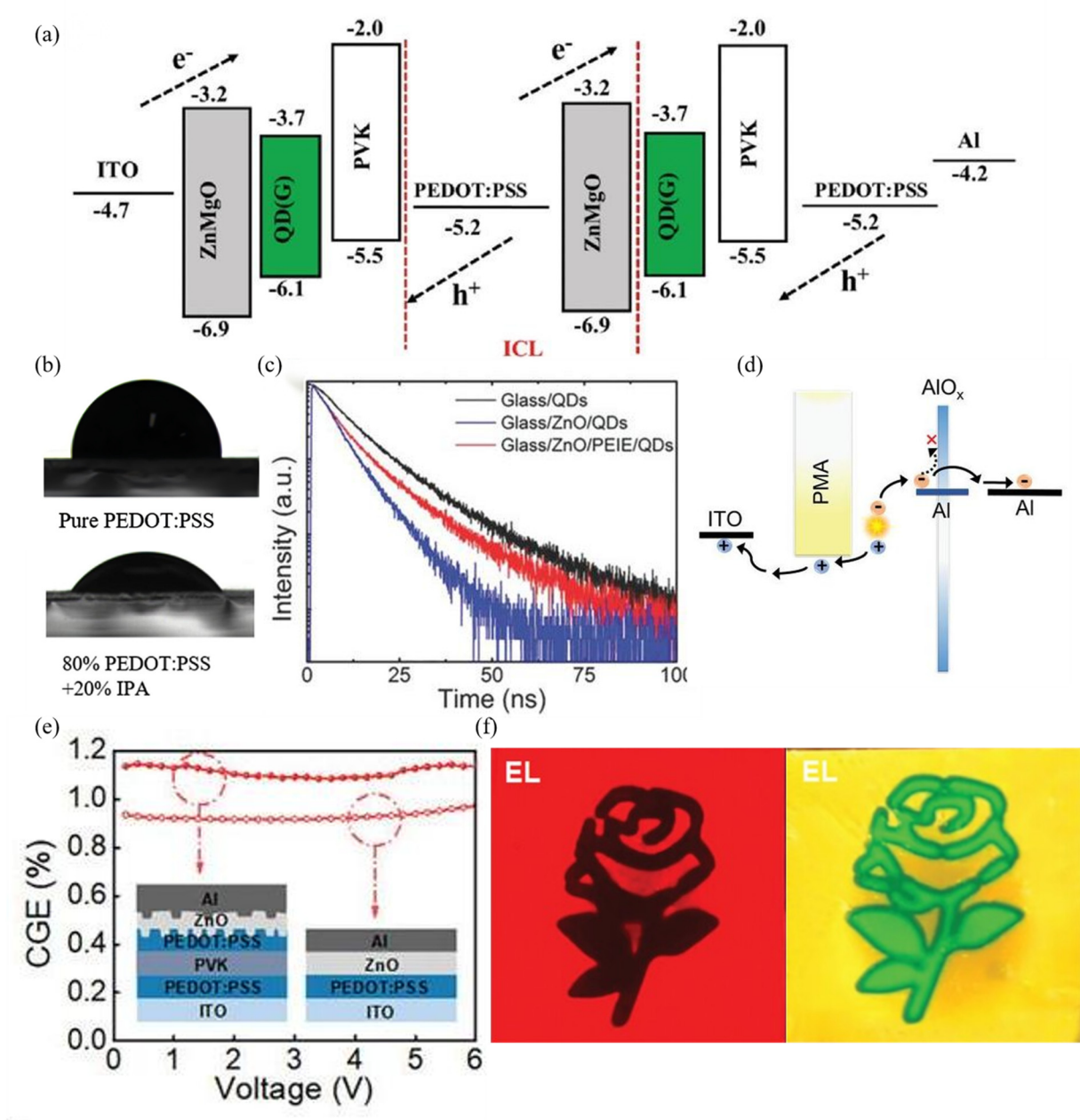


图 3 倒置叠层器件结构及优化效果[54, 58-59, 66, 68]

Fig. 3 Inverted tandem device structure and optimization effects[54, 58-59, 66, 68]

(a) Schematic diagram of energy level arrangement of inverted TQLED device[58]; (b) Wetting angle change before and after IPA addition[66]; (c) PL decay curve of red quantum dots on different functional layer thin films[68]; (d) Energy level structure and electric field induced charge generation of semiconductor-metal-dielectric material CGL[54]; (e) charge generation efficiency of CGL with and without microstructure[59]; (f) electroluminescence photos of green and red tandem anti-counterfeiting devices under 8 V (left) and 13 V (right) driving voltages[59]

2.1.2 电荷产生层结构设计

在倒置 TQLED 器件的制备过程中，由于大量功能层的层层堆叠，底层功能层不可避免地会在后续加工过程中受到损伤。为解决制备高性能 TQLED 时

的这一关键问题 Kwon 等[69]设计了一种结合热蒸发和溅射两种工艺的双层 CGL 结构，热蒸发的第一层保护了底层免受溅射损伤，而溅射的第二层则保护了整个下层结构免受溶剂损伤。与理论上串联两个

单元效率翻倍的预期不同,使用 WO_3/ZTO 双层 CGL 的器件性能最佳,其电流效率高达 82 cd/A,是单个 QLED 单元的约 3.2 倍。

在经典的 PEDOT:PSS/ZnO 结构中,由于亲水性的 PEDOT:PSS 的吸湿特性,常常会使底层单元性能恶化,从而导致传统倒置 TQLED 的效率一直难以突破。为解决此问题, Wu 等^[54]采用磷钼酸(PMA)代替传统的 PEDOT:PSS,并在此基础上开发了一种便于加工制造且具备优异稳定性及光电耦合性能的由半导体-金属-电介质材料(PMA/Al:AlO_x)构成的新型 CGL,如图 3(d)所示,该 CGL 能够有效防止溶剂损伤、平衡电荷并抑制电流泄露,最终所制备的绿光 TQLED 器件的最高 EQE 达到了 50%。Meng 等^[70]则是在保留传统的 PEDOT:PSS/ZnO 电荷产生界面基础上,在空穴传输层 PVK 和 PEDOT:PSS 之间引入 PMA,构建了结构为 PVK/PMA/PEDOT:PSS/ZnO 的 CGL。PMA 层的引入不仅改善了 PEDOT:PSS 在 PVK 上的成膜质量,还额外形成了一个 PVK/PMA 的电荷产生界面,增强了总的电荷产生与空穴传输能力。基于这种结构,全溶液法制备的倒置红色 TQLED 实现了超过三倍的效率提升,其最大 EQE 达到了 29.4%,并且器件寿命也得到了显著提升。

CGL 的电荷产生效率和器件光提取效率对于性能有着较大的影响。在 2024 年, Zhou 等^[59]通过 PEDOT:PSS 与 ZnO 自发形成的微结构界面,构建了一种类体异质结 CGL,通过增大界面接触面积,使电荷产生效率显著提升至 115%(图 3(e))。并且,通过进一步精确调控器件的光学微腔结构,成功抑制了光损耗,提升了光提取效率,最终的红色 TQLED 实现了 42.9%的超高 EQE。同时,系统研究了器件中上下两个发光单元的驱动顺序机制,并基于此开发出一种新颖的光电双重防伪显示器件,如图 3(f)所示。

