

文章编号:1007-2780(2026)01-0084-19

长寿命量子点发光二极管的功能层设计

李成骏^{1,2}, 徐锐^{1,3}, 杨紫琰^{1,4}, 吴智俊^{1,5}, 贡兴承^{1,2}, 黎瑞锋^{1*}, 章婷^{1*}

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201;

2. 中国科学技术大学 纳米科学技术学院, 安徽 合肥 230026;

3. 宁波诺丁汉大学 机械、材料与制造工程系, 浙江 宁波 315100;

4. 四川大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610065;

5. 宁波大学 材料科学与化学工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:量子点发光二极管(Quantum Dot Light-emitting Diode, QLED)具有卓越的性能,如高色纯度、宽色域和可调节的发射波长。这些独特的优点使其成为下一代显示器和固态照明领域的有力竞争者。本文系统地分析了长寿命 QLED 器件的设计策略,从量子点发光层(Emitting Layer, EML)、电子传输层(Electron Transport Layer, ETL)、空穴传输层(Hole Transport Layer, HTL)等 3 个核心功能层梳理长寿命 QLED 器件的共性特征和规律,为后续蓝光 QLED 器件和更多量子点体系 QLED 器件寿命的提升提供有益的思路,对长寿命 QLED 技术的发展提出展望。

关键词:量子点发光二极管;长寿命器件;量子点发光层;电子传输层;空穴传输层

中图分类号:O482.31;TN383⁺.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2025-0182 **CSTR:**32172.14.CJLCD.2025-0182

收稿日期:2025-09-10;**修订日期:**2025-10-10.

基金项目:国家重点研发计划(No.2022YFB3606501, No.2022YFB3602902);国家自然科学基金(No.U23A2092);国家自然科学基金重点项目(No.62234004);浙江省“尖兵”“领雁”科技计划(No.2024C01092, No.2024C01191);宁波市科技创新 2025 重大专项(No.2022Z085);宁波市 3315 计划(No.2020A-01-B);甬江引才工程(No.2021A-038-B, No.2021A-159-G);“科创甬江 2035”重点研发计划(No.2025Z079, No.2024Z146)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2022YFB3606501, No. 2022YFB3602902); National Natural Science Foundation of China (No.U23A2092); Key Projects of National Natural Science Foundation of China (No. 62234004); “Pioneer” and “Leading Goose” R&D Program of Zhejiang (No.2024C01092, No.2024C01191); Ningbo Key Technologies R&D Program (No.2022Z085); Ningbo 3315 Programme (No. 2020A-01-B); Yongjiang Talent Introduction Programme (No. 2021A-038-B, No.2021A-159-G); Ningbo Science and Technology Yongjiang 2035 Key Technology Breakthrough Plan Project (No.2025Z079, No.2024Z146)

*通信联系人, E-mail: zhangting@nimte.ac.cn; lirufeng@nimte.ac.cn

Design of functional layers for long-lifetime quantum dot light-emitting diodes

LI Chengjun^{1,2}, XU Rui^{1,3}, YANG Ziyang^{1,4}, WU Zhijun^{1,5}, GONG Xingcheng^{1,2},
LI Ruifeng^{1*}, ZHANG Ting^{1*}

(1. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences,
Ningbo 315201, China;

2. Nano Science and Technology Institute, University of Science and Technology of China,
Hefei 230026, China;

3. Department of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, University of
Nottingham Ningbo, Ningbo 315100, China;

4. School of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

5. School of Materials Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Quantum dot light-emitting diodes (QLEDs) exhibit outstanding properties, such as high color purity, wide color gamut, and tunable emission wavelengths. These advantages make them strong competitors in the fields of next-generation displays and solid-state lighting. There are three core functional layers in QLED: the quantum dot Emitting Layer (EML), Electron Transport Layer (ETL), and Hole Transport Layer (HTL), which are of great significance for the lifetime of QLEDs. In this review, we summarize the common characteristics and patterns of long-lifetime QLED devices from researches about these three functional layers. We systematically analyze the design strategies for long-lifetime QLED devices. This paper provides valuable insights for subsequent lifetime research on blue QLED devices and QLED devices based on more quantum dot systems, and presents an outlook on the development of long-lifetime QLED technology.

Key words: quantum dot light-emitting diode; long-life devices; emitting layer; electron transport layer; hole transport layer

1 引言

QLED 是一种基于量子点的低功耗主动式发光器件,具有发光效率高、色域广和易于加工的优势,是继 OLED 有机发光技术后下一代重要的显示技术路线。当前 QLED 器件的外量子效率 (External Quantum Efficiency, EQE) 已基本符合产业应用要求,然而器件的工作寿命仍然是制约 QLED 技术发展的瓶颈。

QLED 器件由量子点发光层、电子/空穴传输层和上下电极组成, QLED 器件的 EQE、亮度和工作寿命主要取决于各个功能层材料和器件结构的设计。其中量子点发光层、电子传输层和空穴传输层是 3 个最核心的功能层,各功能层的能级位

置、迁移率和界面接触状态直接影响载流子注入和复合发光的过程,各功能层材料和相邻界面在长时间恒流驱动下的稳定性与器件整体的寿命表现息息相关。经过多年的发展,含镉量子点体系相对其他体系展现出当前最长的器件工作寿命。以含镉体系的 QLED 器件为例,目前红光和绿光 QLED 器件工作寿命分别达到 72 968 h ($T_{95}@1\ 000\ \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)^[1] 和 19 500 h ($T_{95}@1\ 000\ \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)^[2], 然而蓝光 QLED 器件的最优寿命仅为 287 h ($T_{95}@1\ 000\ \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)^[3], 与产业应用要求仍有较大差距。

本文聚焦 QLED 器件的量子点发光层、电子传输层和空穴传输层 3 个核心功能层,对当前长寿命 QLED 器件的代表性工作梳理,分析核心功能层材料和相邻界面的设计对器件工作寿

命的影响,提炼和归纳材料和器件设计的共性规律,为 QLED 器件进一步提升和突破工作寿命提供有益的思路 and 指引。最后分析和展望了 QLED 器件的未来发展方向,并提出器件设计建议供本领域研究者参考。

2 量子点发光层设计

量子点发光层是 QLED 的核心功能层,对 QLED 器件的 EQE 和工作寿命有重要影响。有别于光致发光的量子点材料设计,电致发光的量子点材料一方面需要保证激子有效束缚和高效复合,同时也需要兼顾载流子的平衡注入。如果其自身结构不稳定,内部成分不均匀或者缺陷过多,并且不能与临近功能层能级适配,积累的载流子或者缺陷诱导的非辐射复合产生的热量会使 EML 遭到破坏和降解,从而导致 QLED 器件寿命较短。因此量子点材料的核、壳和表面配体设计是调控器件性能的关键要素。以下将围绕量子点材料的大尺寸化与合金化设计、中间壳层设计、最外壳层设计和表面配体等展开讨论,归纳长寿命 QLED 器件的 EML 设计思路。

2.1 量子点的大尺寸与合金化设计

为增加激子辐射复合概率,减少表面或内部缺陷等因素带来的非辐射复合,长寿命 QLED 的量子点往往采用“合金化(稳定结构)+大尺寸(性能优化)”的协同设计思路。合金化能够使量子点内部成分更加均匀,一方面可以减少内部缺陷,抑制缺陷诱导的非辐射复合,另一方面可以平缓量子点中的载流子注入势垒,有利于电子和空穴的注入和复合,从而抑制载流子积累诱导的量子点降解以及非辐射俄歇复合。而大尺寸设计一方面可以增加激子的辐射复合概率,减少热量积累带来的稳定性问题,另一方面可以降低量子点比表面积,抑制量子点表面缺陷造成的非辐射复合。利用合金化可以解决大尺寸生长中带来的成分不均匀问题,通过大尺寸可以放大合金化的性能优势,两者相辅相成,最终实现“高亮度、高效率、长寿命”的器件应用需求。

以最近长寿命器件的设计为例,2023 年河南大学 Shen Huaibin 团队采用单层大尺寸全梯度

(CdSe/CdZnSe/ZnS)核壳结构,如图 1(a)所示,通过“减少量子点堆积数量”,即相同发光面积内大量子点比常规小量子点(10 nm)堆积数少(如 12 个小量子点的区域仅能容纳 3 个大量子点),使总电荷固定时单个量子点的电荷布居数更高,在相同电压下辐射复合概率更高,最终使红光 QLED 器件寿命超过 48 000 h ($T_{95}@1\ 000\ \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$),功率转换效率(Power Conversion Efficiency, PCE)达 23%^[4]。此外,为实现低驱动电压下有效提升亮度和减少器件发热,2024 年该团队进一步设计了“巨型”全合金 CdZnSe/ZnSeS 核壳结构(尺寸约 19 nm,核心为 CdZnSe 合金),形成连续能级与离域空穴波函数,如图 1(c~f)所示。该结构平缓了量子点层与空穴传输层的能量分布,降低了空穴注入势垒并加速了激子辐射复合,实现了极低的效率滚降,使红光 QLED 寿命超过 72 968 h ($T_{95}@1\ 000\ \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)^[1]。利用合金化手段不仅可以平缓载流子注入势垒,还可以使量子点内部成分更加均匀。2025 年苏州大学 Liu Bochen 等人采用 CdZnSeS 合金核心搭配多层核壳结构(图 1(b)),一方面借助合金成分均匀性减少内部缺陷,另一方面不对称应变的设计促进了薄膜中量子点的水平排列,使光子优先沿 c 轴发射(定向性增强),减少器件内部光损耗,提升了发光效率,使绿光 QLED 寿命达 6 350 h ($T_{95}@1\ 000\ \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)^[5]。在无镉量子点方面,2024 年河南大学 Shen Huaibin 团队通过设计大尺寸 InP 内核,显著降低比表面积,减少表面悬挂键与氧化缺陷,为后续 ZnSe 中间壳层和 ZnS 外壳的外延生长提供原子级平整界面,从而缓解 InP 与 ZnS 之间高达 7% 的晶格失配问题,减少界面位错与非辐射复合中心的生成^[6],并在发射波长为 543 nm 的绿光 InP 基 QLED 中实现了 26.68% 的 EQE 和 1 241 h 的寿命 ($T_{95}@1\ 000\ \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)。

对于 InP 量子点,由于内核生长时表面易存在未配位金属位点、氧化缺陷等非辐射复合中心,需要在生长壳层前对内核进行适度蚀刻。2019 年,三星公司报道了超高性能的红光 InP 基 QLED。通过在合成过程中加入氢氟酸(HF)来去除 InP 的氧化缺陷,合成了高度稳定且尺寸均匀的 InP/ZnSe/ZnS 量子点。优化后的 InP/ZnSe/ZnS 量子点发光二极管的最大 EQE 为 21.4%,最大亮

