

胶体量子阱LED的最新研究进展

刘羽凡¹, 廖靖妍¹, 阮钰菁¹, 代毅^{2*}, 赵体鹏³, 肖鹏⁴,
王穗东⁵, 余俊宏^{6*}, 刘佰全^{1*}

(1. 中山大学, 电子与信息工程学院, 广东省显示材料与技术重点实验室, 光电材料与技术全国重点实验室, 广州 510275;

2. 澳门城市大学, 教育学院, 澳门;

3. 视源电子科技有限公司, 广州 510530;

4. 佛山大学, 物理与光电工程学院, 粤港澳智能微纳光电技术联合实验室, 佛山 528225;

5. 澳门科技大学, 澳门材料科学与工程研究所, 中葡光电技术联合实验室, 澳门 999078;

6. 重庆师范大学, 物理与电子工程学院, 重庆 401331)

摘要: 胶体量子阱(colloidal quantum well, CQW)是一类具有原子级厚度可控、准二维结构和厚度方向强量子限域特性的胶体半导体纳米晶, 兼具窄发射光谱、大吸收截面和优异的溶液加工性能, 被认为是新一代高性能光电子与微电子材料。近年来, 通过异质结构构筑、壳层工程、合金化、掺杂以及表面配体调控等策略, CQW的发光效率和稳定性得到显著提升, 因而推动了胶体量子阱发光二极管(CQW light-emitting diode, CQW-LED)快速发展。本文首先阐明了CQW的结构特征、光电性质、制备方法与材料性能调控策略, 并介绍了CQW在激光器、探测器及可见光通信等领域的应用潜力; 随后, 从光色角度出发, 重点总结了近年来红光、绿光、蓝光和白光CQW-LED的研究进展。最后, 对CQW-LED在蓝光波段、无镉材料体系和产业化发展等方面进行了展望。

关键词: 胶体量子阱; 发光二极管; 波长调控; 发光机理; 异质结构

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.3724/CJL.20260271

CSTR: 32170.14.CJL.20260271

Recent Advances in Colloidal Quantum Well Light-Emitting Diodes

LIU Yufan¹, LIAO Jingyan¹, RUAN Yujing¹, DAI Yi^{2*}, ZHAO Tipeng³, XIAO Peng⁴,
WANG Sui-Dong⁵, Yu Junhong^{6*}, LIU Baiquan^{1*}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Display Material and Technology, State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China);

2. School of Education, City University of Macau, Macau, China;

3. Shiyuan Electronic Technology Co. Ltd., Guangzhou, 510530, China;

4. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory of Intelligent Micro-Nano Optoelectronic Technology, Foshan University, Foshan, 528225, China;

5. Sino-Luso Joint Laboratory for Optoelectronics, Macao Institute of Materials Science and Engineering (MIMSE), Macau University of Science and Technology, Taipa, Macao, 999078, China;

6. College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing, 401331, China)

* Corresponding Authors, E-mail: Yi Dai (yidai@cityu.edu.mo); Junhong Yu (jyu012@e.ntu.edu.sg); Baiquan Liu (liubq33@mail.sysu.edu.cn)

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家科技重大专项(批准号: 2026ZD16013100); 国家自然科学基金(批准号: 62575315); 澳门科学技术发展基金与广东省科技厅联合科研资助(FDCT-GDST)(批准号: 0003/2024/AGJ); 广东省基础与应用基础研究基金(批准号: 2023B1515120046, 2024A0505090010); 广东创新创业团队项目(批准号: 2021ZT09X070)

Supported by the National Science and Technology Major Project (2026ZD16013100), the National Natural Science Foundation of China (62575315), the Joint Research Funding Program between the Macau Science and Technology Development Fund (FDCT) and the Department of Science and Technology of Guangdong Province (2024) (FDCT-GDST) under Grant [number 0003-2024-AGJ], the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2023B1515120046 and 2024A0505090010), and the Guangdong Innovation and Entrepreneurship Team Project (2021ZT09X070)

Abstract: Colloidal quantum wells (CQWs) are a class of quasi-two-dimensional colloidal semiconductor nanocrystals, featuring atomically precise thickness control and strong quantum confinement along the thickness direction. Combining narrow emission linewidths, large absorption cross-sections, and excellent solution processability, CQWs have emerged as promising candidates for next-generation high-performance optoelectronic and microelectronic materials. In recent years, significant improvements in the luminescence efficiency and stability of CQWs have been achieved through heterostructure engineering, shell engineering, alloying, doping, and surface ligand regulation, promoting the rapid development of CQW light-emitting diodes (CQW-LEDs). This review first introduces the structural characteristics, optoelectronic properties, synthesis methods, and material engineering strategies of CQWs, followed by an overview of their application potential in lasers, photodetectors, and visible light communication, with particular emphasis on recent advances in red, green, blue, and white CQW-LEDs. Finally, the remaining challenges and future prospects of CQW-LEDs in blue-emitting devices, cadmium-free materials, and industrialization are discussed.

Keywords: colloidal quantum wells; light-emitting diodes; emission control; working mechanism; heterostructures

1 引 言

随着高分辨率显示、智能终端以及新型光电系统的快速发展,显示技术正向高效率、高亮度、高色纯度和低功耗方向持续发展。继阴极射线管和液晶显示之后,有机电致发光二极管(organic light-emitting diode, OLED)技术凭借其主动发光、柔性可折叠等优势,逐渐成为现代显示领域的重要研究方向^[1-6]。近年来,电致发光技术涌现出了钙钛矿发光二极管等新兴技术,不断丰富着半导体发光器件的种类^[7-15]。尽管如此,已实现商业化应用的 OLED 仍面临材料长期稳定性、器件工作寿命以及大面积规模化制备成本等严峻挑战,而新兴体系亦尚待成熟^[16-17]。因此,开发兼具优异光电性能和可溶液加工优势的新型发光材料,成为推动下一代显示技术发展的关键研究方向。

胶体半导体纳米晶因其尺寸和组分可调的光学性质,在新型显示领域展现出重要潜力。其中,胶体量子点(quantum dot, QD)^[18]凭借可调带隙、高色纯度和溶液加工能力推动了胶体量子点发光二极管(quantum-dot LED, QLED)^[19]的快速发展。然而,零维量子点仍存在吸收截面有限、多激子条件下俄歇复合明显以及发射谱宽受尺寸分布影响等问题^[20-21]。为突破上述限制,2008年 Ithurria 等人首次报道了具有原子级厚度控制能力的胶体量子阱(Colloidal quantum well, CQW)^[22],建立了准二维胶体纳米晶体系。由于载流子在厚度方向受到强量子限域,而在横向方向保持较大的迁移范围,因此 CQW 兼具二维量子阱和胶体纳米晶的优势,表现出极窄发射线宽、高吸收截面、大激子结

合能以及受抑制的俄歇复合等特性,为高色纯度发光器件和低阈值光学增益器件提供了新的材料选择^[23-25]。

基于 CQW 优异的光学特性, CQW 发光二极管(CQW-LED)有望成为下一代显示器件的重要候选体系之一。然而,早期 CQW-LED 受限于材料缺陷、界面非辐射复合以及载流子注入不平衡等问题,器件性能明显低于成熟的 QLED 和 OLED 体系^[26]。近年来,通过高质量异质结构、梯度组分设计以及器件界面优化等策略, CQW-LED 性能取得快速突破,尤其是在红光器件领域已接近理论效率极限,同时蓝绿光 CQW 材料和器件研究也取得重要进展,推动 CQW 向全彩显示应用方向发展^[27-28]。尽管如此, CQW 体系仍面临短波发射效率不足、界面缺陷控制困难、器件稳定性有限以及规模化制备挑战等问题。因此,系统总结 CQW 材料结构调控策略及其器件发展历程,对于推动基于 CQW 的高性能光电器件发展具有重要意义。

本文围绕 CQW 发光材料及其电致发光器件展开综述。首先介绍了 CQW 的发展历程、合成机制、准二维结构特征及其在厚度方向上的一维量子限域效应、光电性质及主要制备方法;随后总结了异质结构、梯度壳层、表面配体、掺杂及薄膜取向排列等调控策略;在此基础上,重点梳理了红、绿、蓝和白光 CQW-LED 的发展过程与代表性成果,并讨论了 CQW 在激光、探测器及其他光电子领域的应用。最后,针对蓝光稳定性、无镉材料、大面积制造和器件寿命等问题,对 CQW 及其发光器件的未来发展进行展望。

2 CQW 发光材料研究

2.1 CQW 发光材料研究

2.1.1 CQW 发展历程

1981年, Ekimov 等人首次在半导体纳米晶中观测到量子尺寸效应, 自此半导体纳米材料迅速成为科学界的核心研究热点^[29]。1983年, 贝尔实验室 Brus 针对 CdS 纳米晶开展开创性研究, 极大地推动了学界对 QD 光致发光特性的研究热潮^[30]。1994年, 首个 QLED 问世, 大幅拓宽了半导体纳米材料在光电子领域的应用范围^[19]。2000年, 彭笑刚教授等人实现半导体纳米晶形貌可控合成, 制备出一维纳米棒, 为纳米晶形貌调控提供了新的思路^[31]。基于成熟的 QD 合成与改性技术, 科研人员进一步开发出 CQW 材料。2006年, Joo 等报道了胶体 CdSe 纳米带的液相合成, 为二维胶体半导体纳米晶的发展提供了重要基础^[32]。然而, 其厚度均一性和尺寸可控性有限。直到 2008 年, Ithurria 与 Dubertret 等人首次实现原子层厚度可控的 CdSe CQW^[22]。该方法通过乙酸镉辅助的晶面选择性调控, 实现了二维 CdSe 的可控生长, 展现出传统 QD 难以兼具的高色纯度优势。随后, 其二维电子结构和厚度依赖光学特性得到进一步证实, 确立了 CQW 作为准二维胶体半导体材料的基本物理图景^[33]。2012 年, Mahler 等首次实现了保持二维形貌完整性的 CdSe CQW 核/壳异质结构, 如图 1 所示, 通过室温外延生长策略在 CdSe 表面实现 CdS 及 CdZnS 壳层的可控包覆, 开创了 CQW 异质结构工程的发展方向^[34]。

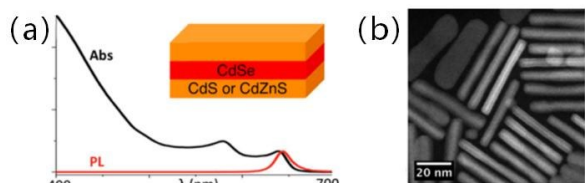


图 1 (a) CdSe/CdS 核/壳 CQW 的光谱与结构示意图; (b) CdSe/CdS 核/壳 CQW 透射电子显微镜 (transmission electron microscopy, TEM) 图像^[34]

Fig.1 (a) Schematic illustration of the spectra and structure of CdSe/CdS core/shell CQWs; (b) TEM images of CdSe/CdS core/shell CQWs.^[34]

2.1.2 CQW 结构特征与一维量子限域

CQW 在结构上属于准二维胶体半导体纳米晶, 在形貌上区别于零维 QD 和一维纳米棒, 其载流子在厚度方向受到一维量子限域, 而在平面方

向保持自由输运^[33]。当 CQW 横向尺寸显著大于激子特征尺度时, 其带边跃迁能量主要由厚度决定, 因此横向尺寸分散对发射峰位和非均匀展宽的影响通常弱于厚度分散^[25,35-36]。在 CQW 中, 厚度通常以单原子层 (monolayer, ML) 为单位进行计量, 每个 ML 约 0.3 nm。由于厚度方向存在强一维量子限域, 核心 ML 数的变化会直接改变受限方向尺寸, 从而显著影响带边跃迁能量。当核心厚度减少一个 ML 时, 电子和空穴波函数在厚度方向被进一步压缩, 量子限域能增大, 带边跃迁能量升高, 发射峰向短波方向移动, 即蓝移。反之, 当核心厚度增加一个 ML 时, 厚度方向限域减弱, 带边跃迁能量降低, 发射峰向长波方向移动, 即红移。因此, CQW 的发射波长随 ML 数呈现离散、阶梯式变化, 而不是像传统 QD 那样主要依赖三维粒径的连续变化。以 CdSe CQW 为例, 如图 2 所示, 4、5、6、7 ML 对应的厚度分别约为 1.22、1.52、1.82、2.13 nm。随着 ML 数增加, 吸收和 PL 峰位逐渐向低能方向移动, 发射波长从蓝光/蓝绿光区域红移至绿光/黄绿光区域。每个 ML 约 0.3 nm 的厚度变化即可引起显著的波长移动, 这也是 CQW 具有原子级厚度可控、极窄发射线宽和高色纯度的物理根源之一。需要指出的是, 核心 ML 数主要决定 CQW 的基础带隙和发射波长范围, 而壳层 ML 数、合金组分和界面应变会进一步影响有效带隙。壳层增厚通常使电子/空穴波函数向壳层离域, 导致发射红移。合金化或阳离子交换则可在保持二维形貌和厚度不变的前提下连续调节带隙, 弥补单纯依靠 ML 数变化所带来的离散波长调控限制。因此, 在实际材料设计中, 常将核心 ML 数调控与合金化、壳层工程相结合, 以实现目标波长的精准发射。

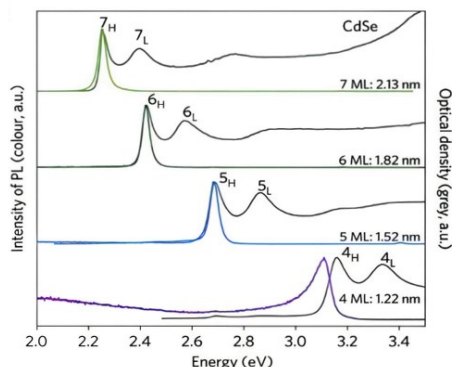


图 2 CQW 材料的窄 FWHM^[33]

Fig. 2 CQWs with a narrow FWHM^[33]

然而,CQW能够实现精准厚度控制的形成机制曾长期存在争议^[37]。2017年,Riedinger等人通过实验与理论研究表明,CQW的形成并非依赖传统认为的分子模板或纳米簇取向附着,而是源于晶体生长过程中的内禀生长动力学不稳定性^[37]。在闪锌矿 CdSe 体系中,特定晶面的生长速率差异及生长过程中的对称性破缺共同促进晶体沿面内方向扩展,而厚度方向的生长受到抑制,从而形成矩形或片状二维纳米晶^[37-38]。除矩形 CQW 外,通过进一步调控二维晶体的成核和生长过程,还可获得量子环等特殊二维拓扑结构,表明 CQW 体系具有丰富的形貌设计性^[39]。

得益于一维量子限域效应,CQW在厚度方向上的电子和空穴波函数被强烈压缩,激子结合能可达数百 meV 量级,远高于室温热能(约 25 meV),确保激子在室温下能够稳定存在并高效辐射复合^[25]。同时,波函数在平面方向的自由拓展赋予 CQW 巨振子强度和大吸收截面,显著增强光与物质的相互作用^[40-41]。在横向尺寸方面,CQW 可扩展至数十纳米乃至微米级,使其同时具备量子限域效应和准二维材料的各向异性特征,为载流子输运和激子动力学调控提供了灵活的结构选择^[33]。

需要指出的是,CQW 与传统的 QD 虽然同属胶体半导体纳米晶,但二者在维度、量子限域方式及光电性质上存在很大区别。QD 是零维体系,电子和空穴在三个维度均受到量子限域,其带隙和发射波长主要由粒径决定,尺寸分布会同时造成发射峰位波动和非均匀展宽。而 CQW 是准二维体系,仅在厚度方向受到强一维量子限域,而在平面方向保持自由输运,带边跃迁能量主要由原子层厚度决定,横向尺寸分散对发射峰位和非均匀展宽的影响相对较弱。因此,CQW 无需像 QD 那样在三维尺度上同时维持严格的尺寸均一性,即可获得原子级厚度分布和极窄发射线宽,目前最窄 FWHM 已可达 4 nm。光学性质方面,CQW 具有巨振子强度、大吸收截面和数百 meV 量级的激子结合能,并表现出受抑制的俄歇复合。载流子动力学方面,CQW 面内波函数离域有利于载流子输运和低阈值光学增益,而 QD 中载流子主要依赖颗粒间跳跃或隧穿。此外,CQW 具有各向异性的跃迁偶极矩,可通过取向组装提高面内偶极比例和光提取效率。

2.2 胶体量子阱的光电性质

基于准二维电子结构和原子级厚度可控特征,CQW 不仅保留了半导体纳米晶光谱可调、可溶液加工、高色饱和度等固有优势,同时还具备极窄发射线宽、大激子结合能、高增益系数等独特的光学特性。

(1) 窄线宽发光

对于 CQW 而言,CQW 窄带发射主要来源于原子层级均一的厚度分布,无需像 QD 那样在三维尺度上同时维持严格的尺寸分布^[42]。CQW 样品中离散且高度均一的单原子层厚度分布,使不同颗粒具有近似一致的带边跃迁能量,从而显著降低光谱的非均匀展宽。Bai 等人提出,这种原子平坦性的物理根源可能在于 CQW 横向生长的能量优势-沿面内方向扩展在能量上有利,而厚度方向的长大则受到抑制^[42]。得益于这种独特的生长模式(图 2),目前 CQW 的最窄光致发光(photoluminescence, PL)半高宽(full width at half maximum, FWHM)已缩小至 4 nm,对于提升显示色纯度具有重要价值。

(2) 大吸收截面

CQW 仅在厚度方向受到强量子限域,而在平面方向保持较大的横向尺寸,使面内激子波函数发生离域,表现出巨振子效应。与此同时,CQW 较大的横向面积和吸收体积也进一步提高了单颗粒吸收截面。因此,CQW 能够在相同光程下吸收更多入射光子,提高光激发载流子的产生效率,为光泵浦增益、光转换和探测等器件提供了良好的材料基础^[40,43-44]。