近十年来,还有其他众多的研究者同样致力于倒置 TQLED 中 CGL 的材料优化和结构设计,这在很大程度上缓解了诸如载流子注入不平衡和溶剂损伤等实际问题,为未来 QLED 技术的商业化做出了巨大的贡献。

2.2 正置结构

在倒置结构中, PEDOT:PSS/ZnO 电荷产生层有着广泛的应用,而在正置结构中 PEDOT:PSS 在疏水性 ZnO 上难以成膜的问题一直未得到解决,严重影响了器件的性能。因此,优化 CGL 界面、开发新的

CGL 结构成为了正置 TQLED 的主要研究方向。

早在 2017 年, Zhang 等^[71]就提出了一种以 ZnMgO/PEDOT:PSS 为 CGL 的正置叠层器件结构,并将红、绿、蓝三个发光单元串联,成功制备出了正置白光 TQLED。然而, PEDOT:PSS 在 ZnMgO 上面成膜依然较差,界面质量受限,尽管通过添加 IPA 改善了润湿性,器件电流效率也仅为 4.75 cd/A,远低于理论预期,反映出早期 CGL 材料选择与结构设计存在明显问题。为解决上述问题,该团队^[72]开发了基于蒸镀工艺的高性能 CGL 结构 Al/HATCN/MoO₃,器件能级结构如图 4(a)所示。超薄 Al 金属层能增强界面电场,提升电流注入效率; HATCN 作为电子受体配合 MoO₃ 提供良好的空穴注入能力,同时有效缓解溶液旋涂对下层的破坏(图 4(b))。该结构使红、绿、蓝三基色正置 TQLED 的 EQE 分别提高至 23.1%、27.6%、21.4%,器件稳定性也得到明显提升。此后,该团队^[52]基于该结构进一步将蒸镀-溶液旋涂工艺进行了有效融合,实现 EQE 接近 24%的正置白光 TQLED,图 4(c)展示了白光叠层器件的工作状态。

为了进一步解决在全溶液法制备正置 TQLED 时底层薄膜易被溶剂破坏的技术难题, Jiang 等^[73]设计了一种由 ZnO 和 PMA 组成的 CGL,实现了高性能的全溶液法白光 TQLED。该 CGL 不仅具备优异的耐溶剂性,能有效保护下方的量子点发光层,还实现了高效的电荷产生与传输。通过串联红、绿、蓝三个发光单元,优化后的白光器件,在 100,000 cd/m² 的高亮度下,其电流效率和外量子效率分别高达 60.4 cd/A 和 27.3%。该器件配合商用彩色滤光片可实现 124% NTSC 的广色域(图 4(d))。

一直以来, ZnO 过高的电子迁移率与缺陷态密度都是妨碍 TQLED 性能发展的另外一个关键问题,为进一步提升全溶液法制备 TQLED 的性能, Sun 等^[43]使用镁掺杂的氧化锌(ZnMgO)替代传统的 ZnO 作为电子传输层。通过提高镁掺杂浓度不仅有效地降低了电子迁移率,一定程度上实现了电子与空穴的注入平衡,同时也抑制 ZnO 对量子点的淬灭。此外 ZnMgO 的优异耐酸性缓解了酸性 PEDOT:PSS 对其的侵蚀,显著改善了界面接触质量,从而使 ZnMgO/PEDOT:PSS CGL 获得了优异的电荷产生能力。所制备的串联器件最大 EQE 高达 35.51%,与单个发光单元相比,其工作寿命也延长了近三倍(图 4(e))。

正置结构 TQLED 经过多年研究已逐步追赶上倒置结构的脚步, 发展至高效率、高亮度与长寿命的

高性能器件。未来在显示领域也将有着广阔的应用前景。

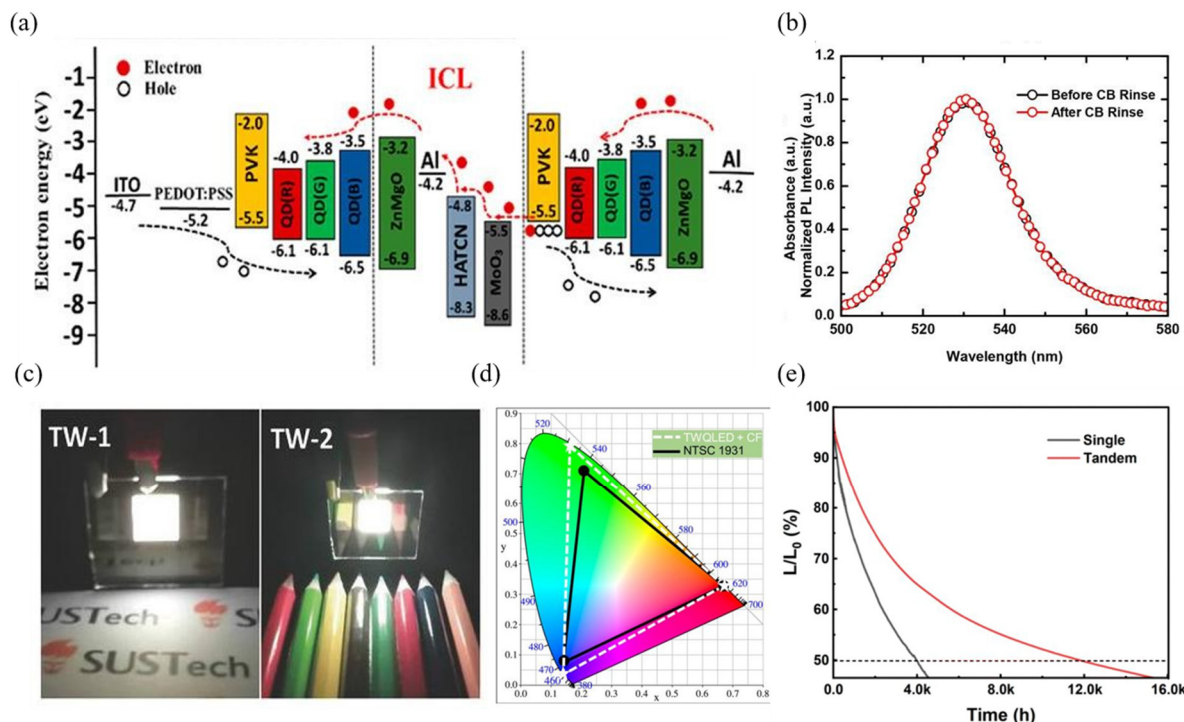


图 4 正置叠层器件结构及优化效果^[43, 52, 72-73]

Fig. 4 Conventional tandem device structure and optimization effects^[43, 52, 72-73]

(a) Conventional TQLED energy level structure^[72]; (b) PL spectra of green quantum dots covered with ZnMgO/Al/HATCN/MoO₃ before and after chlorobenzene rinsing^[72]; (c) White TQLED working diagram^[52]; (d) Color gamut diagram^[73]; (e) Comparison of lifetime between tandem and single-layer devices^[43]