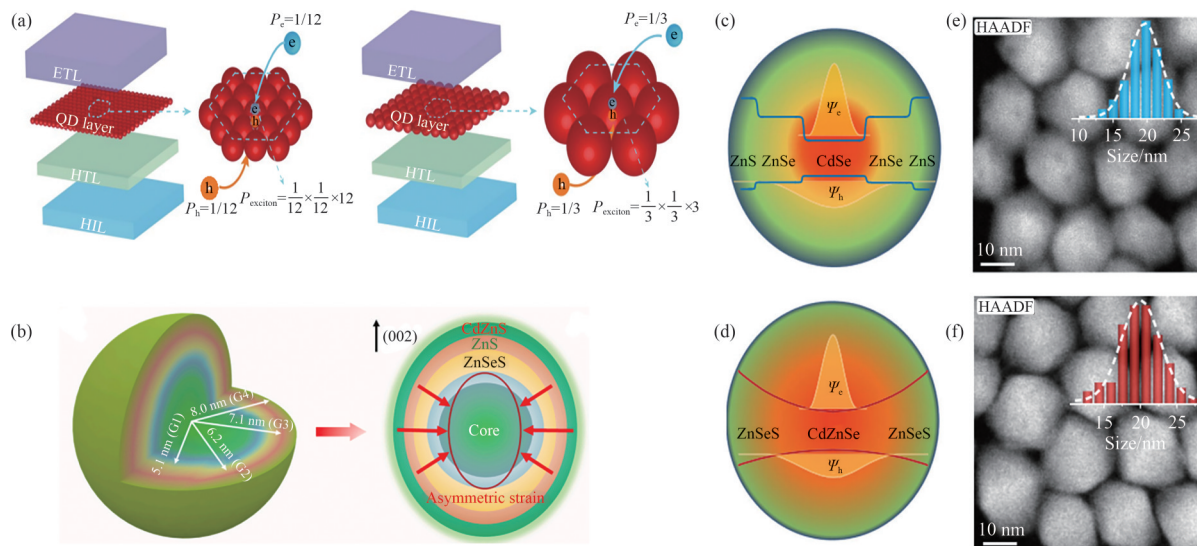


图1 量子点大尺寸与合金化设计,目的是增加激子的辐射复合概率,提高光子利用率,减少热量积累。(a) 量子点尺寸对电子-空穴复合概率的影响,这里选取一个可容纳12个规则量子点的小区域进行说明,由于大量子点具有较低的堆积密度,因此对于给定的电荷浓度,电子(P_e)和空穴(P_h)的充电速率更高,从而导致QLED中的激子形成概率更高^[4]; (b) 非对称应变量子点的示意图^[5],这种非对称应变迫使光子优先沿 c 轴定向发射,提高了光子利用率; (c) 基于CdSe的量子点和(d)基于CdZnSe的量子点示意图,展示了相应的能级以及电子/空穴波函数^[1]; (e) 基于CdSe的量子点和(f)基于CdZnSe的量子点的高角度环形暗场扫描透射电子显微镜图像(插图:相应的尺寸分布直方图)^[1]。

Fig. 1 Design of large-size and alloying of quantum dots, the purpose is to increase the radiative recombination probability of excitons, improve the photon utilization rate, and reduce heat accumulation. (a) Effect of QD size on electron-hole recombination probability. A small area that can pack 12 regular QDs is selected here for illustration. Because large QDs have lower packing densities, the charging rates for both electrons (P_e) and holes (P_h) are higher for a given charge concentration, leading to higher exciton formation probabilities (P_{exciton}) in QD-LEDs^[4]. (b) Schematic illustration of asymmetrically strained QDs^[5]. This asymmetric strain forces photons to be preferentially emitted along the c -axis, improving the photon utilization rate. Schematic illustrations of QDs with corresponding energy levels and electron/hole wavefunctions for (c) CdSe-based QDs and (d) CdZnSe-based QDs^[1]. HAADF scanning transmission electron microscopy images of (e) CdSe-based QDs and (f) CdZnSe-based QDs (insets: the corresponding size distribution histograms)^[1].

度为 $100\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, 在 $100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 下具有长达 $1\,000\,000\text{ h}$ (T_{50}) 的寿命^[7]。此外, InP 核表面反应活性极高, 易在合成过程中发生氧化。这些氧化层不仅会成为非辐射复合中心, 还会阻碍后续壳层的生长, 最终导致其光致发光量子产率 (Photoluminescence Quantum Yield, PLQY) 降低, 降低器件寿命。2025 年, Luo Yaning 等人用小分子配体 (吡啶) 替换传统长链羧酸配体 (如油酸), 消除空间位阻, 使 HF 等蚀刻剂能高效接触 InP 核表面, 去除氧化层缺陷, 减少因氧化产生的非辐射复合中心; 另一方面, 配体中的配位基团 (如吡啶的 N 原子) 可与 InP 核表面未配位的 In^{3+} 形成强配位键, 填补表面悬挂键等缺陷位点, 从化学层

面封堵缺陷, 抑制非辐射复合路径, 最终使量子点光致发光量子产率 (PLQY) 提升至 90%, 平均荧光寿命延长至 146.8 ns , 相应的绿光 QLED 器件实现了 15.4% 的 EQE 以及 6 819 h 的长工作寿命 ($T_{95}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$)^[8]。

2.2 中间壳层设计

中间壳层作为内核与外壳的“过渡桥梁”, 核心作用是缓解晶格失配、平衡载流子传输、约束激子, 从而减少界面缺陷与载流子泄漏, 设计合适的中间壳层可以优化界面与电荷传输以提升量子点寿命。

为缓解核壳间晶格失配引起的应变, 2015 年, Qian Lei 团队通过设计渐变中间壳层调节成分

与厚度,引入 ZnSe 作为中间壳层,在提升晶格适配的同时还优化了载流子注入的过程,使蓝、绿、红 QLED 外量子效率均超 10%, $100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 下绿光器件外推寿命超过 90 000 h (T_{50}),红光超过 300 000 h (T_{50})^[9],获得里程碑式的突破。2023 年,苏州大学及 TCL 团队 Chen Xingtong 等人针对蓝光 QLED 寿命短板,设计了 CdSeS 合金核心、ZnSeS 梯度内层壳(能级非单调渐变)和 ZnS 最外层结构,通过“宽-窄-宽”非单调能级排列将激子波函数限制在内部,抑制表面-体相耦合,形成势能阱,降低电荷注入势垒,在初始亮度为 $1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,蓝光器件的 T_{95} 工作寿命达到 227 h^[10]。针对内核与外壳高晶格失配问题,2024 年河南大学 Shen Huaibin 团队在 InP 基量子点(晶格常数约 0.587 nm)与 ZnS 外壳(约 0.541 nm)间插入 ZnSe 缓冲层(约 0.567 nm),用加厚的 ZnSe 夹层代替目前广泛使用的 ZnSeS 夹层,既缓解了 InP 与 ZnS 之间的晶格失配(从 7% 降至 2% 以下),又有效约束了激子避免了电子泄漏^[6],进而延长了器件寿命。2025 年,该团队还通过设计一种界面势能梯度(Interfacial Potential Graded, IPG)结构的 ZnSeTe 量子点来解决晶格失配的问题^[11],这种结构通过控制 Te 分布的梯度核心/壳层结构来实现,从而减少了界面晶格失配和应变,降低了结构变形和失配缺陷。在平衡载流子传输、约束激子方面,采用非单调梯度壳层借助能带工程(如 ZnSeS 的宽禁带子壳)使得激子波函数远离表面,降低了表面电荷对激子跃迁的影响。

2.3 最外壳层与表面配体设计

最外壳层与表面配体设计直接影响量子点与电荷传输层的适配性及表面稳定性,合适的量子点最外壳层与表面配体通过结构防护与化学调控的协同作用可帮助器件实现性能与稳定性的双重提升。

最外壳层的核心作用是钝化表面缺陷和物理防护。2025 年, Liu Bochen 等人采用 CdZnSeS/ZnSeS/ZnS/CdZnS 四层核壳结构,解决绿光量子点表面缺陷多、激子易泄漏的痛点。其中最外壳层选用 CdZnS 窄带隙外壳。CdZnS 具有与中间 ZnS 壳层、内壳 ZnSeS 良好的晶格匹配特性(晶格失配率 $<2\%$),避免因晶格差异产生界面位

错;同时其窄带隙特性(较 ZnS 窄)可优化量子点能级结构,缩小了价带顶与空穴传输层的最高占据分子轨道(Highest Occupied Molecular Orbital, HOMO)能级差,减少了空穴注入势垒,平衡了载流子的复合。此外, CdZnS 的化学稳定性优于纯 ZnS,能更有效地隔绝氧气、水分对量子点核的侵蚀,使绿光 QLED 在 $1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 下 T_{95} 寿命达 6 350 h^[5]。

量子点表面配体可钝化表面未配位的金属位点、氧化缺陷等非辐射复合中心,对于延长器件寿命有重要影响。2021 年, Chao 等人使用各种烷基二胺和卤化锌对 InP 量子点最外壳层表面进行后处理,钝化了量子点表面缺陷位点,提高了空穴的传输性能和薄膜的平整度。在初始亮度为 $100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,基于修饰后的绿光 InP 基 QLED 器件的最大外量子效率(EQE)达到 16.3%,长期工作半衰期为 1 033.4 h^[12]。2024 年, Shen Huaibin 等人使用半胱胺(CTA)分子对量子点薄膜进行后处理,有效钝化了表面缺陷和非辐射位点,从而提高了器件稳定性。如图 2(a)所示,经 CTA 处理的 QDs 诱导形成了界面偶极,降低了空穴的注入势垒,阻碍了电子注入,实现了器件中更平衡的载流子注入,使得绿光 QLED 的 T_{95} 寿命超过 1 200 h ($T_{95}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$)^[13]。在镉基量子点中,2020 年,浙江大学 Pu Chaodan 等人将具有优异发光性能的量子点与电化学惰性配体相结合,如图 2(b)所示,采用十八胺(RNH_2)替换合成过程中残留的锌羧酸盐($\text{Zn}(\text{RCOO})_2$),通过配体交换反应形成电化学惰性表面以缩小其光致发光与电致发光之间的差距,使得红光发光二极管寿命实现 ($T_{95}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$) $>3\,800\text{ h}$ 、蓝光发光二极管寿命实现 ($T_{50}@100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$) $>10\,000\text{ h}$,工作寿命达到了较高的水平^[14]。

量子点光刻技术是通过设计光敏交联剂调控配体光化学反应,结合特定波长光源(如 254 nm 深紫外光、365 nm i 线),在实现量子点微米至亚微米级高分辨率图案化的同时,无损保留其光致发光、载流子传输等关键性能,最终用于制备高性能 RGB 全彩 QLED 的核心技术,对于延长 QLED 寿命也有着十分重要的作用。利用光刻技术可以让量子点之间形成交联网络,使量子点膜层厚

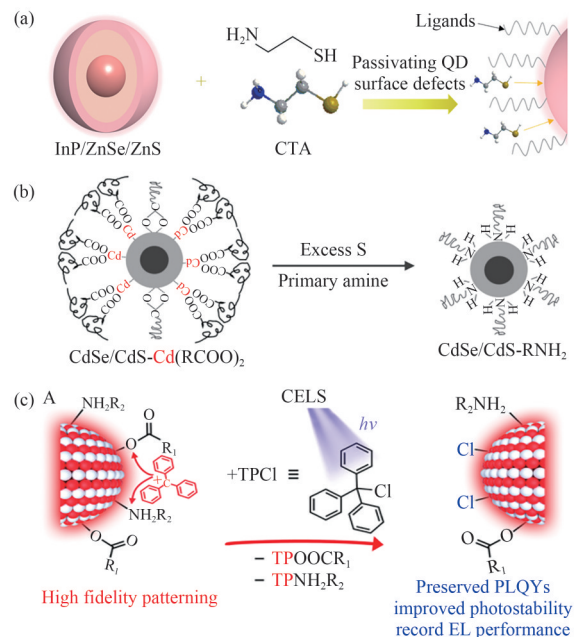


图2 量子点表面配体工程,目的是钝化缺陷,增强激子束缚。(a)红光InP/ZnSe/ZnS核/壳/壳量子点的示意图、CTA分子的分子结构图及CTA分子钝化量子点表面缺陷示意图^[13]; (b)配体从羧酸镉(含有少量带负电荷的羧酸盐)交换为伯胺的示意图^[14]; (c)碳正离子驱动的配体脱除示意图^[15],TPCl分子发生光致解离,生成三苯基碳正离子(TP⁺)和氯离子(Cl⁻),TP⁺使得量子点配体剥离,Cl⁻通过强配位作用结合到未配位金属位点,填补表面缺陷。

Fig. 2 Quantum dot surface ligand engineering, the purpose is to passivate defects and enhance exciton binding. (a) Schematic diagram of the red InP/ZnSe/ZnS core/shell/shell QDs, molecular structure diagram of CTA molecule, and schematic diagram of CTA molecular passivation of QD surface defects^[13]; (b) Ligand exchange from cadmium-carboxylates (with a small amount of negatively charged carboxylates) to primary amines^[14]; (c) Schematic illustration of CELS (carbocation-enabled ligand stripping)^[15]. The triphenylmethyl chloride (TPCl) molecule undergoes photodissociation to generate triphenylmethyl carbocation (TP⁺) and chloride ion (Cl⁻). TP⁺ causes the ligand stripping of the quantum dots, and Cl⁻ binds to the uncoordinated metal sites through strong coordination to fill the surface defects.

