

文章编号: 1000-7032(2026)08-1370-16

核/壳结构钙钛矿纳米晶及其发光二极管研究进展

王继浩¹, 孔令媚^{1,2*}, 牟南历¹, 王 林^{1*}, 张晓宇^{3*}, 杨绪勇^{1,4*}

(1. 上海大学 新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072;

2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804;

3. 吉林大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022;

4. 上海大学 上海市集成电路与新型显示材料工程研究中心, 上海 201899)

摘要: 金属卤化物钙钛矿发光二极管具有色纯度高、色域广以及制备工艺流程简易等优势, 近年来, 其性能发展迅速, 器件外量子效率已突破 30%。其中, 核/壳结构的钙钛矿纳米晶凭借其提升的材料稳定性以及可调的半导体特性, 极大地推进了钙钛矿发光二极管的效率与器件寿命进展。本综述对核/壳钙钛矿纳米晶进行了系统分类, 并重点阐述壳层对钙钛矿光电性质的作用机理。在此基础上, 进一步总结了壳层包覆策略对钙钛矿材料和器件性能方面的影响, 以及相关体系的研究进展。最后, 探讨了壳层包覆策略实现高效率、高稳定性钙钛矿发光二极管所面临的困难与挑战, 并对未来发展方向进行了展望。

关 键 词: 钙钛矿; 核/壳结构; 纳米晶; 发光二极管

中图分类号: O482.31; TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260090

CSTR: 32170.14.CJL.20260090

Research Progress on Core/Shell Structured Perovskite
Nanocrystals and Their Light-emitting DiodesWANG Jihao¹, KONG Lingmei^{1,2*}, MOU Nanli¹, WANG Lin^{1*}, ZHANG Xiaoyu^{3*}, YANG Xuyong^{1,4*}

(1. Key Laboratory of Advanced Display and System Applications of Ministry of Education,

Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

4. Shanghai Engineering Research Center for Integrated Circuits and Advanced Display Materials,
Shanghai University, Shanghai 201899, China)

* Corresponding Authors, E-mail: klmmm@tongji.edu.cn; lin_wang@shu.edu.cn; zhangxiaoyu@jlu.edu.cn; yangxy@shu.edu.cn

Abstract: Metal halide perovskite light-emitting diodes have advantages such as high color purity, wide color gamut, and facile solution processability. In recent years, their performance has developed rapidly, and the external quantum efficiency of the devices has exceeded 30%. “Core/shell” perovskite nanocrystals are particularly effective in improving luminescent properties and stability because of their unique architecture and customized semiconducting properties. A major focus in this review is the classification of “core/shell” perovskite nanocrystals and the mechanism by which the shell affects the perovskite. This review then summarizes how shell coating strategies improve the performance of perovskite materials and devices, along with recent progress in this area. We also discuss the difficulties and challenges of shell-coating technology for fulfilling efficient and stable perovskite light-emitting diodes, and offer an outlook on future development directions.

Keywords: perovskites; core/shell structures; nanocrystals; light-emitting diodes

收稿日期: 2026-03-19; 修订日期: 2026-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(T2525035, 12504493, 12404479)

Supported by National Natural Science Foundation of China(12504493, T2525035, 12404479)

1 引言

金属卤化物钙钛矿因其带隙可调谐性^[1-2]、高缺陷容忍度^[3]以及窄带发射^[4-5]等卓越的光电特性,引起研究人员广泛的研究兴趣,并有力推动了新型半导体光电器件的发展^[6-7]。特别地,钙钛矿作为发光材料,其发光二极管(Light-emitting diodes, LEDs)应用表现出优异性能,外量子效率(External quantum efficiency, EQE)在数年内已突破30%^[7-10]。钙钛矿发光二极管(Perovskite light-emitting diodes, PeLEDs)的快速发展为实现新一代低成本、高性能发光器件提供了重要机遇,并在显示、照明及光通信等领域展现出广阔的应用前景^[11-15]。然而,其商业化进程仍受到器件稳定性的制约^[16-17]。究其本质,归因于钙钛矿材料离子键合的软晶格特性及其较低的晶格形成能^[18]。当暴露于水、紫外光、氧气及高温等环境下时,钙钛矿易发生相变或严重降解。此外,在持续光照或电场作用下产生的离子迁移会进一步加剧晶体结构的破坏^[19]。同时,由于表面配体的高动态结合特性,胶体钙钛矿纳米晶(Nanocrystals, NCs)同样面临结构与化学稳定性差的挑战^[20]。因此,发展有效的材料设计与结构调控策略,以提升钙钛矿体系在复杂环境中的稳定性,成为当前研究的核心课题之一。