(3) 大激子结合能

由于 CQW 仅在厚度方向受到限制,电子和空穴波函数在受限方向发生压缩,使二者空间重叠程度增加,从而提高激子束缚强度。CQW 激子结合能通常为数百 meV 量级,并随厚度、介电环境和异质结构发生显著变化,远高于室温热能,因此激子在室温条件下仍能保持稳定存在,有效抑制热诱导激子解离过程,为高效激子辐射复合提供了有利条件^[25,42]。

(4) 光学增益特性

相比传统 QD,CQW 具有更大的吸收截面和更窄的发射线宽,有利于获得较高的光学增益。此外,CQW 的俄歇复合速率较慢,可减少高激发密度下的非辐射损耗。上述因素共同降低了放大

自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)阈值,并提高了光学增益性能^[45]。2014年,She等人采用变条纹长度法,测得3CdS/CdSe/3CdS核/壳CQW的增益约为 $600 \pm 100 \text{ cm}^{-1}$,约为当时QD最高报道值的4倍,如图3所示。同时,该材料的ASE阈值低至 $6\text{--}8.6 \mu\text{J}/\text{cm}^2$,表明CQW具有优异的受激辐射性能^[45]。随后研究表明,CdSe CQW固体在室温下的光学增益系数可进一步达到 6600 cm^{-1} ,远高于QD体系,体现出二维CQW结构在增强受激辐射过程中的优势^[46]。因此,CQW凭借低ASE阈值、高增益系数以及溶液可加工特性,成为构建低成本、高性能胶体激光器的重要候选材料。

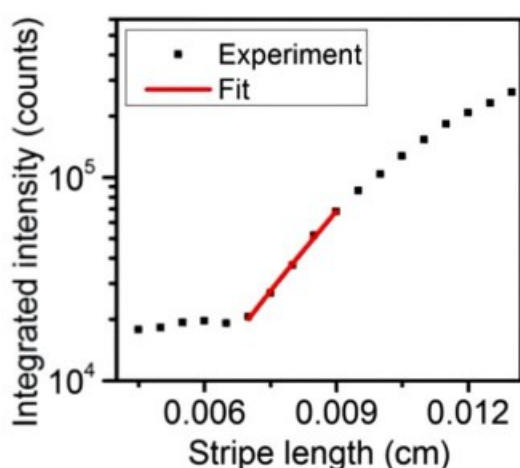


图3 基于变条纹长度法的增益测量^[45]

Fig. 3 Gain measurement using the variable stripe length method.^[45]

2.3 CQW 制备工艺

(1) 低温液相合成法

低温液相合成法是CQW材料发展的早期制备方法之一,其核心思想是在较低反应温度下,通过控制前驱体反应速率及配体作用实现二维晶体的成核与生长。该方法中,配体对晶体生长过程具有重要调控作用,促进晶体沿横向生长,最终形

成具有原子级厚度的二维纳米片结构。2006年,Joo等人首次利用低温液相合成法制备了厚度约1.4 nm的CdSe纳米带,为CQW材料的研究奠定了基础^[32]。该方法具有反应条件温和、设备要求低、重复性较好的特点,能够获得厚度均一的二维纳米晶。然而,由于较低温度限制了前驱体反应活性,其晶体质量和尺寸调控范围相对有限,难以满足复杂异质结构CQW和高性能光电器件对材料质量的要求。因此,低温液相合成法更多作为CQW基础结构探索和生长机制研究的重要方法。

(2) 胶体原子层沉积法

胶体原子层沉积法(colloidal atomic layer deposition, c-ALD)是一种借鉴传统原子层沉积思想发展的精确结构调控方法,其主要优势在于能够实现胶体纳米晶表面壳层材料的逐层可控生长。Ithurria等人于2012年提出该方法,并成功在CdSe CQW表面沉积均匀CdS壳层,构建了CdSe/CdS核/壳异质结构CQW^[47]。c-ALD通过控制不同前驱体在极性和非极性环境中的交替反应,使每个循环仅沉积约一个原子层,从而实现壳层厚度和界面结构的精确控制。相比传统连续生长方法,该技术能够有效避免副产物积累,提高异质界面质量,并可用于构筑复杂核/壳、梯度合金以及多层异质结构CQW。然而,c-ALD过程通常需要多步循环操作,反应效率较低,对实验条件控制要求较高,因此其规模化应用仍受到一定限制。

(3) 热注入法

热注入法是目前CQW材料中应用最广泛的合成策略之一,其主要通过快速注入高活性前驱体,使反应体系瞬间达到过饱和状态,引发大量晶核形成,随后通过二维选择性生长获得具有特定厚度的纳米片结构。2011年,Ithurria等人利用热注入法成功制备了不同厚度和发射波长的CdSe CQW,并揭示了纳米晶尺寸对CQW厚度调控的重要作用^[48],如图4所示。该方法具有成核速

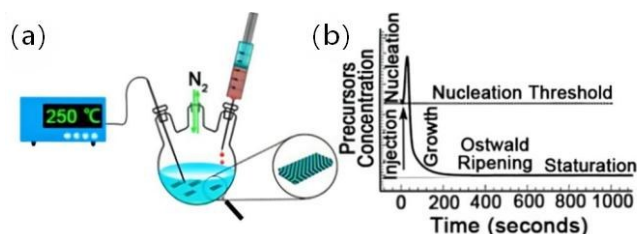


图4 (a)热注入法合成CQW示意图(b)热注入法纳米晶成核和生长过程示意图^[48]

Fig. 4 (a) Schematic illustration of CQW synthesis by the hot-injection method; (b) Schematic illustration of the nucleation and growth processes of nanocrystals by the hot-injection method.^[48]

率快、晶体质量高以及尺寸调控灵活等优势,通过调节反应温度、前驱体浓度、配体比例和生长时间,可实现 CQW 横向尺寸及光学性质的精准调节。2018 年,Christodoulou 等人通过引入 CdCl_2 控制剂改变晶面生长动力学,实现 CQW 由薄层向厚层结构的可控转变,使 CdSe CQW 厚度范围扩展至 8.5 个单原子层(monolayer, ML),并获得 625 nm 以上的波长发射,同时保持较窄的 FWHM^[49]。由于其优异的结晶质量和可扩展性,热注入法为制备高性能 CQW 发光材料提供了重要技术路线。

(4) 阳离子交换法

阳离子交换法是一种区别于传统直接生长的组分调控策略,其利用预制 CQW 作为结构模板,通过晶格中阳离子的部分或完全置换实现材料组成和电子结构调节。该方法能够在保持二维晶体形貌和晶格框架完整性的同时,实现元素组成的连续调控,因此特别适用于合金型 CQW 材料的构筑。2026 年,Zhu 等人利用 CdSe CQW 作为模板,通过三丁基膦(tributylphosphine, TBP)辅助的 $\text{Cd}^{2+}/\text{Zn}^{2+}$ 阳离子交换过程制备了 CdZnSe 合金核心 CQW,实现 Zn 组分在 53%-82% 范围内连续调节,并获得 455-512 nm 可调发射波长以及低于 20 nm 的窄 FWHM^[28],如图 5 所示。相比传统依靠厚度变化调节带隙的方法,阳离子交换能够实现更连续、更精细的能带工程,为蓝绿光 CQW 材料的发展提供了新的解决方案。

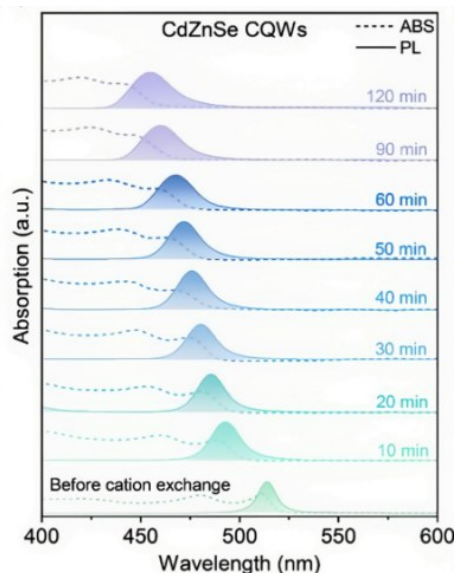


图 5 CdZnSe CQW 在不同阳离子交换反应时间下的归一化吸收与 PL 光谱^[28]

Fig. 5 Normalized absorption and PL spectra of CdZnSe CQWs at different cation exchange reaction times.^[28]

2.4 CQW 的材料调控

CQW 材料性能优化经历了从早期异质结构构筑,到壳层与组分工程调控,掺杂再到表面化学和薄膜排列工程优化的发展过程。研究初期主要通过核/壳、核/冠异质结构实现载流子限域和缺陷钝化;随后发展出梯度合金壳层、双梯度结构等精细化能带调控策略,实现对激子动力学和载流子行为的调控。近年来,研究重点进一步扩展至配体工程、薄膜取向调控以及溶剂-界面作用优化,以提升 CQW 器件中的载流子传输、光提取效率和稳定性。

(1) 异质结构

CQW 异质结构是最早用于改善材料光学性能的重要策略,其核心目标是在保持准二维结构和一维量子限域特性的基础上,通过能带结构设计调节电子和空穴分布。2012 年,Mahler 等人首次制备了保持二维形貌的 CdSe/CdS 和 CdSe/CdZnS 核/壳 CQW,并实现了不同厚度壳层的生长。所得核/壳 CQW 仍保持较窄的发射光谱,FWHM 约为 20 nm,光致发光量子产率(PL quantum yield, PLQY)最高可达 60%,为后续核/壳及多层 CQW 异质结构的发展奠定了基础^[34]。

随后,研究者进一步探索 II 型能带结构对载流子空间分离的调控作用。2014 年,Pedetti 等人首次构建了 CdSe/CdTe 核/冠 II 型 CQW 异质结构,通过在 CdSe CQW 边缘外延生长 CdTe 冠层,使电子和空穴分别局域于不同区域,从而降低波函数重叠并延长激子寿命。该结构实现了近红外波段可调发射(最高约 730 nm),证明了 II 型 CQW 在长波发光、低自吸收光学增益以及作为 LED 材料中的应用潜力^[50]。

然而,传统 II 型结构中过度增强的电子-空穴空间分离会降低辐射复合效率。针对这一问题,Durmusoglu 等人于 2023 年提出 $\text{CdSe}/\text{CdTe}/\text{CdSe}$ 多冠层 II 型 CQW 结构(图 6),通过外层 CdSe 冠层优化载流子分布,在保持空间分离优势的同时提高辐射复合概率,使 PLQY 提升至 83%,荧光寿命达到 73.3 ns,实现了长寿命激子态与高效率发光之间的平衡^[51]。

(2) 梯度壳层与组分工程

随着 CQW 器件对性能的需求提高,传统突变核/壳界面由于晶格失配和界面缺陷导致的非辐射损耗逐渐成为限制因素。因此,梯度壳层工程

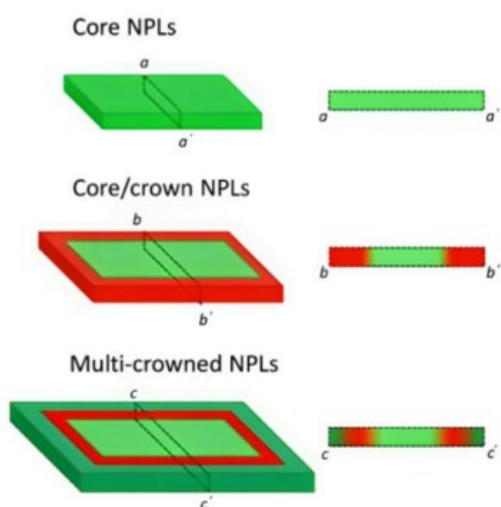


图6 单核型 CdSe、核/冠型 CdSe/CdTe 和核/多冠型 CdSe/CdTe/CdSe CQW 的结构示意图及截面视图^[51]

Fig. 6 Schematic diagrams and cross-sectional views of CdSe core, CdSe/CdTe core/crown, and CdSe/CdTe/CdSe core/multicrown CQWs.^[51]

被提出用于缓解界面应变并优化载流子输运。

2019 年, Kelestemur 等人提出 CdS 缓冲层/ $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ 梯度合金壳层结构, 通过连续组分过渡降低 CdSe 核心与外壳之间的晶格失配, 减少界面缺陷并增强载流子限域能力。该策略使红光 CQW 在保持窄发射特性的同时获得 89% 的 PLQY, 证明了梯度合金壳层对于提升 CQW 光学质量的重要作用^[52]。

进一步, Liang 等人于 2023 年进一步提出双梯度 CQW 结构, 通过同时调节面内 $\text{CdSe} \rightarrow \text{CdS}$ 梯度核和面外 $\text{CdS} \rightarrow \text{ZnS}$ 梯度壳, 实现对激子局域化和库仑作用强度的协同控制, 如图 7(a) 所示。该结构在 620-645 nm 范围内保持接近 100% 的 PLQY, 并降低自吸收效应, 提高光热稳定性, 为 CQW 激子工程提供了新的设计方向^[53]。

在此基础上, Ba 等人于 2024 年提出 $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ 梯度合金壳层 CQW, 利用 Cd 和 Zn 前驱体反应动力学差异, 实现壳层由内层 Cd-rich 向外层 Zn-rich 的连续变化, 如图 7(b) 所示。该梯度结构不仅有效降低界面应变和缺陷密度, 同时调节 CQW 能带结构, 使价带位置更接近空穴传输层, 有利于改善空穴注入平衡, 如图 7(c) 所示。基于该结构的 CQW 具有接近 100% 的 PLQY^[54]。

(3) 表面配体与缺陷工程

由于 CQW 具有极高的表面积/体积比, 其光学性能对表面缺陷和配体状态高度敏感, 因此表

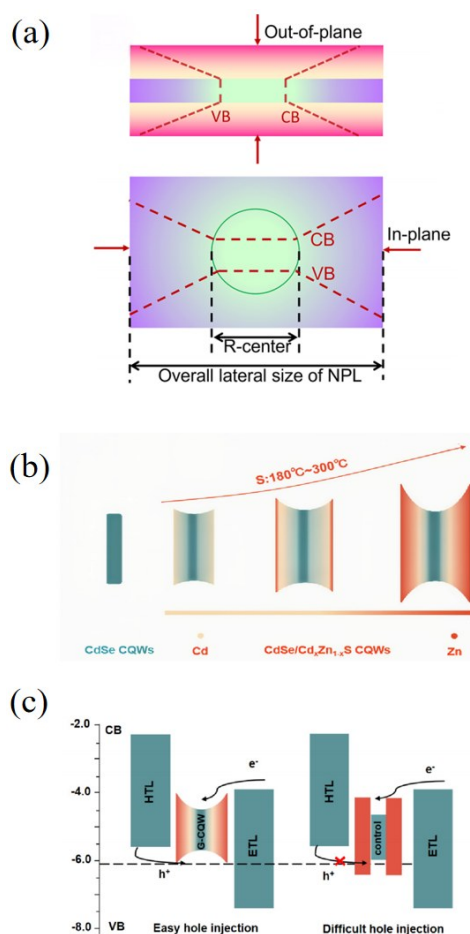


图7 (a) 双梯度 CQW 的结构示意图^[53]; (b) 梯度合金壳层 CQW 形成的示意图^[54]; (c) 对照 CQW 与梯度合金壳层 CQW 基 LED 的能级示意图^[54]。

Fig. 7 (a) Schematic illustration of the structure of doubly gradient CQWs;^[53] (b) Schematic illustration of the formation of CQWs with a gradient composition $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ shell;^[54] (c) Schematic energy-level diagrams of LEDs based on control CQWs and CQWs with a gradient composition shell.^[54]

面工程成为提升 CQW 性能的重要途径。2018 年, Singh 等人系统研究了 CdSe CQW 表面配体结构与光学性能之间的关系, 发现 CQW 表面主要由 Cd 富集层和油酸配体组成, 仅约 1% 的配体脱附即可导致 PLQY 明显下降。结合核磁共振表征和密度泛函理论计算表明, 配体优先从 CQW 边缘脱附, 并诱导低配位 Se 缺陷形成带隙内陷态, 从而促进非辐射复合。该研究建立了 CQW 表面化学与发光性能之间的联系, 为边缘钝化和配体优化提供了理论依据^[55]。

近年来, 溶剂-配体界面作用也受到关注。Chen 等人结合光学泵浦太赫兹探测和分子动力学模拟, 揭示了溶剂化作用对 CQW 胶体稳定性的影

响,发现通过调节溶剂分子结构和链长,可以控制CQW间吸引作用和聚集行为,为高稳定性CQW分散体系和溶液加工薄膜制备提供新策略^[56]。

(4) 掺杂工程

掺杂工程通过引入外源离子改变CQW内部电子结构、载流子动力学以及激子复合过程,为调控材料光学性能提供了新的途径。由于CQW具有原子级厚度的二维结构,掺杂离子与宿主激子的波函数重叠更加显著,因此能够产生区别于传统量子点体系的强耦合效应。

2015年,Delikanli等人利用胶体原子层沉积方法,在CdSe/CdS核/壳CQW中引入Mn²⁺掺杂层,构建了CdSe/Cd_{0.985}Mn_{0.015}S/CdS多层量子阱结构,实现了对载流子-磁性离子交换作用的原子级调控^[57]。通过改变Mn²⁺掺杂层的位置和厚度,可以调节载流子波函数与磁性离子的空间重叠程度,使材料表现出可调控的磁光响应,同时保持较窄的发射线宽和较好的室温发光性能^[57]。该研究证明了掺杂工程不仅能够改变CQW光学性质,还可用于构建具有自旋调控能力的新型二维胶体半导体材料。