度均匀性提升,电荷在发光层内分布更均匀,避免局部电流集中引发量子点降解加速的“热点效

应”。2022年,Yang Jeehye等人开发了基于支化光驱动配体交联剂的无重金属量子点无损光刻策略,光交联后量子点形成致密的配体交联网络,在后续沉积ZnMgO电子传输层时,膜层结构更稳定,避免了溶液加工导致的量子点表面缺陷暴露或界面剥离,减少了载流子非辐射复合的界面陷阱。光刻后绿光QLED($T_{90}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$)提升至156 h,是原始器件寿命的10.4倍^[16]。除了形成致密的交联网络增加量子点膜的均匀性以外,光刻技术还可以同时实现图案化与配体钝化过程。2023年,清华大学Fu Zhong等人用三苯基氯甲烷(TPCl)光解生成TP⁺部分去除原生配体,实现约4 μm 图案化,同时释放Cl⁻钝化缺陷,提升光稳定性,基于此的绿光QLED寿命达8 700 h($T_{95}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$)^[15],见图2(c)。为了避免量子点在光刻过程中受到损伤,保证其在实现图案化的同时寿命不受到影响,2025年,Zhai Zhixin等人设计了基于二苯甲酮类交联剂(biBPS)的无损i线(365 nm紫外线)光刻策略,光交联后量子点的能级上移,减少了与空穴传输层的能级势垒,改善了空穴注入效率,避免了载流子在界面积累导致的器件老化。biBPS与量子点表面配体形成致密交联网络,交联后空穴迁移率提升、电子迁移率适度降低,载流子复合更平衡,减少非辐射复合引起的能量损耗与材料降解。光刻后的红光QLED $T_{95}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 提升至2 258.3 h,约是原始器件寿命的2.1倍^[17]。

2.4 策略总结

综上所述,长寿命QLED的EML设计既要保证电子和空穴的高效注入,也要保证电子和空穴的高效利用,其自身结构的稳定性也至关重要。量子点的核壳结构、尺寸、形状、表面配体设计都服务于这三者。基于此,上述策略可以总结为以下3点:(1)从量子点的稳定性与载流子的高效利用角度而言,量子点的大尺寸与合金化设计可以增加激子的辐射复合概率和量子点内部成分的均匀性,减少激子陷阱,从而抑制非辐射复合,实现低电流下的高效率,减少热量积累对于量子点本身以及相邻功能层带来的负面影响;(2)从载流子的高效注入与高效利用角度而言,中间壳层作为过渡层,其成分渐变设计可以减少晶格失配

造成的非辐射复合位点,同时调控载流子的注入势垒进而实现载流子注入与传输的平衡;(3)从量子点的稳定性和载流子的高效注入角度而言,表面配体需要具备有效的量子点表面缺陷钝化能力、良好的结合能力以及优异的电荷传输能力,而光刻手段可以保证量子点的结构稳定以及电子、空穴的传输路径稳定,起到延长量子点寿命的作用。未来高效长寿命量子点的设计需要以提升激子束缚和减少非辐射复合位点、提高载流子的利用率为目标,进而实现 QLED 工作寿命的提升。

3 电子传输层设计

在 QLED 发展初期,研究者沿用有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)的有机小分子作为电子传输层,如 Alq_3 ^[18]、 TPBi ^[19]、 Bphen ^[20]等,这类蒸镀材料的电子迁移率普遍较低(约 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),且蒸镀工艺容易对量子点造成损伤。随着 QLED 技术的发展,纳米金属氧化物材料逐渐成为电子传输层(ETL)的有力候补,其中纳米氧化锌(ZnO)材料作为 ETL 是 QLED 器件效率和寿命快速发展的重要驱动因素。

2008 年,Caruge 等人引入 $\text{ZnO}:\text{SnO}_2$ 合金材料作为 ETL^[21]。Janssen 采用溶液法合成了 ZnO 纳米颗粒(Nanoparticles, NPs)^[22],用于构筑 QLED 器件。2011 年,Qian Lei 团队将 ZnO NPs 作为 ETL^[23],制备全溶液 QLED 器件,性能达到当时的最高值。此后, ZnO NPs 成为 QLED 器件首选的 ETL 材料。截至目前为止,QLED 原型器件(单节非叠层)最高的 EQE 和寿命均采用 ZnO NPs 作为 ETL 材料^[1-3]。 ZnO NPs 作为 ETL 虽然具有高电子迁移率和良好的溶液加工性等优点,但也面临一些亟待解决的问题:(1)纳米尺度 ZnO NPs 表面存在大量表面配体残留与本征缺陷,如氧空位 V_O 、锌空位 V_Zn 、氧替位 O_i 、锌填隙 Zn_i 等,这些缺陷会捕获传输电子导致传输效率下降,同时使被捕获电子与空穴在缺陷处发生非辐射复合,直接降低 QLED 的效率并加速器件老化、缩短使用寿命;(2) ZnO NPs 的高电子浓度与高电子迁移率虽能提升电子传输速度,但可能导致电子过注入,过量电子会使发光层中电子数量远超空穴,

多余电子不仅形成“电子积累”阻碍后续注入,还会诱发量子点发光猝灭,进一步降低器件亮度与效率;(3) ZnO NPs 与量子点之间的界面稳定性较差,容易受到环境影响,导致界面特性变化和激子猝灭;(4) ZnO NPs 与金属电极之间的界面化学反应导致器件像素发光不均、稳定性不可控。

针对上述问题,当前研究通过掺杂、表面修饰和界面工程等方法精准调控 ZnO NPs 的缺陷、界面与电子传输特性,以优化其在 QLED 中的应用性能,提升 QLED 的工作稳定性,推动 QLED 向长工作寿命、大规模量产方向快速发展。

3.1 ZnO NPs 掺杂

2018 年,Jang 等人将锂(Li)和镁(Mg)共掺杂的氧化锌(ZnMgLiO , ZMLO)作为 ETL^[24],如图 3(a)所示。与 ZnO NPs 相比,ZMLO 显示出相对较浅的导带边缘和较宽的禁带宽度,改善了电荷平衡。此外,ZMLO 表面羟基($-\text{OH}$)浓度降低,进一步减少了激子猝灭,提升了器件性能。2022 年,Tian Jianjun 等人在 ZnO NPs 中掺杂 Mg 以降低电子迁移率,优化不同的有机空穴传输材料及薄膜厚度,进一步匹配氧化锌镁(ZnMgO , ZMO),达到调节 QLED 器件中载流子传输平衡的目的。对所制作的器件的工作稳定性进行了评估,ZMO NPs 器件的实测寿命 T_{95} 为 9.3 h,大于 ZnO NPs 的器件寿命 1.1 h。另外,掺杂 Mg 之后,ZMO 的导带底能级高于 ZnO ,在一定程度上阻止了电子的回流,从而减少猝灭、提高器件效率。该研究中基于 ZMO 器件的效率和寿命比 ZnO 分别提高了 200% 和 800% 以上^[25]。

2022 年,Du Zuliang 团队在 ZnO NPs 中掺杂锡(Sn)来优化 ETL,以缓解电子过注入问题,器件寿命($T_{50}@100 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$)提高 21 倍^[26]。Hany Aziz 等人通过使用四氟化碳(CF_4)等离子体处理 ZnO NPs,将氟(F)掺杂到 ZnO NPs 中,制备了 F 掺杂的 ZnO (ZFO NPs)ETL。F 掺入 ZnO NPs 可钝化 ZnO 中的氧空位和电子陷阱,减少子带隙态,优化电荷分布,使电荷平衡更佳,减少激子猝灭,延长了器件寿命。同时影响 QD/ETL 及 HTL/QD 界面的电子-空穴复合速率,降低空穴积累导致的器件降解,提升稳定性,使器件寿命($T_{50}@100 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$)达到 2 370 000 h,是对照器件的 47 倍^[27]。

