

文章编号: 1000-7032(2026)01-0010-12

ZnSeTe 全彩量子点研究进展及其发光二极管应用

庞可意[†], 野世阳[†], 梁 艺, 邹炳锁, 曹 盛*, 赵家龙*

(广西大学 物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530000)

摘要: 量子点发光二极管(Quantum dot light-emitting diodes, QLED)因其低功耗、高色纯度和广色域优势,已成为新一代自发光显示技术。目前,高效 QLED 仍主要依赖 CdSe 或含 Pb 钙钛矿量子点,其重金属带来的环境风险限制了产业化发展。无镉无铅的环保型量子点材料因此成为推动 QLED 大规模商业化的核心替代方案。在众多候选体系中,ZnSeTe 量子点凭借优异的发光性能和独特能带调节机制,可实现从 450 nm 蓝光到 700 nm 红光的宽范围连续发射,是最具潜力的单体系环保型全彩发光材料。尽管如此,ZnSeTe 体系仍面临高 Te 含量引起的晶格应变、界面缺陷及器件电荷传输失衡等技术挑战。本文系统综述了 ZnSeTe 量子点的合成及其在 QLED 应用中的最新进展,重点围绕蓝、绿、红三基色发射的优化策略,分析了组分工程、壳层工程和表面工程的作用机理及最新成果,并展望了其在稳定性、规模化合成与器件效率方面的未来发展方向。

关 键 词: 环保量子点; QLED; ZnSeTe; 发光性能

中图分类号: O482. 31; TN312. 8

文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20250210

CSTR: 32170. 14. CJL. 20250210

Recent Advances in Full-color ZnSeTe Quantum Dots Toward High-performance Light-emitting Diodes

PANG Keyi[†], YE Shiyang[†], LIANG Yi, ZOU Bingsuo, CAO Sheng*, ZHAO Jialong*

(School of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530000, China)

* Corresponding Authors, E-mail: caosheng@gxu. edu. cn; zhaojl@gxu. edu. cn

Abstract: Quantum dot light-emitting diodes (QLEDs) have emerged as a promising next-generation self-emissive display technology, offering advantages such as low power consumption, high color purity, and wide color gamut. Currently, high-performance QLEDs largely rely on toxic CdSe or Pb-containing perovskite quantum dots, whose heavy metal content presents environmental risks that restrict industrialization. Consequently, the development of Cd/Pb-free, eco-friendly quantum dot materials has become the core alternative for driving large-scale QLED commercialization. Among various candidates, ZnSeTe quantum dots stand out as the most promising single-system full-color emitter, due to their superior luminescence properties and unique band structure tuning mechanism, which enables continuous emission across a broad range from 450 nm blue light to 700 nm red light. Nevertheless, the ZnSeTe system still faces critical challenges, including lattice strain induced by high Te content, interfacial defects, and carrier transport imbalance in devices. This review systematically summarizes the latest progress in the synthesis of ZnSeTe quantum dots and their applications in QLEDs. Focusing on optimization strategies for achieving blue, green, and red primary colors, we analyze the mechanisms and the latest achievements of composition engineering, shell engineering, and surface engineering. Finally, we discuss the future outlook regarding challenges in stability, scale-up synthesis, and device efficiency.

Keywords: eco-friendly quantum dots; QLED; ZnSeTe; luminescence performance

收稿日期: 2025-09-08; 修订日期: 2025-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(62475054, 62165001)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62475054, 62165001)

[†]: 共同贡献作者

1 引 言

量子点 (Quantum dots, QDs) 是一类具有独特光电性质的零维半导体纳米材料, 因其量子限域效应而展现出可调谐发光波长、窄的发射线宽 (高色纯度)、高发光效率以及优异的溶液可加工性, 近年来在照明和显示领域受到广泛关注。基于量子点色彩转换膜的背光源技术已实现商业化, 并在液晶显示面板中大规模应用, 有效提升了显示色域和能效水平。与此同时, 量子点发光二极管 (QLED) 技术作为新一代自发光显示解决方案, 兼具低功耗、高色纯度、超广色域覆盖、快速响应时间和柔性可集成等优势, 被视为未来超高清电视、移动终端、可穿戴设备和照明的重要候选^[1-2]。过去四十余年, QLED 技术实现了飞跃式发展, 红、绿、蓝三基色 QLED 的最大外量子效率 (External quantum efficiency, EQE) 已分别提升至 38.2%^[3]、28.8%^[4]和 24.7%^[5], 接近甚至超越商用 OLED (Organic light-emitting diode) 水平^[6-9], 成为高端显示技术的有力竞争者。

尽管 QLED 的性能已接近商用标准, 目前效率最高、工艺最成熟的发射层仍主要依赖 CdSe^[10-13] 或含 Pb 钙钛矿量子点^[2,6-8,14-17]。Cd 和 Pb 的潜在毒性及环境危害引发全球关注, 并受到严格法规限制, 例如, 欧盟 RoHS 2.0 指令将 Cd 和 Pb 的含量上限分别限定为 100×10^{-6} 和 1000×10^{-6} 。这些法规显著制约了含 Cd/Pb QLED 的产业化与可持续发展。无 Cd/Pb 量子点的研究体系主要包括 ZnSe^[18-23]、InP^[24-32]、CuInS₂^[33-37]、碳量子点^[38-42] 及其衍

生物。其中, CuInS₂ 量子点因其深能级陷阱态或杂质导致宽光谱发射, 难以满足高色纯度显示需求^[43-44]; InP 量子点虽具备较优的本征激子发光特性^[2,45-47], 但已被世界卫生组织列为 2A 类潜在致癌物^[47-48], 其生产和应用可能将面临日益严格的安全和环保审查。碳量子点具有优异的生物相容性, 但其发光机理复杂, 发射光谱通常较宽, 导致色纯度有限。因此, 寻找安全、环保且兼备高色纯度与高效率的量子点体系, 成为推动 QLED 绿色化发展的必然路径。

在众多无 Cd/Pb 环保型量子点体系中, ZnSe 量子点因其优良的本征激子发光特性、较高的辐射复合效率以及无毒环保的化学组成而备受关注。然而, ZnSe 本征带隙较大 (约 2.7 eV)^[46], 发射波长集中在蓝紫光区, 难以覆盖绿光和红光, 从而限制了其在全色 QLED 中的应用潜力。为突破波长调谐瓶颈, 研究者将 ZnSe 与带隙更小的 ZnTe (2.25 eV) 合金化, 利用能带弯曲效应实现了从蓝紫光到红光的宽范围发射^[49-55]。自 2019 年首个电驱动 ZnSeTe 基 QLED 问世以来, 该体系凭借无 Cd/Pb 的环保优势和接近 CdSe 基 QLED 的优异性能 (蓝光 EQE 已达 24.7%), 引发学术界与产业界的高度关注^[50-53,56-60]。近年来, 前驱体设计、表面钝化、核壳结构调控及器件架构优化等方面的进展, 使 ZnSeTe 量子点在蓝光和绿光波段的光致发光量子效率 (photoluminescence quantum yield, PLQY) 已接近 100%^[55-57,61], 对应 QLED 的 EQE 也取得突破^[56], 展示出作为无 Cd/Pb 环保型全彩 QLED 发射层材料的巨大潜力^[62] (如表 1 所示)。本文综述了

表 1 ZnSeTe 基量子点及其 QLED 研究进展
Tab. 1 Research progress of ZnSeTe-based quantum dots and their QLED