除过渡金属掺杂外,铜离子掺杂也被用于改善CQW的发光特性。2017年,Sharma等人通过部分阳离子交换方法实现了Cu²⁺掺杂CdSe及CdSe/CdS CQW结构,在引入杂质发光中心的同时产生较大的Stokes位移,有效降低了自吸收损耗。该类Cu掺杂CQW表现出超过43%的光致发光量子产率,并凭借二维结构带来的大吸收截面,在发光太阳能聚光器等领域展现出应用潜力^[58]。

(5) 薄膜取向排列与器件级结构优化

随着CQW-LED研究的发展,仅优化CQW本征性能已难以满足器件效率提升需求,因此研究逐渐转向薄膜微结构和跃迁偶极矩调控。

2019年,刘佰全等人研究发现,CQW纵横比(aspect ratio, AR)对薄膜形貌和器件性能具有重要影响。低AR CQW具有更好的表面覆盖能力和较弱的堆叠趋势,可形成更加致密均匀的发光层,其PLQY达到92%,如图8(a)所示,说明横向尺寸调控能够有效减少薄膜缺陷和非辐射复合^[27]。2022年,Baruj等人提出液-气界面自组装策略,实现CQW单层膜的定向排列,使面内跃迁偶极矩比例由传统旋涂膜的67%提高至92%,光提取效率由22%提升至34%,CQW-LED实现了18.1%的

外量子效率(external quantum efficiency, EQE)和19800 cd/m²亮度^[59],如图8(b,c)所示。

进一步地,Ba等人于2025年提出两相驱动平铺排列(two-phase driving flat arrangement, TDFA)策略,通过调节CQW配体与乙二醇亚相之间的界面作用,实现CQW水平取向排列。如图8(d)所示,该方法降低薄膜粗糙度,提高偶极矩取向比例,使CQW-LED获得25.5%的EQE、59620 cd/m²亮度以及超过16000小时(T₉₅@100 cd/m²)的寿命,证明了薄膜排列工程对于高性能CQW器件的重要作用^[60]。表1总结了近年来有关CQW材料调控的策略。

2.5 CQW的应用

由于CQW具有准二维结构、大吸收截面、高振子强度、窄发射线宽以及优异的载流子动力学特性,使其在发光器件、激光器和探测等领域展现出重要应用潜力。

2.5.1 胶体量子阱发光二极管

CQW优异的光学性能为高性能CQW-LED的发展提供了重要基础。其高PLQY以及厚度可调、窄带发射等特性有利于提高发光效率并实现高色纯度显示^[61]。CQW独特的二维各向异性结构还可通过薄膜取向和界面调控提高光提取效率及器件性能^[62]。近年来,随着异质结构、壳层工程及器件结构优化的发展,红光和绿光CQW-LED的峰值EQE均已达到20%以上。其中,高度取向红光CQW-LED寿命已超过15000小时(T₉₅@100 cd/m²),展现出较好的应用潜力^[28,62]。然而,与商业显示要求相比,CQW-LED在大面积一致性、制造成熟度及不同颜色器件的性能均衡方面仍有提升空间,尤其蓝光CQW-LED的效率和亮度仍明显落后于红、绿光器件^[28,63]。与传统QLED相比,CQW-LED的优势不仅体现在窄带发射和高色纯度上,还体现在CQW面内跃迁偶极矩可取向调控所带来的光提取效率提升。然而,CQW-LED在蓝光效率、器件寿命和大面积一致性方面仍落后于成熟QLED体系。但随着材料工程和器件优化的发展,CQW有望在高色域显示、照明及柔性光电器件领域实现进一步应用。

2.5.2 CQW激光器

CQW具有较大的吸收截面、较强的带边跃迁以及二维电子态密度特征,并可通过异质结构设计调控多激子动力学和俄歇复合过程,使其具有

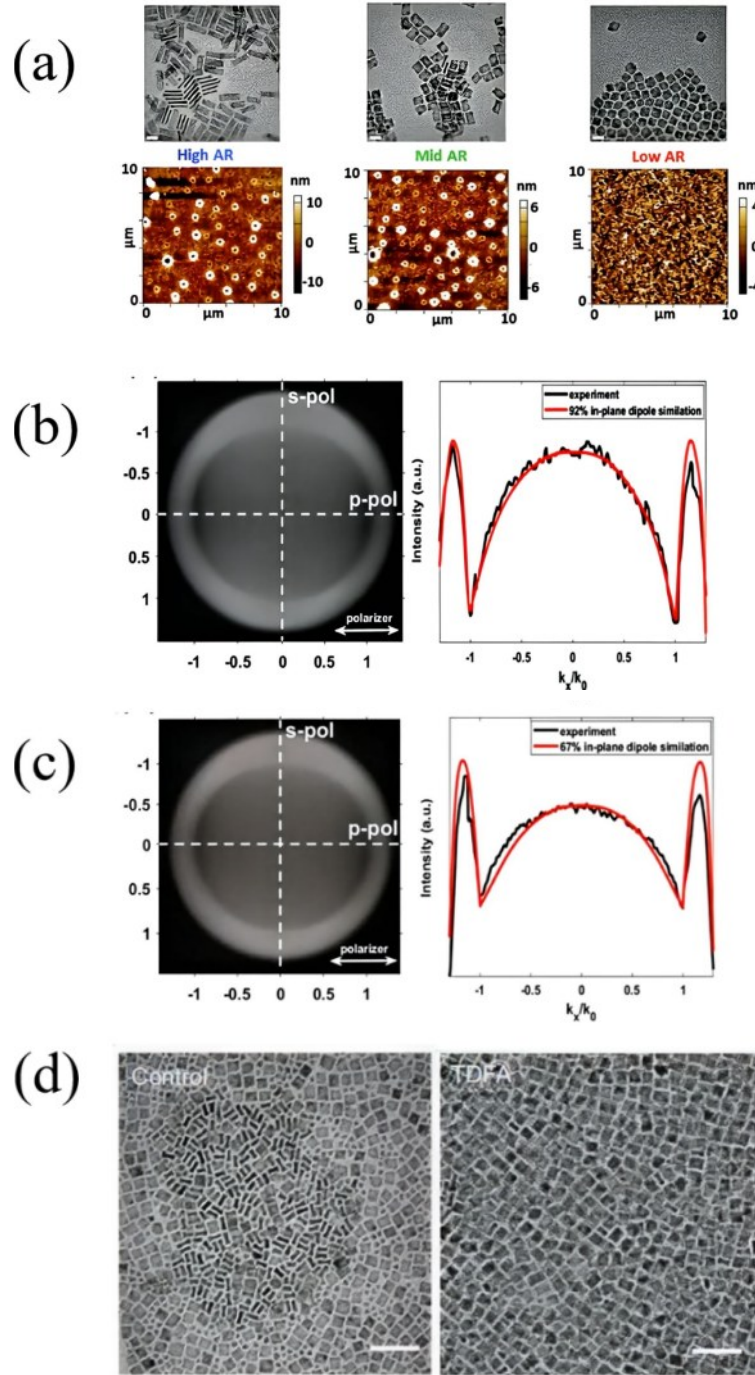


图8 (a)不同AR的形貌对比^[27]; (b)石英基底上的自组装单层膜,其面内跃迁偶极矩占比为92%^[59]; (c)石英基底上的旋涂薄膜,其面内跃迁偶极矩占比为67%^[59]; (d)TDFA与旋涂法制备的CQW薄膜的TEM图像^[60]。

Fig. 8 (a) Morphological comparison of CQWs with different ARs; ^[27] (b) Self-assembled monolayer film on a quartz substrate with an in-plane transition dipole moment (IP TDM) fraction of 92%; ^[59] (c) Spin-coated film on a quartz substrate with an IP TDM fraction of 67%; ^[59] (d) TEM images of CQW films prepared with TDFA and by spin coating. ^[60]

较高的光学增益和较低的受激辐射阈值,因此成为极具潜力的胶体激光增益介质。Taghipour等人利用CdSe/CdS@CdZnS核/冠@梯度合金壳CQW构建垂直腔面发射激光器,实现了低至7.5 uJ/cm²的激光阈值^[64]。Thung等人通过自组装方法将CQW均匀沉积于微谐振器表面,获得27.67 uJ/

cm²的低阈值激光输出以及13000的高品质因子,并表现出优异的光稳定性^[65]。这些研究表明,CQW在低阈值、高稳定性微型激光器领域具有重要应用潜力。

2.5.3 光探测与其他光电应用

由于CQW具有可调谐带隙和较大的光吸收

表 1 CQW 材料调控策略总结

Tab 1 Summary of tailoring strategies for CQWs				
材料调控	代表工作	主要作用	效果	Ref.
异质结构 II 型 异质结构	Mahler 2012	缺陷钝化, 载流子限域	PLQY 提升	[34]
	Pedetti 2014	空间分离, 长寿命	$\lambda \approx 730\text{ nm}$	[50]
梯度壳层	Kelestemur 2019	降低界面 应变	PLQY $\approx 89\%$	[52]
双梯度	Liang 2023	激子 局域化	PLQY $\approx 100\%$	[53]
梯度合金	Ba	能带优化	PLQY $\approx 100\%$	[54]
壳层 CQW	2024			
配体工程	Singh 2018	边缘钝化	PLQY 恒定	[55]
掺杂	Delikanli 2015	磁光调控	自旋响应	[57]
Cu 掺杂	Sharma	大 Stokes 位移	PLQY $> 43\%$	[58]
	2017			
排列工程	Ba 2025	光提取	EQE $> 25\%$	[60]

截面,其在光探测和光伏器件中同样具有应用价值^[66]。通过调节 CQW 厚度、组分以及异质结构,可以实现宽范围光谱响应;同时,通过优化薄膜取向、颗粒耦合及界面结构,可进一步改善载流子传输性能^[67]。此外,CQW 优异的荧光稳定性和窄带发射特性,使其在生物成像、量子光源等领域也展现出潜在应用价值^[68]。

2.5.4 激子极化激元器件

CQW 不仅适用于传统电致发光器件,其大激子结合能和巨振子强度还为激子极化激元(exciton-polariton)器件的构建提供了理想平台。当 CQW 置于光学微腔中时,激子与腔光子发生强耦合,形成兼具激子和光子性质的杂化态,即激子极化激元。该过程无需粒子数反转即可实现极化激元激光,有望降低激光阈值并拓展可调谐波长范围。

近年来,CQW 在激子极化激元领域取得了多项重要突破。Morshed 等人通过将 CdSe 纳米片与金属-DBR 法布里-珀罗腔耦合,在室温下实现了 Rabi 分裂达 74.6 meV 的强耦合,且 5 K 与 300 K 下的 Rabi 分裂基本相同,验证了该体系温度无关操作的可行性^[69]。Zhao 等人将 CdSe/CdS 核/冠 CQW 嵌入法布里-珀罗腔中,获得了约 202 meV 的 Rabi 分裂,并在 $k=0$ 处观测到蓝移的尖锐发射峰,证实了激子极化激元激光的实现^[70]。该团队进一步在面朝下取向排列的 CdSe CQW 中实现了室温激子极化激元玻色-爱因斯坦凝聚和极化激元激

光,通过调控激子-光子失谐获得了 530-549 nm 范围可调的极化激元激光^[71]。Cam 等人利用梯度核/冠 CQW 构建了多共振微腔阵列,实现了室温极化激元的可控形成,Rabi 振荡品质因子 $QR=3.3$,Rabi 分裂超过热损耗的两倍,展示了片上极化激元器件的潜力^[72]。

从极化激元激光到电驱动极化激元 LED,仍需克服多重挑战。首先,电注入需要将电子和空穴高效注入强耦合区域并形成激子,而非自由载流子,而 CQW 的二维结构有利于面内载流子输运,但注入效率和激子形成效率仍需优化。其次,电注入条件下的高载流子密度易引发激子展宽和俄歇复合,破坏强耦合条件,而 CQW 的俄歇复合速率较慢,但仍需在高电流密度下保持激子稳定性和窄线宽。此外,器件结构设计需兼顾电注入和光学腔的兼容性,如何在金属电极、电荷传输层与光学腔集成的同时避免腔模损耗,是实现电驱动极化激元 LED 的核心器件物理问题。同时,CQW 薄膜的取向排列对强耦合效率至关重要,面朝下取向的 CQW 可增强激子-光子耦合,发展 CQW 取向组装技术与光学腔集成的工艺是实现高效极化激元 LED 的关键路径之一。

CQW 兼具大激子结合能、巨振子强度和溶液加工优势,是构建室温激子极化激元器件的理想平台。发展电驱动极化激元 LED,实现照明、激光和量子光源的多功能集成,是未来 CQW-LED 发展的重要方向之一。

总体而言,CQW 应用已经由早期光学增益材料逐渐拓展至高性能发光器件和集成光电子领域。其中,CQW-LED 凭借高效率、高色纯度和溶液加工优势,成为当前最具产业化潜力的应用方向之一。未来,通过无镉材料开发、异质结构优化以及薄膜工程协同调控,CQW 有望进一步推动新一代显示和光电器件的发展。

3 胶体量子阱发光二极管的研究现状

CQW-LED 通常采用与 QLED 类似的多层结构,由透明导电电极、电子传输层(electron transport layer, ETL)、CQW 发光层、空穴传输层(hole transport layer, HTL)及金属电极组成,一般采用正置或倒置结构,通过调控电子/空穴注入平衡实现高效电致发光,如图 9 所示。尽管 CQW-LED 与

QLED 在器件构型上均采用载流子传输层/发光层/电极的层状结构,但二者发光层的物理性质存在本质差异。QLED 的发光层由零维 QD 组成,载流子注入后在点内复合,颗粒间传输、能量转移和尺寸分布对器件性能影响显著。CQW-LED 的发光层由准二维 CQW 组成,载流子在厚度方向受限、面内可自由输运,且可通过水平取向排列提高光提取效率。因此,CQW-LED 在窄带发射、高色纯度、大吸收截面、俄歇复合抑制和取向光提取方面具有独特优势。但同时,CQW 发光层更易发生堆叠,对表面配体和薄膜取向更敏感,蓝光短波器件还面临壳层钝化与波长红移之间的矛盾。器件性能不仅取决于 CQW 材料本征发光性能,还受到载流子注入平衡、界面能级匹配及光提取效率等因素共同影响。近年来,随着高质量 CQW 材料和器件工程的发展,CQW-LED 性能实现了快速提升,并逐步形成红、绿、蓝及白光器件体系。

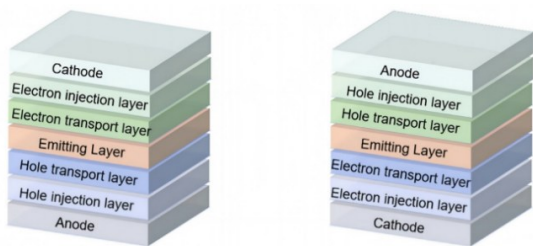


图9 正置型和倒置型的 CQW-LED 器件结构示意图

Fig. 9 Schematic illustrations of the device structures of normal and inverted CQW-LEDs

3.1 胶体量子阱发光二极管的发展历程

2014 年,研究人员首次将 CdSe 基 CQW 作为发光层引入电致发光器件中,实现了 CQW 的电致发光,为 CQW-LED 的发展奠定了基础。然而,受限于材料质量和器件结构,早期器件的 EQE 普遍不足 1%,亮度和稳定性均远未达到实际应用要求。因此,此阶段的研究主要聚焦于验证 CQW 作为电致发光材料的可行性,并建立基本器件构型^[63]。

2015 至 2020 年,随着 CQW 材料质量的提升和新器件结构的引入,CQW-LED 的 EQE 迅速提升至 19% 以上,标志着器件性能进入快速提升阶段^[59,63]。该阶段的研究为后续高效率器件的实现提供了重要支撑。

2021 年以来,CQW-LED 进入高效率与高稳定性协同发展的新阶段,研究重心逐步由提升器件效率转向效率、亮度和稳定性的协同优化。目

前,红光和绿光 CQW-LED 的 EQE 均已突破 20%,蓝光器件超过 10%,白光 CQW-LED 也开始受到关注^[63,73]。

3.2 红光 CQW-LED 研究进展

2014 年,Chen 等人首次实现了基于 CdSe/CdZnS 核/壳 CQW 的电致发光器件。通过短链配体交换和 HTL 优化,有效改善了载流子注入,实现了 4499 cd/m^2 的峰值亮度和 0.63% 的 EQE^[74]。值得注意的是,该器件在不同驱动电压下始终保持 25-30 nm 的窄电致发光 FWHM,验证了 CQW 在高色纯度显示器件中的应用潜力,为 CQW-LED 的发展奠定了基础^[74]。

2018 年,Giovanella 等人在 CdSe/CdZnS CQW 发光层与金属阴极之间引入兼具界面调控功能的极性共轭聚电解质 P1 作为 ETL,通过界面偶极调节电子注入势垒,改善电子-空穴载流子平衡^[75]。如图 10(a)所示,相比未引入 P1 的器件,加入 P1 后峰值外量子效率由约 2.4% 进一步提升至 5.73%,实现了约 2 倍以上的效率提升;器件在空气中放置后 EQE 进一步提高至 8.39%。同时,器件保持约 25 nm 的窄电致发光 FWHM 和 98% 的色纯度,并在无封装条件下可于空气中稳定工作数小时。

然而,此阶段器件性能的提升主要依赖于器件结构优化和载流子注入调控,CQW 材料仍存在表面缺陷、载流子限域不足及界面非辐射复合等问题,限制了器件效率和稳定性的进一步提升。因此,后续研究重点逐渐由器件结构优化转向 CQW 材料工程,通过梯度壳层、异质结构及表面钝化等策略改善载流子限域能力和界面质量,成为推动 CQW-LED 性能提升的重要方向。