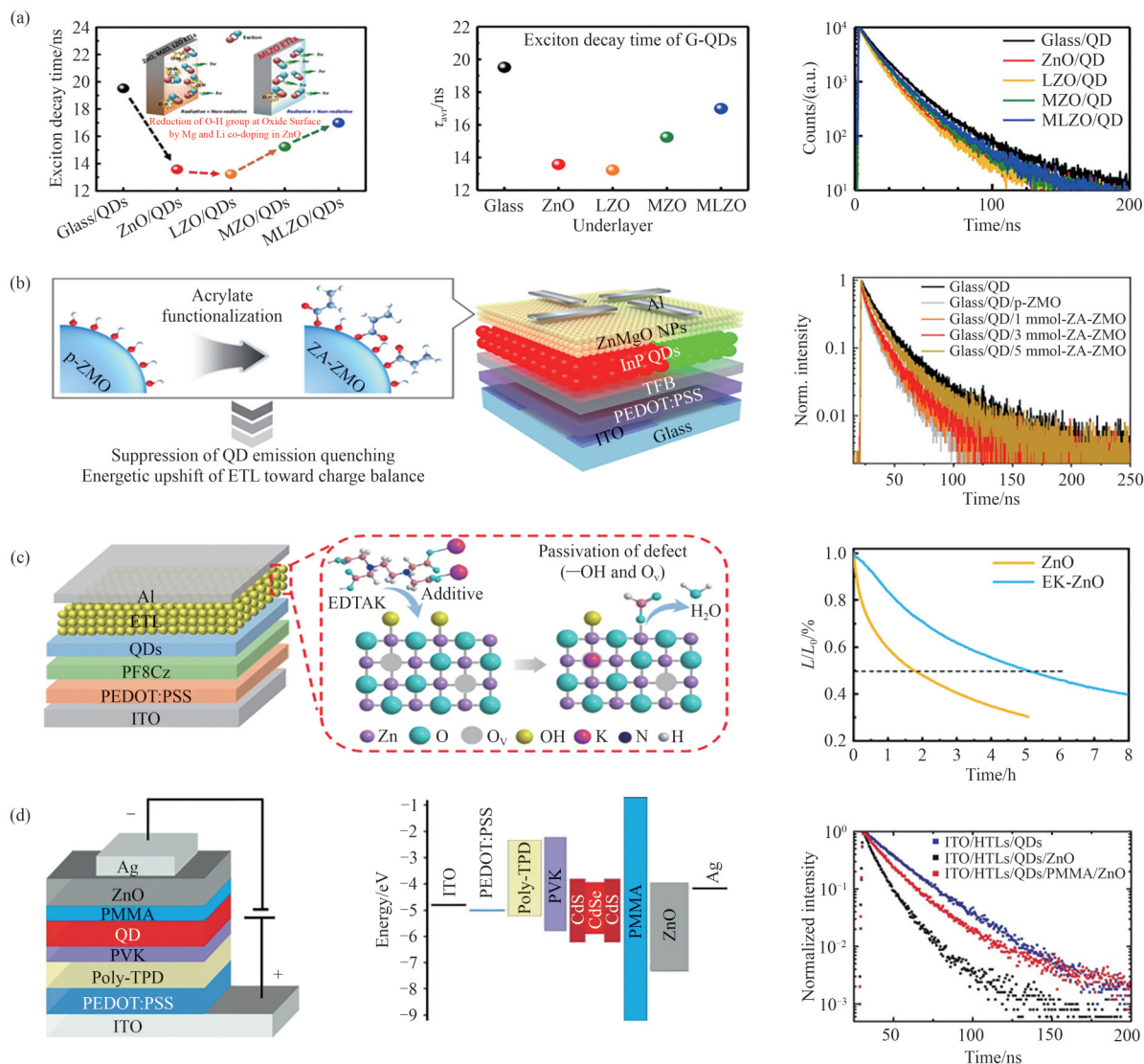


图3 ZnO 优化,通过掺杂、表面修饰和界面工程等方法精准调控 ZnO NPs 的缺陷以及平衡电子注入,减少非辐射复合,提升器件稳定性。(a) Li 和 Mg 共掺杂 ZnO NPs^[24]; (b) 丙烯酸酯功能团对 ZMO NPs 进行表面改性^[28]; (c) 使用 EDTAK 添加剂合成 ZnO NPs^[29]; (d) QD/ETL 之间插入绝缘层 PMMA^[30]。

Fig. 3 ZnO optimization, regulating the defects of ZnO NPs and balancing electron injection through methods such as doping, surface modification, and interface engineering to reduce non-radiative recombination and improve device stability. (a) Li and Mg co-doped ZnO NPs^[24]; (b) Surface modification of ZMO NPs with acrylate functional groups^[28]; (c) Synthesis of ZnO NPs using EDTAK as an additive^[29]; (d) Insertion of an insulating layer (PMMA) between QD and ETL^[30].

3.2 电子传输材料表面调控

2022 年, Yang Heesun 等人引入丙烯酸酯功能团对 ZMO NPs 进行表面改性^[28]。如图 3(b) 所示, 丙烯酸酯功能化显著减少了 ZMO 表面的羟基(—OH)缺陷, 同时通过羧基(—COOH)填补了表面氧空位, 从而减少了激子猝灭位点。功能化后的 ZMO NPs 的导带最小值(Conduction Band Minimum, CBM)和价带最大值(Variance Band

Maximum, VBM)发生了上移, 这有助于减少电子注入, 优化电荷平衡, 使器件工作稳定性提升约 3.2 倍。

2023 年, Du Zuliang 等人使用乙二胺四乙酸二钾盐(EDTAK)作为添加剂合成了具有低缺陷密度和高稳定性的 ZnO NPs, 见图 3(c)。这种添加剂有效钝化了 ZnO NPs 中的表面缺陷, 并同时诱导化学掺杂。通过这种双功能工程提高了 ZnO

NPs 的 CBM,促进了电荷平衡,所制备的蓝光器件具有良好的长寿命工作特性, $T_{50}@100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 达到 1 685 h^[29]。2025 年,该课题组将高效表面修饰剂苄基膦酸(BPA)分子及其衍生物引入 ZMO NPs 表面作为钝化层,有效钝化了缺陷,增强了纳米粒子的分散性与稳定性,并精确调控能级以平衡电荷注入。以此为 ETL 的绿光 QLED 在 $1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 条件下 T_{95} 工作寿命提升了 3.3 倍以上^[31]。

2024 年, Sun Xiaowei 等人采用 2-羟基-1-乙硫醇(HESH)钝化 ZnO 的缺陷态,减少 ZnO/QD 界面的激子猝灭和非辐射复合中心,适当地阻止了 QLED 器件中的电子注入,改善了载流子平衡,进而增强了 QLED 的性能,使红光 QLED 器件获得了超过 12 000 h ($T_{95}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$) 的长寿命^[32]。随后在 2025 年,他们又提出了一种双重钝化策略,通过电负性氧化膦(P=O)功能化有机分子的整合,P=O 官能团中的电子与量子点中的表面缺陷态相结合,有效减少了陷阱态,增加了激子的数量。这些电子与 ZMO 中的氧空位相互作用,减轻了由 ZMO 中氧空位引起的激子猝灭。该方法同时修饰了 QDs 膜和 ETL,钝化了量子点表面的阴离子空位和 ZMO NPs 中羟基相关缺陷,从而抑制了非辐射复合途径,优化了电荷传输,使蓝光 QLED 器件寿命 $T_{50}@100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 延长了 6 倍至 618 h,展示了显著的稳定性^[33]。

同年, Zhao Jialong 团队通过一种结合卤化物离子钝化和无机壳层限制的协同修饰策略来提高蓝光 ZnSeTe QLED 的性能。用氯离子(Cl^-)钝化 ZnO NPs 表面的氧空位缺陷,采用 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 无机壳层包裹以稳定氯离子(Cl^-)。该方法显著抑制了非辐射复合和激子猝灭。结果表明,含 ZnO NPs 的蓝光 QLED 的 EQE 达到 17.5%, 6.0 V 时的峰值亮度为 $13\,670\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, 工作寿命是未经处理的 QLED 的 4.6 倍^[34]。

3.3 ZnO/量子点界面优化

在 QLED 中, ZnO/QD 之间的界面存在诸多问题,包括电荷不平衡、界面缺陷态引起的非辐射复合、量子点发光猝灭、界面稳定性差以及能级不匹配等。

2014 年, Peng Xiaogang 等人提出在量子点层和氧化物 ETL 之间插入绝缘层(聚甲基丙烯酸

甲酯, PMMA)。见图 3(d), 实现了电荷平衡的优化并保留了量子点发光特性。该红光 QLED 展现出接近完美的内量子效率、低效率滚降、亚带隙开启电压、出色的重现性和 $T_{50}@100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 超过 100 000 h 的使用寿命, 标志着溶液加工 QLED 在实际应用中的一个重要里程碑^[30]。

2016 年, Ji Wenyu 等人在 ZnO/QD 和 QD/4,4-双(咔唑-9-基)联苯(CBP)界面处插入 Al_2O_3 层, 第一层 Al_2O_3 减少了 ZnO NPs 层上的空穴漏电流, 并有效抑制了 ZnO NPs 引起的激子猝灭; 第二层 Al_2O_3 阻挡了电子从 QD 向 CBP 的泄漏。所制备的红光器件寿命得到很大提高, 其 $T_{50}@100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 超过 110 000 h, 比传统器件的寿命提高近 40%^[35]。2018 年, Sun Xiaowei 团队在 QD 与相邻的 ZnO NPs 电子层之间插入超薄的双面绝缘层 Al_2O_3 以平衡载流子注入, 抑制激子猝灭, 采用此结构制备的全无机绿光 QLED 的 $T_{50}@100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 展示出 16 120 h 的长寿命^[36]。同年, Shen Huaibin 团队进一步优化量子点合成工艺, 在蓝光器件中引入 PMMA 插层, 寿命提升约 9.9 倍^[37]。

2024 年, Jin Yizheng 课题组通过胺基配体交换方法对光学 ZnO NPs(O-ZnO)纳米晶进行表面修饰, 钝化表面缺陷, 显著抑制了绿光和蓝光 QLEDs 中量子点与氧化物界面处的激子猝灭。该工作设计了 O-ZnO- NH_2 和导电 ZnO NPs(C-ZnO)组成的双层氧化物 ETL, 使绿光 QLED 的寿命达到 19 500 h ($T_{95}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$) 蓝光 QLED 的寿命为 71 h ($T_{95}@1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$), 实现了高效且稳定的绿光和蓝光 QLED^[2]。

3.4 ZnO/金属电极界面工程

2017 年, Holloway 等人观察到当使用可 UV 固化的酸性树脂封装器件时, 在放置一定时间后器件的 EQE 和亮度等性能显著提高, 如图 4(a) 所示。他们认为这种正向老化现象是由 ZnO NPs 与酸性丙烯酸树脂发生界面反应而产生的。封装树脂中的弱酸与 ZnO NPs 反应产物可以钝化 ZnO NPs 缺陷, 修饰 ZnO/Al 界面, 从而提高激子辐射复合率^[38]。2018 年, Chen Shuming 团队发现, 正向老化的关键原因是铝(Al)阴极与 ZMO NPs 电子传输层之间的界面反应。反应产物 AlO_x 过渡层降低了电子注入势垒, 而氧空位增加了电

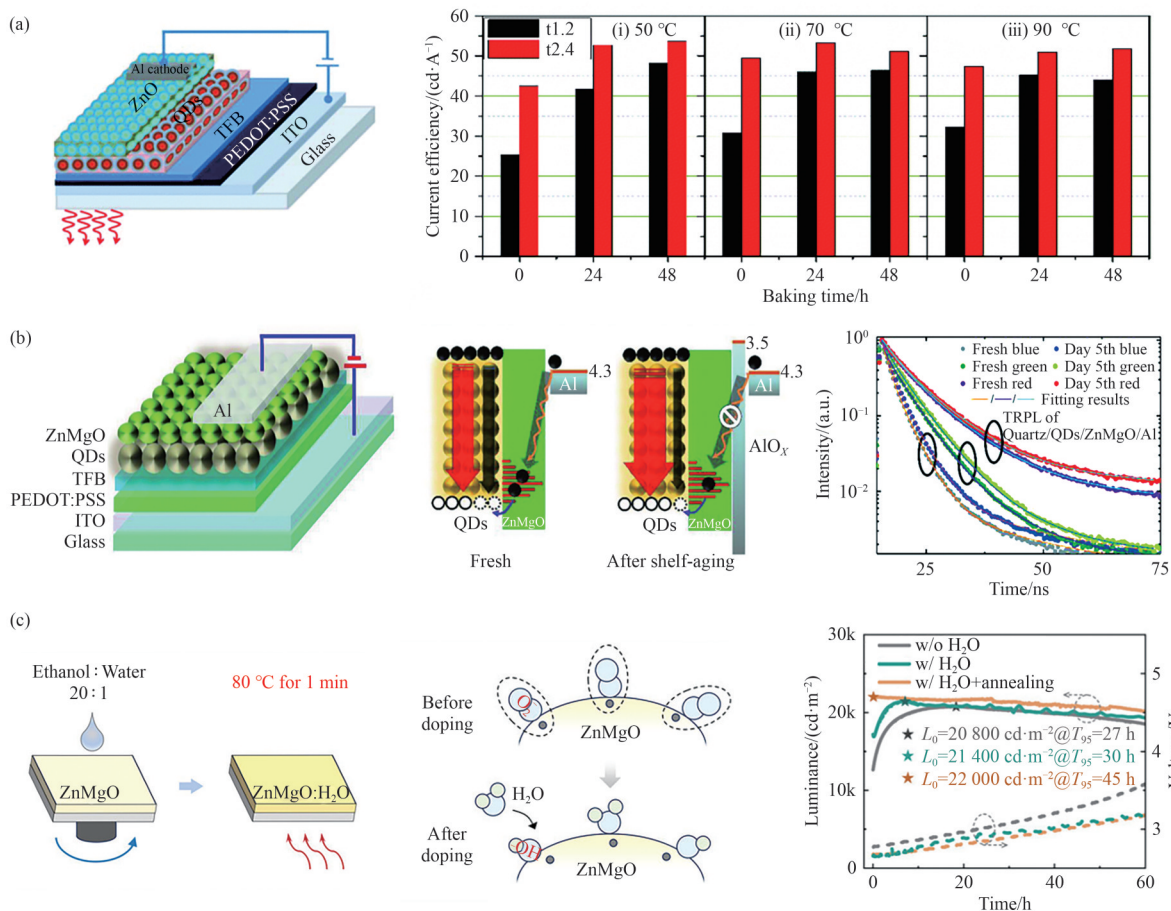


图 4 界面调控策略,目的是消除正向老化,改善器件稳定性。(a) 酸性树脂与 ZnO NPs 反应^[38]; (b) Al 阴极与 ZMO NPs 的界面反应^[39]; (c) H₂O 处理 ZnO NPs^[42]。