2.3 多发光材料叠层结构

除了传统的多单元量子点串联结构, 近年来研究者开始探索将不同发光机制的材料集成, 构建出兼具多种发光机制优势的混合叠层结构。这类结构通过 CGL 将两种不同发光机制单元有效连接, 在结构上打破了“同质串联”的限制, 将两种发光材料各自的优势叠加, 是实现高性能、功能多样化叠层发光器件的另一种重要方向。

2.3.1 镉基量子点/有机叠层发光二极管

Chen 等^[57]于 2016 年提出并实现了 QLED/OLED 的串联叠层器件, 器件结构如图 5(a)所示。他们采用 ZnMgO/Al/HATCN 作为 CGL, 实现了绿光镉基 QLED 与磷光 OLED 的有效串联, 从而构建出高效率、高色纯度的混合型器件。该结构不仅在电荷注入和复合方面表现优异, 而且大幅改善了发光色彩质量。器件的 EQE 高达 25.9%, 显著优于单独的 QLED(EQE 7.81%)和 OLED(EQE 19.04%)单元; 同时, 器件的发光半峰宽从 OLED 的 68 nm 降至 44 nm(图

5(b)), 实现了 100% NTSC 色域覆盖(图 5(c))。

2.3.2 钙钛矿/有机叠层发光二极管

尽管镉基量子点有着出色的性能表现, 但在一些显示要求更高的领域也稍显不足。此外, 镉重金属还存在着环保与可持续发展问题, 这促使研究者寻求性能更优异以及低毒性的环保发光材料。钙钛矿因其高荧光量子效率和优异的带隙可调性得到了广泛关注, 相较于镉基量子点, 钙钛矿具有更高的色纯度、毒性更低等优点, 为构建色彩优异的混合叠层器件提供了可能^[74]。基于这些优势, Sun 等^[75]提出了一种蓝光钙钛矿发光单元(PLED)与橙光 OLED 的串联方案, 通过在钙钛矿表面引入含 P=O:Pb 相互作用的导电钝化剂, 有效抑制了由表面缺陷诱导的非辐射复合并降低缺陷密度, 提高了蓝光 PLED 的发光效率。该蓝光单元与 OLED 串联后构建出的白光混合器件, 其 EQE 提升至 24.3%, 并在热稳定性与器件寿命方面也优于传统钙钛矿单元, 展现了钙钛矿/有机混合结构较高的应用潜力。为解决 PLED 稳定性

差的难题，Kong 等^[76]通过一个创新的 HAT-CN/MoO₃/CBP CGL 将钙钛矿 PLED 与 OLED 结合，开发了一种高效且稳定的混合串联 LED，器件结构如图 5(d)所示。在 CGL 中引入的超薄 MoO₃ 层，形成了 P 型界面掺杂，增强了电场强度(图 5(e))，这不仅显著增强了电荷的产生能力，还有效抑制了焦耳热效应。最终的混合 LED 表现出卓越的综合性能：最大 EQE 超过 40%，峰值亮度超过 176,000 cd/m²，同时保持了约 30 nm 的窄发射半峰宽和超过 42,000 h 的超长工作寿命，图 5(f)展示了优化 CGL 前后的寿命以及表面温度对比。钙钛矿/有机混合叠层 LED 还存在着因结构不匹配导致发光谱变宽和电荷不平衡问题，为解决这一问题，Lee 等^[77]通过光学模拟，设计并定义了名为“h-tandem valley”的光学微腔结

构，能使器件实现窄带发光，并基于此设计制造了一种“谷中心串联”器件，器件结构如图 5(g)所示，该结构通过精确控制层厚度，不仅实现了最优的微腔效应，还使钙钛矿 PLED 和 OLED 两个单元之间实现了近乎完美的电荷平衡。这种协同优化使得器件性能得到巨大提升，EQE 高达 37.0%，其效率甚至超过了两个独立单元的效率之和。同时，器件的色彩纯度极高，发光半峰宽仅为 27.3 nm，图 5(h)为两种发光单元及叠层器件的发光光谱。

混合叠层结构通过多种发光机制的协同整合，不仅突破了传统 LED 单一结构的性能限制，还拓展了器件的功能性与应用场景，未来在高端显示技术与多功能光电器件中也具有巨大的发展潜力。

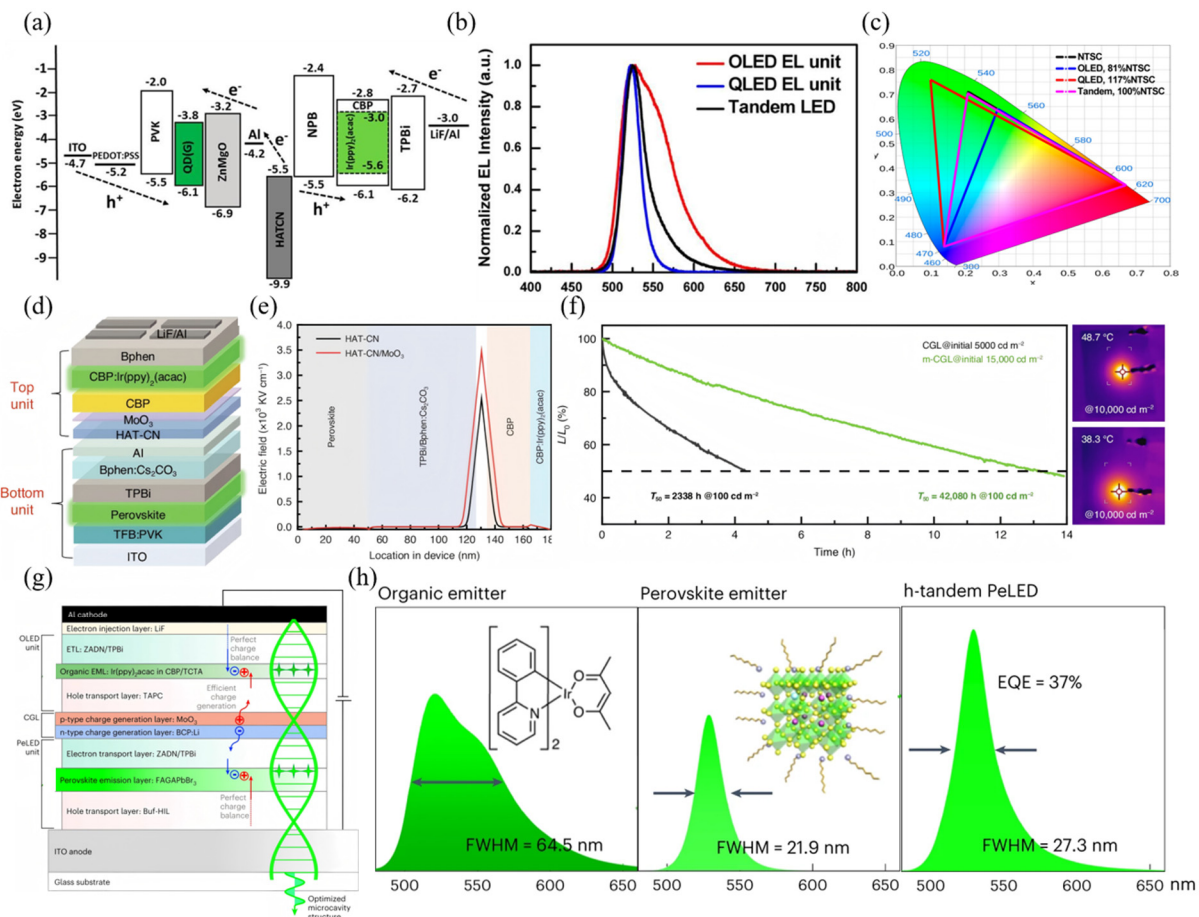


图 5 多发光材料叠层器件结构及优化效果^[57, 76-77]