量子点结构	PLQY/%	FWHM/nm	峰位/nm	EQE/%	Ref.
ZnSeTe/ZnSe/ZnS	70	32	445	4.2	2019 ^[50]
ZnSeTe/ZnSe/ZnSeS/ZnS	84	28	447	9.5	2020 ^[52]
ZnSeTe/ZnSe/ZnS	100	36	460	20.2	2020 ^[56]
ZnSeTe/ZnSe/ZnS	96	23	465	18.6	2022 ^[57]
ZnSeTe/ZnSe/ZnS	100	23	448	10.9	2023 ^[55]
ZnSeTe/ZnSe/ZnS	86.2	22	443	5.46	2023 ^[63]
ZnSeTe/ZnSe/ZnS	95	22	452	18	2023 ^[64]
ZnSeTe/ZnSe/ZnS	63	40	455	9.1	2024 ^[65]
ZnSe/ZnSeTe/ZnSe/ZnS	84	19	455	—	2024 ^[66]
ZnSeTe/ZnSe/ZnS	95	33	460	17.2	2024 ^[67]
ZnSeTeS/ZnSe/ZnS	100	14	460	24.7	2025 ^[5]
ZnSeTe/ZnSe/ZnS	90	36	526	3.42	2024 ^[68]
ZnSeTe/ZnSe/ZnSeS/ZnS	86	50	520	20.6	2025 ^[69]
ZnSeTe/IPG/ZnSe/ZnS	95	38	520	21.7	2025 ^[70]
ZnSeTe/ZnSe/ZnSeS/ZnS	55	52	608	—	2023 ^[54]
ZnSeTe/ZnTe/ZnSe/ZnS	12	72	618	—	2025 ^[71]

ZnSeTe 量子点及其 QLED 最新研究进展,重点分析其在蓝、绿、红三基色实现中的主要技术挑战,并探讨表面工程、组分工程和壳层工程等优化策略,旨在为无 Cd/Pb 环保型全彩 QLED 的发展提供参考与启示。

2 蓝光 ZnSeTe 量子点

ZnSeTe 量子点可以通过在 ZnSe 晶格位中引入适量 Te 来实现蓝光区发射波长的调谐。然而,Te 前驱体的高反应活性会对量子点的光学性能带来显著挑战。在合成过程中,Te 原子极易与氧或羟基发生副反应,从而在量子点表面形成大量缺陷态^[72-73]。这些缺陷会俘获激子并诱发非辐射复合,进而严重降低其 PLQY。此外,由于 Te 和 Se 前驱体反应活性存在差异,Te 在量子点晶体中的分布往往不均,容易形成局部 Te 团簇。这种团簇会导致量子点带隙不均匀,产生深能级陷阱及电荷局域化效应,不仅增加了非辐射复合,还会导致量子点发射光谱峰展宽和不对称,从而严重影响

蓝光量子点的色纯度与器件性能^[46]。

为解决 Te 引发的 ZnSeTe 量子点表面缺陷问题,研究者提出了卤素离子表面钝化策略。Zheng 等^[63]通过密度泛函理论(DFT)计算(图 1(a))发现,Br⁻与 Zn 位点的结合能(-2.34 eV)显著低于油酸配体(-1.55 eV),驱动了配体交换过程,使最外层 ZnS 壳层中过量的绝缘性油酸配体被取代或去除。这一作用不仅有效饱和了表面 Zn 悬挂键(图 1(b))、消除陷阱态并抑制非辐射复合,同时也降低了量子点间的空间位阻和隧穿势垒,显著提升载流子注入与传输效率,最终使 ZnSeTe 量子点的 PLQY 由 39.7% 提升至 86.2%(图 1(c)),器件 EQE 由 0.74% 增至 5.46%。Guan 等^[65]提出了一种高效的碘离子(I⁻)表面钝化策略,以解决 ZnSeTe 量子点表面的高缺陷态问题。他们发现 I⁻与 Zn 位点结合能更高,能够更彻底取代长链油酸配体,从而在缺陷消除(图 1(d)、(e))和界面能级优化方面发挥协同作用,使 PLQY 由 45% 提高至 63%,器件 EQE 由 5.0% 提升至 9.1%(图 1(f))。这些结果表明,卤素

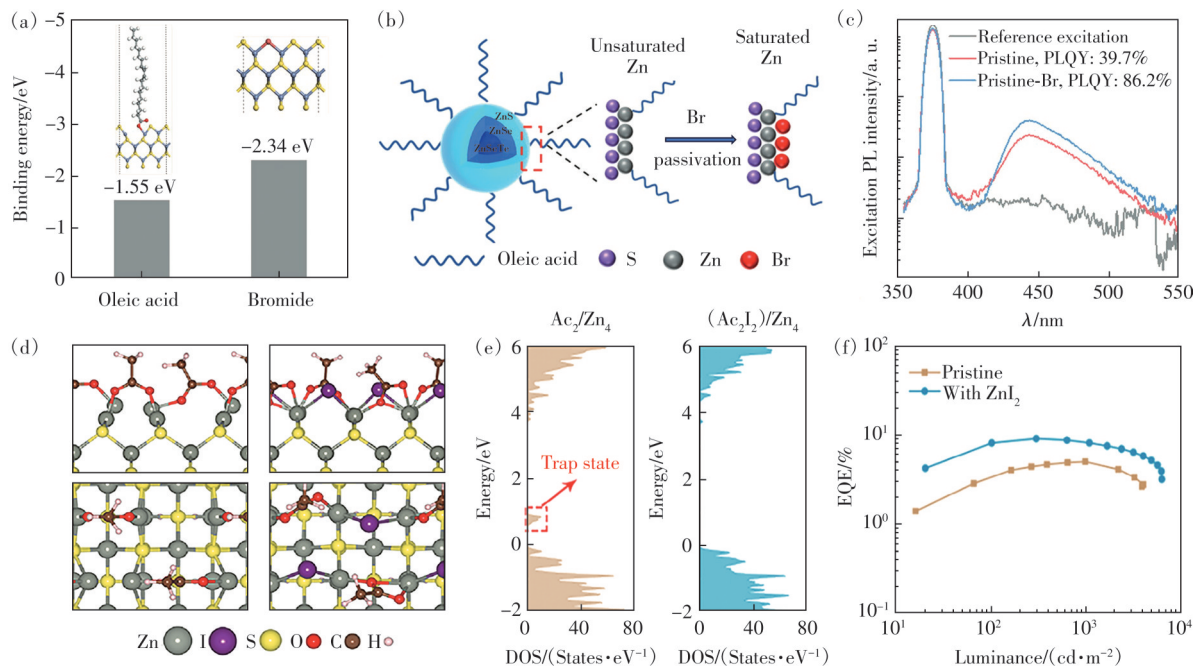


图 1 (a)油酸和溴离子与量子点表面 Zn 结合能的 DFT 计算结果;(b)溴离子与量子点表面 Zn 结合示意图;(c)未使用溴离子处理与使用溴离子处理的量子点 PL 光谱对比;(d)ZnI₂ 修饰前(图左)、后(图右)ZnS(100)表面结构;(e)有(图左)、无(图右)碘离子修饰的量子点的表面态密度(DOS)计算;(f)有无碘离子修饰量子点的 QLED 性能对比

Fig.1 (a) DFT calculation results of the binding energy between oleic acid/bromide ions and Zn atoms on the quantum dot surface. (b) Schematic illustration of bromide ion binding with unsaturated Zn atoms on the quantum dot surface. (c) Comparison of photoluminescence (PL) spectra for quantum dots with and without bromide ion treatment. (d) ZnS(100) surface structure before (left) and after (right) ZnI₂ modification. (e) Calculated surface density of states (DOS) for quantum dots with (left) and without (right) iodine ion modification. (f) Comparison of QLED performance for quantum dots with and without iodine ion modification