Fig. 4 Interface regulation strategies, the purpose is to eliminate positive aging and improve device stability. (a) Reaction between acidic resin and ZnO NPs^[38]; (b) Interface reaction between Al cathode and ZMO NPs^[39]; (c) Treatment of ZnO NPs with H₂O^[42].

导率,从而有效增强了电子注入。此外,AlO_x还能有效地抑制金属电极对激子的猝灭^[39],如图 4(b)所示。

2020 年, Jin Yizheng 课题组发现有机酸与银电极反应导致银扩散到 ETL 中,增加了电子导电性,但最终会引起银电极的腐蚀。有机酸还会与 ETL 中的 ZnO NPs 表面的羟基反应,改变界面特性,抑制激子猝灭,但过量的酸会导致 ETL 转化为绝缘的金属羧酸盐^[40]。为此,该研究团队设计了一种由 O-ZnO NPs 和 C-ZnO NPs 组成的双层氧化物 ETL, O-ZnO NPs 用于抑制 QD/ETL 界面的激子猝灭, C-ZnO 用于提高电子传输效率,实现了壳层稳定、高效率 and 超长工作寿命(5 500 h, T₉₅@1 000 cd·m⁻²)的红光 QLED。

2021 年, Chen Shuming 课题组对 ZMO 基的

红光 QLED 采用了无封装、UV 树脂封装、UV 树脂加干燥剂封装 3 种封装方式。实验结果发现, UV 树脂封装时, QLED 出现“正向老化”, 揭示了 ZMO NPs 缺陷是空穴泄漏通道的关键。干燥剂虽防潮防氧, 却会吸收 UV 树脂酸性产物, 据此他们提出“先 UV 树脂封装完成正向老化(5 天), 再封装干燥剂”的新方法, 使红光 QLED 的 EQE 提升 1.4 倍, 半衰期寿命提升 6 倍, 成为当时性能最优器件之一^[41]。该课题组还系统研究了封装工艺对 QLED 器件正向老化的影响, 发现 QLED 正向老化的起源是 ZMO NPs 与酸性树脂反应生成 H₂O。他们于 2025 年开发了一种简单有效的 H₂O 处理方法, 见图 4(c)。通过液相 H₂O 处理 ZMO 和后退火, H₂O 分子通过吸附在 ZMO NPs 表面, 钝化氧吸附位点并提供自由电子, 增强 ZMO

NP 的导电性。后退火促进 Al 与 ZMO-H₂O 的相互作用, Al 作为钝化剂钝化 ZMO NP 中的深能级缺陷, Al³⁺ 替代 Zn²⁺ 促进晶格收缩, 改善晶体结构完整性、减少缺陷产生, 同时在界面形成 AlO_x 层钝化表面态, 阻挡空穴漏电流路径并减少空穴漏电流。实测 T_{95} 寿命提高 1.67 倍, 实现了高性能和耐储存的 QLED^[42]。

原位还原策略可预先优化电子传导和空穴阻挡能力, 配合无酸封装, 完全避免了含酸树脂引起的不可控正向老化。2025 年 Peng Xiaogang 团队发现 ZMO NP 电子注入层的电子导电性低, 导致量子点发光二极管的性能欠佳且对封装树脂敏感。通过简单的水蒸气处理实现的原位 n 型掺杂方法, 使 QLED 具有 1 000 倍高的电子电导率, 并改善了空穴阻挡。实验结果显示, 处理后 QLED 的使用寿命提升 60%, 在存储中 EQE、亮度、电流密度等性能几乎保持恒定, 完全消除了正向老化^[43]。

同年, Jin Yizheng 课题组揭示水是正向老化的真正诱因。Zn_{0.85}Mg_{0.15}O NP 与树脂释放的丙烯酸反应生成副产物水分子, 可渗透至电极图案区域与 Zn_{0.85}Mg_{0.15}O 作用引发正向老化。他们研究开发了可控水处理工艺, 通过水对 ZnO NP 基电子传输层 (ETL) 的表面钝化, 减少带隙内缺陷, 促进纳米晶颈缩/烧结, 构建连续电荷传输路径以提升电荷传输效率并抑制空穴泄漏, 最终顶发射蓝光 QLED 实现初始亮度 1 000 cd·m⁻² 下 287 h 的 T_{95} 寿命, 刷新了蓝光 QLED 的最长寿命记录^[3]。

2025 年, Edward H. Sargent 团队通过原子层沉积技术在 ZMO NP 表面包覆约 0.5 nm 厚的 Al₂O₃, 抑制 ZMO NP 纳米晶尺寸熟化并钝化表面陷阱, 在新制造的器件中实现了可重复的高效率 (~17%), 将 4 500 cd·m⁻² 下 T_{60} 提高了 10 倍, 并显著改善了批次之间的重现性^[44]。同年, 吉林大学 Ji Wenyu 团队通过丙烯酸处理提供酸性条件。在酸性条件下, Al³⁺ 从阴极向 ZnO NP 层扩散, 占据 ZnO NP 晶格中的锌空位 (V_{Zn}), 并与表面吸附的氧结合, 形成稳定的 Al—O—Zn 键, 有效钝化氧空位等缺陷。酸性条件诱导 ZnO NP 表面羟基间发生脱水反应, 形成 Zn—O—Zn 键, 进一步促进颗粒间的连接。上述反应促使相邻的

ZnO NP 发生融合, 从随机聚集的纳米颗粒转变为长程有序的纳米晶体。通过上述过程, ZnO NP 从初始的缺陷丰富、分散的纳米颗粒状态转变为缺陷钝化、具有长程有序结构的晶体, 其电子传输机制从跳跃传导转变为类能带传导, 显著提升了电子迁移率, 降低了载流子密度, 所制备的红光器件实现了 57 686 h 长寿命 ($T_{50}@100 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$)^[45]。

3.5 策略总结

综上所述, 长寿命 QLED 器件的 ETL 设计主要围绕材料改性与界面调控展开: (1) 从 ZnO NP 自身性能调控入手, 通过掺杂改性及表面修饰的手段, 一方面实现对 ZnO NP 的表面钝化以减少缺陷位点, 另一方面还能精准调节 ZnO NP 的导带能级, 减少电子注入, 优化了电荷平衡; (2) 通过界面工程手段针对性解决 ZnO NP 与量子点发光层界面处的激子猝灭与电荷泄漏难题, 改善界面稳定性; (3) ZnO NP 与金属电极界面反应是引起正向老化现象的关键。研究重心集中在减少 ZnO NP 表面陷阱态以及优化电子传输特性, 采用无酸封装材料, 配合原位 n 型掺杂, 杜绝有机酸引发的异常界面反应, 抑制非辐射复合。

现有研究多聚焦于“改性方法——性能提升”的关联性验证, 然而对核心机制的微观解析仍存在不足。例如, 掺杂元素在 ZnO 晶格中的扩散动力学、表面修饰配体与 ZnO NP 表面的键合方式对缺陷钝化的定量影响、界面插层厚度与电荷传输性能的对应关系等, 尚都缺乏精准理论指导。从研究现状来看, 需要厘清 ZnO 基 ETL 性质与 QLED 性能内在关联的工作物理机制。研究者们应进一步揭示氧化锌材料及其相邻界面的微观结构与器件性能的构效关系, 开发 ETL 材料优化和器件结构设计新方法, 实现高效稳定的 QLED。

4 空穴传输层设计

在长寿命 QLED 的研究中, 空穴注入和空穴传输材料的性能直接影响器件的空穴注入效率、载流子平衡、发光效率及使用寿命。高性能空穴传输材料需要满足与量子点发光层能级匹配、具有高空穴迁移率、良好的成膜性、优异的稳定性以及制备工艺的简便性等要求。近年来, 研究者

通过分子工程、界面修饰和新型结构设计等多种策略,开发了一系列新型空穴传输材料,显著提升了QLED器件的性能和工作寿命。

4.1 新型空穴传输材料的设计

为了实现器件内高效的空穴注入与传输,减少发光层的非辐射复合,提高器件内部载流子注入与传输的平衡,能级匹配、高空穴迁移率及电化学稳定性成为空穴传输材料设计的关键。传统空穴传输材料(如聚[(9,9-二辛基芴-2,7-二基)-共-(4,4'-(N-(4-仲丁基苯基)二苯胺)](TFB))在器件长期工作过程中容易因电场、热量和注入载流子的影响而发生化学降解,导致器件性能衰减。近年来,研究人员针对空穴传输材料进行了大量的研发。2025年,Hwang等人将具有超高键解离能的二苯并呋喃(DBF)结构引入聚合物型空穴传输材料中,合成了以DBF为侧基的共聚物(1-4-PFDBF),该材料表现出一5.53 eV的HOMO能级以及 $4.40 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高迁移率,显著降低了空穴注入势垒并优化了器件内部电荷平衡,使绿光QLED的EQE和电流效率(CE)分别达到25.71%和102.98 $\text{cd} \cdot \text{A}^{-1}$,远优于基于TFB的器件(11.16%,44.08 $\text{cd} \cdot \text{A}^{-1}$),器件寿命提升了36倍^[46]。该工作表明,在分子结构中引入高键解离能的刚性单元是提升空穴传输材料本征稳定性,实现长寿命QLED的有效策略。2022年,Jin Yizheng课题组针对蓝光和绿光量子点发光二极管效率和寿命落后的产业瓶颈,从抑制界面电子泄漏出发,提出采用具有刚性主链和受限共轭的新型空穴传输材料设计策略。如图5(c)所示,通过引入平面3,6-吡嗪单元合成新型空穴传输材料PF8Cz,增强分子刚性并提升层状堆积有序性,使HOMO能级无序宽度从0.37 eV缩减至0.25 eV。基于PF8Cz的绿光和蓝光QLED在100 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 初始亮度下的 T_{95} 寿命分别达到580 000 h和4 400 h,刷新了溶液加工LED的纪录^[47]。该研究表明,通过增强分子刚性和有序性来降低能级无序度,对于抑制电子泄漏、获得高效率与超长寿命至关重要。为解决量子点发光二极管中空穴传输过慢的问题,Zhang Zhenhu等人提出一种在交联聚合物基质中构筑一维空穴传输通道的创新策略。如图5(a)所示,将具有自组装能力的分子混合在交联空穴传输层中,显著