2019 年,Kelestemur 等人为改善界面质量提出 CdSe/CdS/Cd_xZn_{1-x}S 梯度壳层结构,通过在 CdSe 量子阱外依次引入 CdS 缓冲层和 Cd_xZn_{1-x}S 梯度合金壳层,实现壳层组分由内向外连续变化,有效缓解异质结构中的晶格失配和界面应变,并进一步增强了载流子限域能力和表面钝化效果^[52]。如图 10(b)所示,基于梯度壳层 CQW 构筑的 LED 器件具有良好的能级匹配,并实现了稳定的红光电致发光(650 nm)。最终,CQW 的 PLQY 提高至 89%,基于该材料制备的 CQW-LED 峰值 EQE 达到 9.92%,最大亮度提升至 $4.6 \times 10^4 \text{ cd/m}^2$ 。该工作首次将梯度壳层设计引入 CQW-LED,通过缓解晶

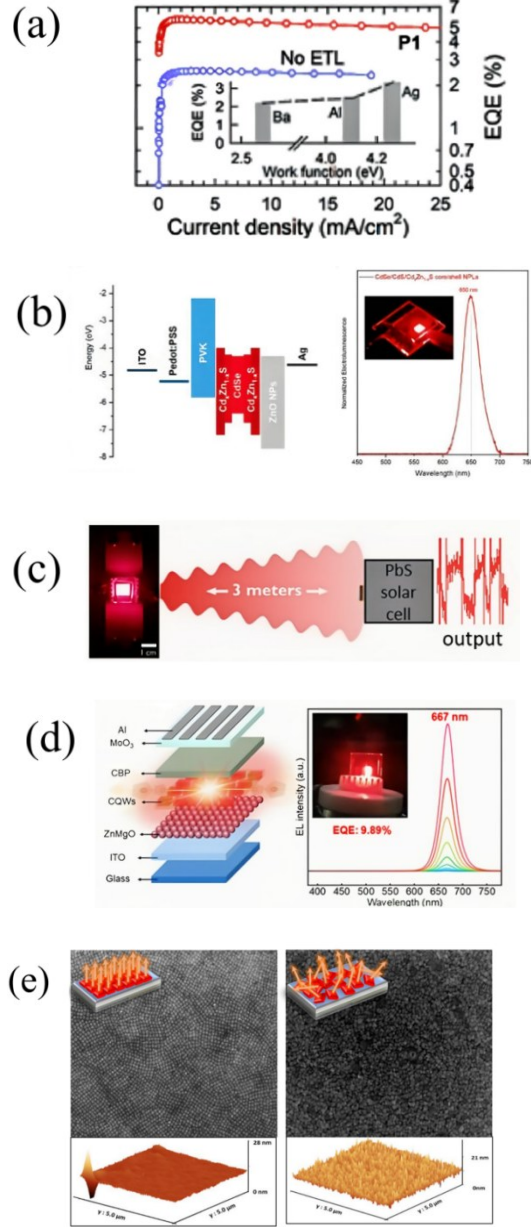


图 10 (a) P1 电子传输层对 CQW-LED 外量子效率的提升作用^[75]; (b) 基于梯度壳层的器件能级结构和电致发光光谱与器件实物^[52]; (c) 基于 CQW-LED 的 LiFi 演示系统^[76]; (d) 深红光 CQW-LED 器件结构及 667 nm 电致发光特性^[26]; (e) 自组装与旋涂 CQW 发光层的取向结构及表面形貌对比^[59]。

Fig. 10 (a) Enhancement of the EQE of CQW-LEDs by the P1 ETL; ^[75] (b) Energy-level structure, electroluminescence (EL) spectrum, and photograph of the device based on a gradient shell; ^[52] (c) LiFi demonstration system based on CQW-LEDs; ^[76] (d) Device structure and 667 nm EL characteristics of deep-red CQW-LEDs; ^[26] (e) Comparison of the orientation structures and surface morphologies of self-assembled and spin-coated CQW emissive layers. ^[59]

格失配和增强载流子限域显著提升了器件性能,为后续梯度合金壳层及能带梯度调控策略的发展奠定了基础。

2020 年,刘佰全等人进一步发展了热注入壳层生长(hot-injection shell, HIS)策略,通过高质量壳层包覆降低表面缺陷和非辐射复合,并改善 CQW 薄膜的均匀性与稳定性^[27]。所得 CdSe/Cd_{0.25}Zn_{0.75}S 核/HIS CQW 在溶液和薄膜中的 PLQY 分别保持在 95% 和 87%,表明其在多次纯化和成膜后仍具有优异的发光性能。基于该材料构筑的红光 CQW-LED 实现了 19.2% 的峰值 EQE、23490 cd/m² 的最大亮度以及国际照明委员会(Commission Internationale de l'Éclairage, CIE)色坐标为(0.715, 0.283)的高饱和红光,使器件效率接近传统平面 LED 的理论外耦合极限,标志着红光 CQW-LED 由壳层结构优化进一步迈入高质量壳层生长驱动的高效率阶段。

高质量 CQW 材料体系的建立进一步推动了其应用研究也由高性能发光器件进一步拓展至可见光通信等新型光电子领域。Qu 等人采用 CdSe/CdZnS 核/壳 CQW 构筑红光 LED,并通过优化壳层合金组成改善载流子注入,实现了 5% 以上的 EQE、35000 cd/m² 的最大亮度以及超过 3100 h (100 cd/m²) 的工作寿命^[76]。如图 10(c) 所示,作者进一步构建了基于 CQW-LED 的大面积可见光通信(light fidelity, LiFi)演示系统,实现了 3 m 距离的信息传输,验证了 CQW-LED 在照明与高速光通信一体化应用中的可行性,为胶体纳米晶光电子器件的多功能集成提供了新的发展方向。

当器件效率逐渐接近外耦合极限后,单纯依赖提高材料 PLQY 和优化壳层质量已难以实现性能的进一步突破。研究重点因此由材料质量优化逐步转向器件物理调控,更加关注载流子动力学、发射偶极取向、光提取效率以及高色纯度深红发光等关键问题,从而为 CQW-LED 性能的持续提升提供了新的研究思路。

2022 年,胡素娟等人将载流子动力学调控引入深红光 CQW-LED 设计,通过采用 ZnMgO 电子传输层优化电子注入,实现电子与空穴的平衡输运,并有效抑制非辐射复合损失^[26]。如图 10(d) 所示,基于(CdSe/CdS)@(CdS/CdZnS) CQW 构筑的深红光 CQW-LED 实现了 667 nm 电致发光, EQE 达到 9.89%,同时表现出较低的效率滚降和 3853 cd/m²

的最大亮度。器件 CIE 坐标达到 (0.719, 0.278), 色域覆盖国际电信联盟 BT. 2020 标准 (Recommendation ITU-R BT. 2020, Rec. 2020) 的 102%。该工作系统阐明了载流子动力学调控对深红光 CQW-LED 性能提升的重要作用, 为后续激子调控和电荷分布优化策略的发展提供了新的研究思路。

除载流子动力学外, CQW 天然各向异性的发射偶极矩也逐渐受到关注, 提高发光层水平取向成为进一步突破光提取效率的重要方向。Baruj 等人利用液-气界面自组装方法构筑全平躺取向 CQW 单层发光膜, 通过充分发挥 CQW 各向异性跃迁偶极矩优势, 提高了器件光提取效率^[59]。如图 10(e) 所示, 相较于传统旋涂形成的随机取向薄膜, 自组装 CQW 薄膜具有更加均匀的平躺排列和更低的表面粗糙度, 为载流子输运和光子出射提供了更加有利的界面结构。在此基础上, 结合短链配体交换进一步改善电荷注入, 使全溶液加工红光 CQW-LED 获得 18.1% 的 EQE、19800 cd/m² 的最大亮度以及 651 nm 高色纯度发光。

在自组装策略验证发射偶极取向能够提高光提取效率后, 研究进一步围绕 CQW 取向有序性展开优化, 以实现更高比例的面内偶极分布和更优的器件综合性能。2023 年, Zhu 等人进一步优化 CQW 自组装过程, 通过调控基底表面性质及 CQW 间相互作用, 构筑了具有 95% 面内跃迁偶极矩分布的高取向发光层, 使器件光提取效率提高至 37%^[62]。基于该策略制备的红光 CQW-LED 的 EQE 进一步提升至 26.9%, 最大亮度达到 55754 cd/m², 工作寿命超过 15000 h (T₉₅@100 cd/m²), 刷新了各向异性纳米晶 LED 的性能纪录。该工作进一步证明了取向工程不仅能够有效提升外耦合效率, 同时兼顾器件亮度和运行稳定性, 为高性能 CQW-LED 的发展提供了新的设计思路。

在材料结构持续优化的基础上, 研究人员开始进一步关注器件性能提升背后的激子动力学机制。2024 年, 胡素娟等人从激子动力学角度系统揭示了 CQW-LED 性能提升机制, 通过协同优化 CdSe/CdZnS 壳层厚度和器件结构, 实现了激子限域、载流子平衡与非辐射复合过程的协同调控^[77]。研究发现, 5 ML 壳层 CQW 薄膜在电荷传输层上的 PLQY 达到 76.63%, 器件获得 13.43% 的 EQE、9.20 cd/A 的电流效率及 6.04 lm/W 的功率效率, 同时效率滚降显著降低。如图 11(a) 所示, 作者

建立了俄歇寿命 (τ_{Auger}) 与电子限域能之间的定量关系, 阐明了增强电子限域能够有效抑制俄歇复合、延长激子寿命并提高辐射复合效率, 为 CQW-LED 性能优化提供了新的物理机制。

随着激子动力学调控逐渐揭示 CQW-LED 性能提升的物理机制, 研究重点进一步转向材料结构与能带工程的协同优化。传统均匀壳层虽能有效钝化表面缺陷, 但仍难以兼顾激子淬灭抑制与载流子平衡注入。因此, 梯度合金壳层逐渐成为提升 CQW-LED 综合性能的重要策略。

Ba 等人提出梯度合金壳层策略, 通过构筑 CdSe/Cd_{1-x}Zn_xS 梯度组分外壳, 实现了缺陷钝化与能带调控的协同优化^[54]。梯度壳层有效降低了 CdSe/ZnS 界面晶格失配, 显著抑制激子淬灭, 使 CQW 获得接近 100% 的 PLQY; 同时, 梯度能带提高了价带能级, 降低空穴注入势垒, 实现电子与空穴的平衡注入。如图 11(b) 所示, 基于梯度合金壳层构筑的 CQW-LED 获得 22.83% 的 EQE、111319 cd/m² 的最大亮度以及超过 6500 h (T₉₅@100 cd/m²) 的寿命, 为后续高效率 CQW-LED 的发展奠定了新的材料设计基础^[78]。

然而, 仅依赖材料结构优化仍难以充分发挥 CQW 的光学优势, 薄膜组装质量逐渐成为限制器件性能进一步提升的重要因素。Ba 等人提出 TDFA 策略, 利用氯仿/乙二醇双液相界面的表面张力和范德华相互作用诱导 CQW 沿宽晶面水平排列, 并通过 Langmuir-Schaefer 转移构筑高致密度发光薄膜^[60]。如图 11(c) 所示, TDFA 工艺能够实现 CQW 在液面上的有序排列和均匀组装, 从而显著提高薄膜水平取向比例, 为后续提升光提取效率和器件稳定性提供了新的工艺路径。最终, CQW 薄膜的水平跃迁偶极矩比例提高至 90%, 器件实现 25.5% 的 EQE、59620 cd/m² 的最大亮度以及超过 16233 h (T₉₅@100 cd/m²) 的工作寿命, 同时实现 100 cm² 大面积均匀 CQW 薄膜制备, 为 CQW-LED 的大面积制造和产业化应用奠定了基础。

高质量发光薄膜解决了光提取问题后, 研究进一步开始关注器件内部载流子输运过程。方文惠等人针对长波红光 CQW-LED 中空穴注入不足和载流子分布不均的问题, 采用由 4,4'-双(N-咔唑基)-1,1'-联苯 (4,4'-bis(N-carbazolyl)-1,1'-biphenyl, CBP)、三(4-咔唑基-9-基苯基)胺 (tris(4-carbazoyl-9-ylphenyl)amine, TCTA) 和 4,4'-环己基二[N,

N-双(4-甲基苯基)苯胺][4,4'-cyclohexylidenebis[N, N-bis(4-methylphenyl)benzenamine], TAPC)组成的三层 HTL,通过构建阶梯式能级结构和梯度空穴迁移率,实现空穴的逐级输运与注入优化^[79]。如图 11(d)所示,三层 HTL有效改善了 CQW 发光层与载流子传输层之间的能级匹配,促进电子与空穴平衡注入,并拓宽了激子复合区域,从而显著降低非辐射复合损失。基于该策略构筑的 671 nm 深红光 CQW-LED 获得 17.45% 的 EQE 和 9335 cd/m² 的最大亮度;进一步应用于红光 CQW-LED 后,器件 EQE 提升至 20.41%,表明电荷分布调控已成为继壳层工程、激子调控和薄膜组装之后提升 CQW-LED 综合性能的重要器件设计策略。

当 EQE 已不再是唯一评价指标时,高亮度工作条件下的效率保持能力在评价器件性能中的重要性逐渐显现出来。2026 年, Qiu 等人针对 CQW-LED 在高电流密度下效率快速衰减的问题,设计

了 CdSe/ZnSe/ZnS 核/壳/壳梯度异质结构 CQW,通过组分梯度调控促进载流子注入并进一步抑制非辐射复合,实现了近 100% 的 PLQY^[80]。基于该 CQW 构筑的底发射 CQW-LED 表现出极低的效率滚降,其 J_{90} 提高至 485 mA/cm²,并实现超过 47000 h ($T_{95}@100$ cd/m²) 的寿命;同时,顶发射器件电流效率达到 36.5 cd/A。与前期研究主要关注 EQE 不同,该工作将研究重点转向高亮度工作条件下的效率保持能力和器件寿命,标志着 CQW-LED 的发展由高效率逐步迈向高亮度、高稳定性的实际应用阶段。

总体而言,红光 CQW-LED 的发展经历了器件结构优化、材料工程、器件物理调控以及多策略协同优化四个阶段,研究重点逐渐由提升峰值效率转向兼顾高亮度、低效率滚降和长寿命等综合性能,使 CQW-LED 逐步具备面向高性能显示和照明应用的潜力。

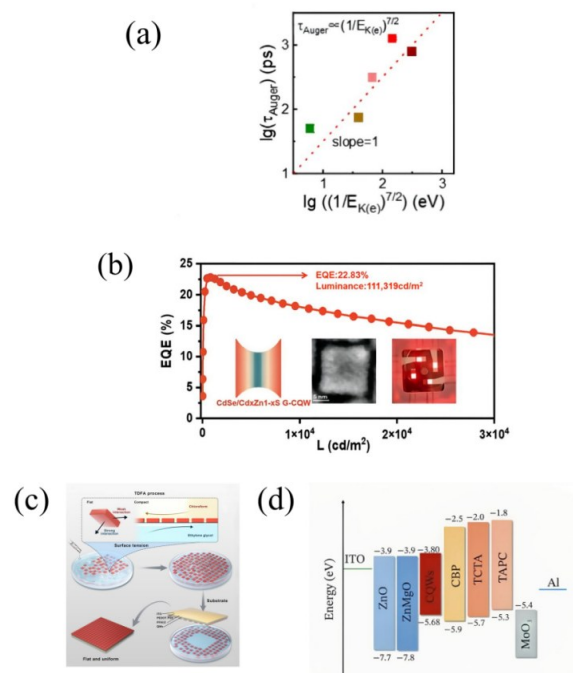


图 11 (a) CQW 中俄歇寿命与电子限域能的关系^[77]; (b) 基于梯度合金壳层 CdSe/Cd_xZn_{1-x}S CQW 构筑的 LED 器件性能与发光展示^[54]; (c) TDFA 策略诱导 CQW 水平排列及致密薄膜构筑示意图^[60]; (d) 基于 CBP/TCTA/TAPC 三级空穴传输层的 CQW-LED 能级结构示意图^[79]。

Fig. 11 (a) Relationship between the τ_{Auger} and electron confinement energy in CQWs; ^[77] (b) Performance and luminescence demonstration of LED devices based on CQWs with a gradient composition CdSe/Cd_xZn_{1-x}S shell; ^[54] (c) Schematic illustration of the TDFA strategy for inducing horizontal alignment of CQWs and constructing dense films; ^[60] (d) Schematic energy-level diagram of CQW-LEDs based on a CBP/TCTA/TAPC trilayer HTL. ^[79]

3.3 绿光 CQW-LED 研究进展

绿光 CQW-LED 的发展主要围绕三个关键问题展开:一是突破 CQW 发射波长受原子层厚度限

制的离散调控特征;二是在保持窄带发射和高色纯度的同时提升器件效率;三是解决绿光核/壳 CQW 在壳层生长过程中容易发生明显红移的问

题。相关研究由早期的光谱调控逐步发展至薄膜形貌、激子动力学和异质结构的协同优化。

2015年, Fan等人首次将CdS引入CdSe胶体量子阱形成 $\text{CdSe}_{1-x}\text{S}_x$ 合金化结构, 在保持量子阱厚度不变的条件下, 通过调控材料组成实现了绿光至蓝绿光区域的连续发光调控, 突破了传统CdSe CQW只能依赖原子层厚度实现离散波长调控的限制^[81], 如图12(a)所示。同时, 器件实现约2.1 V的开启电压, 并获得约12.5 nm的超窄电致发光FWHM, 为后续绿光CQW的组分调控和高色纯度器件研究提供了材料基础^[81]。

在连续波长调控得到验证后, 研究重点开始由能否实现绿光发射转向能否兼顾亮度、效率与色纯度。2016年, Zhang等人采用CdSe/CdS核/壳CQW作为发光层, 构建了全溶液法制备的绿光CQW-LED^[82], 如图12(b)所示。相比早期亮度较