离子在 ZnSeTe 蓝光量子点的表面工程中具有关键作用,为高效器件的实现提供了有效途径。

为了消除 ZnSeTe 量子点核壳界面的堆垛层错, Kim 等开发了基于氢氟酸(HF)和氯化锌(ZnCl_2)添加剂的合成路线^[56],将量子点 PLQY 从 50% 提高至 93%。在此基础上,他们进一步通过液相和固相两步配体交换,引入 ZnCl_2 替代油酸配体,实现了氯离子对量子点表面缺陷的高效钝化。DFT 计算结果表明,氯离子具有更高的表面结合能,能彻底清除价带附近的带隙缺陷态,使 PLQY 达到 100%。并且该策略显著提升了量子点的热稳定性,在 150 °C 退火处理后,PLQY 保持率由 19% 提高到 90%。在器件结构设计方面,通过引入氯浓度梯度的双发光层结构,实现空穴注入优化和载流子复合平衡,最终获得了 EQE 20.2%、最大亮度 88 900 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 的高性能蓝光 QLED。尽管 HF 法在缺陷钝化方面表现出优异效果,但其高腐蚀性和复杂工艺流程限制了量子点规模化和绿色制造的应用前景。为克服这一问题,我们课题组提出了一种基于无机氟化物 NH_4F 添加剂辅助合成 ZnSeTe 量子点的安全简易策略^[67]。在 ZnSeTe 核的早期生长阶段引入 NH_4F ,可以在不进行高温 HF 处理的情况下将氟离子引入反应体系,显著抑制 Te—O 键的形成(图 2(a)),降低量子点表面的氧缺陷浓度。采用该策略合成的 ZnSeTe/ZnSe/ZnS 量子点在 460 nm 处实现了纯蓝发射,PLQY 高达 95%(图 2(b)),且在壳层生长过程中 PLQY 保持较高且稳定(图 2(c))。基于该量子点制备的 QLED 实现了 17.2% 的 EQE(图 2(d)),倒置结构 QLED 也达到 16.3%(图 2(e)),CIE (Commission Internationale de l'Éclairage)色坐标满足纯蓝光(450~470 nm)显示需求。该 NH_4F 辅助方法具有安全、低成本和工艺简单等优点,为环保型蓝光 QLED 的产业化制造提供了可行且绿色的技术路径。

实现高色纯度蓝光显示所需的超窄发射线宽是 ZnSeTe 量子点商业化应用的另一重要挑战。为克服 Te 分布不均带来的带隙起伏和缺陷态诱发的峰展宽问题^[61],杨绪勇团队提出了基于 ZnSeTeS 四元量子点的“等电子硫控制策略”^[5]。该策略采用三苯基膦硫(TPP-S)为硫源,TPP-S 易释放 S^{2-} 离子,提高了 S 的反应活性;同时,TPP 能适度减缓 Te 前驱体(如 TOP-Te)的反应速率,避免 Te 过快或过早进入晶格。通过这一方式,Se、Te、

S 三种阴离子的反应速率更接近,有助于实现量子点晶格中阴离子组分的均匀掺入与合金化,从而提升量子点的组成均一性和发光性能。同时,硫元素的高电负性有助于抑制 Te 团簇的形成与空穴的局域化效应,减少氧缺陷及晶体层错。实验结果表明,当硫在阴离子前驱体中的摩尔分数为 3% 时,所制备的 ZnSeTeS/ZnSe/ZnS 量子点在 460 nm 处实现了纯蓝光发射,PLQY 接近 100%,发射线宽仅 17 nm,且具备优异的热稳定性(在 150 °C 退火 64 h 后 PLQY 保持率达到 97%)。基于该量子点制备的 QLED 表现出高达 24.7% 的 EQE,最大亮度达到 36 850 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$,CIE 色坐标(0.14, 0.06)满足 Rec. 2020 显示标准。

此外,壳层厚度优化是进一步缩窄量子点发射线宽和提升其器件效率的重要策略^[74]。本课题组通过精确调控内层 ZnSe 壳层厚度,有效改善了量子点的发光性质^[64]。研究发现,当 ZnSe 壳层厚度优化至 2.5 nm 时,量子点在溶液中的发射线宽从 > 30 nm 缩窄到 20 nm,PLQY 提升至 95%(图 2(f))。基于该优化量子点制备的 QLED 器件在 452 nm 实现了纯蓝发射,EL 线宽 22 nm,CIE 色坐标为(0.148, 0.042),EQE 达 18%,最大亮度 3 520 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ (@4 V)。对比研究显示,ZnSe 壳层过薄时难以充分钝化量子点晶核表面缺陷和减缓晶核与 ZnS 外壳之间的晶格失配,增加非辐射复合缺陷位点从而降低发光效率;ZnSe 壳层过厚时导致电子-空穴波函数耦合不足和内部应力积累,形成新的非辐射复合中心,均不利于发光效率提升。图 2(g)是瞬态吸收光谱,用于分析不同量子点的俄歇复合过程,验证了壳层优化可以有效抑制俄歇复合。图 2(h)为不同壳层厚度量子点的拉曼光谱,证实了壳层结构对晶格振动和激子-声子耦合的影响。该壳层工程策略通过协同抑制量子点激子-声子耦合和钝化表面缺陷,实现了高色纯度与高效率的平衡,最终器件 EQE 达到 18%(图 2(i)),为环保型无 Cd/Pb 超高清蓝光显示技术的开发提供了重要技术支撑。

综上所述,蓝光 ZnSeTe 量子点的高性能实现依赖于对 Te 相关缺陷的精确控制、表面钝化以及壳层结构优化。当前研究表明,通过卤素离子辅助钝化,可有效降低表面氧缺陷和带隙缺陷态,从而显著提升 PLQY 和热稳定性;等电子硫掺杂策略则进一步优化了阴离子组分均匀性,抑制 Te 团簇形成,实现超窄发射线宽与高色纯度;壳层厚度精

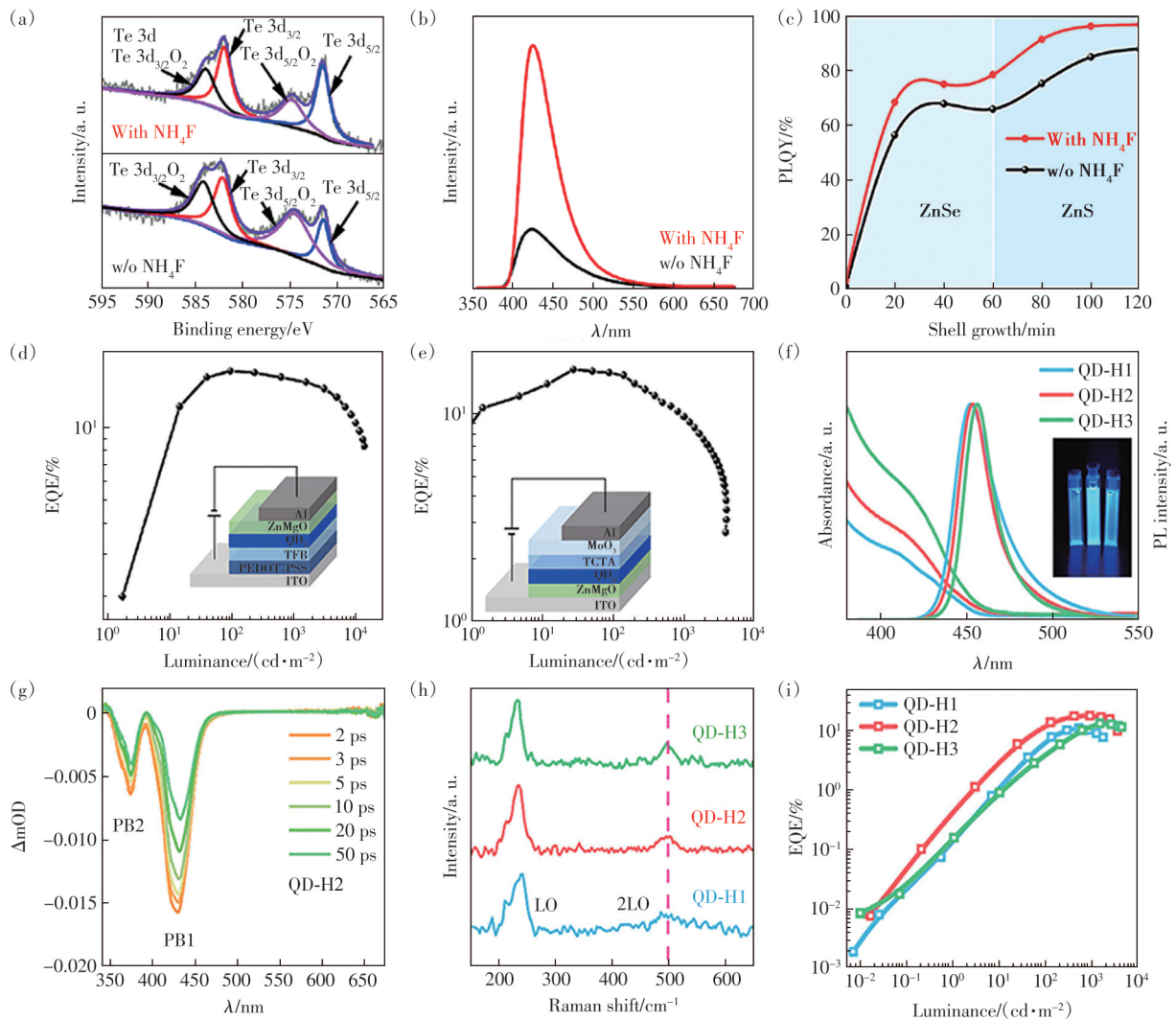


图2 (a)有无 NH_4F 添加剂辅助合成的 ZnSeTe 量子点 XPS 光谱;(b)有无 NH_4F 添加剂辅助合成的 ZnSeTe 量子点 PL 光谱;(c)PLQY 随 ZnSe 和 ZnS 壳层生长时间的变化;基于 NH_4F 辅助合成的 ZnSeTe 量子点的正置(d)和倒置(e)QLED 性能;(f)不同壳层厚度 ZnSeTe 量子点的吸收光谱和 PL 光谱;(g)QD-H2 瞬态吸收光谱;(h)不同壳层厚度量子点的拉曼光谱;(i)三种不同壳层厚度量子点 QLED 的 EQE-亮度曲线