提高了空穴迁移率,使深蓝光QLED的EQE提升至18.16%,寿命提升2.3倍^[48]。掺杂同样是提升性能的一种有效方式,Liu Yuyu等人通过将路易斯碱混合在传统空穴传输材料PVK中,降低了空穴的注入势垒,使空穴迁移率由 $7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 提升至 $2.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,显著改善了载流子平衡,器件寿命提高约5倍^[49],见图5(b)。

为进一步突破有机材料在长期稳定性上的本征局限,研究者将目光投向具有卓越环境稳定性和热稳定性的无机空穴传输材料。近年来,无机空穴传输材料因卓越的稳定性和高载流子迁移率,成为长寿命QLED研究的重要方向。无机空穴材料能够有效避免有机材料的吸湿性和酸性问题,使器件稳定性得到显著提升。 NiO_x 作为p型金属氧化物,凭借其高功函数、优异稳定性和高载流子迁移率,被认为是QLED器件中最有前景的无机空穴注入材料之一。2014年,Nguyen等人首次采用溶液法制备 NiO_x 纳米颗粒并将其作为无机空穴注入层,显著降低了注入势垒,提高了载流子辐射复合效率(图5(f))^[50]。此外,氧化钨(WO_x)凭借其更高的功函数和良好的稳定性也受到广泛关注。2025年,Wang Wenxuan等人通过热注射法合成了具有优异成膜性的溶液可处理 WO_x 纳米颗粒,并创新地引入原位光诱导配体交换技术,替代了传统空穴注入材料PEDOT:PSS(聚(3,4-亚乙氧基噻吩)-聚(苯乙烯磺酸)),解决了传统PEDOT:PSS的酸性、吸湿性以及旋涂上层溶剂导致的界面侵蚀问题,见图5(e)。基于此光敏 WO_x 制备的红光QLED器件实现了7 088.9 h($T_{90}@100 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$)的运行寿命,达到基于PEDOT:PSS器件寿命的3倍^[51]。无机HTL材料在稳定性方面优势突出,是解决器件长期运行可靠性难题的重要方向,但其能级调控灵活性和与有机/量子点界面的适配性仍是未来研究的重点。

综上所述,新型HTL材料的设计呈现出“有机材料精细化”与“无机材料实用化”并行发展的趋势。在有机材料领域,通过引入刚性骨架、构建交联网络和采用掺杂策略,分别在提升本征稳定性、增强薄膜稳定强度以及优化载流子传输方面取得了显著进展。而无机材料则从根本上规

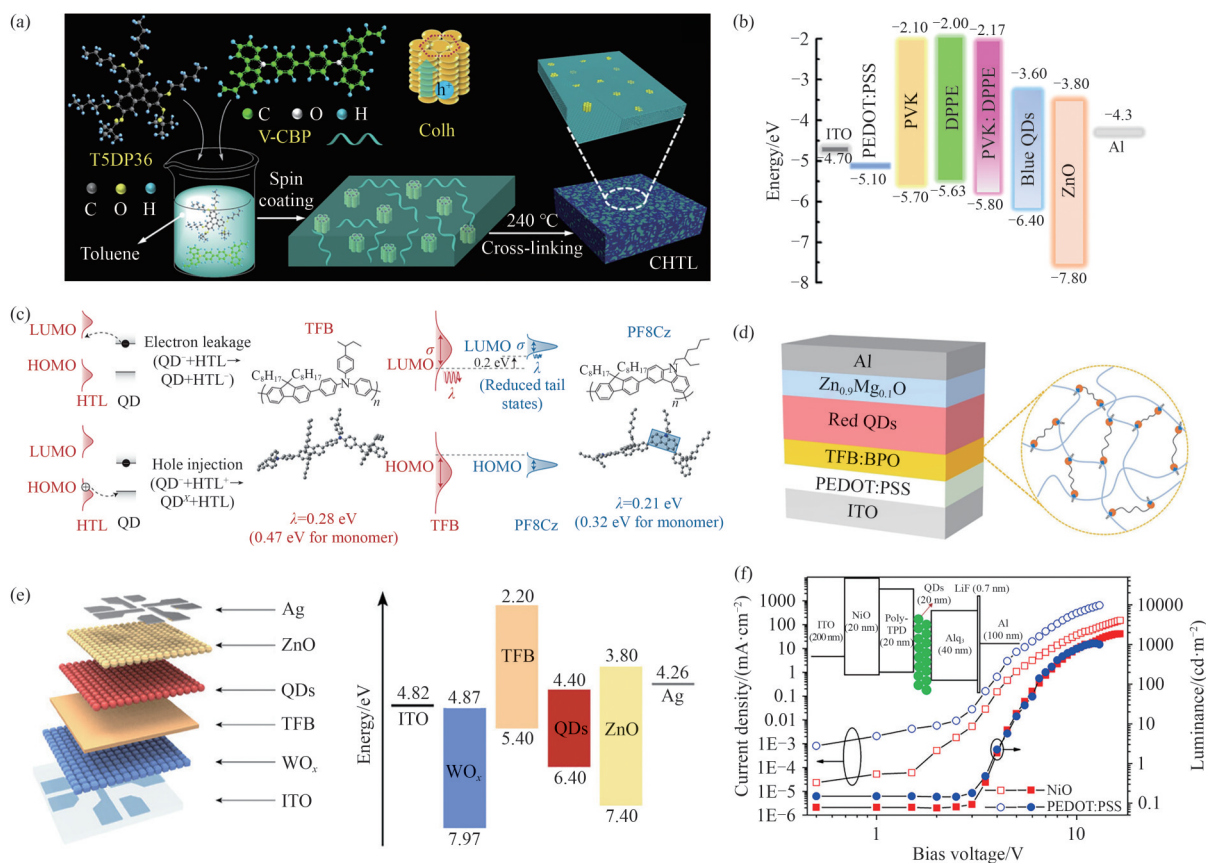


图5 新型空穴传输材料的设计,系统展示了近年来空穴传输层材料设计的主要策略,包括交联网络构筑、掺杂调控、刚性骨架设计以及无机材料替代等。(a)具有自组装能力的交联空穴传输层^[48];(b)路易斯碱混合掺杂PVK空穴传输材料^[49];(c)具有刚性骨架的空穴传输材料PF8Cz^[47];(d)交联网空穴传输材料^[52];(e)以WO_x作为空穴注入层的QLED器件结构^[51];(f)以NiO作为空穴注入层的QLED器件结构^[50]。

Fig. 5 Design of novel hole transport materials, it systematically demonstrates the main strategies for the design of hole transport layer materials in recent years, including the construction of cross-linked networks, doping regulation, design of rigid skeletons, and replacement with inorganic materials. (a) Cross-linked hole transport layer with self-assembly capability^[48]; (b) Lewis base mixed-doped PVK hole transport material^[49]; (c) Rigid-framework hole transport material PF8Cz^[47]; (d) Cross-linked network hole transport material^[52]; (e) Structure of the QLED device with WO_x as the hole injection layer^[51]; (f) Structure of the QLED device with NiO as the hole injection layer^[50].

避免了有机材料的吸湿与降解问题,但其能级调控灵活性与界面匹配仍是未来的优化重点。这些策略共同构建了长寿命QLED的新型HTL材料优化方案。

4.2 交联型空穴传输层

光交联技术是QLED高分辨率图案化与功能层性能优化的核心技术之一。通过交联反应形成稳定网状结构,从而实现量子点像素精准图案化或功能层电荷传输性能调控,最大程度保留量子点的光电特性。在QLED的多层溶液加工过程中,上层溶剂的侵蚀会破坏下层有机薄膜,而器件在长期工作时,空穴传输层(HTL)还需承

受电场、焦耳热及界面应力等多重作用。常用的聚合物HTL材料(如TFB和PVK)在电和热应力下易发生分子链断裂、氧化降解或薄膜形貌演变,导致器件性能衰退。为解决这一稳定性瓶颈,交联策略被广泛采用,通过在HTL中形成稳定的三维共价网状结构,可显著提升其耐溶剂性、机械强度及电化学稳定性,从而延长器件寿命。

光交联技术因其可在低温下快速成膜而备受关注。2020年,Sun Wenjian等人报道了一种将二苯甲酮(BP)光敏基团引入TFB侧链的光交联方法,在紫外光下实现低温交联。交联HTL抑制了界面电荷积累与激子猝灭,使红光QLED

的 T_{70} 寿命由 19.8 h (原始 TFB) 延长至 81.7 h ($@2\ 000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$), 提升约 4 倍^[53]。热交联策略则利用交联剂与主体材料在加热条件下形成网络。2022 年, Xie Liming 等人设计可热交联的小分子 FLTA-V, 与 TFB 共混后在 180 °C 下形成交织网状结构, 实现 HTL 耐溶剂性 $>98\%$ 。交联后 HTL 膜层更加致密, 空穴注入效率提高, 界面接触改善, 器件寿命提升一个数量级^[54]。为进一步优化交联效率与效果, 光热协同交联策略应运而生。同年, Yi Yuanqiuqiang 等人开发了新型双苯甲酮交联剂, 与 TFB 共混后通过光热协同实现高效交联, 使红光 QLED 的 EQE 从 14.1% 提升至 16.8%, 寿命 $T_{50}@1\ 000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 由 71 h (纯 TFB) 提升至 128 h, 效率滚降仅为 1.73%, 见图 5(d)^[52]。

交联策略能够赋予有机 HTL 卓越的加工性与运行稳定性。无论是光交联的低温高效、热交联的致密网络, 还是光热协同的优化完善, 其共同目标都是构建一个在溶剂、电场和热量作用下仍能保持稳定的三维骨架。这不仅解决了多层溶液加工中的界面侵蚀问题, 还显著抑制了 HTL 在长期工作过程中的化学降解与形貌演变, 是实现长寿命、可图案化 QLED 器件的关键技术路径之一。然而, 交联剂的引入可能对 HTL 的空穴迁移率与能级带来影响, 且部分策略对工艺精度要求较高, 这些都是未来优化中需要权衡的因素。

4.3 空穴传输层界面工程

在 QLED 器件中, HTL 与 EML 或电极之间的界面对器件内部电荷注入平衡、激子复合行为以及稳定性有关键影响。界面能级失配、缺陷导致的非辐射复合以及载流子泄漏等问题严重制约器件性能的进一步提升。近年来研究人员提出了多种界面调控策略, 旨在优化能级匹配、抑制界面猝灭并增强器件的运行稳定性。

引入界面缓冲层是调控界面特性的经典策略。早在 2010 年, Koo 等人受 OLED 器件结构中“空间限域”的启发, 提出在 HTL 与 EML 之间引入超薄电子阻挡层 (如 TPBi、TCTA 或 PMMA)。该中间层可有效抑制电子溢出至 HTL, 减少激子-极化子猝灭, 从而显著增强器件的电热稳定性^[55]。2014 年, Ji Wenyu 等人系统研究了有机电子阻挡材料 TPBi 的厚度对 HTL/EML 界面电荷平

