

长程有序助力钙钛矿 QLED 高性能化

吕昕怿, 相恒阳, 曾海波

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

摘要: 钙钛矿量子点在显示应用方面具有独特优势, 然而在高亮度下其长期稳定性仍是一个巨大的挑战。本文聚焦于钙钛矿量子点及其发光薄膜形貌的调控进展, 阐述了长程有序的钙钛矿量子点薄膜对其电致发光性能的影响, 并展望了其在提升钙钛矿量子点电致发光稳定性方面的发展前景。

关键词: 钙钛矿量子点; 长程有序; 配体交换; 显示材料; 量子点发光二极管

中图分类号: TQ174 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2025)01-0111-02

Long-range Ordered Films Boost Efficient Perovskite Quantum Dot Light-emitting Devices

LÜ Xinyi, XIANG Hengyang, ZENG Haibo

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

Abstract: Perovskite quantum dots have unique advantages in display. However, their long-term stability at high brightness is still a huge challenge. Therefore, this article focuses on the progress of the regulation of perovskite quantum dots and their luminescent film morphology, explains the influence of long-range ordered perovskite quantum dot films on their electroluminescent properties, and looks forward to the development prospects in improving the electroluminescent stability of perovskite quantum dots.

Key words: perovskite quantum dot; long-range ordering; ligand exchange; display material; quantum dot light-emitting diode

新型显示是国家战略性新兴产业之一, 也是中日韩和欧美等国相互竞争的产业高地, 其全球市场规模高达千亿美元。量子点在实现高色纯度、宽色域、低成本宏量制备等方面具备显著优势, 成为新一代显示用发光材料的研究热点, 并于 2023 年获得了诺贝尔化学奖^[1-3]。然而, 在围绕量子点的显示应用中, 量子点及其显示器件的效率和稳定性仍然是巨大挑战^[4]。追求效率往往以牺牲稳定性为代价, 而提高稳定性可能会降低发光效率, 凸显了设备优化

所需的微妙平衡^[5]。

在这个背景下, 钙钛矿量子点成为了备受期待的竞争者, 不到十年的时间, 钙钛矿相关材料和器件的外量子效率(EQE)已经从 0.1%发展到超过 20%^[6-8]。而且其在高清显示所需的色彩纯度方面显露出独特的优势, 具有超过 140% NTSC 标准色域范围的钙钛矿量子点, 比传统产品更出色, 目前只有钙钛矿量子点发射器可以满足国际电信联盟推出的 Rec. 2020 标准, 显示了它们进一步改变显示技

收稿日期: 2024-08-12; 收到修改稿日期: 2024-09-02; 网络出版日期: 2024-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3606502); 国家自然科学基金(52131304, 62004101, 62261160392)

National Key R&D Program of China (2022YFB3606502); National Natural Science Foundation of China (52131304, 62004101, 62261160392)

作者简介: 吕昕怿(1999-), 女, 硕士研究生. E-mail: lvxy652@njust.edu.cn

LÜ Xinyi (1999-), female, Master candidate. E-mail: lvxy652@njust.edu.cn

通信作者: 曾海波, 教授. E-mail: zeng.haibo@njust.edu.cn; 相恒阳, 副教授. E-mail: xiang.hengyang@njust.edu.cn

ZENG Haibo, professor. E-mail: zeng.haibo@njust.edu.cn;

XIANG Hengyang, associate professor. E-mail: xiang.hengyang@njust.edu.cn

术的潜力^[9-10]。然而,从实验室到实际应用的转变并非没有障碍。

钙钛矿量子点显示器件面临的最重要挑战之一是在苛刻的工作条件下保持其稳定性。尽管出色的色彩纯度和广泛的色域使它们成为下一代显示器的理想选择,但对其长期性能和可靠性的担忧仍然存在^[11]。特别是在不影响稳定性的情况下实现高亮度水平仍然是研究和行业领域的关注焦点^[12-13]。

2024 年苏州大学王亚坤和廖良生教授团队^[14]从器件稳定性机理研究出发,深入剖析影响钙钛矿量子点发光器件稳定性的因素,提出了一种量子点薄膜序构化调控的新理念,并实现了在器件稳定性方面提升 100 倍的重大突破。该团队开发了一种双配体协同策略,通过富碘剂进行阴离子交换和缺陷态钝化,同时利用原位生成强酸的化学反应剂溶解小尺寸量子点,并有效去除导电率较低的配体,制备了长程有序、致密、均匀和无缺陷的薄膜(图 1)。

得益于这种长程有序的量子点薄膜,量子点的导电性及稳定性得到了显著提升。基于这一新型策略,该团队成功制备了兼具高发光效率和高稳定性的量子点发光器件。所制备的钙钛矿量子点发光器件在电压为 2.8 V、亮度为 $1000 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 的工作条件下, EQE 超过了 20%, 同时工作寿命相对提高了 100 多倍,为同类器件的最高值(图 2)。

综上所述,该工作不仅从理论上提供了一种可控制备长程有序钙钛矿量子点薄膜的新方法,而且从技术应用层面首次实现了导电性-高效率-高稳定性的有效统一,取得了关键技术突破,为量子点显示器件商业化应用提供了新的策略。