Fig. 5 Structure and optimization effects of multi luminescent materials tandem devices^[57, 76-77]

(a) Device structure, (b) EL spectrum and (c) color gamut of cadmium-based/organic tandem device^[57]; (d) Device structure, (e) simulated electric field before and after inserting MoO₃ and (f) working lifetime and surface temperature comparison of perovskite/organic tandem device^[76]; (g) Tandem device structure with optical microcavity and (h) EL spectra of organic, perovskite, and tandem devices^[77]

2.4 其他结构

近年来，除了发光材料和功能层的持续优化，研究者们为实现多模态发光、驱动兼容和柔性显示等

功能。从驱动方式、电极结构、色彩调控等多个维度出发，提出了一系列创新的器件结构。

2.4.1 交流驱动器件

2019 年, Xia 等^[78]采用 P(VDF-TrFE-CFE)作为高电容介电层,同时利用 MoO₃/TFB 层在器件内部产生空穴,开发了一种串联结构的交流驱动 QLED,它可以在 AC 电源的正、负半周期内交替发光,从而实现器件在整个交流周期内持续发光。Zhang 等^[79]通过 IZO 中间电极,将两个发光单元垂直堆叠起来(图 6(a))。这种结构使其在并联模式和交流驱动下,器件可实现全彩可调,能分别发出红、绿、蓝三基色,覆盖 63%的 NTSC 色域,图 6(b)展示了交流信号控制发光颜色的过程;而在串联模式和直流驱动下,两个发光单元同时工作,可以发出高效的白光,其亮度高

达 107,000 cd/m², EQE 最高可达 26.02%。随后,该团队^[80]又成功制备了一种无需外接 AC/DC 转换器,可直接兼容 220 V/50 Hz 家用交流电的双极量子点发光二极管。通过使用金属桥接层,将一个正向 QLED 和一个反向 QLED 串联,构建双极器件。该器件在正向或反向偏压下均可发光,使用铝桥接层时,其 EQE 高达 22.9%。为进一步提升性能,使用银作为桥接层,利用电场下银离子迁移形成的导电银丝大幅增加反向电流,从而将器件亮度在 15 V 电压下提升至 16,370 cd/m²,同时保持了 22.2%的高 EQE。最终,成功使用 220 V/50 Hz 的家用电源驱动由 15 个此类 QLED 串联而成的阵列并稳定发光。

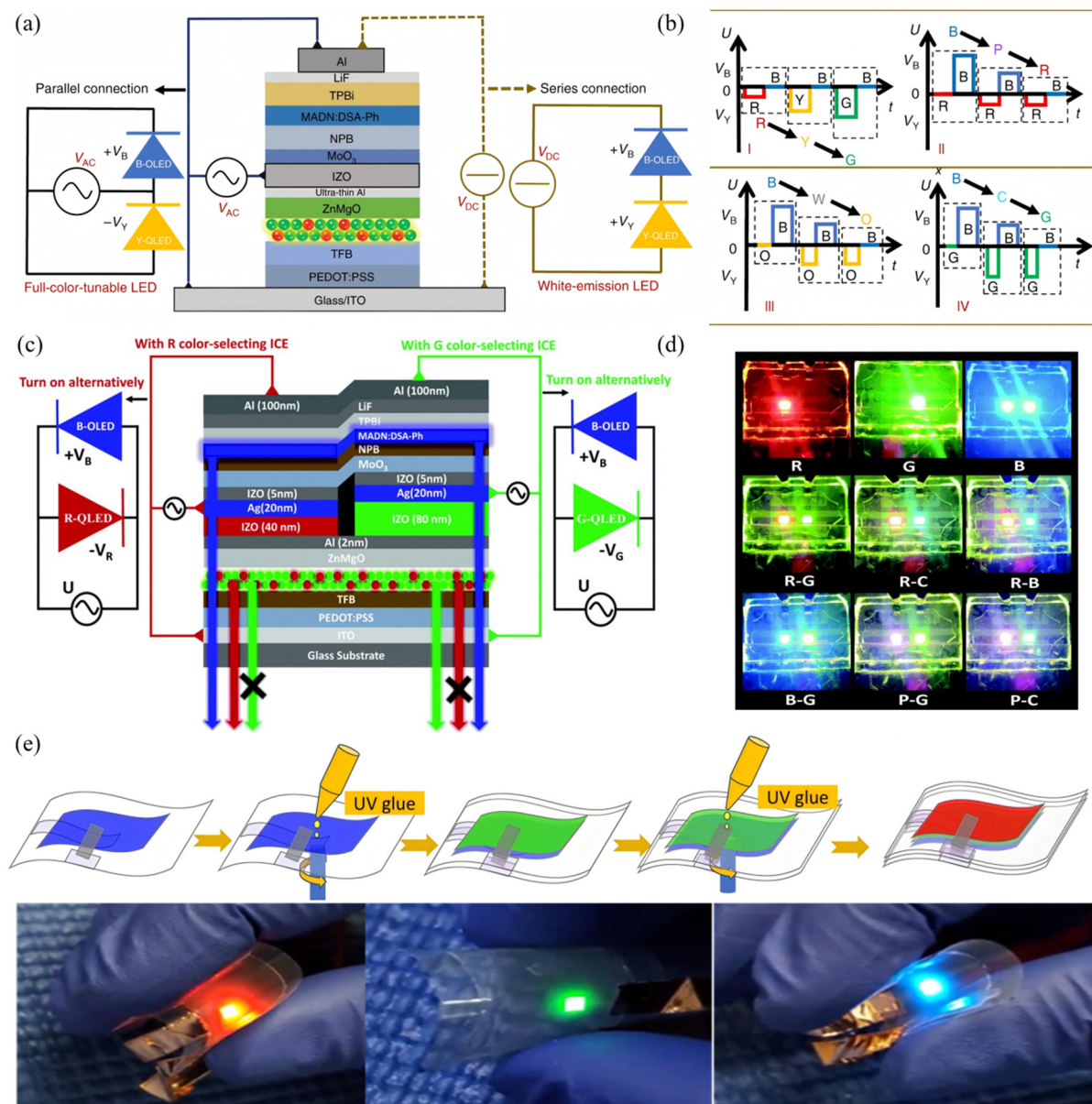


图 6 其他创新叠层器件结构及效果^[79, 81-82]

Fig. 6 Structure and optimization effects of other innovative tandem devices^[79, 81-82]