Fig.2 (a) XPS spectra of ZnSeTe quantum dots synthesized with and without NH_4F additive. (b) PL spectra of ZnSeTe quantum dots synthesized with and without NH_4F additive. (c) Changes in PLQY with ZnSe and ZnS shell growth time. Performance of inverted(d) and conventional(e) QLEDs based on ZnSeTe quantum dots synthesized with NH_4F additive. (f) Absorption and PL spectra of ZnSeTe quantum dots with different shell thicknesses. (g) Transient absorption spectra(QD-H2). (h) Raman spectra of quantum dots with different shell thicknesses. (i) EQE-luminance curves of QLEDs based on three quantum dots with different shell thicknesses

细调控则在抑制激子-声子耦合和俄歇复合的同时,实现量子点发光效率和器件性能的平衡。整体来看,这些策略不仅揭示了蓝光 ZnSeTe 量子点性能瓶颈的物理机理,也为环保型无镉高效蓝光 QLED 的设计提供了系统性解决方案,显示出材料设计、表面化学和器件工程协同优化的重要性。

3 绿光 ZnSeTe 量子点

为了实现 ZnSeTe 量子点在绿光波段的发射,

需要在 ZnSe 晶体中掺入更高浓度的 Te 元素,以有效减小带隙,实现发光波长的红移。然而, Te 含量的增加显著加剧了 ZnSeTe 核与 ZnSe 或 ZnS 壳层之间的晶格常数失配,导致界面应力和结构缺陷产生。这些缺陷不仅为量子点的非辐射复合提供了路径,还会引起电荷陷获和俄歇复合,降低了 PLQY,最终严重影响 QLED 的电致发光效率和稳定性^[70-71]。

针对 Te 含量升高带来的量子点界面失配

问题,研究者提出了多层梯度壳层设计策略。2025年,申怀彬团队在传统 ZnSe 壳层和 ZnS 外壳之间引入超薄的 ZnSeS 合金中间层,成功合成了厚壳 ZnSeTe/ZnSe/ZnSeS/ZnS 量子点(图 3(a))^[69]。该 ZnSeS 中间层因其晶格常数介于 ZnSe 和 ZnS 之间,有效缓解了 ZnSeTe 核与壳层间的应变累积和界面缺陷生成,降低了晶格失配率,减少了缺陷态和激子猝灭。这一改进使得 ZnSeTe 量子点的 PLQY 由 76% 提升到 86%(图 3(b)),同时促进了 ZnS 外壳的均匀稳定生长。厚壳结构不仅降低了量子点之间的 Förster 共振能量转移,抑制了俄歇复合,还优化了能带结构,价带顶从 -6.11 eV 提

升到 -5.94 eV,显著降低了空穴从空穴传输层注入的势垒,有利于载流子注入平衡。基于这一优化设计,制备的绿色 ZnSeTe 基 QLED 实现了 20.6% 的 EQE(图 3(c))。

在提升量子点效率的同时,实现绿色发射的高色纯度依然是关键目标。为进一步降低量子点核壳界面缺陷、改善成分均匀性并缩窄发射线宽,本课题组提出了界面势能梯度(Interfacial potential gradient, IPG)结构设计(图 3(d))^[70]。该设计在 ZnSeTe 核与 ZnSe 壳层之间插入 ZnSe_{0.9}Te_{0.1} 合金中间层,形成势能梯度,有效平滑了晶格常数差异并抑制应力集聚。实验表明,IPG 结构显著

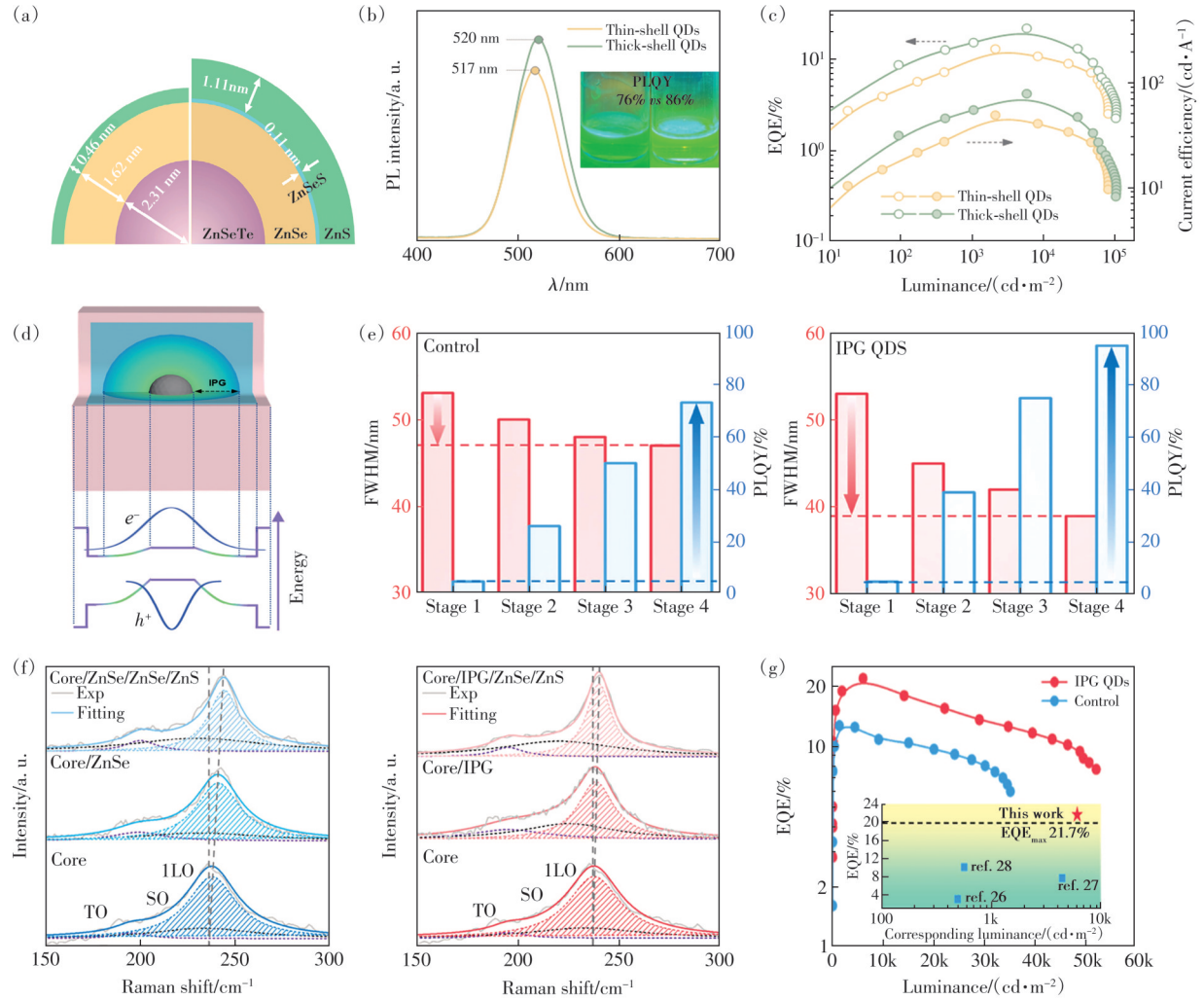


图 3 (a) ZnSeTe/ZnSe/ZnSeS/ZnS 量子点结构; (b) 厚壳与薄壳量子点的 PL 光谱; (c) 厚壳和薄壳量子点 QLED 的 EQE 和电流效率曲线; (d) IPG 结构量子点设计; (e) 对照(Control)和 IPG 结构量子点在不同生长阶段的 FWHM 和 PLQY 变化; (f) 对照(Control)和 IPG 结构量子点的拉曼光谱; (g) 基于 IPG 量子点绿光 QLED 的 EQE-亮度曲线