衡的影响, 发现合适厚度的 TPBi 层可优化载流子复合区域, 减少界面激子猝灭, 提升器件的效率与工作寿命 (图 6(a))^[56]。表面钝化技术, 特别是自组装单分子层 (SAM), 在优化无机 HTL 界面方面展现出巨大潜力。2024 年, Cai Fensha 等人采用含有膦酸 (PA) 锚定基团的自组装单分子层 (SAM) 对 NiO_x 的表面缺陷进行钝化, 显著降低了界面缺陷态密度, 成功制备出全无机红光 QLED, 实现 335 045 h ($T_{50}@100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$) 的器件寿命, 器件运行寿命得到显著提高 (图 6(b))^[57]。此外, 引入无机绝缘层 (如 Al_2O_3) 也被证明能有效提升界面稳定性。2016 年, Zhang Han 等人在倒置结构 QLED 的 HTL 与 EML 之间引入无机 Al_2O_3 界面层, 如图 6(d) 所示, 在低电压下有效降低了漏电流、钝化量子点表面缺陷并抑制了激子猝灭, 使器件稳定性得到显著提升^[35]。

4.4 多层空穴传输层结构设计

除了单一的界面修饰, 构建多层 HTL 结构能够从三维空间上更好地调控能级排列和电荷输运动力学, 是实现载流子平衡注入和抑制泄漏的综合性方案。近年来, 多层空穴传输结构也逐渐成为解决 QLED 寿命问题的有效策略。这种结构不仅能够改善电荷注入平衡, 还可以增强器件的稳定性。

2018 年, Huang Xiaoyu 等人提出 TFB/PVK 双层 HTL 结构, 利用 TFB 的高空穴迁移率 ($\sim 10^{-3}\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) 和 PVK 的深 HOMO 能级 (-5.8 eV), 通过构建梯度能级结构降低空穴注入势垒, 有效抑制了电子的泄漏和激子猝灭, 实现器件稳定性的提升, 见图 6(c)^[58]。同年, Fu 等人开发了一种独特的三明治结构界面层, 在量子点发光层两侧各引入一层超薄界面修饰层, 采用 Poly-TPD/PEIE 作为空穴注入层, 通过其亲水表面改善与空穴传输层的界面接触, 减少了空穴注入势垒, 使电子和空穴的注入更加平衡, 大幅提升了器件的性能^[59]。2020 年, Davidson-Hall 等人设计了一种由 CBP/TCTA/NPB 组成的三级 HTL 结构, 实现了 HOMO 能级的梯度排列, 逐步降低空穴注入势垒, 使器件运行寿命提高了 25 倍^[60]。2024 年, Zhu Xitong 等人采用掺杂双层聚合物 HTL 的策略, 同时实现深最高占据分子轨道 (HOMO)、浅最低未占分子轨道 (Lowest

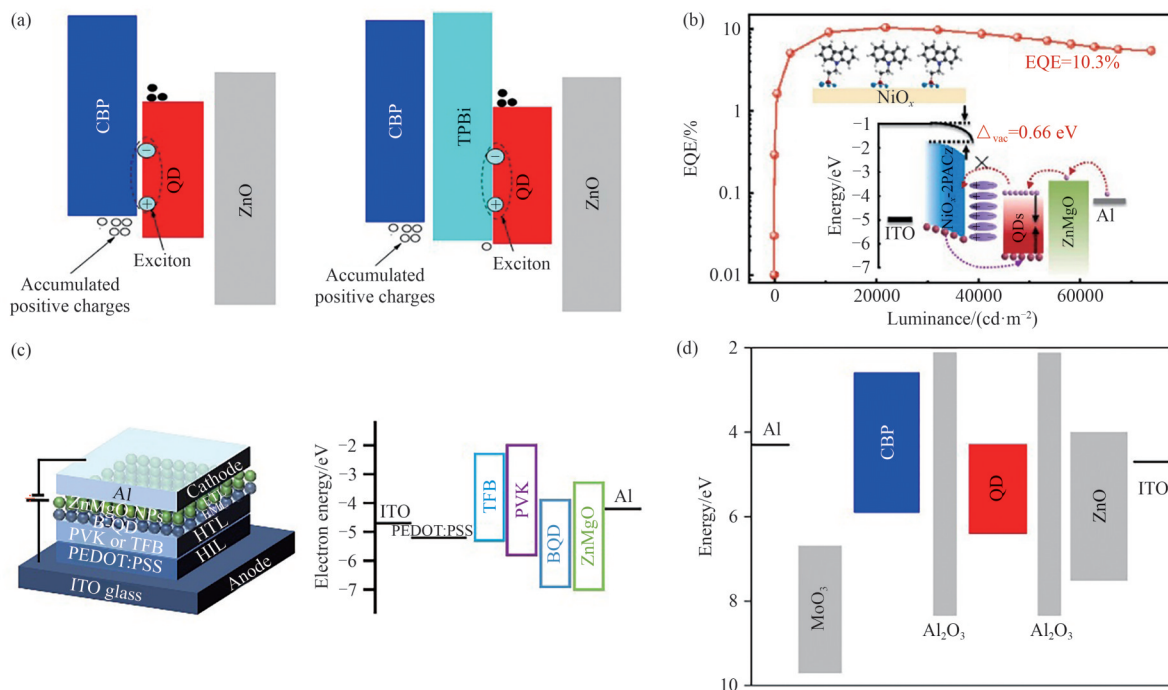


图6 界面工程,归纳了QLED中空穴传输层的界面与多层结构工程策略,包括电子阻挡层、SAM钝化、双层HTL及无机界面层等。(a)具有有机电子阻挡层TPBi的器件结构^[56]; (b)具有自组装单分子层(SAM)钝化NiO_x的QLED^[57]; (c)TFB/PVK双层空穴传输层QLED^[58]; (d)具有无机Al₂O₃界面层器件结构的倒置QLED^[35]。

Fig. 6 Interface engineering, it summarizes the interface and multi-layer structure engineering strategies for the hole transport layer in QLEDs, including electron blocking layers, SAM passivation, double-layer HTLs, and inorganic interface layers. (a) Device structure with organic electron-blocking layer TPBi^[56]; (b) QLED with self-assembled monolayer (SAM) passivated NiO_x^[57]; (c) TFB/PVK double-layer hole transport layer QLED^[58]; (d) Inverted QLED with an inorganic Al₂O₃ interface layer^[35].

Molecular Occupied Orbital, LUMO)以及优异的电化学稳定性,在保证高导电性和稳定性的同时抑制了电子泄漏。基于此结构制备的绿光QLED在 $1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 下的 T_{95} 寿命达到17 700 h,最大亮度突破 $1.34\times 10^6\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,均刷新了溶液法QLED的记录^[61]。

多层HTL结构设计的精髓在于“功能集成与协同”。通过将不同能级、不同迁移率、不同稳定性的材料组合成双层或多层结构,实现了单一材料难以企及的载流子平衡与界面稳定性。从简单的双层到复杂的掺杂多层,这种设计理念是实现QLED超高效率和超长寿命的强大工具。

4.5 策略总结

综上所述,长寿命QLED器件的空穴传输层设计已从单一的材料开发演进为一项融合了分子工程、界面物理与器件结构创新的系统性工程。未来,新型高迁移率、高稳定性有机、无机半导体材料的开发、复合HTL或多层梯度能级结

构仍为开发重点,开发低温、溶液化加工且与大面积制备工艺(如喷墨打印、卷对卷涂布)兼容的空穴传输材料与界面处理技术,将是实现QLED技术商业化应用的关键。

5 总结与展望

随着近几年的快速发展,QLED器件的效率和红绿器件的工作寿命得到了大幅提升,有望加快推动QLED技术进入产业化阶段。本文系统地回顾了近期长寿命QLED器件的代表性工作,分析3个核心功能层的共性设计规律,为后续蓝光QLED器件的寿命突破和QLED器件的产业应用提供了有益的思路。归纳要点如下:(1)量子点发光层采用合金和大尺寸设计策略,减少内部晶格应变和增大辐射复合概率,提升发光层在高电流和高工作温度下的工作稳定性,为长寿命QLED器件的研制奠定基础;(2)电子传输层采

取组分掺杂调节能级结构,通过配体钝化抑制本征缺陷对载流子注入的影响、获得更高的电化学稳定性,利用界面工程降低接触电阻,有效提高电子注入效率、减少电荷积累,综合以上策略获得长寿命的 QLED 器件;(3)空穴传输层采用新型材料设计和分子工程,有效抑制电荷泄露、提升空穴迁移率,通过引入电子阻挡层和双 HTL 等策略使器件寿命进一步提升。

归纳以上功能层的设计思路,可以提炼出共性设计规律:(1)无论是量子点发光层、电子传输层还是空穴传输层,材料的设计需要适配长时间电流和高温下工作的稳定性,在现有材料的基础上进一步提高内部结构致密性,减少内部缺陷的负面影响;(2)各功能层应合理设计能级位置,尽可能减少电荷在界面的积累,降低电荷积累对功能层材料的损伤;(3)各功能层材料设计时应减少材料表面或位于功能层界面的缺陷,尽量降低对载流子注入、传输和复合的不利影响。

展望未来,尽管 QLED 器件的工作寿命已获得长足的进步,蓝光 QLED 器件的设计仍然面临较大的挑战。蓝光量子点材料的设计需要平衡激子束缚和尺寸的关系,减少更高的激子能量产生潜在的更强的电化学损害,更精细的核壳结构和反应控制是获得长寿命电致发光量子点的基础;现有的电子传输层和空穴传输层无法完全适

配蓝光 QLED 器件的工作需求,新型电子传输层/空穴传输层材料、器件结构和器件工艺仍待进一步研究和发展,以增强电子传输层/空穴传输层在长时恒流驱动的工作稳定性。

以上共性规律的梳理对 InP、钙钛矿和更多种类 QLED 器件的设计具有积极的借鉴意义:(1)量子点发光层应提供良好的注入界面和有效的激子束缚,量子点材料的设计可以根据不同半导体类型选择合适的多层核壳结构,通过增大内核乃至设计各向异性的晶体结构实现注入和束缚之间的平衡;(2)电子传输层的选择需要适配量子点 LUMO 能级的位置,并且在具有合适迁移率的前提下,应尽可能减少材料的本征缺陷或表面缺陷(例如 ZnO 的氧空位缺陷),使得电子传输层在电化学或光热条件下稳定工作;(3)空穴传输层的设计应适配量子点 HOMO 能级的位置,通过结构设计提高分子结构刚性以及缩短空穴有效传输路径,减少电子、空穴在界面的无效复合,提高空穴传输层在长时间高温和电流驱动的工作稳定性。

当前长寿命器件的共性特征和设计思路,无疑将引导后续蓝 QLED 器件以及更多材料体系 QLED 器件的研究和发展,相信在该领域研究者的共同努力下,QLED 技术将突破瓶颈并成功迈入产业应用。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] LUO X, HE S Y, CHEN D S, *et al.* Shelf-stable green and blue quantum dot light-emitting diodes with high efficiencies [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2024, 15(26): 6722-6727.
- [3] JIN W X, HE S Y, LU X Y, *et al.* Water-induced high-performance quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Nature Photonics*, 2025.
- [4] GAO Y, LI B, LIU X N, *et al.* Minimizing heat generation in quantum dot light-emitting diodes by increasing quasi-Fermi-level splitting [J]. *Nature Nanotechnology*, 2023, 18(10): 1168-1174.
- [5] LIU B C, BAO J J, HE W, *et al.* Highly orientated asymmetrically strained CdZnSeS/ZnSeS/ZnS/CdZnS quantum dots for efficient green light-emitting diodes [J]. *Nano Energy*, 2025, 140: 110982.
- [6] BIAN Y Y, YAN X H, CHEN F, *et al.* Efficient green InP-based QD-LED by controlling electron injection and leakage [J]. *Nature*, 2024, 635(8040): 854-859.
- [7] 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.
- [8] LUO Y N, CAO X, WANG S, *et al.* Suppression of interfacial oxidation in core/shell InP quantum dots through solvent assisted core-etching strategy for efficient green light-emitting diodes [J]. *Nano Letters*, 2025, 25(1):

593-599.