(a) Device structure and (b) AC signal controlled output color of the AC driven TQLED^[79]; (c) Device structure and (d) full-color pixel working diagram of the light output control device;^[81](e) Flexible TQLED assembly processes and working diagram^[82]

2.4.2 光输出控制器件

Zhang 等^[81]通过一个特殊设计的 IZO/Ag 多功能中间电极将两个不同的发光单元垂直堆叠, 结构如图 6(c)所示, 通过调控 IZO 层厚度改变光学微腔的共振波长, 从而能选择性地使 QLED 发出的黄光转换为红光或绿光; 半反射的 Ag 层则增强了 OLED 的光学干涉效应, 显著提升了蓝光的色彩纯度。这种设计无需对发光层进行图案化处理, 便实现了可独立控制的 R/G/B 三基色发光, 并达到了约 110% NTSC 的高色域, 图 6(d)展示了器件的工作状态。Yoo 等^[83]设计了一种仅空穴注入的器件结构并采用 n-p-n 结构 (AZO/PEDOT:PSS/AZO) 的中间连接层。这种 n-p-n 中间层相比其他结构, 具有更优越的电荷产生与传输能力、更低的阻抗和更高的电流密度。该器件能够根据直流偏压的方向选择性地发出两种纯色光, 并通过脉冲宽度调制驱动实现混合色彩。

2.4.3 柔性叠层发光器件

2021 年, Su 等^[82]开发了一种新型的柔性 TQLED, 其核心点在于能够对红、绿、蓝发光单元进行独立寻址和控制。通过在柔性基板上制造高效透明的 R/G/B QLEDs, 再使用紫外固化胶将它们垂直堆叠起来, 从而规避了传统多层制备工艺中常见的溶剂损伤问题。这种垂直像素结构与传统的并排像素相比, 能显著提升显示器件的分辨率和开口率。其可单独控制的 R/G/B 单元的 EQE 分别达到了 12.0%、8.5% 和 4.5%。此外, 器件的连接方式十分灵活, 在串联模式下 EQE 高达 24.8%, 在并联模式下则能实现 130,654 cd/m² 的超高亮度, 器件组装步骤及工作状态如图 6(e)所示。

这些结构创新策略不仅拓展了 TQLED 的功能性, 也为其在多场景、多领域的实用化奠定了坚实的结构基础。

3 总结与展望

TQLED 作为 QLED 技术的重要延伸, 通过引入多发光单元与电荷产生层结构, 成为了量子点显示技术实用化的重要发展方向。近年来, 通过不断深入探究 CGL 的工作机理, 在材料选择、结构设计与工艺开发等方面层层优化, 使 TQLED 的效率、亮度与寿命都实现了显著的突破, 表 2 总结了近年来不同类型的叠层器件结构及性能。TQLED 的多单元串联

结构能以更低电流密度实现更高亮度, 以此显著提高器件的效率与寿命, 尤其适用于 HDR、高亮度显示等应用场景; 通过串联多色量子点单元, 精确调控各发光单元的能级结构与排列, 可实现高显色指数、可调色温的高质量白光发射; 此外, 由于其溶液加工的兼容性, 可与柔性基底集成实现柔性器件结构, 使其有望应用于可穿戴显示、电子皮肤和人机交互系统。

然而, TQLED 的性能优化研究仍处于实验阶段, 商业化前仍面临众多关键的挑战与瓶颈:

(1)CGL 材料体系的优化。未来, 突破 CGL 的性能瓶颈将成为 TQLED 发展的重中之重。就目前而言, 常见的 CGL 在能级匹配和长期工作下的稳定性不足, 容易导致效率滚降与电流攀升, 最终导致器件在实际应用中性能恶化。因此, 更多的研究将致力于探索更加高效稳定的 CGL 材料体系, 如采用新型的杂化结构, 以实现与周围功能层更加精准匹配的能级排列, 降低电子与空穴的注入势垒, 从而显著提高电荷传输能力与注入平衡性。这将直观地提升 TQLED 器件的发光效率与使用寿命, 为将来超高性能发光器件铺平道路。

(2)发光材料环保化。在发光显示领域, 推动绿色环保材料的革命是实现可持续发展的必然要求。然而, 目前主流镉基量子点材料存在严重的环保性问题, 同时也制约 TQLED 的实际应用。研究者们应更加努力将研究目光聚焦于新型环保发光材料的开发, 即使目前镉基量子点性能优异, 也不能忽视其所带来的环境污染, 因此推动无镉量子点的研发与应用仍是当务之急。如今性能逐渐逼近镉基量子点的 InP 基量子点、在蓝光显示领域表现优异的 ZnSe 基量子点、环境友好成本低廉的 I-III-VI 族量子点及其衍生物, 以及拥有高色纯度与广阔应用前景的无铅钙钛矿量子点等等都是极具潜力的环保发光材料。其中, 无铅钙钛矿发光材料尤为引人关注。该类材料通过引入锡、锗、铋、铟等元素替代铅, 在保持优异发光性能的同时显著提高了环境友好性。虽然这些非铅体系的效率和稳定性目前与含铅体系相比仍有差距, 但它们凭借独特的电子结构、高色纯度潜力与环境友好特性, 展现出了广阔的应用前景。未来若能突破其材料合成与器件制备的关键瓶颈, 这些环保材料将进一步取代重金属材料并快速发展, 成为显示照明领域的主流。

(3)界面侵蚀与低成本制造。在 TQLED 的生产过程中,如果采用全溶液法制备,上层溶剂将不可避免地对底层量子点与传输层产生破坏,从而产生界面缺陷,进而引发界面失效等问题。为了解决这一问题,目前较为成熟的 TQLED 体系大多依赖于复杂且昂贵的真空蒸镀工艺,这极大地限制了 TQLED 的高性能和大面积实际生产。因此,在制造工艺上,与柔性电子以及印刷技术的深度融合将成为大规模商业化生产的关键。未来的研究将高度重视这一趋势,推动大面积制备工艺的进步,利用喷墨打印等技术,极大简化生产流程、降低原料损耗,并摆脱对昂贵复杂的

大尺寸真空蒸镀设备的依赖,在最终真正的商业生产中实现低成本与高良品率,从而让超大尺寸、可卷曲折叠、超高性能以及拥有优秀性价比的 QLED 显示屏从概念走向普及。

(4)应用体系多元化与集成化。通过不断结合器件结构创新与系统级集成设计,最终,TQLED 将超越显示照明的单一范畴,融合传感、通信、能量采集等现代化高科技技术,使其达成从单一像素发光体到多功能智能光电平台的转变。TQLED 在未来将十分有望成为下一代智能显示与光电平台的核心力量。