Fig.3 (a) ZnSeTe/ZnSe/ZnSeS/ZnS quantum dot structure. (b) PL spectra of thick-shell and thin-shell quantum dots. (c) EQE and current efficiency curves of QLEDs with thick-shell and thin-shell quantum dots. (d) IPG structure quantum dot design. (e) Changes in FWHM and PLQY of control and IPG structure quantum dots at different growth stages. (f) Raman spectra of control and IPG structure quantum dots. (g) EQE-luminance curve of green-emitting QLED based on IPG quantum dots

提升了量子点的 PLQY, 从传统结构的 70% 提高到 95%。同时, IPG 结构量子点发射光谱的半峰宽由核阶段的 53 nm 缩小至 38 nm, 相比对照组的 47 nm 有明显改善 (如图 3(e))。X 射线衍射 (XRD) 和拉曼光谱分析证实, IPG 层有效降低了晶格失配率 (由 3.9% 降至 1.5%), 显著减少了界面应变和缺陷态 (如图 3(f))。激发功率依赖的瞬态吸收光谱测量显示, 该设计能够有效抑制俄歇复合, 促进载流子沿辐射路径复合。基于 IPG 量子点制备的绿光 QLED 实现了 21.7% 的 EQE (图 3(g)), 表现出优异的发光效率、稳定性和更高的色纯度。该设计策略不仅验证了 IPG 层在优化 ZnSeTe 基环保量子点方面的有效性, 也为实现全色、无 Cd/Pb、高性能 QLED 显示提供了重要的结构设计思路和技术储备。

综上可见, 绿光 ZnSeTe 量子点的高性能实现主要依赖于对 Te 含量升高引发的晶格失配和界面缺陷的有效调控。多层梯度壳层设计通过引入 ZnSeS 或 ZnSeTe 合金中间层, 有效缓解了核壳间应力, 减少了缺陷态, 提高了 PLQY, 并优化了载流子注入平衡, 从而显著提升了 QLED 的电致发光效率。IPG 结构的应用进一步增强了成分均匀性和界面稳定性, 缩窄了发射线宽, 提升了色纯度, 同时抑制了俄歇复合, 实现了高效率、高稳定性的绿色发光。整体来看, 这些策略不仅阐明了 Te 掺杂与核壳结构对量子点光电性能的内在影响机制, 也为高色纯度、环保型绿光 QLED 的器件设计提供了系统性的解决方案, 体现了材料化学与器件工程协同优化的重要性。

4 红光 ZnSeTe 量子点

相比蓝光和绿光波段, ZnSeTe 量子点在红光区域的发射开发面临更大挑战。主要原因在于实现红光发射通常需要掺入更高比例的 Te 元素, 以进一步缩小材料带隙。高 Te 含量带来的两个主要问题是: 一方面, Te 前驱体的反应活性远高于 Se 前驱体, 导致量子点合成过程中阴离子掺杂失控, 难以实现成分均匀分布, 从而导致能带起伏和缺陷富集; 另一方面, Te 原子尺寸较大, 导致 ZnSeTe 核与壳层之间的晶格失配加剧, 形成严重的界面应力和结构畸变, 影响量子点的晶体质量、化学稳定性及发光性能^[75-76]。此外, Te 元素诱发的表面缺陷容易俘获激子, 增加非辐射复合通道, 致使红光 ZnSeTe 量子点的 PLQY 明显低于蓝光和绿光区域。这些

因素共同导致当前红光 ZnSeTe 量子点在 PLQY、发射线宽及器件性能方面仍存在显著不足。

为缓解高 Te 含量带来的反应活性差异与界面缺陷, Kim 团队发展了一系列合成及结构优化策略^[54]。他们首先使用二苯基膦 (DPP) 络合 Se 前驱体, 有效提高 Se 源的反应活性, 使其与高反应性的 Te 前驱体反应更为均衡, 从而提升了 ZnSeTe 合金核的成分均匀性和晶体质量。基于此, 他们采用一步法连续包覆 ZnSe/ZnSeS/ZnS 三重壳层 (图 4(a)), 获得了从深蓝到红光波段连续可调的 ZnSeTe 量子点。当 Te/Se 比例为 2 时, 实现了红光发射, PLQY 由 38% 提升至 55% (图 4(b)), 发射峰位明显红移 (图 4(c)), 且平均寿命和辐射复合率均有所提升。为进一步抑制副反应, 他们采用两步法壳层包覆策略, 有效消除残留前驱体引发的晶体缺陷, 半峰宽由 58 nm 缩小至 52 nm。随后, 引入 Te 含量较低 (Te/Se=0.33) 的 ZnSeTe 过渡层作为核壳缓冲层, 进一步缓解晶格应力, 使红光发射的 ZnSeTe 量子点 PLQY 达到 63%, 发射半峰宽收窄至 48 nm。

为拓展红光发射波长范围及实现可控带隙结构, 宁佳佳团队提出基于“魔力尺寸团簇 (Magic-size clusters, MSCs)”的合成策略^[71]。他们利用 TOP-Te 作为 Te 源, 与 ZnSe MSCs 反应生成高组分一致性的 ZnSeTe 合金核 (图 4(d))。在此基础上生长 ZnTe 壳层, 构建 II 型核壳异质结构 (即电子与空穴分别局域于不同区域, 空穴倾向于限制在核心, 电子偏向于分布在壳层), 从而降低俄歇复合并将发射波长扩展至 760 nm 以上, 实现了覆盖 450~760 nm 的连续可调发射范围 (图 4(e))。进一步包覆 ZnSe 和 ZnS 壳层后, 量子点稳定性得到增强。然而, II 型结构特有的电子-空穴空间分离特性虽有利于长波发射, 却导致激子寿命延长和发射线宽加大。在典型的 ZnSeTe/ZnTe/ZnSe/ZnS 量子点中, PLQY 仅为 12%, 半峰宽高达 72 nm (图 4(f))。目前, 红光 ZnSeTe 量子点的研究主要集中在通过合成策略提升 PLQY, 而其在 QLED 器件中的电致发光性能尚未见公开报道。其主要原因在于, 高 Te 含量引入的界面缺陷和势阱效应导致发光层效率低且稳定性差, 从而限制了器件的整体性能。