- [9] YANG Y X, ZHENG Y, CAO W R, *et al.* High-efficiency light-emitting devices based on quantum dots with tailored nanostructures [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(4): 259-266.
- [10] CHEN X T, LIN X F, ZHOU L K, *et al.* Blue light-emitting diodes based on colloidal quantum dots with reduced surface-bulk coupling [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 284.
- [11] BI Y H, SUN J H, CAO S, *et al.* Highly efficient and eco-friendly green quantum dot light-emitting diodes through interfacial potential grading [J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 1945.
- [12] CHAO W C, CHIANG T H, LIU Y C, *et al.* High efficiency green InP quantum dot light-emitting diodes by balancing electron and hole mobility [J]. *Communications Materials*, 2021, 2(1): 96.
- [13] WANG S B, YANG W Y, LI Y, *et al.* Stable and efficient red InP-based QLEDs through surface passivation strategies of quantum dots [J]. *Nano Letters*, 2024, 24(49): 15781-15787.
- [14] PU C D, DAI X L, SHU Y F, *et al.* Electrochemically-stable ligands bridge the photoluminescence-electroluminescence gap of quantum dots [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 937.
- [15] FU Z, ZHOU L K, YIN Y, *et al.* Direct photo-patterning of efficient and stable quantum dot light-emitting diodes via light-triggered, carbocation-enabled ligand stripping [J]. *Nano Letters*, 2023, 23(5): 2000-2008.
- [16] YANG J, LEE M, PARK S Y, *et al.* Nondestructive photopatterning of heavy-metal-free quantum dots [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(43): 2205504.
- [17] ZHAI Z X, GU C, WANG W X, *et al.* Nondestructive direct photolithography of colloidal quantum dots enabled by benzophenone-based crosslinkers [J]. *Nano Research*, 2025, 18(9): 94907980.
- [18] SUN Q J, WANG Y A, LI L S, *et al.* Bright, multicoloured light-emitting diodes based on quantum dots [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(12): 717-722.
- [19] RITU, QURAISHI A M, KATTAYAT S, *et al.* Optimization of NPD/Alq₃/TPBi/Bphen OLED structure and investigation of electrical characteristics along with allied parameters [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2023, 55(8): 698.
- [20] YADAV R A K, DUBEY D K, CHEN S Z, *et al.* Role of molecular orbital energy levels in OLED performance [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 9915.
- [21] CARUGE J M, HALPERT J E, WOOD V, *et al.* Colloidal quantum-dot light-emitting diodes with metal-oxide charge transport layers [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(4): 247-250.
- [22] STOUWDAM J W, JANSSEN R A J. Red, green, and blue quantum dot LEDs with solution processable ZnO nanocrystal electron injection layers [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2008, 18(16): 1889-1894.
- [23] QIAN L, ZHENG Y, XUE J G, *et al.* Stable and efficient quantum-dot light-emitting diodes based on solution-processed multilayer structures [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(9): 543-548.
- [24] KIM H M, CHO S, KIM J, *et al.* Li and Mg co-doped zinc oxide electron transporting layer for highly efficient quantum dot light-emitting diodes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(28): 24028-24036.
- [25] 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]. *Science China Materials*, 2022, 65(7): 1882-1889.
- [26] GAO M, TU Y F, TIAN D D, *et al.* Alleviating electron over-injection for efficient cadmium-free quantum dot light-emitting diodes toward deep-blue emission [J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(4): 1400-1408.
- [27] CHUNG D S, DAVIDSON-HALL T, COTELLA G, *et al.* Significant lifetime enhancement in QLEDs by reducing interfacial charge accumulation via fluorine incorporation in the ZnO electron transport layer [J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 212.
- [28] YOON S Y, LEE Y J, YANG H, *et al.* Performance enhancement of InP quantum dot light-emitting diodes via a surface-functionalized ZnMgO electron transport layer [J]. *ACS Energy Letters*, 2022, 7(7): 2247-2255.
- [29] CAI F S, TU Y F, TIAN D D, *et al.* Defect passivation and electron band energy regulation of a ZnO electron transport layer through synergetic bifunctional surface engineering for efficient quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nanoscale*, 2023, 15(25): 10677-10684.
- [30] DAI X L, ZHANG Z X, JIN Y Z, *et al.* Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on

- quantum dots [J]. *Nature*, 2014, 515(7525): 96-99.
- [31] REN Y F, WANG Y Q, FANG Y, *et al.* Robust ZnMgO capped with benzyl-phosphonic acid as armor layer enables efficient and stable quantum dot light-emitting diodes [J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(29): e01388.
- [32] JIA S Q, HU M L, GU M, *et al.* Optimizing ZnO-quantum dot interface with thiol as ligand modification for high-performance quantum dot light-emitting diodes [J]. *Small*, 2024, 20(13): 2307298.
- [33] LIANG S S, TANG Z B, LI S, *et al.* Efficient ZnSeTe-based blue quantum-dot light-emitting diodes via phosphine oxide dual passivation of quantum dots and ZnMgO interfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(15): 2500034.
- [34] SUN C Y, LI Q Y, CAO S, *et al.* Synergistic chloride passivation and inorganic shell confinement in ZnMgO nanoparticles for efficient and stable blue ZnSeTe QLEDs [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2025, 16(22): 5441-5448.
- [35] ZHANG H, SUI N, CHI X C, *et al.* Ultrastable quantum-dot light-emitting diodes by suppression of leakage current and exciton quenching processes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(45): 31385-31391.
- [36] YANG X Y, ZHANG Z H, DING T, *et al.* High-efficiency all-inorganic full-colour quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nano Energy*, 2018, 46: 229-233.
- [37] LIN Q L, WANG L, LI Z H, *et al.* Nonblinking quantum-dot-based blue light-emitting diodes with high efficiency and a balanced charge-injection process [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(3): 939-946.
- [38] ACHARYA K P, TITOV A, HYVONEN J, *et al.* High efficiency quantum dot light emitting diodes from positive aging [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(38): 14451-14457.
- [39] SU Q, SUN Y Z, ZHANG H, *et al.* Origin of positive aging in quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Advanced Science*, 2018, 5(10): 1800549.
- [40] CHEN D S, CHEN D, DAI X L, *et al.* Shelf-stable quantum-dot light-emitting diodes with high operational performance [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(52): 2006178.
- [41] CHEN Z N, SU Q, QIN Z Y, *et al.* Effect and mechanism of encapsulation on aging characteristics of quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Nano Research*, 2021, 14(1): 320-327.
- [42] CHEN Z N, CHEN S M. Eliminating positive aging in quantum dot light-emitting diodes by H₂O-treatment [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(32): 2503477.
- [43] ZHENG Y Z, LIN X, LI J Z, *et al.* In situ n-doped nanocrystalline electron-injection-layer for general-lighting quantum-dot LEDs [J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 3362.
- [44] WAN H Y, XIA P, JUNG E, *et al.* Atomic layer deposition stabilizes nanocrystals, enabling reliably high-performance quantum dot LEDs [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(11): 2418300.
- [45] WANG S, LIU S H, WANG T, *et al.* Operando ZnO recrystallization for efficient quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 196.
- [46] HWANG Y, JUNG H, KIM J, *et al.* Boosting efficiency and longevity of quantum dot light-emitting diodes with dibenzofuran-incorporated hole transport materials featuring high bond dissociation energy [J]. *Small*, 2025, 21(36): e04867.
- [47] 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.
- [48] ZHANG Z H, ZHANG X Y, LIU H L, *et al.* Building one-dimensional hole transport channels in cross-linked polymers to enable efficient deep blue QLED [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451: 138516.
- [49] LIU Y Y, YAN M M, SHU J, *et al.* Enhanced performance and high resistance to efficiency degradation of blue quantum-dot light-emitting diodes using the lewis base blended hole-transporting layers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(1): 1251-1258.
- [50] NGUYEN H T, JEONG H, PARK J Y, *et al.* Charge transport in light emitting devices based on colloidal quantum dots and a solution-processed nickel oxide layer [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(10): 7286-7291.

- [51] WANG W X, GU C, ZHAI Z X, *et al.* Efficient quantum dot light-emitting diodes based on solution-processed WO_x nanoparticles [J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(14): 2403443.
- [52] YI Y Q Q, YANG J, XIE L M, *et al.* Linear cross-linkers enabling photothermally cured hole transport layer for high-performance quantum dots light-emitting diodes with ultralow efficiency roll-off [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 439: 135702.
- [53] SUN W J, XIE L M, GUO X J, *et al.* Photocross-linkable hole transport materials for inkjet-printed high-efficient quantum dot light-emitting diodes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(52): 58369-58377.
- [54] XIE L M, YANG J, ZHAO W C, *et al.* High-performance inkjet-printed blue QLED enabled by crosslinked and intertwined hole transport layer [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(21): 2200935.
- [55] KOO W H, JEONG S M, ARAOKA F, *et al.* Light extraction from organic light-emitting diodes enhanced by spontaneously formed buckles [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 222-226.
- [56] JI W Y, TIAN Y, ZENG Q H, *et al.* Efficient quantum dot light-emitting diodes by controlling the carrier accumulation and exciton formation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(16): 14001-14007.
- [57] CAI F S, LI M, ZHOU Y M, *et al.* Dipole-tunable interfacial engineering strategy for high-performance all-inorganic red quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Nano Energy*, 2024, 119: 109050.
- [58] HUANG X Y, SU S K, SU Q, *et al.* The influence of the hole transport layers on the performance of blue and color tunable quantum dot light-emitting diodes [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(8): 470-476.
- [59] FU Y, JIANG W, KIM D, *et al.* Highly efficient and fully solution-processed inverted light-emitting diodes with charge control interlayers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(20): 17295-17300.
- [60] DAVIDSON-HALL T, AZIZ H. Significant enhancement in quantum dot light-emitting device stability via a cascading hole transport layer [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(14): 16782-16791.
- [61] ZHU X T, LUO X, DENG Y Z, *et al.* Doping bilayer hole-transport polymer strategy stabilizing solution-processed green quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Science Advances*, 2024, 10(33): eado0614.

作者简介:



李成骏,男,硕士研究生,2024年于齐鲁工业大学(山东省科学院)获得学士学位,主要从事量子点发光二极管功能层界面调控方面的研究。E-mail: lichengjun@nimte.ac.cn



章婷,女,博士,研究员,2005年于北京交通大学获得博士学位,主要从事纳米光电材料与器件、发光与显示、印刷显示大面积量产及高分辨率的研究。E-mail: zhangting@nimte.ac.cn



黎瑞锋,男,博士,副研究员,2016年于浙江大学获得博士学位,主要从事QLED器件机理和工作寿命方面的研究。E-mail: lirufeng@nimte.ac.cn