表 2 近年来 TQLED 器件结构及性能

Table 2 Structure and performance of TQLED devices in recent years

Color	CGL	Effect	EQE/ %	Lifetime/h	Ref.
Red	TCTA/MoO ₃ /IZO /ZnMgO	1.Energy level matching 2.Potential barrier reduction	49.01	>50,000 (T ₉₅ *@1000cd/m ²)	[84]
Green	PMA/Al:AlO _x	1. Achieved charge injection balance 2. Suppress current leakage	50.3	19,000 (T ₅₀ @100mA/cm ²)	[54]
Blue		3. Prevent solvent damage to the lower layer	24	–	
White	PEDOT:PSS/ZnO /PEIE	1. Improve charge injection balance 2. Inhibit quenching	28	–	[68]
Red	ZnMgO/PEDOT:PSS	1. Improve CGL acid resistance 2. Inhibit quenching	35	12,000 (T ₅₀ @1000cd/m ²)	[43]
Red	ZnMgO/Al/HATCN /MoO ₃	–	34.4	–	[85]
Green	ZnMgO/Al/HATCN /MoO ₃	1. Reduced solvent damage 2. Implemented a matching energy level arrangement	27.6	53,808 (T ₅₀ @100cd/m ²)	[72]
Blue		3. Improve the balance of carrier injection	21.4	107 (T ₅₀ @100cd/m ²)	
White	ZnO/PMA	1. Reduce solvent damage 2. Improve the charge injection and transfer capability 3. High transmittance reduces parasitic light absorption	27.3	–	[73]
Green	Bphen:Cs ₂ CO ₃ /Al /HATCN/MoO ₃ /CBP	–	40	42,080 (T ₅₀ @100cd/m ²)	[76]
White	Bphen:Yb/HATCN /TAPC	–	23.9	–	[75]
Red	–	1.Prevent solvent damage to the lower layer 2.High-efficiency interconnection	60.7	≈30,000 (T ₉₅ @1000cd/m ²)	[86]
Red	ITO	1.Improve the balance of carrier injection 2. Optimized optical external coupling	51.2	≈31,383 (T ₉₅ @1000cd/m ²)	[87]
Red	ZnMgO/PMA/AMA	1. Improve the balance of carrier injection 2. Improve CGL acid resistance 3. Improve the morphology of thin films	–	–	[88]

*T₉₅ means the time taken to reach 95% of the initial brightness

参考文献:

- [1] GARCÍA DE ARQUER F P, TALAPIN D V, KLIMOV V I, *et al.* Semiconductor quantum dots: technological progress and future challenges. *Science*, 2021, **373**(6555): 8541.
- [2] POULSEN F, HANSEN T. Band gap energy of gradient core-shell quantum dots. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, **121**(25): 13655.
- [3] ZHANG G, MEI S, WEI X, *et al.* Dual-emissive and color-tunable Mn-doped InP/ZnS quantum dots via a growth-doping method. *Nanoscale Research Letters*, 2018, **13**(1): 170.
- [4] BI Y, CAO S, YU P, *et al.* Reducing emission linewidth of pure-blue ZnSeTe quantum dots through shell engineering toward high color purity light-emitting diodes. *Small*, 2023, **19**(45): 2303247.
- [5] VALLÉS-PELARDA M, GUALDRÓN-REYES A F, FELIPE LÉON C, *et al.* High optical performance of cyan-emissive CsPbBr₃ perovskite quantum dots embedded in molecular organogels. *Advanced Optical Materials*, 2021, **9**(18): 2001786.
- [6] BJELICA M, WITZIGMANN B. Optimization of 1.55 μm quantum dot edge-emitting lasers for narrow spectral linewidth. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, **48**(2): 1.
- [7] CHEN C, ZHANG P, GAO G, *et al.* Near-infrared-emitting two-dimensional codes based on lattice-strained core/(doped) shell quantum dots with long fluorescence lifetime. *Advanced Materials*, 2014, **26**(36): 6313.
- [8] EKIMOV A I, EFROS A L, ONUSHCHENKO A A. Quantum size effect in semiconductor microcrystals. *Solid State Communications*, 1985, **56**(11): 921.
- [9] ROSSETTI R, NAKAHARA S, BRUS L E. Quantum size effects in the redox potentials, resonance Raman spectra, and electronic spectra of CdS crystallites in aqueous solution. *The Journal of Chemical Physics*, 1983, **79**(2): 1086.
- [10] ALIVISATOS A P, HARRIS A L, LEVINOS N J, *et al.* Electronic states of semiconductor clusters: homogeneous and inhomogeneous broadening of the optical spectrum. *The Journal of Chemical Physics*, 1988, **89**(7): 4001.
- [11] JIN X, XIE K, ZHANG T, *et al.* Cation exchange assisted synthesis of ZnCdSe/ZnSe quantum dots with narrow emission line widths and near-unity photoluminescence quantum yields. *Chem. Commun. (Camb.)*, 2020, **56**(45): 6130.
- [12] MOON H, LEE C, LEE W, *et al.* Stability of quantum dots, quantum dot films, and quantum dot light-emitting diodes for display applications. *Adv. Mater.*, 2019, **31**(34): e1804294.
- [13] SUN Y, JIANG Y, SUN X W, *et al.* Beyond OLED: efficient quantum dot light-emitting diodes for display and lighting application. *Chem. Rec.*, 2019, **19**(8): 1729.
- [14] SHEN Z, ZHANG F, SHEN H, *et al.* Green emissive electroluminescent devices based on colloidal quantum dots. *Advanced Functional Materials*, 2025, **35**(39): 2422093.
- [15] ZHANG Q, YANG K, LUO C, *et al.* Nanosecond response perovskite quantum dot light-emitting diodes with ultra-high resolution for active display application. *Light Sci. Appl.*, 2025, **14**(1): 285.
- [16] SHAN Q, DONG Y, XIANG H, *et al.* Perovskite quantum dots for the next-generation displays: progress and prospect. *Advanced Functional Materials*, 2024, **34**(36): 2401284.
- [17] HUANG Q, SUN S, LIU M, *et al.* Colloidal quantum dot electroluminescent diodes for display applications: progress and challenges. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, **44**(5): 739.
- [18] CHEN S, ZHONG H, WANG X, *et al.* Hybrid-size quantum dots in hole transport layer depress dark current density of short-wave infrared photodetectors. *ACS Photonics*, 2025, **12**(2): 879.
- [19] WANG S, WEN J, FENG L, *et al.* High temperature resistance and wide-spectrum detection flexible photodetectors based on PbS quantum dots/Bi₂S₃ nanorods. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2025, **198**: 109738.
- [20] SHAN Q, WEI C, JIANG Y, *et al.* Perovskite light-emitting/detecting bifunctional fibres for wearable LiFi communication. *Light Sci. Appl.*, 2020, **9**: 163.
- [21] XUE J, LIU J, MAO S, *et al.* Recent progress in synthetic methods and applications in solar cells of Ag₂S quantum dots. *Materials Research Bulletin*, 2018, **106**: 113.
- [22] JI K, YUAN J, LI F, *et al.* High-efficiency perovskite quantum dot solar cells benefiting from a conjugated polymer-quantum dot bulk heterojunction connecting layer. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, **8**(16): 8104.
- [23] MCDONALD C, PADMANABAN D B, MCGLYNN R, *et al.* Improved performance and stability of perovskite solar cells by incorporating silicon quantum dots within the FAPbI₃ active layer. *Advanced Energy Materials*, 2025, **15**(36): e02864.
- [24] SHI Y, WANG J, SONG X, *et al.* Six-angle polarized snowflake-like carbon quantum dots via electrostatic reversion for low-cost and high-efficiency solar cells. *Joule*, 2025, **9**(8): 102013.
- [25] ZHANG Z, WANG W, RAO H, *et al.* Boosting the efficiency of quantum dot-sensitized solar cells over 17% via sequential deposition of water- and oil-soluble quantum dots. *Advanced Functional Materials*, 2025, **35**(26): 2501241.
- [26] ZENG H, HAN B, ZHANG F. Perovskite quantum dot photovoltaic and luminescent concentrator cells: current status and challenges. *Journal of Inorganic Materials*, 2022, **37**(2): 117.
- [27] ZHANG Y, LIU B, LIU Z, *et al.* Research progress in the synthesis and biological application of quantum dots. *New Journal of Chemistry*, 2022, **46**(43): 20515.
- [28] BRUCHEZ M, MORONNE M, GIN P, *et al.* Semiconductor nanocrystals as fluorescent biological labels. *Science*, 1998,

281(5385): 2013.