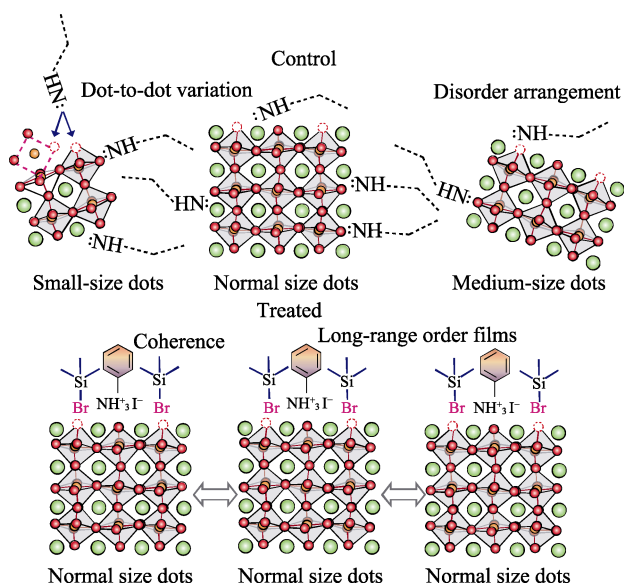


图 1 长程有序策略示意图^[14]

Fig. 1 Long-range order control strategy^[14]

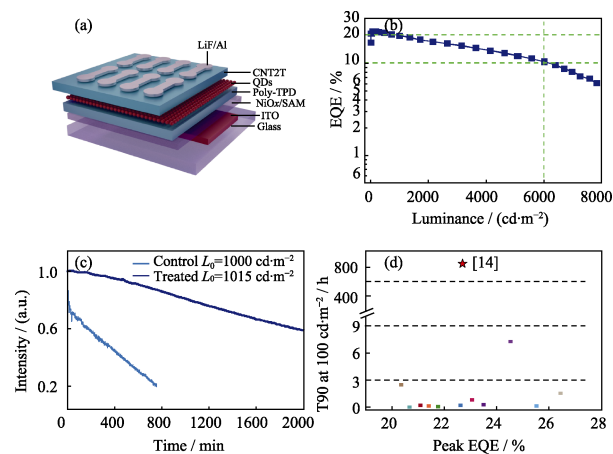


图 2 长程有序钙钛矿量子点器件性能及稳定性^[14]

Fig. 2 LED performance and operating stability^[14]

(a) Device structure and materials used in each layer; (b) EQE-luminance curve of the LEDs; (c) Operating stability of control and treated LEDs; (d) Reported peak EQEs and calculated T90 of red perovskite LEDs

参考文献:

- [1] DE ARQUER F P G, TALAPIN D V, KLIMOV V I, *et al.* Semiconductor quantum dots: technological progress and future challenges. *Science*, 2021, **373**(6555): eaaz8541.
- [2] PROTESESCU L, YAKUNIN S, BODNARCHUK M I, *et al.* Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX_3 , X = Cl, Br, and I): novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut. *Nano Letters*, 2015, **15**(6): 3692.
- [3] JIANG J, ZHANG S, SHAN Q, *et al.* High-color-rendition white QLEDs by balancing red, green and blue centre in eco-friendly ZnCuGaS:In@ZnS quantum dots. *Advanced Materials*, 2024, **36**(21): 2304772.
- [4] 王益飞, 相恒阳, 周怡辉, 等. 基于共价有机聚合物空穴注入层的钙钛矿发光二极管. *发光学报*, 2022, **43**(10): 1574.
- [5] ZHOU Y, FANG T, LIU G, *et al.* Perovskite anion exchange: a microdynamics model and a polar adsorption strategy for precise control of luminescence color. *Advanced Functional Materials*, 2021, **31**(51): 2106871.
- [6] SHAN Q, DONG Y, XIANG H, *et al.* Perovskite quantum dots for the next-generation displays: progress and prospect. *Advanced Functional Materials*, 2024, **34**(36): 2401284.
- [7] FENG Y F, LI H J, ZHU M Y, *et al.* Nucleophilic reaction-enabled chloride modification on CsPbI_3 quantum dots for pure red light-emitting diodes with efficiency exceeding 26%. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, **63**(11): e202318777.
- [8] NONG Y Y, YAO J S, LI J Q, *et al.* Boosting external quantum efficiency of blue perovskite QLEDs exceeding 23% by trifluoroacetate passivation and mixed hole transportation design. *Advanced Materials*, 2024, **36**(27): 2402325.
- [9] YANG S X, LI J, WANG J F, *et al.* Lowering surface steric hindrance of strongly-confined perovskite quantum dots enables efficient pure-red light-emitting diodes. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **488**: 150799.
- [10] WANG R, XIANG H, LI Y, *et al.* Minimizing energy barrier in intermediate connection layer for monolithic tandem WPeLEDs with wide color gamut. *Advanced Functional Materials*, 2023, **33**(21): 2215189.
- [11] WANG R, XIANG H Y, ZENG H B. Carrier balanced distribution regulation of multi-emissive centers in tandem PeLEDs. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, **38**(9): 1062.
- [12] KIM J, ROH J, PARK M, *et al.* Recent advances and challenges of colloidal quantum dot light-emitting diodes for display applications. *Advanced Materials*, 2024, **36**(20): 2212220.
- [13] CHEN X, LIN X, ZHOU L, *et al.* Blue light-emitting diodes based on colloidal quantum dots with reduced surface-bulk coupling. *Nature Communications*, 2023, **14**(1): 284.
- [14] WANG Y K, WAN H Y, TEEALE S, *et al.* Long-range order enabled stability in quantum dot light-emitting diodes. *Nature*, 2024, **629**: 586.