总体来看, 红光 ZnSeTe 量子点的性能受限于高 Te 掺杂引发的成分不均、晶格失配及界面缺陷。现有研究通过提升 Se 源反应活性、分步壳层包覆、

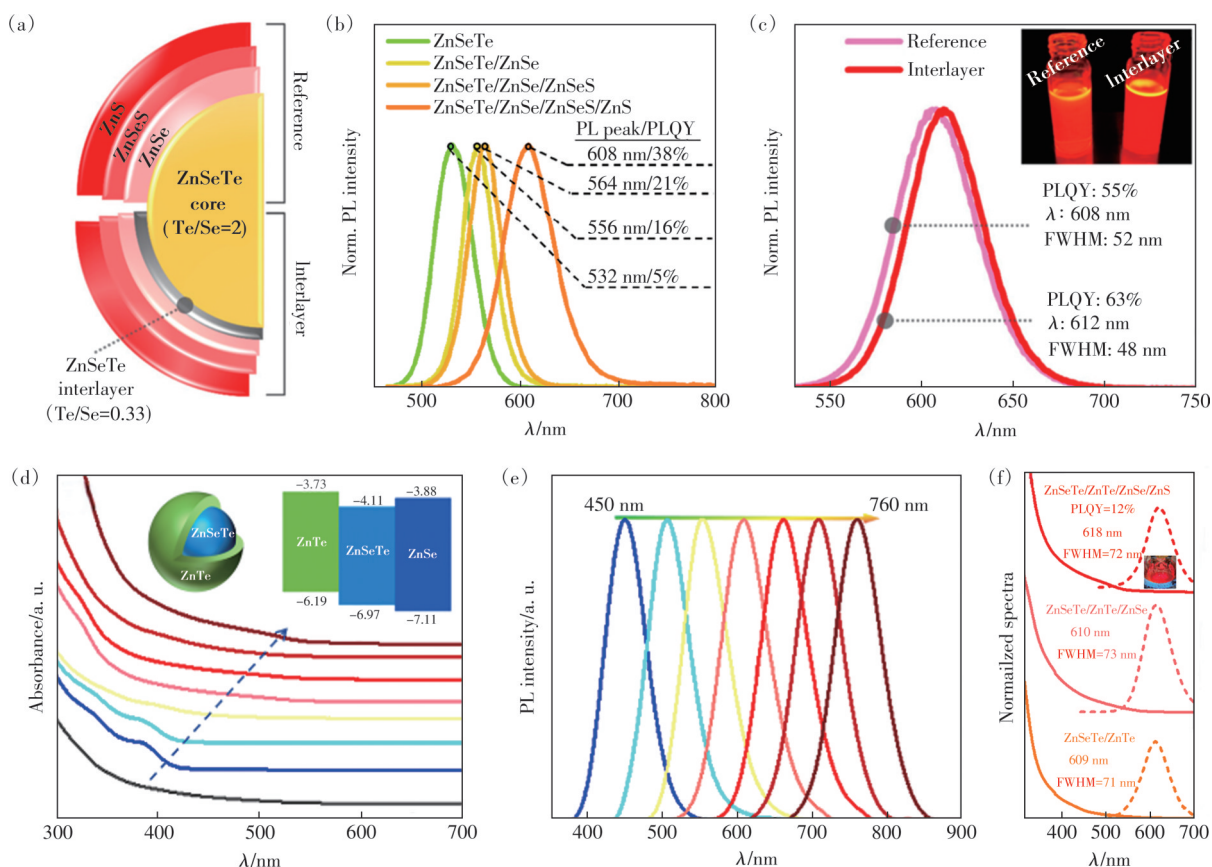


图 4 (a)分步壳层包覆策略得到的 ZnSeTe 量子点结构;(b)不同壳层结构量子点的 PL 光谱;(c)引入过渡层前后量子点的 PL 光谱;(d)MSCs 合成的 ZnSeTe 量子点;(e)450~760 nm 连续可调 PL 光谱;(f)包覆多层壳层后的红光 PL 光谱

Fig.4 (a) ZnSeTe quantum dot structure obtained by step-by-step shell coating strategy. (b) PL spectra of quantum dots with different shell structures. (c) PL spectra of quantum dots before and after introduction of the transition layer. (d) ZnSeTe quantum dots synthesized by MSCs. (e) Continuously tunable PL spectra from 450 nm to 760 nm. (f) Red-emitting PL spectrum after coating with multiple shell layers

核壳缓冲层以及 MSC 策略,初步缓解了 Te 高含量导致的界面应力和晶体缺陷,实现了红光发射的可控波长和一定的 PLQY 提升。然而,与蓝光和绿光量子点相比,红光区的 PLQY 显著偏低,发射线宽较大,显示出器件效率和色纯度提升空间有限。这表明,在红光 ZnSeTe 量子点的高性能实现上,仍需进一步优化量子点晶核成分均匀性、界面缺陷钝化以及核壳结构设计,以平衡长波发射需求与光电性能,提供高色纯度、高效率红光 QLED 的可行方案。

5 结论与展望

ZnSeTe 基环保型量子点因其优异的带隙可调性、高 PLQY 及环境友好性,正成为全彩 QLED 发射层的重要候选材料。过去数年中,蓝光 ZnSeTe 量子点在表面缺陷钝化、配体工程和壳层结构优化方面取得了显著进展,实现了近 100% 的 PLQY、窄至 20 nm 的发射线宽及超过 20% 的 EQE,展现出

良好的产业化前景与应用潜力;绿光体系虽可通过提高 Te 含量拓展发射波长,但高掺杂带来的晶格失配和界面应力增加显著影响发光效率与稳定性,通过梯度核壳、中间层合金化和界面势能梯度设计等手段已实现 EQE 超过 20%,但色纯度与寿命仍需提升;红光体系因高 Te 含量引发的反应活性失衡、组分不均及界面缺陷等问题,仍面临结构稳定性差、PLQY 低和发射线宽宽等挑战,虽在前驱体活性匹配、分步壳层包覆、II 型核壳及“魔力尺寸团簇”策略下取得一定突破,但在发射纯度、效率与长期稳定性方面仍有较大提升空间。

为了推动 ZnSeTe 量子点从实验室研究向商业化应用,需要在材料合成、核/壳结构调控以及器件工程方面持续优化。具体而言,应开发绿色、安全、低成本且可规模化的合成工艺,以实现高产率、批次稳定性及均匀成分分布;精准设计核-壳界面结构并采用高效缺陷钝化策略,降低缺陷态

密度,抑制非辐射复合,从而提升量子点的发光效率和器件寿命;在红光波段,需优化合金成分分布与均匀性,突破PLQY低、发射线宽宽及色纯度不足的瓶颈;同时,构建高效、长寿命、低功耗的QLED器件结构,以满足超高清、广色域及柔性显示等多元化应用需求。

在产业化过程中,ZnSeTe量子点仍面临多重挑战。首先,高活性的Te前驱体容易导致成分不均和界面缺陷,增加合成和壳层包覆难度;其次,红光量子点PLQY低、发射线宽宽及长期稳定性不足,限制了器件效率与色纯度;此外,传统HF等钝

化剂存在安全与环保隐患,亟需开发绿色、安全的替代方案;最后,全色显示对量子点性能一致性提出更高要求,从材料制备到器件集成各环节均需高可控性。应对这些挑战需要材料化学、表面工程、器件物理及工艺工程的多学科协同创新,以推动ZnSeTe量子点成为下一代全色、高色纯度、低能耗QLED显示及固态照明的核心材料体系。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250210>

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] JANG E, JANG H. Review: quantum dot light-emitting diodes [J]. *Chem. Rev.*, 2023, 123(8): 4663-4692.
- [3] LIU B C, LIN Q Z, SUN S Q, *et al.* Tailored large-particle quantum dots with high color purity and excellent electroluminescent efficiency [J]. *Sci. Bull.*, 2025, 70(6): 905-913.
- [4] 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.
- [5] WU Q Q, CAO F, YU W K, *et al.* Homogeneous ZnSeTeS quantum dots for efficient and stable pure-blue LEDs [J]. *Nature*, 2025, 639(8055): 633-638.
- [6] XU H Y, SONG J J, ZHOU P H, *et al.* Dipole-dipole-interaction-assisted self-assembly of quantum dots for highly efficient light-emitting diodes [J]. *Nat. Photonics*, 2024, 18(2): 186-191.
- [7] DENG Y Z, PENG F, LU Y, *et al.* Solution-processed green and blue quantum-dot light-emitting diodes with eliminated charge leakage [J]. *Nat. Photonics*, 2022, 16(7): 505-511.
- [8] ZHANG W J, LI B, CHANG C, *et al.* Stable and efficient pure blue quantum-dot LEDs enabled by inserting an anti-oxidation layer [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 783.
- [9] KONG L M, LUO Y, WU Q Q, *et al.* Efficient and stable hybrid perovskite-organic light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 40 percent [J]. *Light Sci. Appl.*, 2024, 13(1): 138.
- [10] ZHANG X, BAO H, CHEN C L, *et al.* The fatigue effects in red emissive CdSe based QLED operated around turn-on voltage [J]. *J. Chem. Phys.*, 2023, 158(13): 131101.
- [11] XIONG R X, LI Y B, YANG C Y, *et al.* Exciton dynamic processes in colloidal CdS/CdSe/CdS quantum well nanostructures [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2025, 16(23): 5644-5649.
- [12] JEONG B G, PARK Y S, CHANG J H, *et al.* Colloidal spherical quantum wells with near-unity photoluminescence quantum yield and suppressed blinking [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(10): 9297-9305.
- [13] BAE W K, KWAK J, PARK J W, *et al.* Highly efficient green-light-emitting diodes based on CdSe@ZnS quantum dots with a chemical-composition gradient [J]. *Adv. Mater.*, 2009, 21(17): 1690-1694.
- [14] CHEN Z N, LI H T, YUAN C X, *et al.* Color revolution: prospects and challenges of quantum-dot light-emitting diode display technologies [J]. *Small Methods*, 2024, 8(2): 2300359.
- [15] 李梦娇, 王晔, 王亚坤, 等. 高效钙钛矿量子点发光二极管: 挑战和优化[J]. *发光学报*, 2025, 46(3): 452-461.
LI M J, WANG Y, WANG Y K, *et al.* Efficient perovskite quantum dots light-emitting diodes: challenges and optimization [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(3): 452-461. (in Chinese)
- [16] 马培金, 赵彪, 谭占鳌. 高效铅基绿光钙钛矿发光二极管研究进展: 材料合成与器件性能优化 [J]. *发光学报*, 2025, 46(6): 1014-1036.
MA P J, ZHAO B, TAN Z B. Research progress on high-efficiency lead-based perovskite green light-emitting diodes:

- material synthesis and device optimization [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(6): 1014-1036. (in Chinese)
- [17] DONG J C, ZHAO B, JI H Y, *et al.* Multivalent-effect immobilization of reduced-dimensional perovskites for efficient and spectrally stable deep-blue light-emitting diodes [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2025, 20(4): 507-514.
- [18] LIN Q L, SHEN H B, WANG H Z, *et al.* Cadmium-free quantum dots based violet light-emitting diodes: high-efficiency and brightness *via* optimization of organic hole transport layers [J]. *Org. Electron.*, 2015, 25: 178-183.
- [19] JUNG W H, YOO J Y, KIM H J, *et al.* Fabrication of highly efficient pure blue-emitting electroluminescent devices using ZnSe/ZnSe_xS_{1-x}/ZnS QDs [J]. *Opt. Mater. Express*, 2020, 10(12): 3372.
- [20] CHO H, PARK S, SHIN H, *et al.* Highly efficient deep blue Cd-free quantum dot light-emitting diodes by a p-type doped emissive layer [J]. *Small*, 2020, 16(40): 2002109.
- [21] GAO M, YANG H W, SHEN H B, *et al.* Bulk-like ZnSe quantum dots enabling efficient ultranarrow blue light-emitting diodes [J]. *Nano Lett.*, 2021, 21(17): 7252-7260.
- [22] CHEN L, JIANG H, LIU F H, *et al.* ZnSe/ZnS core/shell quantum dots with narrow emission bands for QLED displays [J]. *ACS Appl. Opt. Mater.*, 2025, 3(8): 1800-1809.
- [23] 杨书洪, 刘方海, 陈萍, 等. 面向量子点电致发光二极管的蓝光 InP 和 ZnSe 量子点研究现状 [J]. *液晶与显示*, 2023, 38(12): 1631-1644.
- YANG S Q, LIU F H, CHEN P, *et al.* Research status of the blue InP and ZnSe quantum dots for electroluminescent quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2023, 38(12): 1631-1644. (in Chinese)
- [24] WANG W, ZHANG S Z, HUO S T, *et al.* Controllable nucleation and growth of blue InP quantum dots enable efficient and bright light-emitting diodes [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(18): 2500294.
- [25] WANG S B, YANG W Y, LI Y, *et al.* Efficient and long lifetime red InP-based QLEDs enabled by simultaneously improved carrier injection balance and depressed leakage [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(12): 2402677.
- [26] LU X F, MENG F Y, CHEN X H, *et al.* Efficient InP-based quantum dot light-emitting diodes using LiMgZnO electron transport materials [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2025, 8(14): 6877-6885.
- [27] ZHANG F J, LI G G, ZHOU P H, *et al.* High efficiency ultra-narrow emission quantum dot light-emitting diodes enabled by microcavity [J]. *Small*, 2024, 20(52): 2405704.
- [28] CHEN M Y, LI Q, BIAN Y Y, *et al.* High-efficiency and stable green InP-QLED enabled by lowering electron injection barrier [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(6): 2402555.
- [29] ZHOU X P, HU Q S, WANG Y H. Magnesium ions enhanced core-shell lattice matching for narrow-band green emission indium phosphide QDs [J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 488: 151152.
- [30] YU P, SHAN Y L, CAO S, *et al.* Inorganic solid phosphorus precursor of sodium phosphoethynolate for synthesis of highly luminescent InP-based quantum dots [J]. *ACS Energy Lett.*, 2021, 6(8): 2697-2703.
- [31] YU P, CAO S, SHAN Y L, *et al.* Highly efficient green InP-based quantum dot light-emitting diodes regulated by inner alloyed shell component [J]. *Light Sci. Appl.*, 2022, 11(1): 162.
- [32] LI Q Y, CAO S, YU P, *et al.* Boosting electroluminescence performance of all solution processed InP based quantum dot light emitting diodes using bilayered inorganic hole injection layers [J]. *Photonics Res.*, 2022, 10(9): 2133.
- [33] YUAN X, ZHAO J L, JING P T, *et al.* Size- and composition-dependent energy transfer from charge transporting materials to ZnCuInS quantum dots [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2012, 116(22): 11973-11979.
- [34] SUN M Y, ZHU D H, JI W Y, *et al.* Exploring the effect of band alignment and surface states on photoinduced electron transfer from CuInS₂/CdS core/shell quantum dots to TiO₂ electrodes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2013, 5(23): 12681-12688.
- [35] DENG B, ZHU Y Q, LI J L, *et al.* Low temperature synthesis of highly bright green emission CuInS₂/ZnS quantum dots and its application in light-emitting diodes [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 851: 155439.
- [36] LIU Z Y, HAO C Q, SUN Y Y, *et al.* Rigid CuInS₂/ZnS core/shell quantum dots for high performance infrared light-emitting diodes [J]. *Nano Lett.*, 2024, 24(17): 5342-5350.
- [37] 陈卓, 陈一鸣, 张倩倩, 等. 通过壳层掺杂工程改善 CuInS₂/ZnS 近红外量子点发光二极管性能 [J]. *发光学报*, 2025, 46(8): 1420-1429.
- CHEN Z, CHEN Y M, ZHANG Q Q, *et al.* Improving performance of CuInS₂/ZnS pear-infrared QLED by shell doping engineering [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(8): 1420-1429. (in Chinese)