- [29] ZHANG Y, LV Y, LI L S, *et al.* Aminophosphate precursors for the synthesis of near-unity emitting InP quantum dots and their application in liver cancer diagnosis. *Exploration (Beijing)*, 2022, **2(4)**: 20220082.
- [30] WANG B, CAI H, WATERHOUSE G I N, *et al.* Carbon dots in bioimaging, biosensing and therapeutics: a comprehensive review. *Small Sci.*, 2022, **2(6)**: 2200012.
- [31] PROTESCU L, YAKUNIN S, BODNARCHUK M I, *et al.* Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX₃, X = Cl, Br, and I): novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut. *Nano Letters*, 2015, **15(6)**: 3692.
- [32] JIANG J, ZHANG S, SHAN Q, *et al.* High-color-rendition white QLEDs by balancing red, green and blue centres in eco-friendly ZnCuGaS:In@ZnS quantum dots. *Adv. Mater.*, 2024, **36(21)**: e2304772.
- [33] ZENG H, LIU Y, SHAN Q, *et al.* High-brightness and monodisperse quaternary CuInZnS@ZnS quantum dots with tunable and long-lived emission. *Journal of Inorganic Materials*, 2025, **40(4)**: 433.
- [34] YANG Z, GAO M, WU W, *et al.* Recent advances in quantum dot-based light-emitting devices: challenges and possible solutions. *Materials Today*, 2019, **24**: 69.
- [35] YUAN Q, WANG T, YU P, *et al.* A review on the electroluminescence properties of quantum-dot light-emitting diodes. *Organic Electronics*, 2021, **90**: 106086.
- [36] SHIRASAKI Y, SUPRAN G J, BAWENDI M G, *et al.* Emergence of colloidal quantum-dot light-emitting technologies. *Nature Photonics*, 2012, **7(1)**: 13.
- [37] BAE W K, BROVELLI S, KLIMOV V I. Spectroscopic insights into the performance of quantum dot light-emitting diodes. *MRS Bulletin*, 2013, **38(9)**: 721.
- [38] DAI X, DENG Y, PENG X, *et al.* Quantum-dot light-emitting diodes for large-area displays: towards the dawn of commercialization. *Advanced Materials*, 2017, **29(14)**: 1607022.
- [39] XU L, LI J, CAI B, *et al.* A bilateral interfacial passivation strategy promoting efficiency and stability of perovskite quantum dot light-emitting diodes. *Nature Communications*, 2020, **11(1)**: 3092.
- [40] CUI Z, YANG D, QIN S, *et al.* Advances, challenges, and perspectives for heavy-metal-free blue-emitting indium phosphide quantum dot light-emitting diodes. *Advanced Optical Materials*, 2022, **11(4)**: 2202036.
- [41] WANG F, HUA Q, LIN Q, *et al.* High-performance blue quantum-dot light-emitting diodes by alleviating electron trapping. *Advanced Optical Materials*, 2022, **10(13)**: 2200319.
- [42] LIM E L, CHEN X, WEI Z. The rise of tandem perovskite light-emitting diode. *Small*, 2024, **20(51)**: 2405933.
- [43] SUN Y, HAN C, LI R, *et al.* Fully solution-processed red tandem quantum dot light-emitting diodes with an EQE exceeding 35%. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, **12(27)**: 10053.
- [44] MATSUMOTO T, NAKADA T, ENDO J, *et al.* 27.5L: late-news paper: multiphoton organic EL device having charge generation layer. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2012, **34(1)**: 979.
- [45] LEE S, SHIN H, KIM J J. High-efficiency orange and tandem white organic light-emitting diodes using phosphorescent dyes with horizontally oriented emitting dipoles. *Adv. Mater.*, 2014, **26(33)**: 5864.
- [46] SHEN H, LIN Q, CAO W, *et al.* Efficient and long-lifetime full-color light-emitting diodes using high luminescence quantum yield thick-shell quantum dots. *Nanoscale*, 2017, **9(36)**: 13583.
- [47] FU Y, LIU H, YANG D, *et al.* Boosting external quantum efficiency to 38.6% of sky-blue delayed fluorescence molecules by optimizing horizontal dipole orientation. *Sci. Adv.*, 2021, **7(43)**: eabj2504.
- [48] ZHANG H, CHEN S, SUN X W. Efficient red/green/blue tandem quantum-dot light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 21. *ACS Nano*, 2018, **12(1)**: 697.
- [49] CAO W, XIANG C, YANG Y, *et al.* Highly stable QLEDs with improved hole injection via quantum dot structure tailoring. *Nat. Commun.*, 2018, **9(1)**: 2608.
- [50] SHEN H, GAO Q, ZHANG Y, *et al.* Visible quantum dot light-emitting diodes with simultaneous high brightness and efficiency. *Nature Photonics*, 2019, **13(3)**: 192.
- [51] FUNG M K, LI Y Q, LIAO L S. Tandem organic light-emitting diodes. *Advanced Materials*, 2016, **28(47)**: 10381.
- [52] ZHANG H, SU Q, SUN Y, *et al.* Efficient and color stable white quantum-dot light-emitting diodes with external quantum Efficiency over 23%. *Advanced Optical Materials*, 2018, **6(16)**: 1800354.
- [53] MENG S G, ZHU X Z, ZHOU D Y, *et al.* Recent progresses in solution-processed tandem organic and quantum dots light-emitting diodes. *Molecules*, 2022, **28(1)**: 134.
- [54] WU Q, GONG X, ZHAO D, *et al.* Efficient tandem quantum-dot LEDs enabled by an inorganic semiconductor-metal-dielectric interconnecting layer stack. *Advanced Materials*, 2021, **34(4)**: 2108150.
- [55] DAI X, ZHANG Z, JIN Y, *et al.* Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on quantum dots. *Nature*, 2014, **515(7525)**: 96.
- [56] KRÖGER M, HAMWI S, MEYER J, *et al.* Temperature-independent field-induced charge separation at doped organic/organic interfaces: experimental modeling of electrical properties. *Physical Review B*, 2007, **75(23)**: 235321.
- [57] ZHANG H, FENG Y, CHEN S. Improved efficiency and enhanced color quality of light-emitting diodes with quantum dot and organic hybrid tandem structure. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, **8(40)**: 26982.