低的CQW器件, 该工作在保持14 nm超窄电致发光FWHM的同时, 实现了33000 cd/m²的最大亮度和5%的EQE, 显著改善了早期合金化CQW器件亮度不足的问题^[82]。该工作表明, CdSe/CdS核/壳结构能够有效改善CQW的表面缺陷并提高器件发光性能, 在保持窄带发射特性的同时显著提升了器件亮度和效率, 推动绿光CQW-LED由光谱调控阶段迈向高亮度、高色纯度器件的发展。

此后, 研究者进一步将合金化策略拓展至核/壳异质结构设计。2020年, Altintas等人通过调控CdSeS/CdZnS异质结构中核与壳的组成, 实现了从绿光到深红光的连续可调电致发光, 其中绿光CQW-LED发射峰位于558 nm^[83], 如图12(c)。该研究进一步拓宽了CQW发光波长的调控范围, 为后续标准绿光器件的设计提供了新的材料思路。

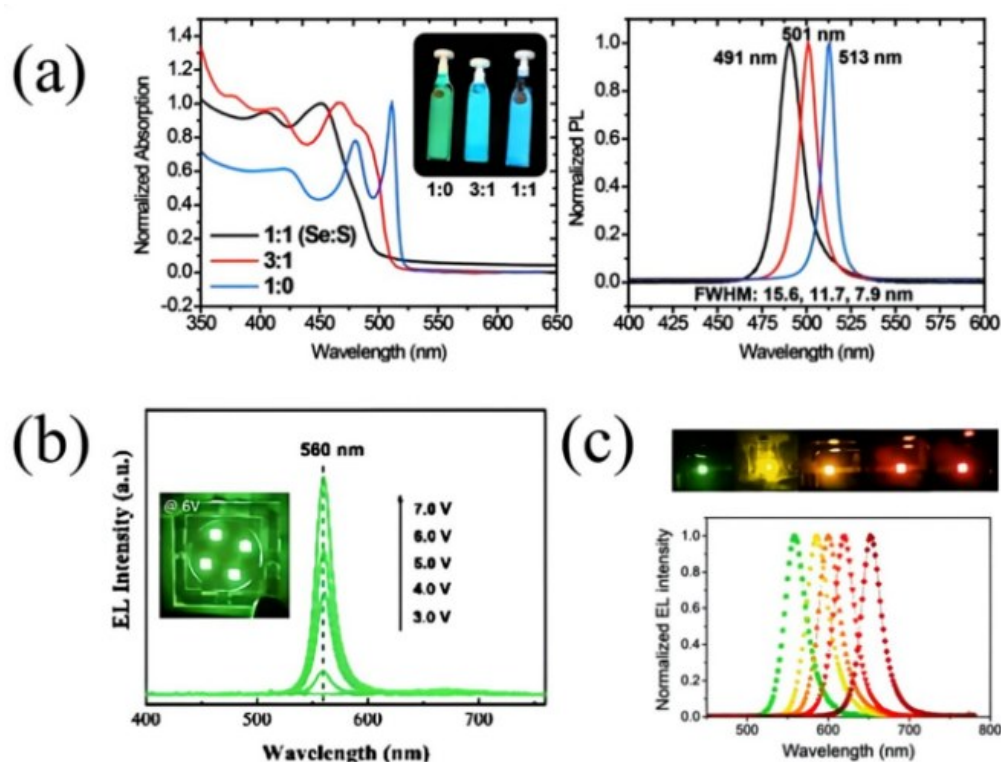


图12 (a)连续可调电致发光的CQW-LED^[81]; (b)CdSe/CdS核/壳绿光CQW-LED及其电致发光特性^[82]; (c)合金化异质结构CQW-LED的连续可调发光特性^[83]。

Fig. 12 (a) CQW-LEDs with continuously tunable EL;^[81] (b) CdSe/CdS core/shell green CQW-LED and its EL characteristics;^[82] (c) Continuously tunable emission characteristics of CQW-LEDs with alloyed heterostructures.^[83]

尽管前述研究已实现较高亮度和连续波长调控, 但560 nm附近的黄绿色发射与宽色域显示所需的标准绿光仍存在偏差。因此, 绿光CQW-LED的研究随后逐渐转向实现超纯绿色发射。2020年, Wen等人采用4 ML CdSe/CdS核/冠CQW构建超纯

绿CQW-LED, 并在ZnO与发光层之间引入聚乙烯吡咯烷酮(polyvinylpyrrolidone, PVP)缓冲层, 以抑制电子过量注入以及ZnO与HTL直接接触引起的寄生发光^[84]。优化后的器件实现521 nm电致发光, FWHM仅15 nm, CIE坐标为(0.101, 0.806), 色域

覆盖达到美国国家电视系统委员会(National Television System Committee, NTSC)标准的 124.7%^[84], 如图 13(a)所示。该工作虽然 EQE 仅为 0.416%, 但

较为明确地展示了 4 ML 核/冠 CQW 在超纯绿色和宽色域显示方面的优势, 标志着绿光 CQW-LED 研究开始由亮度提升转向标准绿色发射的精准调控。

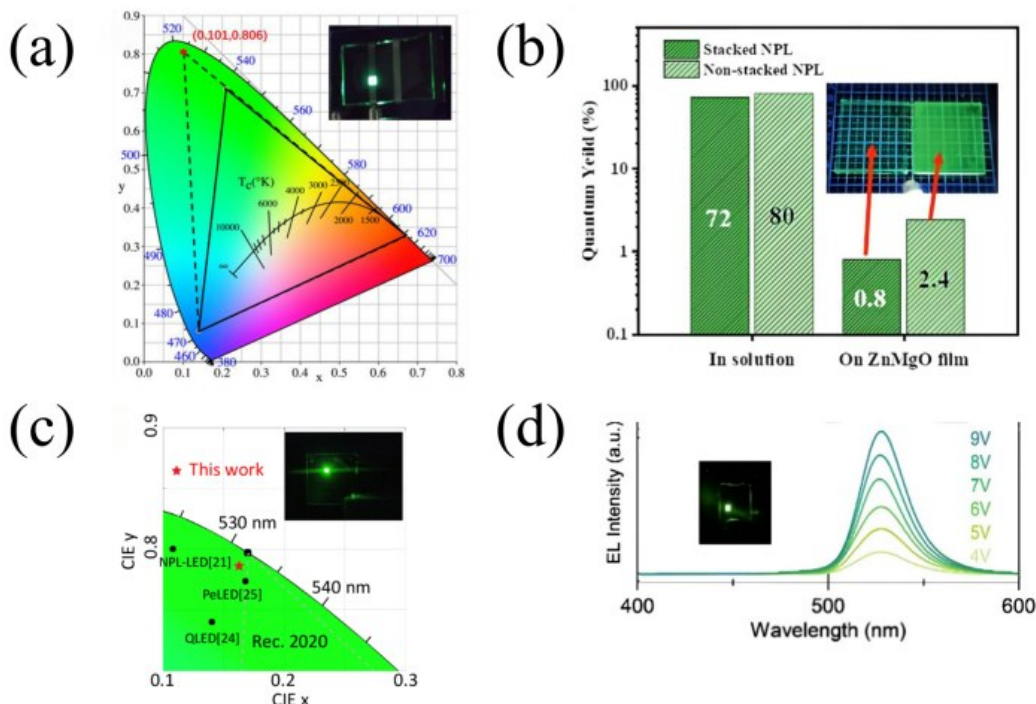


图 13 (a) 纯绿光 CQW-LED 的 CIE 色坐标与器件照片^[84]; (b) 堆叠与非堆叠 CQW 的量子产率对比^[85]; (c) CdSe/CdSeS 核/合金冠 CQW-LED 的 CIE 色坐标及器件照片^[86]; (d) CdZnSe/ZnS 核/壳 CQW-LED 的绿光电致发光光谱及器件照片^[28]。

Fig. 13 (a) CIE color coordinates and device photograph of pure-green CQW-LEDs;^[84] (b) Comparison of the quantum yields of stacked and nonstacked CQWs;^[85] (c) CIE chromaticity coordinates and device photograph of CdSe/CdSeS core/alloy-crown CQW-LEDs;^[86] (d) Green EL spectrum and device photograph of CdZnSe/ZnS core/shell CQW-LEDs.^[28]

在获得超纯绿色后, 如何克服 CQW 在成膜过程中发生堆叠和非辐射能量转移, 成为提高器件效率的关键。2021 年, Wen 等人发现 CQW 薄膜中的堆叠结构会导致严重的非辐射能量转移, 成为限制超纯绿 CQW-LED 效率的重要因素。研究人员通过调节沉淀纯化过程中的反溶剂比例制备非堆叠 CdSe/CdS 核/冠 CQW, 使其在 ZnMgO 薄膜上的 PLQY 由堆叠样品的 0.8% 提高至 2.4%, 如图 13(b)所示, 同时延长薄膜激子寿命^[85]。基于非堆叠 CQW 构筑的器件保持 521.5 nm、15 nm 的 FWHM 的超纯绿色发射, EQE 提高至 2.16%, 最大亮度达到 22400 cd/m²^[85]。该工作将绿光 CQW-LED 的优化从器件层设计推进至纳米片组装与激子能量传递调控, 证明抑制堆叠诱导的非辐射损失是提高超纯绿器件性能的有效途径。

然而, 早期的纯绿光 CQW-LED 的效率较低。针对这一问题, 2022 年, Bai 等人采用 CdSe/CdSeS

核/合金冠 CQW, 通过调控 CQW 长宽比、表面配体和纯化过程, 获得了高平整度、面朝下取向且 PLQY 接近 100% 的发光薄膜; 同时采用聚(N-乙烯基咔唑)(poly(N-vinylcarbazole), PVK) 和 4,6-双(3,5-二(吡啶-4-基)苯基)-2-甲基嘧啶 (B4PymPm) 调节载流子注入平衡^[86]。最终器件 EQE 达到 9.78%, 电致发光峰由 528 nm 红移至 532 nm, 在 3.5 V 下 CIE 坐标为 (0.163, 0.786), 接近 Rec. 2020 标准绿基色^[86], 如图 13(c)所示。该工作兼顾了接近 Rec. 2020 标准的超纯绿色与接近 10% 的器件效率, 推动绿光 CQW-LED 进入色纯度与效率协同提升阶段。

实际上, 绿光 CQW-LED 仍面临一个根本性的材料矛盾: 宽带隙无机壳层有利于表面钝化和稳定性提升, 但常规 CdSe CQW 在 ZnS 等壳层生长后会因载流子波函数离域而发生过度红移, 难以保持绿光发射。2025 年, Zhu 等人提出直接阳

离子交换与 HIS 协同合成策略, 实现 CdZnSe/ZnS 核/壳胶体量子阱的可控制备^[28]。该策略通过调控 CdZnSe 合金核组成补偿 ZnS 壳层生长引起的发射红移, 在保持绿光发射波长的同时实现高质量 ZnS 壳层钝化。基于该材料构筑的绿光 CQW-LED 的 EQE 达到 20.6%, 最大亮度达 347683 cd/m², 同时, 不同驱动电压下电致发光光谱基本保持稳定^[28], 如图 13(d) 所示。该工作使绿光 CQW-LED 的 EQE 突破 20%, 并将亮度提高至 10⁵ cd/m² 量级, 表明绿光器件迈向了高效率、高亮度和高稳定性协同发展的新阶段。

绿光 CQW-LED 的发展经历了由合金化连续调波长、核/冠结构提升亮度、标准绿光色坐标调控、堆叠与非辐射能量转移抑制、薄膜与载流子协同优化, 再到合金核/无机壳结构实现 20% 以上效率的演进过程。其研究重点也由早期的获得绿光和窄带发射, 逐步转向色域、效率、亮度和稳定性的综合提升。不过, 与红光 CQW-LED 相比, 绿光器件在高效率下的长期运行稳定性、发光层界面电荷积累以及标准绿色与高亮度的兼容性方面仍需进一步优化。

3.4 蓝光 CQW-LED 研究进展

与红光和绿光 CQW-LED 相比, 蓝光 CQW 由于具有更大的带隙, 其材料设计和器件构筑难度显著增加。蓝光 CQW 的固有难点并非单一因素, 而是由超薄晶体结构、表面化学、壳层外延和载流子限域等多方面因素相互耦合所致, 可集中归纳为以下四类。

(1) 3 ML 超薄晶体结构易卷曲, 形貌与厚度稳定性差。蓝光发射通常要求 CdSe 核心厚度降至 3 ML 甚至更薄, 以通过强量子限域获得足够大的带隙。然而, 原子级厚度使 CQW 具有高表面能和有限的面内刚度, 在合成、纯化、配体交换及成膜过程中易发生卷曲、褶皱、堆叠甚至破碎, 破坏准二维形貌和厚度均一性, 导致薄膜覆盖不均匀和发光性能退化。

(2) 表面缺陷密度高, 非辐射复合严重。3 ML CQW 具有极高的比表面积/体积比, 表面及边缘存在大量未配位原子和悬挂键, 易形成深能级陷阱。这些陷阱不仅显著降低 PLQY, 还会引起陷阱态发光、光谱展宽和器件效率滚降。对于蓝光 CQW, 由于激子结合能大、载流子波函数更局域, 激子更容易被表面缺陷捕获, 因此其对表面钝

化的要求比红光、绿光 CQW 更苛刻。

(3) 壳层生长容易造成波长红移。为钝化表面缺陷并提高稳定性, 通常需要在蓝光 CQW 表面外延生长 CdS、ZnS 等宽带隙壳层。但壳层生长会削弱厚度方向量子限域, 使电子/空穴波函数向壳层离域; 同时, 界面应变、阳离子互扩散及合金化会改变有效带隙, 导致发射峰明显红移。因此, 蓝光 CQW 面临“钝化需要壳层、壳层导致红移”的材料矛盾, 难以在保持蓝光发射的同时获得高质量厚壳钝化。

(4) 载流子限域与注入平衡难以兼顾。蓝光发射要求核心带隙大、厚度薄, 载流子波函数在厚度方向被强烈压缩, 这虽然有利于提高激子结合能, 但也使载流子对厚度波动、界面缺陷和电场极其敏感。壳层过薄时限域不足、缺陷钝化不充分; 壳层过厚或能带偏移不匹配时则会造成红移、注入势垒增大和俄歇复合增强。此外, 蓝光 CQW 的能级位置与常用电荷传输层之间易出现电子/空穴注入不平衡, 进一步加剧非辐射复合和效率下降。

上述四类难点相互关联, 超薄结构导致高表面缺陷, 缺陷钝化又依赖壳层外延, 而壳层生长诱发的红移和限域减弱限制了蓝光发射保持, 最终表现为蓝光 CQW-LED 在效率、亮度和稳定性方面明显落后于红光和绿光器件。因此, 蓝光 CQW-LED 的研究需要从材料体系、核/冠结构、合金化壳层、表面配体及器件能级匹配等方面协同突破。

针对蓝光 CQW 材料 PLQY 低、陷阱态发光严重等问题, 研究首先围绕蓝光发光材料体系展开探索。2022 年, Izmir 等人首次实现工作于蓝光波段的 CdSe 基 CQW-LED, 标志着 CQW-LED 首次完成红、绿、蓝三基色覆盖^[87]。研究者通过在 4 ML CdSe 核心中引入 S, 构筑了 CdSe_{1-x}S_x 合金 CQW, 实现蓝光区域的发射波长调控, 并利用 CdS 冠层对纳米片侧向边缘进行钝化, 使材料 PLQY 由约 10% 提高至 60%。如图 14(a) 所示, 所得 CdSe_{0.20}S_{0.80}/CdS 核/冠 CQW 保持规则的二维矩形形貌, 平均长度和宽度分别为 34.0±4.3 nm 和 14.7±2.1 nm。基于该材料构筑的 CQW-LED 实现了约 476 nm 蓝光电致发光, 半峰宽 34 nm, 开启电压约 4 V, EQE 约 0.06%, 最大亮度约 12 cd/m²。尽管器件效率仍然较低, 但该工作首次验证了蓝

光 CQW 在电致发光器件中的可行性,为后续蓝光 CQW-LED 围绕材料质量提升、界面优化及器件效率突破奠定了研究基础。

在验证蓝光 CQW 电致发光可行性的基础上,研究重点进一步转向提高蓝光材料本身的发光品质。同年,由于蓝光 CdSe CQW 深陷阱态导致 PLQY 不足的问题,Hu 等人对核/冠结构进行了进一步优化,实现了近乎无陷阱的蓝光发射 CQW^[88]。研究发现,非对称冠层生长能够部分抑制深陷阱态,而进一步结合小尺寸核心和合金化对称冠层后,可获得纯蓝发射和 100% 的 PLQY。激子动力学研究表明,陷阱发光来源于表面陷阱。基于该材料制备的 CQW-LED 实现了中心波长约 461 nm 的超窄带蓝光电致发光,FWHM 低至 11 nm,进一步推动了高色纯度蓝光 CQW-LED 的发展。

总体来看,蓝光 CQW 研究早期仍处于材料体系探索阶段,研究重点主要集中于核/冠结构设计和表面缺陷钝化,通过提升 PLQY 和改善发光纯度,为后续蓝光器件性能提升提供材料基础。这一阶段虽然器件效率仍然较低,但蓝光 CQW 的基本材料设计路线已得到初步验证。

在蓝光材料体系逐渐成熟后,研究重点开始由单纯材料优化转向材料与器件协同优化。2025 年,Cirignano 等人进一步应用实验设计法,通过优化 3.5 ML CdSe/CdS 核/冠 CQW 的合成及器件结构,提高了材料发光效率并降低了陷阱态发光,最终实现了性能优异的蓝光 CQW-LED^[89]。如图 14 (b)所示,器件在不同驱动电压下均保持稳定的蓝