- [38] WANG L, LI W T, YIN L Q, *et al.* Full-color fluorescent carbon quantum dots [J]. *Sci. Adv.*, 2020, 6(40): eabb6772.
- [39] ZHAO D L, CHUNG T S. Applications of carbon quantum dots (CQDs) in membrane technologies: a review [J]. *Water Res.*, 2018, 147: 43-49.
- [40] TIAN L, LI Z, WANG P, *et al.* Carbon quantum dots for advanced electrocatalysis [J]. *J. Energy Chem.*, 2021, 55: 279-294.
- [41] DAS R, BANDYOPADHYAY R, PRAMANIK P. Carbon quantum dots from natural resource: a review [J]. *Mater. Today Chem.*, 2018, 8: 96-109.
- [42] 张思凡, 梁亚川, 刘凯凯, 等. 水相室温磷光碳点进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(2): 260-272.
ZHANG S F, LIANG Y C, LIU K K, *et al.* Progress in water-soluble room-temperature phosphorescent carbon dots [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(2): 260-272. (in Chinese)
- [43] ZHU S J, SONG Y B, ZHAO X H, *et al.* The photoluminescence mechanism in carbon dots (graphene quantum dots, carbon nanodots, and polymer dots): current state and future perspective [J]. *Nano Res.*, 2015, 8(2): 355-381.
- [44] KOLNY-OLESIK J, WELLER H. Synthesis and application of colloidal CuInS₂ semiconductor nanocrystals [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2013, 5(23): 12221-12237.
- [45] WU Z H, LIU P, ZHANG W D, *et al.* Development of InP quantum dot-based light-emitting diodes [J]. *ACS Energy Lett.*, 2020, 5(4): 1095-1106.
- [46] DENG X Z, ZHANG F J, ZHANG Y, *et al.* Heavy-metal-free blue-emitting ZnSe(Te) quantum dots: synthesis and light-emitting applications [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(42): 14495-14514.
- [47] WANG S B, LI Y, CHEN J, *et al.* Development and challenges of indium phosphide-based quantum-dot light-emitting diodes [J]. *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.*, 2023, 55: 100588.
- [48] TAMANG S, LINCHENEAU C, HERMANS Y, *et al.* Chemistry of InP nanocrystal syntheses [J]. *Chem. Mater.*, 2016, 28(8): 2491-2506.
- [49] LI C L, NISHIKAWA K, ANDO M, *et al.* Synthesis of Cd-free water-soluble ZnSe_{1-x}Te_x nanocrystals with high luminescence in the blue region [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2008, 321(2): 468-476.
- [50] JANG E P, HAN C Y, LIM S W, *et al.* Synthesis of alloyed ZnSeTe quantum dots as bright, color-pure blue emitters [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(49): 46062-46069.
- [51] LEE S H, HAN C Y, SONG S W, *et al.* ZnSeTe quantum dots as an alternative to InP and their high-efficiency electroluminescence [J]. *Chem. Mater.*, 2020, 32(13): 5768-5775.
- [52] HAN C Y, LEE S H, SONG S W, *et al.* More than 9% efficient ZnSeTe quantum dot-based blue electroluminescent devices [J]. *ACS Energy Lett.*, 2020, 5(5): 1568-1576.
- [53] YOON S Y, HAN J N, LEE Y J, *et al.* Highly emissive green ZnSeTe quantum dots: effects of core size on their optical properties and comparison with InP counterparts [J]. *ACS Energy Lett.*, 2023, 8(2): 1131-1140.
- [54] KIM Y H, YOON S Y, LEE Y J, *et al.* Compositional and heterostructural tuning in red-emissive ternary ZnSeTe quantum dots for display applications [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2023, 6(21): 19947-19954.
- [55] CHENG C Y, YU B B, HUANG F, *et al.* Near-unity quantum yield ZnSeTe quantum dots enabled by controlling shell growth for efficient deep-blue light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(24): 2313811.
- [56] KIM T, KIM K H, KIM S, *et al.* Efficient and stable blue quantum dot light-emitting diode [J]. *Nature*, 2020, 586(7829): 385-389.
- [57] LEE S H, SONG S W, YOON S Y, *et al.* Heterostructural tailoring of blue ZnSeTe quantum dots toward high-color purity and high-efficiency electroluminescence [J]. *Chem. Eng. J.*, 2022, 429: 132464.
- [58] IMRAN M, PARITMONGKOL W, MILLS H A, *et al.* Molecular-additive-assisted tellurium homogenization in ZnSeTe quantum dots [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(45): 2303528.
- [59] 黄兴云, 谢潇婷, 杨开宇, 等. 基于纳米压印的高分辨率和高效率量子点发光二极管 [J]. *发光学报*, 2025, 46(6): 1120-1128.
HUANG X Y, XIE X T, YANG K Y, *et al.* High-resolution and high-performance quantum dots light-emitting diode based on nanoimprint [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(6): 1120-1128. (in Chinese)
- [60] 关小雅, 王洪哲, 申怀彬, 等. 面向显示应用的量子点发光器件研究进展 [J]. *液晶与显示*, 2021, 36(1): 176-186.
GUAN X Y, WANG H Z, SHEN H B, *et al.* Research progress of quantum dot light-emitting devices for display application [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2021, 36(1): 176-186. (in Chinese)

- [61] LEE Y J, KIM S, LEE J, *et al.* Crystallographic and photophysical analysis on facet-controlled defect-free blue-emitting quantum dots [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(16): 2311719.
- [62] WANG S, WANG C, WANG Y K, *et al.* Local lattice softening in semiconductor quantum dots for efficient white light-emitting diodes [J]. *Nat. Photonics*, 2025, 19(9): 952-959.
- [63] ZHENG Z S, REN Z W, XIA W L, *et al.* Bromide decorated eco-friendly ZnSeTe/ZnSe/ZnS quantum dots for efficient blue light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2023, 10(5): 2202241.
- [64] BI Y H, 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 [J]. *Small*, 2023, 19(45): 2303247.
- [65] GUAN Z Y, HUANG Y, WANG Z J, *et al.* Surface defects passivation of ZnSeTe/ZnSe/ZnS quantum dots by iodine ions for highly efficient blue light-emitting diodes [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(35): 2401884.
- [66] YU B B, GAO L, HUANG F, *et al.* Precursor reactivity-controlled synthesis of ZnSeTe spherical quantum wells with narrow and symmetric photoluminescence [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(2): 2402129.
- [67] HE L J, CAO S, LI Q Y, *et al.* Achieving near-unity quantum yield in blue ZnSeTe quantum dots through NH_4F molecular-assisted synthesis for highly efficient light-emitting diodes [J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 489: 151347.
- [68] HEO H S, SHIN G J, LEE S A, *et al.* Enhanced fluorescence in green ZnSeTe quantum dots using gradient layer technique [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(3): 2402215.
- [69] DENG X Z, ZHAO Q L, ZHANG H, *et al.* Bright and efficient green ZnSeTe-based quantum-dot light-emitting diodes with EQE exceeding 20% [J]. *Sci. Bull.*, 2025, 70(10): 1619-1626.
- [70] 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]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 1945.
- [71] SONG X R, QIN Y, YU C Y, *et al.* Construct ZnSeTe/ZnTe nanostructures with the tunable emission from 450 to 760 nm [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2025, 16(4): 1045-1050.
- [72] KIM S, KIM J A, KIM T, *et al.* Efficient blue-light-emitting Cd-free colloidal quantum well and its application in electroluminescent devices [J]. *Chem. Mater.*, 2020, 32(12): 5200-5207.
- [73] CHANG J H, LEE H J, RHEE S, *et al.* Pushing the band gap envelope of quasi-type II heterostructured nanocrystals to blue: ZnSe/ZnSe_{1-x}Te_x/ZnSe spherical quantum wells [J]. *Energy Mater. Adv.*, 2021, 2021: 3245731.
- [74] 伍仕停, 余春燕, 方佳庆, 等. ZnSe 基蓝光量子点的中间壳层结构调控及其发光性能研究 [J]. *人工晶体学报*, 2024, 53(7): 1160-1169.
- WU S T, YU C Y, FANG J Q, *et al.* Intermediate shell structure regulation and optical properties of ZnSe based blue quantum dots [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2024, 53(7): 1160-1169. (in Chinese)
- [75] CAI W B, REN Y J, HUANG Z G, *et al.* Emission mechanism of bright and eco-friendly ZnSeTe quantum dots [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(6): 2301970.
- [76] SONG S W, LEE S H, JO D Y, *et al.* Single and dual doping of blue-emissive ZnSeTe quantum dots with transition metal ions [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(2): 2101767.



庞可意(2003-),男,安徽阜阳人,硕士研究生,2024年于北京科技大学获得学士学位,主要从事 ZnSeTe 量子点制备与发光性能的研究。

E-mail: 2407301096@st.gxu.edu.cn



曹盛(1988-),男,四川南充人,博士,教授,2016年于北京科技大学获得博士学位,主要从事半导体纳米晶电致发光/变色的研究。

E-mail: caosheng@gxu.edu.cn



野世阳(2002-),男,河北邯郸人,硕士研究生,2024年于河南科技大学获得学士学位,主要从事 ZnSeTe 量子点制备及其发光性能的研究。

E-mail: 2407301156@st.gxu.edu.cn



赵家龙(1963-),男,辽宁岫岩人,博士,教授,博士生导师,2001年于日本筑波大学获得博士学位,主要从事半导体量子点的发光性质及其发光器件的制备和物理基础研究。

E-mail: zhaojl@gxu.edu.cn