- [58] ZHANG H, SUN X, CHEN S. Over 100 $\text{cd}\cdot\text{A}^{-1}$ efficient quantum dot light-emitting diodes with inverted tandem structure. *Advanced Functional Materials*, 2017, **27(21)**: 1700610.
- [59] ZHOU T, WANG T, BAI J, *et al.* High-performance tandem quantum-dot light-emitting diodes based on bulk-heterojunction-like charge-generation layers. *Advanced Materials*, 2024, **36(25)**: 2313888.
- [60] ZHAN S, LIU J-T, ZHANG H-Z, *et al.* Quantum-dot light-emitting diodes based on inorganic charge-generation layer. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, **43(10)**: 1469.
- [61] MEI K, HUO S, YU R, *et al.* Quantum-dot light-emitting diodes based on MoO_3/ZnO inorganic charge-generation layer. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, **44(11)**: 1885.
- [62] LEE H, PARK I, KWAK J, *et al.* Improvement of electron injection in inverted bottom-emission blue phosphorescent organic light emitting diodes using zinc oxide nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 2010, **96(15)**: 153306.
- [63] DOBBERTIN T, KROEGER M, HEITHECKER D, *et al.* Inverted top-emitting organic light-emitting diodes using sputter-deposited anodes. *Applied Physics Letters*, 2003, **82(2)**: 284.
- [64] LEE T, HAHM D, KIM K, *et al.* Highly efficient and bright inverted top-emitting InP quantum dot light-emitting diodes introducing a hole-suppressing interlayer. *Small*, 2019, **15(50)**: 1905162.
- [65] KIM H M, LEE J, HWANG E, *et al.* P-95: inverted tandem architecture of quantum-dot light emitting diodes with solution processed charge generation layers. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, **47(1)**: 1480.
- [66] WU J, XIA J, LEI W. Investigation on the wetting issues in solution processed quantum dot light-emitting diodes with inverted tandem structure. *Organic Electronics*, 2019, **67**: 116.
- [67] SHANSHAN Y A N, SHEN W, WENCHENG L, *et al.* Time-resolved electroluminescence of charge carrier dynamics in multiple-emitting-layer white QLEDs with polyethyleneimine interlayers. *Chinese Journal of Luminescence*, 2025, **46(10)**: 1851.
- [68] CAO F, ZHAO D, SHEN P, *et al.* High-efficiency, solution-processed white quantum dot light-emitting diodes with serially stacked red/green/blue units. *Advanced Optical Materials*, 2018, **6(20)**: 1800652.
- [69] KWON O, KIM D, KIM M, *et al.* High-performance tandem CdSe/ZnS quantum-dot light-emitting diodes with a double-layer interconnecting layer composed of thermally evaporated and sputtered metal oxides. *Journal of Information Display*, 2022, **23(3)**: 213.
- [70] MENG S G, SHEN W S, LIU W Z, *et al.* Solution-processed tandem quantum-dot light-emitting diodes with dual charge generation interfaces: achieving over threefold efficiency enhancement. *Advanced Materials Interfaces*, 2024, **11(26)**: 2400098.
- [71] ZHANG H, WANG S, SUN X, *et al.* All solution-processed white quantum-dot light-emitting diodes with three-unit tandem structure. *Journal of the Society for Information Display*, 2017, **25(3)**: 143.
- [72] ZHANG H, CHEN S, SUN X W. Efficient red/green/blue tandem quantum-dot light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 21%. *ACS Nano*, 2017, **12(1)**: 697.
- [73] JIANG C, ZOU J, LIU Y, *et al.* Fully solution-processed tandem white quantum-dot light-emitting diode with an external quantum efficiency exceeding 25%. *ACS Nano*, 2018, **12(6)**: 6040.
- [74] CHEN J, CHEN S, LIU X, *et al.* Molecule-induced ripening control in perovskite quantum dots for efficient and stable light-emitting diodes. *Sci. Adv.*, 2025, **11(11)**: eads7159.
- [75] SUN S Q, CAI Y, ZHU M, *et al.* Highly efficient hybrid perovskite/organic tandem white light emitting-diodes with external quantum efficiency exceeding 20%. *Advanced Functional Materials*, 2023, **33(51)**: 2306549.
- [76] KONG L, LUO Y, WU Q, *et al.* Efficient and stable hybrid perovskite-organic light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 40 per cent. *Light: Science & Applications*, 2024, **13(1)**: 1364.
- [77] LEE H D, WOO S J, KIM S, *et al.* Valley-centre tandem perovskite light-emitting diodes. *Nature Nanotechnology*, 2024, **19(5)**: 624.
- [78] XIA F, SUN X W, CHEN S. Alternating-current driven quantum-dot light-emitting diodes with high brightness. *Nanoscale*, 2019, **11(12)**: 5231.
- [79] ZHANG H, SU Q, CHEN S. Quantum-dot and organic hybrid tandem light-emitting diodes with multi-functionality of full-color-tunability and white-light-emission. *Nature Communications*, 2020, **11(1)**: 2826.
- [80] ZHANG H, WANG J, CHEN S. 220V/50Hz compatible bipolar quantum-dot light-emitting diodes. *Advanced Materials*, 2024, **36(16)**: 2312334.
- [81] ZHANG H, CHEN L, CHEN S. Quantum-dot and organic hybrid tandem light-emitting diodes with color-selecting intermediate electrodes for full-color displays. *Nanoscale*, 2021, **13(39)**: 16781.
- [82] SU Q, ZHANG H, CHEN S. Flexible and tandem quantum-dot light-emitting diodes with individually addressable red/green/blue emission. *npj Flexible Electronics*, 2021, **5(1)**: 8.
- [83] YOO J I, KIM H B, KO Y J, *et al.* All-solution-processed dual-color QLED with hole-only-injection and n-p-n intermediate connecting layer. *ACS Applied Electronic Materials*, 2025, **7(2)**: 679.
- [84] YUAN C, CHEN Z, TIAN F, *et al.* Very stable and efficient tandem quantum-dot light-emitting diodes enabled by IZO-based interconnecting layers. *Nano Letters*, 2024, **24(24)**: 7541.
- [85] SU Q, ZHANG H, XIA F, *et al.* 73-4: tandem red quantum-

dot light-emitting diodes with external quantum efficiency over 34 %. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, **49(1)**: 977.

[86] LI H, WANG J, CHEN S. Face-to-face integrated tandem quantum-dot LEDs with high performance and multifunctionality. *Light Sci. Appl.*, 2025, **14(1)**: 171.

[87] YANG D, WANG Y, XIE J, *et al.* Regular tandem quantum dot light-emitting diodes with over 51% external quantum

efficiency for next-generation displays. *Advanced Materials*, 2025, **37(44)**: e08173.

[88] MENG S G, WANG Y, XU J Z, *et al.* Dipole engineering in charge generation interface for fully solution-processed and PEDOT:PSS-free tandem quantum-dot light-emitting diodes. *Advanced Electronic Materials*, 2025, **11(14)**: 2500180.