光电致发光,电致发光峰位于 467 nm,FWHM 仅为 16 nm,且与薄膜 PL 光谱基本重合,表明器件具有良好的发光稳定性和较高的光谱纯度。进一步优化后,器件 EQE 达到 1.3%,开启电压降低至 2.9 V,最大亮度达到 150 cd/m²。该工作表明,材料设计与器件结构协同优化能够进一步提升蓝光 CQW-LED 的综合性能,为后续高性能蓝光器件的发展提供了新的研究思路。

在材料和器件协同优化取得进展后,蓝光 CQW-LED 性能迎来了新的突破。同年,Zhu 等人基于 CdZnSe/ZnS 核/壳 CQW 成功实现了高性能蓝光 CQW-LED。器件实现 474 nm 蓝光电致发光,EQE 达到 10.4%,平均 EQE 为 9.4%,最大亮度达到 38063 cd/m^{2[28]}。如图 14(c)所示,在 1000 cd/m² 亮度下,器件 CIE 坐标达到 (0.108,0.156),且随着亮度增加色坐标变化极小,表现出优异的色稳定性。结合此前报道的红光 CQW-LED 及本工作中的绿光器件,由三色器件色坐标构成的色域面积约为标准红绿蓝色彩空间面积的 151%,并达到 Rec. 2020 色域面积的约 82%,表明 CQW-LED 在宽色域全彩显示方面具有较大潜力。

综上所述,蓝光 CQW-LED 器件性能已由最初不足 0.1% 的 EQE 提升至 10% 以上,实现了高色纯度蓝光发射。然而,与红光和绿光 CQW-LED 相比,蓝光器件在效率、亮度及稳定性方面仍存在一定差距。未来仍需围绕宽带隙 CQW 材料设计、界面工程及器件稳定性开展进一步研究,以进一步提升蓝光 CQW-LED 的效率和稳定性,推动高性能全彩 CQW-LED 显示技术的发展。

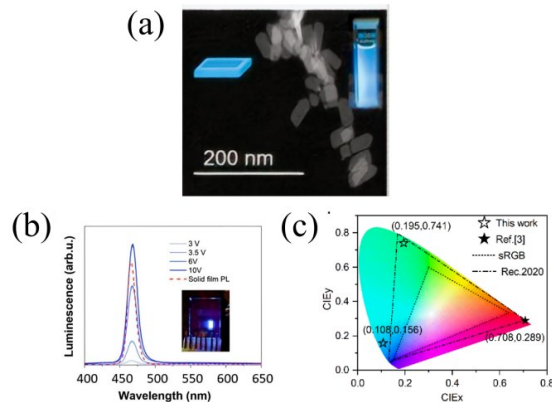


图 14 (a)用于蓝光 CQW-LED 的 CdSe_{0.20}S_{0.80}/CdS 核/冠 CQW^[87]; (b)实验设计法优化蓝光 CQW-LED 的电致发光光谱及器件发光照片^[89]; (c)CdZnSe/ZnS 核/壳 CQW-LED 的 CIE 色坐标及显示色域^[28]。

Fig. 14 (a) CdSe_{0.20}S_{0.80}/CdS core/crown CQWs for blue CQW-LEDs;^[87] (b) EL spectra and device photograph of blue CQW-LEDs optimized by a design-of-experiments approach;^[89] (c) CIE chromaticity coordinates and display color gamut of CdZnSe/ZnS core/shell CQW-LEDs.^[28]

3.5 白光 CQW-LED 研究进展

白光 CQW-LED 通过多色发光组分协同实现宽光谱发射,可兼顾高显色指数与综合色品质,在固态照明、全彩显示及柔性光电子等领域具有重要应用前景。然而,相较于红、绿、蓝 CQW-LED,其研究起步较晚,目前仍处于探索阶段。现有研究主要围绕 Cu、Ag 等掺杂策略以及 CQW/QD 多组分协同发光体系,通过构建双发射或多发射通道实现白光电致发光,并逐步向高显色指数、柔性器件及全溶液加工方向发展。

2019 年,刘佰全等人首次将 Cu 掺杂策略引入 CQW-LED,通过调控 Cu 掺杂浓度实现了由超纯绿光、双发射到白光电致发光的连续调控^[90]。其中,采用 2.4% Cu 掺杂 CQW 与 ZnCdS/ZnS 蓝光 QD 构建混合发光层,实现了白光 LED,器件显色指数(color rendering index, CRI)达到 62, EQE 为 0.029%,最大亮度为 148 cd/m²。如图 15(a)所示,器件电致发光光谱同时包含蓝光、绿光及 Cu 掺杂产生的宽带红光发射,三者共同实现白光输出,表明该策略能够获得具有较好显色性能的白光发射。该工作将 CQW-LED 由单色发射拓展至多色及白光发射,为后续掺杂型白光 CQW-LED 的发展奠定了基础。

在 Cu 掺杂实现白光 CQW-LED 之后,研究人员进一步探索 Ag 等过渡金属掺杂体系,以提高白光品质并拓展器件功能。2022 年,刘佰全等人进一步提出 Ag 掺杂 CQW 策略,通过能隙工程调控激子复合,实现了 Ag 掺杂发射由 606 nm 至 761 nm 的连续可调^[91]。进一步将 0.8% Ag 掺杂 CdSe CQW 与有机蓝光材料 PVK 构建混合发光层,成功实现有机-无机杂化白光 CQW-LED。器件 EQE 达到 0.060%,最大亮度为 206 cd/m²,CRI 达到 82,达到较好显色水平,CIE 色坐标为(0.32, 0.29),表明显色性能得到进一步提升。此外,该工作实现了柔性 CQW-LED,拓展了 CQW-LED 在柔性照明和可穿戴显示领域的应用潜力。

2025 年,杨思佳等人进一步突破传统掺杂型白光 CQW-LED 的实现方式,实现了基于 CQW 的全溶液加工白光 LED^[92]。该工作采用深蓝 ZnSe/ZnS QD 与红光 CdSe/CdZnS CQW 构建混合发光层,并进一步利用了具有优良传输性能的空穴传输材料 poly[(9,9-dioctylfluorenyl-2,7-diyl)-alt-(4,4'-(N-(4-butylphenyl)diphenylamine)](TFB)与纳

米晶界面产生的中间波段界面发射,通过蓝光、界面发射和红光三种发光通道协同实现高品质白光电致发光,如图 15(b)所示。通过优化 CQW 的比例,器件最终获得了(0.33, 0.34)的 CIE 色坐标和 85.3 的 CRI,最大亮度达到 1290 cd/m²,EQE 为 0.085%,开启电压低至 2.2 V。与此前 CQW 白光器件相比,其最大亮度提高约 6 倍。该工作将白光 CQW-LED 由掺杂和有机-无机杂化发光进一步拓展至 QD/CQW 协同发光及全溶液加工体系,为白光 CQW 器件提供了新的实现方法。

总体来看,白光 CQW-LED 已由早期 Cu 掺杂多色发射逐步发展至 Ag 掺杂高显色白光,再进一步拓展至 QD/CQW 多组分协同及全溶液加工器件,CRI 由 62 提高至 85.3,最大亮度由 148 cd/m² 提升至 1290 cd/m²,显示出明显的性能提升趋势。然而,与目前高性能单色 CQW-LED 相比,白光器件的 EQE 仍处于较低水平,其光谱稳定性、载流子平衡及多发射组分间的能量传递仍有较大优化空间。未来仍需进一步优化材料体系与器件结构,以推动 CQW-LED 在高品质照明领域的实际应用。

从显色指数来看,白光 CQW-LED 的 CRI 已由早期 Cu 掺杂的 62 提升至 Ag 掺杂的 82 和全溶液加工器件的 85.3,但与高品质照明(CRI≥90)的要求仍有差距。现有白光 CQW-LED 多采用蓝光组分与红光 CQW 的双发射或双组分混合结构,光谱中缺乏足够的青光(480 - 520 nm)和深红光(> 650 nm)成分,导致光谱覆盖不连续,限制了 CRI 的进一步提升。此外,多组分混合体系中不同发光单元之间的能量传递,尤其是从宽带隙到窄带隙组分的 Förster 共振能量转移,会造成短波发射被猝灭,进一步破坏光谱平衡。

针对上述问题,进一步提升白光 CQW-LED 显色指数可从以下策略入手。第一,引入青光和深红光发射组分,补全光谱间隙。在蓝光、红光双组分基础上引入青光 CQW 或青光 QD 作为第三发光通道,可有效填补 480-520 nm 区域的空白。对于 CQW 体系,可通过合金化或 ML 数调控获得青光发射 CQW,再与红光 CQW 组合,构建三组分白光体系。第二,拓展宽带发射 CQW 或 CQW/QD 协同体系。传统 CQW 的窄发射线宽在白光照明中反而成为劣势,可引入具有宽带发射特性的 CQW 或宽带发射 QD 协同。利用 Cu 掺杂 CQW 的宽带

杂质发光与蓝光组分互补,实现更连续的光谱覆盖。第三,优化掺杂工程调控宽带发射。 Cu 和 Ag 掺杂CQW的杂质发光具有较大的Stokes位移和较宽的发射带宽,可通过调控掺杂浓度、掺杂层位置和宿主CQW厚度,精细调节杂质发光峰位和带宽,使掺杂发射更好地覆盖黄光和红光区域。第四,优化器件结构和光谱比例。采用多层堆叠结构将不同颜色的CQW发光层分层沉积,可有效抑制层间能量传递,保持各组分独立发光,从而精确调控光谱比例。综上,提升白光CQW-LED显色指数的核心在于补全光谱中的青光与深红光成分、抑制多组分间能量传递、并精细调控各发光通道的相对比例。

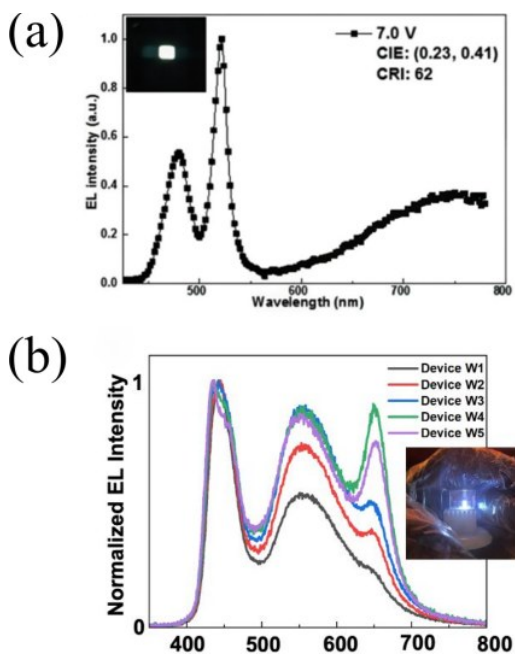


图15 (a) Cu 掺杂CQW白光LED的电致发光光谱及器件发光照片^[90]; (b)不同白光CQW-LED器件在4 V下的EL光谱及W3器件发光照片^[92]。

Fig. 15 (a) EL spectra and device photograph of white LEDs based on Cu -doped CQWs; ^[90] (b) EL spectra of different white CQW-LED devices at 4 V and photograph of the W3 device under operation. ^[92]

3.6 近红外CQW-LED研究进展

近红外发光器件在生物成像、夜视、光通信和光谱学等领域具有重要应用需求。与可见光CQW-LED相比,近红外CQW-LED的研究起步较晚,材料体系和器件工程仍处于探索阶段。近红外CQW的发射机制与可见光CQW存在本质区别。可见光CQW主要通过厚度方向的原子层数调控量子限域效应实现波长调节,而近红外发射

通常需要构建Ⅱ型能带结构异质结,使电子和空穴分别局域于不同材料区域,激子复合发生在跨界面处,产生显著Stokes位移的宽带发射。此外,过渡金属和稀土离子掺杂也被用于调控CQW在近红外波段的发光特性。

2014年, Pedetti等人首次构建了 CdSe/CdTe 核/冠Ⅱ型CQW异质结构,通过在 CdSe CQW边缘外延生长 CdTe 冠层,使电子和空穴分别局域于 CdSe 核心和 CdTe 冠层,实现激子复合发生在跨界面处,获得了最高约730 nm的近红外波段可调发射,荧光寿命可达30-860 ns,证明了Ⅱ型CQW在长波发光中的应用潜力^[50]。Sun等通过调控梯度合金壳层,制备出 CdSe/CdZnSe/CdZnS 核/壳/壳CQW,相应溶液加工LED在3 V偏压下,EL波长位于715 nm,FWHM为22 nm,其开启电压低至1.8 V,最大亮度达 6415 cd/m^2 ^[93]。要将发射真正推进至电信波段(1300、1550 nm),必须引入窄带隙组分。Prudnikau等以 CdSe 模板CQW为起点,采用阳离子交换策略合成了 CdHgSe/ZnCdS 核/壳CQW,其PL可在约1300-1500 nm间连续调节,1300 nm处PLQY达 $58 \pm 6\%$,光谱带宽可窄至102 meV。基于 $\text{ITO/ZnO/PMMA/CQWs/TFB/MoO}_3/\text{Al}$ 结构制备的LED在1300 nm处实现7.5%的EQE,开启电压仅约0.95 V,5 V下辐射亮度超过1 W/(sr m^2),并可在55%相对湿度的空气中连续工作20小时^[94]。随后, Roshan等将同一材料体系系统拓展至短波红外,器件在1280、1400与1550 nm处的EQE分别为7.5%、4.8%与3.8%,开启电压维持在0.8-0.9 V,辐射亮度0.8-1.5 W/(sr m^2),同一批CQW还可用于近红外探测(1200 nm处响应度0.24 A/W),体现了CQW在发光与探测一体化方面的独特优势^[95]。

近红外CQW-LED效率偏低的主要原因包括Ⅱ型异质界面处的非辐射复合较强,近红外发射CQW的表面钝化和壳层生长难度更大,能级匹配与载流子注入平衡仍需优化。尽管如此,近红外CQW-LED在生物成像、夜视照明和光通信等方面仍展现出重要的应用潜力,值得进一步研究。

4 无镉胶体量子阱LED

胶体量子阱LED在色纯度、亮度和光谱可调性方面具有突出优势,但当前高性能器件仍主要依赖 CdSe 系量子阱。然而,镉元素的重金属毒性问题始终是制约其大规模商业化应用的核心障

碍。近年来,随着欧盟 RoHS 指令等环保法规的日益严格,开发环境友好的无镉 CQW 发光材料已成为该领域的重要发展方向。然而,无镉 CQW,主要包括宽禁带锌硫族化物(ZnS、ZnSe、ZnTe)二维纳米片、三元化合物(CuInS_2 , CIS)量子阱以及铜硫族(CuS 等)纳米片,目前研究明显滞后,且真正实现电致发光的报道极少。

4.1 合成难点

(1)前驱体化学不成熟,“温度-活性”窗口极窄。Cd 基 CQW 的成熟建立在镉/硫族前驱体反应活性高度可调的基础之上,而无镉体系则严重受制于前驱体化学。以 ZnTe 为例,Zn 与 Te 均具有较强的金属性,在有利于稳定 magic-size nanoclusters (MSCs)和软模板、并能区分纤锌矿(100)/(110)晶面能差的温和温度(约 200°C)下,反应难以克服活化能,为此必须采用高活性碲前驱体(如 Superhydride 还原的 TBP-Te、还原 TOP-Te 所得聚碲化物、三(二甲氨基)膦碲等),在前驱体活性与反应温度之间进行精细平衡^[96]。

(2)生长路径离散、中间体复杂,厚度/形貌/相三者高度耦合。无镉体系的成核生长往往沿“量化”反应路径进行,各产物为动力学捕获的离散种群而非连续可调。ZnSe 体系即表现为 0D MSC (291 nm)、1D 纳米线(318 nm)、2D 纳米片(345 nm)、另一 2D 纳米片(380 nm)的逐级演化,温度几乎是唯一的主控旋钮,获得单一纯相纳米片的条件窗口极窄^[97]。ZnS 体系中,仅改变硫前驱体用量即可在纤锌矿 ZnS 纳米片(0.45 mmol S,厚度 1.8 ± 0.2 nm,约 5 个单原子层)与闪锌矿 ZnS 纳米棒(4.05-8.10 mmol S)之间切换,硫量进一步降低至 0.30 mmol 以下则只得不规则小颗粒,形貌与晶相同时发生转变^[98]。这种“一参数多变”的特性使无镉纳米片的厚度与形貌难以独立调控。

(3)异质结构与相纯度控制更难。Cd 基体系可依赖 CdSe/CdS、CdZnSe 等近晶格匹配异质结构实现高效钝化,而无镉体系需设计 ZnS/ZnTeSe/ZnS 这类多层壳以缓解失配^[99],或在 ZnS/CIS/ZnS 等无镉量子阱中仍受 CIS 层阳离子交换与形貌、晶相耦合调控的困扰^[100]。对铜硫族体系而言,即使采用空气稳定的前驱体在温和条件下制备 CuS 纳米片及 CuInS_2 、 Cu_2SnS_3 、 CuSbS_2 等三元纳米晶,仍常伴随多相共存与二元杂质,相纯度是另一大挑战^[101]。

4.2 光电特性

(1)宽禁带可实现短波发射。ZnSe(体相带隙约 2.7 eV)、ZnS(3.7-3.8 eV)、ZnTe(2.26 eV)可将 CQW 的发射拓展到 CdSe 系难以覆盖的蓝紫与紫外波段。ZnSe 纳米片已实现 293 nm(2.5 ML)与 347 nm(4 ML)的尖锐激子吸收,345 nm 纳米片的 PL 半高宽仅为 4.0 nm(41 meV)^[97, 102],并保留二维体系的大吸收截面、巨振子强度与大激子结合能等优势^[98]。

(2)辐射复合弱,PLQY 偏低。上述二维限域优势并未转化为高效率发光。ZnSe 纳米片用于紫外探测器时,响应度仅约 3.5 mA/W(365 nm)与 0.6 mA/W(254 nm)^[103],反映其光生载流子的分离与传输仍受严重限制。ZnTe 纳米片则完全无带边发光^[97]。整体看,无镉纳米片的荧光量子产率与辐射复合效率普遍显著低于 CdSe 基 CQW。

(3)谱宽偏大,色纯度受限。以 CIS 为阱层、ZnS 或 CdS 为势垒层的 CQW(含无镉 ZnS/CIS/ZnS 构型)可通过阱层厚度调控发光,实现近红外发射,最高 PLQY 达 37%(783 nm)^[100]。但 CIS 的发光本质上源于施主-受主对(DAP)复合,发射谱较宽、色纯度不足,且目前尚无电致发光器件报道^[101]。铜硫族二维纳米片则主要表现为光伏与光电化学响应,而非高效发光^[101]。

4.3 器件瓶颈

(1)目前仍然没有电致发光实例报道。

(2)宽禁带导致的载流子注入与传输瓶颈。ZnS、ZnSe 等无镉材料禁带宽、价带深、导带高,与常用空穴注入/传输层(如 TFB、PEDOT:PSS)及电子传输层(如 ZnMgO)的能级匹配差,空穴注入尤其困难,易造成载流子注入不平衡、启亮电压升高与效率滚降^[99]。

(3)表面缺陷与环境稳定性。无镉 CQW 比表面积大、表面陷阱密度高,非辐射复合严重,ZnTe 等材料对水氧极端敏感,成膜、封装与储存的工艺窗口远窄于 CdSe 体系。

(4)光谱连续可调性与全彩方案不足。无镉 CQW 的厚度呈离散变化,缺乏 CdSe CQW 通过合金化、梯度壳实现的连续能带工程。三元 CIS 量子阱则偏向近红外且谱宽大,难以满足显示三原色需求^[100],面向白光与全彩的无镉 CQW 方案几近空白。

EL峰位/nm	FWHM/nm	峰值EQE/%	最大亮度/cd/m ²	工作寿命	核心优化策略	参考文献
红光/深红光						
~646	26	0.63	4499	/	配体交换MPA;PVK/ZnO混合结构	[74]
658	25	8.39(空气暴露后)	1540	>5 h连续驱动(空气,无封装)	极性聚电解质P1电荷调控层	[75]
650	21	9.92	46000	T ₅₀ @100 cd/m ² ~ 560 h	CdS缓冲层;Cd _x Zn _{1-x} S梯度合金壳层	[52]
620	29	5.15	35100	T ₅₀ @100 cd/m ² ~ 3160 h	壳合金含量调控;能带对齐	[76]
650	26	19.23	23490	T ₅₀ @100 cd/m ² ~ 12.8 h	热注入壳生长;形状/组成/器件工程;平衡电荷	[27]
667	30	9.89	3853	11.9 h @100 cd/m ² (无封装)	ZnMgO ETL;电荷动力学理解;平衡注入、减少非辐射、平滑膜	[26]
651	/	18.1	19800	247 h @100 cd/m ²	液-气界面自组装;EHT短配体;ZnMgO ETL	[59]
/	/	26.9	55754	T ₉₅ @100 cd/m ² >15 000 h	自组装单层;PF8Cz抑制电子泄漏;高面内TDM	[62]
642	/	13.43	23960	60 h @100 cd/m ² (无封装)	壳工程(5 ML)+ZnMgO ETL;激子动力学控制	[77]
~621	31	22.83	111319	T ₉₅ @100 cd/m ² > 6500 h	梯度Cd _x Zn _{1-x} S壳;抑制激子淬灭;平衡注入	[54]
/	/	25.5	59620	T ₉₅ @100 cd/m ² ~ 16233 h	两相驱动平铺排列(TDFA)+Langmuir-Schaefer;90%水平偶极	[60]
671	/	17.45	9335	T ₅₀ @100 cd/m ² ~ 24.5 h	三空穴传输层CBP/TCTA/TAPC;调节电荷分布	[79]
/	/	15.1(底发射); 15.3(顶发射)	215168(底发射); 250000(顶发射)	T ₉₅ @100 cd/m ² ~ 47000 h	梯度多壳;改善载流子注入;抑制效率滚降	[80]
绿光						
560	14	5	33000	/	合金化CdSe _{1-x} S _x /CdS core/crown;PVK/ZnO	[82]
521	15	0.416	4684	/	PVP电子阻挡层;平衡电荷	[84]
521.5	15	2.16	22400	/	非堆叠NPL抑制NRET;ZnMgO ETL	[85]
528	17	9.78	~600	/	低长径比;配体处理;B4PymPm ETL平衡注入	[86]
520	12	0.016	210	20 s @210 cd/m ²	Cu掺杂;ZnO/CBP	[90]
524	~24	20.4	347683	T ₅₀ @100 cd/m ² ~ 14000 h	直接阳离子交换;HIS壳生长;合金核	[28]
蓝光						
476	34	0.06	12	/	合金化CdSe _{1-x} S _x /CdS core/crown;PVK/ZnO	[87]
461	11	1.16	46	/	小核/合金对称冠;抑制表面陷阱;B4PyPPM/LiF	[88]
460	16	1.30	150	/	DoE优化合成与器件;TPBi/PTAA	[89]
474	18	10.6	38063	T ₅₀ @100 cd/m ² ~ 195 h	接阳离子交换;HIS壳生长;合金核	[28]
其他						
绿→深红连续可调	/	/	46900	/	合金化异质结构(核/壳、核/合金壳、合金核/壳、合金核/合金壳)带隙工程	[83]
掺杂发射可调 606~761 nm	/	/	1339	/	Ag掺杂、能带工程调控激子复合	[91]
白光	/	0.09	1290	/	全溶液加工;蓝CQD+红CQW混合;界面发射	[92]
715	22	/	6415	/	调控梯度合金壳层	[93]

5 结 语

经过近二十年的发展, CQW 材料及 CQW-LED 技术取得了长足进步。从早期二维 CQW 的可控制备, 到异质结构、梯度壳层、合金化、掺杂以及表面工程等材料调控策略的不断完善, CQW-LED 的发光效率、稳定性和器件性能均得到显著提升^[104]。近年来, 红光和绿光 CQW-LED 的 EQE 已突破 20%, 蓝光器件效率突破 10%, 白光及柔性 CQW-LED 也取得了重要进展, 使 CQW-LED 逐渐由实验室研究走向实际应用, 成为新一代溶液加工发光器件的重要发展方向。

尽管如此, 目前 CQW-LED 距离产业化应用仍存在一定差距。其中, 蓝光 CQW 材料发光效率和稳定性不足仍是实现全彩显示的重要瓶颈。目前高性能 CQW 体系仍主要依赖镉基材料, 无镉 CQW 虽然近年来取得了一定进展, 但器件性能与镉基体系相比仍存在明显差距。此外, 高效率 CQW-LED 对材料质量、界面调控和薄膜均匀性提出了更高要求, 而大面积制备、器件一致性以及长期工作稳定性等问题仍有待进一步解决。

针对上述问题, 未来 CQW-LED 的发展可从材料层面、薄膜工程、器件物理和应用拓展四个层面协同推进。

(1) 材料层面。应继续发展高质量梯度/核壳异质结构, 通过能带工程和界面应变调控兼顾载流子限域与缺陷钝化。加强缺陷与配体钝化研究, 发展新型表面配体、卤素钝化和边缘钝化策略, 提高 CQW 的 PLQY 和稳定性。同时, 积极推进无镉 CQW 体系 (如 ZnSe、Cu 基等) 的开发, 在保持窄带发射和高色纯度的同时降低环境风险, 为产业化应用提供材料基础。

(2) 薄膜工程。应进一步发展 CQW 取向组装策略, 提高面内跃迁偶极矩比例和光提取效率。优化液-气界面自组装、Langmuir-Schaefer 转移、两相驱动平铺排列等方法, 实现大面积、高致密度、低粗糙度发光薄膜的均匀制备。同时, 探索喷墨打印、转印、刮涂等印刷工艺与 CQW 墨水的兼容性^[105-110], 解决大面积制备中的咖啡环、堆积和厚度不均等问题, 推动 CQW-LED 向印刷显示和柔性电子方向发展。

(3) 器件物理。应深入理解 CQW-LED 中的载流子注入、传输、复合和淬灭机制, 通过能级匹配、界面偶极调控和梯度传输层设计实现电子/空穴平衡注入。优化器件光学结构, 结合取向发光层、微腔结构和光提取层提高外耦合效率^[111,112]。针对高亮度下的效率滚降问题, 发展抑制俄歇复合、降低陷阱态密度和改善热管理的策略, 实现高效率、低滚降和长寿命的协同提升。

(4) 应用拓展。在显示方面, 应推动红、绿、蓝三基色 CQW-LED 性能均衡提升, 特别是突破蓝光器件的效率和稳定性瓶颈, 实现广色域、高亮度和长寿命全彩显示^[113,114]。在可见光通信方面, 可利用 CQW-LED 窄带发射和快速调制特性, 构建照明与通信一体化系统。在激光器方面, 应进一步降低 ASE 和激光阈值, 提高增益稳定性和器件集成度, 推动 CQW 在微型激光器、片上光源等领域的应用^[71,115]。此外, 还可拓展 CQW-LED 在柔性显示、固态照明、生物成像和量子光源等方向的应用。

相信随着 CQW 材料体系、制备工艺及器件结构设计的不断完善, CQW-LED 将在超高清显示、固态照明、柔性光电子及集成光电子等领域发挥更加重要的作用, 为下一代高性能发光器件的发展提供新的技术方案。

参 考 文 献:

- [1] HEILMEIER G H, ZANONI L A, BARTON L A. Dynamic scattering: A new electrooptic effect in certain classes of nematic liquid crystals[J]. *Proc. IEEE*, 1968, 56(7): 1162-1171.
- [2] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, *et al.* Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives[J]. *Light Sci. Appl.*, 2020, 9(1): 105.
- [3] ZOU S J, ZENG X Y, LI Y Q, *et al.* The strategies for high-performance single-emissive-layer white organic light-emitting diodes[J]. *Laser Photonics Rev.*, 2021, 15(3): 2000474.
- [4] ZOU Y, HU J H, YU M X, *et al.* High-performance narrowband pure-red OLEDs with external quantum efficiencies up to 36.1% and ultralow efficiency roll-off[J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(29): e2201442.
- [5] CHEON H J, WOO S J, BAEK S H, *et al.* Dense local triplet states and steric shielding of a multi-resonance TADF emitter enable high-performance deep-blue OLEDs [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(50): e2207416.

- [6] WANG J Y, LI N Q, CHEN Q D, *et al.* Triarylboron-cored multi-donors TADF emitter with high horizontal dipole orientation ratio achieving high performance OLEDs with near 39% external quantum efficiency and small efficiency Roll-off [J]. *Chem. Eng. J.*, 2022, 450: 137805.
- [7] TANG C W, VANSLYKE S A. Organic electroluminescent diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(12): 913-915.
- [8] BURROUGHES J H, BRADLEY D D C, BROWN A R, *et al.* Light-emitting diodes based on conjugated polymers[J]. *Nature*, 1990, 347(6293): 539-541.
- [9] ERA M, MORIMOTO S, TSUTSUI T, *et al.* Organic-inorganic heterostructure electroluminescent device using a layered perovskite semiconductor (C₆H₅C₂H₄NH₃)₂PbI₄[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 65(6): 676-678.
- [10] LEE T, KIM B J, LEE H, *et al.* Bright and stable quantum dot light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(4): e2106276.
- [11] SUN Y Z, JIANG Y B, SUN X W, *et al.* Beyond OLED: efficient quantum dot light-emitting diodes for display and lighting application [J]. *Chem. Rec.*, 2019, 19(8): 1729-1752.
- [12] ZHANG H, SU Q, CHEN S M. Quantum-dot and organic hybrid tandem light-emitting diodes with multi-functionality of full-color-tunability and white-light-emission [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 2826.
- [13] LI Z C, CHEN Z M, SHI Z S, *et al.* Charge injection engineering at organic/inorganic heterointerfaces for high-efficiency and fast-response perovskite light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1): 6441.
- [14] ZHANG L J, HU S J, GUO M, *et al.* Manipulation of charge dynamics for efficient and bright blue perovskite light-emitting diodes with chiral ligands [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(38): e2302059.
- [15] DU P P, LI J H, WANG L, *et al.* Efficient and large-area all vacuum-deposited perovskite light-emitting diodes via spatial confinement [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 4751.
- [16] ZENG X Y, TANG Y Q, CAI X Y, *et al.* Solution-processed OLEDs for printing displays[J]. *Mater. Chem. Front.*, 2023, 7(7): 1166-1196.
- [17] SUDHEENDRAN SWAYAMPBABHA S, DUBEY D K, SHAHNAWAZ, *et al.* Approaches for long lifetime organic light emitting diodes[J]. *Adv. Sci.*, 2021, 8(1): 2002254.
- [18] SHIRASAKI Y, SUPRAN G J, BAWENDI M G, *et al.* Emergence of colloidal quantum-dot light-emitting technologies [J]. *Nat. Photonics*, 2013, 7(1): 13-23.
- [19] COLVIN V L, SCHLAMP M C, ALIVISATOS A P. Light-emitting diodes made from cadmium selenide nanocrystals and a semiconducting polymer[J]. *Nature*, 1994, 370(6488): 354-357.
- [20] EFROS A L, BRUS L E. Nanocrystal quantum dots: From discovery to modern development[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(4): 6192-6210.
- [21] VAXENBURG R, RODINA A, SHABAEV A, *et al.* Nonradiative Auger recombination in semiconductor nanocrystals [J]. *Nano Lett.*, 2015, 15(3): 2092-2098.
- [22] ITHURRIA S, DUBERTRET B. Quasi 2D colloidal CdSe platelets with thicknesses controlled at the atomic level[J]. *JACS.*, 2008, 130(49): 16504-16505.
- [23] YU J, CHEN R. Optical properties and applications of two-dimensional CdSe nanoplatelets[J]. *InfoMat*, 2020, 2(5): 905-927.
- [24] LI Q, LIAN T. Area- and thickness-dependent biexciton Auger recombination in colloidal CdSe nanoplatelets: Breaking the “universal volume scaling law”[J]. *Nano Lett.*, 2017, 17(5): 3152-3158.
- [25] SHORNIKOVA E V, YAKOVLEV D R, GIPPIUS N A, *et al.* Exciton binding energy in CdSe nanoplatelets measured by one- and two-photon absorption[J]. *Nano Lett.*, 2021, 21(24): 10525-10531.
- [26] HU S, SHABANI F, LIU B, *et al.* High-performance deep red colloidal quantum well light-emitting diodes enabled by the understanding of charge dynamics[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(7): 10840-10851.
- [27] LIU B, ALTINTAS Y, WANG L, *et al.* Record high external quantum efficiency of 19.2% achieved in light-emitting diodes of colloidal quantum wells enabled by hot-injection shell growth[J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(8): 1905824.
- [28] ZHU Y, LU X, QIU J, *et al.* High-performance green and blue light-emitting diodes enabled by CdZnSe/ZnS core/shell colloidal quantum wells[J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(6): 2414631.
- [29] EKIMOV A I, ONUSHCHENKO A A. Quantum size effect in three-dimensional microscopic semiconductor crystals[J]. *JETP Lett.*, 1981, 34(6): 345-349.
- [30] 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[J]. *J. Chem. Phys.*, 1983, 79(2): 1086-1088.
- [31] PENG X, MANNA L, YANG W, *et al.* Shape control of CdSe nanocrystals[J]. *Nature*, 2000, 404(6773): 59-61.
- [32] JOO J, SON J S, KWON S G, *et al.* Low-temperature solution-phase synthesis of quantum well structured CdSe nanoribbons[J]. *JACS.*, 2006, 128(17): 5632-5633.
- [33] ITHURRIA S, TESSIER M D, MAHLER B, *et al.* Colloidal nanoplatelets with two-dimensional electronic structure[J]. *Nat. Mater.*, 2011, 10(12): 936-941.
- [34] MAHLER B, NADAL B, BOUET C, *et al.* Core/Shell colloidal semiconductor nanoplatelets [J]. *JACS.*, 2012, 134(45): 18591-18598.
- [35] SPECHT J F, SCOTT R, CORONA CASTRO M, *et al.* Size-dependent exciton substructure in CdSe nanoplatelets and its relation to photoluminescence dynamics[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(25): 12230-12241.
- [36] ACHTSTEIN A W, ANTANOVICH A, PRUDNIKAU A V, *et al.* Linear absorption in CdSe nanoplates: Thickness and lateral size dependency of the intrinsic absorption[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2015, 119(34): 20156-20161.
- [37] RIEDINGER A, OTT F D, MULE A, *et al.* How semiconductor nanoplatelets form[J]. *Nat. Mater.*, 2017, 16(7): 743-748.
- [38] CHEN Y, CHEN D, LI Z, *et al.* Symmetry-breaking for formation of rectangular CdSe two-dimensional nanocrystals in zinc-blende structure[J]. *JACS.*, 2017, 139(29): 10009-10019.
- [39] FEDIN I, TALAPIN D V. Colloidal CdSe quantum rings[J]. *JACS.*, 2016, 138(31): 9771-9774.
- [40] LI Q, LIU Q, SCHALLER R D, *et al.* Reducing the optical gain threshold in two-dimensional CdSe nanoplatelets by the giant oscillator strength transition effect[J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2019, 10(7): 1624-1632.
- [41] YU J, ZHANG C, PANG G, SUN X W, CHEN R. Effect of lateral size and surface passivation on the near-band-edge excitonic emission from quasi-two-dimensional CdSe nanoplatelets[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(44): 41821-41827.
- [42] BAI B, ZHANG C, DOU Y, *et al.* Atomically flat semiconductor nanoplatelets for light-emitting applications[J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2023, 52(1): 318-360.
- [43] GEIREGAT P, RODÁ C, TANGHE I, *et al.* Localization-limited exciton oscillator strength in colloidal CdSe nanoplatelets revealed by the optically induced Stark effect[J]. *Light Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 112.
- [44] LI M, ZHI M, ZHU H, *et al.* Ultralow-threshold multiphoton-pumped lasing from colloidal nanoplatelets in solution[J]. *Nat. Commun.*, 2015, 6(1): 8513.
- [45] SHE C, FEDIN I, DOLZHNIKOV D S, *et al.* Low-threshold stimulated emission using colloidal quantum wells[J]. *Nano Lett.*, 2014, 14(5): 2772 - 2777.
- [46] DIROLL B T. Colloidal quantum wells for optoelectronic devices[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(31): 10628-10640.
- [47] ITHURRIA S, TALAPIN D V. Colloidal atomic layer deposition (c-ALD) using self-limiting reactions at nanocrystal surface coupled to phase transfer between polar and nonpolar media[J]. *JACS.*, 2012, 134(45): 18585-18590.
- [48] ITHURRIA S, BOUSQUET G, DUBERTRET B. Continuous transition from 3D to 1D confinement observed during the formation of CdSe nanoplatelets[J]. *JACS.*, 2011, 133(9): 3070-3077.
- [49] CHRISTODOULOU S, CLIMENTE J I, PLANELLES J, *et al.* Chloride-induced thickness control in CdSe nanoplatelets [J]. *Nano Lett.*, 2018, 18(10): 6248-6254.
- [50] PEDETTI S, ITHURRIA S, HEUCLIN H, *et al.* Type-II CdSe/CdTe core/crown semiconductor nanoplatelets [J]. *JACS.*, 2014, 136(46): 16430-16438.
- [51] DURMUSOGLU E G, HU S, HERNANDEZ-MARTINEZ P L, *et al.* High External Quantum Efficiency Light-Emitting Diodes Enabled by Advanced Heterostructures of Type-II Nanoplatelets[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(8): 7636-7644.
- [52] KELESTEMUR Y, SHYNKARENKO Y, ANNI M, *et al.* Colloidal CdSe Quantum Wells with Graded Shell Composition for Low-Threshold Amplified Spontaneous Emission and Highly Efficient Electroluminescence[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(12): 13899-13909.
- [53] LIANG X, DURMUSOGLU E G, LUNINA M, *et al.* Near-Unity Emitting, Widely Tailorable, and Stable Exciton Concentrators Built from Doubly Gradient 2D Semiconductor Nanoplatelets[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(20): 19981-19992.
- [54] BA G, YANG Y, HUANG F, *et al.* Gradient Alloy Shell Enabling Colloidal Quantum Wells Light-Emitting Diodes with Efficiency Exceeding 22%[J]. *Nano Lett.*, 2024, 24(15): 4454-4461.

-
- [55] SINGH S, TOMAR R, BRINCK STEN, *et al.* Colloidal CdSe nanoplatelets, a model for surface chemistry/optoelectronic property relations in semiconductor nanocrystals[J]. *JACS.* , 2018, 140(41): 13292-13300.
 - [56] CHEN S, PETERSEN N, VALSSON O, *et al.* Understanding and controlling the colloidal stability of CdSe nanoplatelets by solvation force engineering[J]. *JACS.* , 2025, 147(39): 35347-35354.
 - [57] DELIKANLI S, AKGUL M Z, MURPHY J R, *et al.* Mn²⁺-doped CdSe/CdS core/multishell colloidal quantum wells enabling tunable carrier-dopant exchange interactions[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(12): 12473-12479.
 - [58] SHARMA M, GUNGOR K, YELTIK A, *et al.* Near-unity emitting copper-doped colloidal semiconductor quantum wells for luminescent solar concentrators[J]. *Adv. Mater.* , 2017, 29(30): 1700821.
 - [59] BARUJ H D, BOZKAYA I, CANIMKURBEY B, *et al.* Highly-directional, highly-efficient solution-processed light-emitting diodes of all-face-down oriented colloidal quantum well self-assembly[J]. *Small*, 2023, 19(29): 2206582.
 - [60] BA G, GONG Y, ZHANG M, *et al.* Horizontally oriented compact colloidal quantum well films enable efficient and stable electroluminescent diodes[J]. *Nat. Commun.* , 2025, 16(1): 10819.
 - [61] HU A, MA L, YANG X, *et al.* Colloidal II – VI nanoplatelets for optoelectronic devices: Progress and perspectives[J]. *Nano Res.* , 2024, 17(12): 10412-10425.
 - [62] ZHU Y, DENG Y, BAI P, *et al.* Highly efficient light-emitting diodes based on self-assembled colloidal quantum wells [J]. *Adv. Mater.* , 2023, 35(49): 2305382.
 - [63] GAO H, LUO D, REN Y, *et al.* The rise of colloidal quantum well light-emitting diodes[J]. *Adv. Funct. Mater.* , 2025, 35(23): 2422377.
 - [64] TAGHIPOUR N, DELIKANLI S, SHENDRE S, *et al.* Sub-single exciton optical gain threshold in colloidal semiconductor quantum wells with gradient alloy shelling[J]. *Nat. Commun.* , 2020, 11(1): 3305.
 - [65] THUNG Y T, DUAN R, DURMUSOGLU E G, *et al.* Ultrahigh quality microlasers from controlled self-assembly of ultrathin colloidal semiconductor quantum wells[J]. *Laser Photonics Rev.* , 2023, 17(7): 2200849.
 - [66] DUTTA A, SAIN S, KUMAR P, *et al.* Hybrid nanostructures of 2D CdSe nanoplatelets for high-performance photodetector using charge transfer process[J]. *ACS Appl. Nano Mater.* , 2020, 3(5): 4717-4727.
 - [67] IBRAHEM M A, WARIS M, SHABANI F, *et al.* Edge-Up Oriented Colloidal CdSe Nanoplatelets Facilitate Faster Response in Vertical Photodetectors[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2026, 18(27): 37854-37866.
 - [68] D'AMATO M, FU N, GLORIEUX Q, *et al.* Room-temperature efficient single-photon generation from CdSe/ZnS nanoplatelets[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(14): 14404-14409.
 - [69] MORSHED O, AMIN M, COGAN N M B, *et al.* Room-temperature strong coupling between CdSe nanoplatelets and a metal – DBR fabry – pérot cavity[J]. *J. Chem. Phys.* , 2024, 161(1): 014710.
 - [70] ZHAO H, YU J, WANG C, *et al.* Efficient upconverted exciton – polariton lasing via three-photon absorption in colloidal quantum wells[J]. *Nano Lett.* , 2025, 25(34): 13056-13062.
 - [71] ZHAO H, WANG C, ZHOU M, *et al.* Room-temperature exciton-polariton lasing in semiconductor colloidal quantum wells[J]. *Appl. Phys. Rev.* , 2025, 12(3): 031415.
 - [72] VU CAM N, RAHMAN M A, AKHIL S, *et al.* Tunable multiresonant microcavity exciton-polaritons in colloidal quantum wells[J]. *Nano Lett.* , 2025, 25(15): 6109-6116.
 - [73] FANG W, LIU B. Approaches to Enhance the Stability of Colloidal Quantum Well Light-Emitting Diodes[J]. *Recent Patents on Nanotechnology*, 2025, 19(3): 313-318.
 - [74] CHEN Z, NADAL B, MAHLER B, *et al.* Quasi-2D colloidal semiconductor nanoplatelets for narrow electroluminescence [J]. *Adv. Funct. Mater.* , 2014, 24(3): 295-302.
 - [75] GIOVANELLA U, PASINI M, LORENZON M, *et al.* Efficient solution-processed nanoplatelet-based light-emitting diodes with high operational stability in air[J]. *Nano Lett.* , 2018, 18(6): 3441-3448.
 - [76] QU J, RASTOGI P, GRÉBOVAL C, *et al.* Nanoplatelet-based light-emitting diode and its use in all-nanocrystal LiFi-like communication[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(19): 22058-22065.
 - [77] HU S, XIANG W, LIU B, *et al.* Exciton control enables high-performance colloidal quantum well light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Rev.* , 2024, 11(2): 021428.
 - [78] ZENG Y, YU W, LIU Y, *et al.* Improved efficiency and stability in pure-red CdSe nanoplatelet LEDs enabled by gradient alloyed CdSeS/CdZnS crown/shell[J]. *Adv. Mater.* , 2025, 37(5): 2415569.
 - [79] FANG W, WANG C, LUO D, *et al.* Regulation of charge distribution for highly efficient colloidal quantum-well light-

- emitting diodes with deep-red emissions[J]. *InfoMat*, 2026, 8(3): e70099.
- [80] QIU J, ZHU Y, BAI P, *et al.* Low Efficiency Roll-Off and High Current Efficiency Light-Emitting Diode Enabled by Graded CdSe/ZnSe/ZnS Colloidal Quantum Wells[J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(13): e21504.
- [81] FAN F, KANJANABOOS P, SARAVANAPAVANANTHAM M, *et al.* Colloidal CdSe_{1-x}S_x Nanoplatelets with Narrow and Continuously-Tunable Electroluminescence[J]. *Nano Lett.*, 2015, 15(7): 4611-4615.
- [82] ZHANG F, WANG S, WANG L, *et al.* Super color purity green quantum dot light-emitting diodes fabricated by using CdSe/CdS nanoplatelets[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(24): 12182-12188.
- [83] ALTINTAS Y, LIU B, HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ P L, *et al.* Spectrally wide-range-tunable, efficient, and bright colloidal light-emitting diodes of quasi-2D nanoplatelets enabled by engineered alloyed heterostructures[J]. *Chem. Mater.*, 2020, 32(18): 7874-7883.
- [84] WEN Z, ZHANG C, ZHOU Z, *et al.* Ultrapure green light-emitting diodes based on CdSe/CdS core/crown nanoplatelets[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2020, 56(1): 3200106.
- [85] WEN Z, LIU P, MA J, *et al.* High-performance ultrapure green CdSe/CdS core/crown nanoplatelet light-emitting diodes by suppressing nonradiative energy transfer[J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2021, 7(7): 2000965.
- [86] BAI P, HU A, DENG Y, *et al.* CdSe/CdSeS nanoplatelet light-emitting diodes with ultrapure green color and high external quantum efficiency[J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2022, 13(8): 9051-9057.
- [87] İZMİR M, SHARMA A, SHENDRE S, *et al.* Blue-Emitting CdSe Nanoplatelets Enabled by Sulfur-Alloyed Heterostructures for Light-Emitting Diodes with Low Turn-on Voltage[J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2022, 5(1): 1367-1376.
- [88] HU A, BAI P, ZHU Y, *et al.* Controlled Core/Crown Growth Enables Blue-Emitting Colloidal Nanoplatelets with Efficient and Pure Photoluminescence[J]. *Small*, 2022, 18(44): e2204120.
- [89] CIRIGNANO M, ROSHAN H, FARININI E, *et al.* Blue CdSe/CdS core/crown nanoplatelet light-emitting diodes obtained via a design-of-experiments approach[J]. *Nanoscale*, 2025, 17(1): 304-313.
- [90] LIU B, SHARMA M, YU J, *et al.* Light-emitting diodes with Cu-doped colloidal quantum wells: From ultrapure green, tunable dual-emission to white light[J]. *Small*, 2019, 15(38): 1901983.
- [91] LIU B, SHARMA M, YU J, *et al.* Management of electroluminescence from silver-doped colloidal quantum well light-emitting diodes[J]. *Cell Rep. Phys. Sci.*, 2022, 3(5): 100860.
- [92] YANG S, LI H, WANG C, *et al.* High-quality all-solution-processed white light-emitting diodes based on colloidal quantum wells[J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2025, 46(10): 1821-1824.
- [93] SUN Y, ZENG Y, WANG Q, *et al.* Efficient near-infrared CdSe/CdZnSe/CdZnS core/shell/shell nanoplatelet light-emitting diodes by controlling gradient alloy shells[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2026, 18(35): 47961-47970.
- [94] PRUDNIKAU A, ROSHAN H, PAULUS F, *et al.* Efficient near-infrared light-emitting diodes based on CdHgSe nanoplatelets[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(8): 2310067.
- [95] ROSHAN H, PRUDNIKAU A, DAI J, *et al.* Short-wave infrared optoelectronics with colloidal CdHgSe/ZnCdS core/shell nanoplatelets[J]. *ACS Photonics*, 2025, 12(1): 40-47.
- [96] WANG F, ZHANG M, CHEN W, *et al.* Atomically thin heavy-metal-free ZnTe nanoplatelets formed from magic-size nanoclusters[J]. *Nanoscale Adv.*, 2020, 2(8): 3316-3322.
- [97] CUNNINGHAM P D, COROPCEANU I, MULLOY K, *et al.* Quantized reaction pathways for solution synthesis of colloidal ZnSe nanostructures: a connection between clusters, nanowires, and two-dimensional nanoplatelets[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(4): 3847-3857.
- [98] DAI L, LESYUK R, KARPULEVICH A, *et al.* From wurtzite nanoplatelets to zinc blende nanorods: simultaneous control of shape and phase in ultrathin ZnS nanocrystals[J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2019, 10(14): 3828-3835.
- [99] 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.
- [100] QIN Y, SONG X, ZHANG H, *et al.* Colloidal CuInS₂ quantum well nanostructures with II-VI semiconductors as barrier layers[J]. *Chem. Sci.*, 2025, 16(22): 10051-10060.
- [101] KARMAKAR G, SHAH A Y, KUMAR M, *et al.* Binuclear Cu-pyrazinylthiolate molecular precursor as a gateway to binary CuS and ternary CuInS₂, Cu₂SnS₃, and CuSbS₂ nanoparticles[J]. *Crystal Growth & Design*, 2025, 25(1): 158-170.
- [102] BASALAEVA L S, GRAFOVA V P, DUDA T A, *et al.* Phonons of atomically thin ZnSe nanoplatelets grown by the

- colloidal method[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2023, 127(27): 13112-13119.
- [103] WANG A, SHAN X, XIANG C, *et al.* Heavy-metal-free colloidal semiconductor ZnSe nanoplatelets for UV photodetectors[J]. *Mater. Today Chem.*, 2025, 44: 102603.
- [104] 刘佰全, 高桦宇, 胡素娟, 等. 胶体量子阱发光二极管的研究进展[J]. 物理化学学报, 2022, 38(12): 2204052.
LIU B Q, GAO H Y, HU S J, *et al.* Progress in the Development of Colloidal Quantum Well Light-Emitting Diodes[J]. *Acta Phys. -Chim. Sin.* 2022, 38(12): 2204052.
- [105] 谢潇婷, 林海燕, 赵宇森, 等. 基于纳米压印和热调控转印的高分辨率量子点发光二极管[J]. 发光学报, 2026, 47(5): 846-853.
XIE X T, LIN H Y, ZHAO Y S, *et al.* High-resolution Quantum Dot Light-emitting Diodes Based on Nanoimprint Lithography and Thermal-regulated Transfer Printing[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2026, 47(05): 846-853.
- [106] 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, 2026, 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(06): 1120-1128.
- [107] 刘辰, 魏昌庭, 罗鑫, 等. 喷墨打印量子点电致发光显示关键材料与技术的前世与今生[J]. 发光学报, 2026, 45(9): 1410-1430.
LIU C, WEI C T, LUO X, *et al.* Historical Evolution and Current Status of Key Materials and Technologies in Inkjet-printed Quantum Dot Electroluminescent Displays[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(09): 1410-1430.
- [108] 王士攀, 姜毅斌, 张凯旋, 等. 喷墨印刷有机电致发光显示材料与器件进展[J]. 发光学报, 2026, 44(1): 101-114.
WANG S P, JIANG Y, BZHANG K X, *et al.* Progress in Inkjet Printing Organic Electroluminescent Display Materials and Devices[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(01): 101-114.
- [109] 刘欣, 叶芸, 唐谦, 等. 有机发光二极管显示屏的喷墨打印研究与展望[J]. 中国光学, 2020, 13(2): 217-228.
LIU X, YE Y, TANG Q, *et al.* Progress of OLEDs prepared by inkjet printing[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 217-228.
- 110
黄凌祥, 常赛豪, 满忠伟, 等. 胶体量子点直接光刻技术的发展与应用[J]. 液晶与显示, 2026, 41(1): 163-170.
HUANG L X, CHANG S H, MAN Z W, *et al.* Development and applications of direct photolithography of colloidal quantum dots[J]. *Chin J Liq Cryst Dis*, 2026, 41(1): 163-170.
- [111] Zhang F, Li G, Zhou P, *et al.* High Efficiency Ultra-Narrow Emission Quantum Dot Light-Emitting Diodes Enabled by Microcavity[J]. *Small*, 2024, 20(52): 2405704.
- [112] Jha R K, Kim H, Cho S-Y. Light outcoupling strategies for quantum dot light-emitting diodes[J]. *Nanoscale*, 2026, 18(6): 2916-2941.
- [113] Wang R, Xiang H, Ji B, *et al.* Wide-Color-Gamut, Eco-Friendly Full-Color QLED Displays Enabled by SEL-WQLEDs With Interference Color Filters[J]. *Small*, 2026, 22(28): e14145.
- [114] 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/OL]. 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 Dis*, 2021, 36(1): 176-186.
- [115] Wang Y, Duan R, Wei G, *et al.* In-Plane Tailoring of Colloidal Quantum Well Enables Continuous-Wave Polariton Lasing[J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2026-09-30: e71852.



刘羽凡(2005-),女,河北邯郸人,本科生,中山大学微电子科学与工程专业本科在读
E-mail:liuyf289@mail2.sysu.edu.cn



刘佰全(1987-),男,湖南邵阳人,博士,副教授,2016年于华南理工大学获得博士学位,主要从事半导体发光二极管的器件物理、工艺、集成与应用研究。
E-mail:liubq33@mail.sysu.edu.cn