在传统无机半导体量子点(Quantum dots, QDs, 如磷化铟或硒化镉)体系中,核/壳结构被广泛用于实现高效辐射复合、抑制非辐射俄歇复合和闪烁效应,并保护量子点核免受外界环境侵蚀^[21-22]。尽管钙钛矿具有高缺陷容忍度,无需壳层钝化即可实现接近100%的光致发光量子产率(Photoluminescence quantum yield, PLQY)^[23],但其本征稳定性较差,易受环境因素影响而降解。因此,在钙钛矿表面构建稳定的壳层结构以形成有效的物理与化学屏障,被认为是提升材料稳定性的有效途径^[24]。对此,研究者们提出了多种策略,例如将钙钛矿纳米晶限域于金属有机框架(Metal-organic framework, MOF)中、嵌入有机或无机基质中,或构建原位形成的核/壳结构等。此外,在典型的I型(type-I)能带排列的核/壳结构中,通过在胶体钙钛矿纳米晶体表面外延生长一层带隙更宽、结构稳定的壳层材料,不仅能够显著提升材料稳定性,还能够实现对载流子的有效限域,从而提升辐射复合效率。这些结构设计从广义上均可归类为钙钛矿纳米晶核/壳型结构,通过界面工程与结

构调控显著改善材料的稳定性与光电性能,使其成为一种极具前景的新一代发光材料。

区别于现有综述针对核/壳结构的钙钛矿发光材料在各类光电器件应用中的讨论^[25-27],本文主要聚焦面向发光二极管应用的钙钛矿核/壳材料的合成策略、光电性质及其器件性能进行综述。重点讨论不同类型核/壳纳米晶的构筑方法及其作用机制,并进一步阐述如何通过调控核/壳结构提升钙钛矿材料的质量和LED器件性能。最后,总结了当前核/壳结构在壳层材料自身稳定性不足、高温生长条件限制以及壳层材料的环境毒性等方面面临的关键挑战,并对未来通过开发环境友好型壳层材料与优化包覆策略,实现高质量核/壳结构可控制备及其在更多光电器件中的应用前景进行了展望。

2 核/壳结构钙钛矿纳米晶类型

2.1 聚合物包覆的钙钛矿纳米晶

聚合物因其超疏水特性及柔软、灵活的长链结构,成为一类适宜包覆钙钛矿纳米晶的壳层材料^[28-29]。迄今为止,多种聚合物已被开发用作壳层材料,例如笼型聚倍半硅氧烷、2,5-咪喃二酮与1-十八烯的聚合物和聚甲基丙烯酸甲酯等^[30-32]。通常,通过简单的溶液聚合反应,使一种或多种聚合物在钙钛矿纳米晶表面生长,形成钙钛矿/聚合物核/壳结构^[33-34]。图1(a)展示了其合成过程:将聚合物与钙钛矿前驱体(或已合成的钙钛矿纳米晶)混合,在钙钛矿结晶过程中,聚合物包覆于纳米晶表面形成单核或多核的钙钛矿/聚合物核/壳结构。以MAPbI₃/聚苯乙烯-*b*-聚(2-乙烯基吡啶)二嵌段共聚物为例^[35],透射电子显微镜(Transmission electron microscope, TEM)图像(图1(a)右)中,典型的核/壳结构清晰可辨——由于核与壳之间电子密度的微小差异,核心区域通常比壳层区域颜色更深。通过这种方式,生成的聚合物作为保护层用以封装钙钛矿纳米晶,从而维持核/壳复合结构的稳定性及其光物理性质。事实上,疏水性质的聚合物能与钙钛矿纳米晶表面的配体结合,形成强相互作用,这确保了稳固的核/壳结构能够有效阻隔水和氧气渗透,进而保护钙钛矿免受环境侵蚀。除了作为物理屏障,多齿聚合物还能通过减少表面悬挂键来提升钙钛矿核的发光性能。例如,星形聚甲基丙烯酸甲酯-聚甲基丙烯酸二甲氨基乙酯嵌段共聚物(PMMA-*b*-PDMAEMA(S-MD)),该

材料含有多个路易斯碱位点,包括羰基和叔胺基团,可有效钝化缺陷(如未配位的 Pb^{2+} 和碘空位)^[36]。需要注意的是,长链聚合物壳层会降低材料的导

电性。因此,聚合物包覆的钙钛矿核/壳结构更适合用于对导电性要求不高的场景,如作为荧光粉用于照明领域。

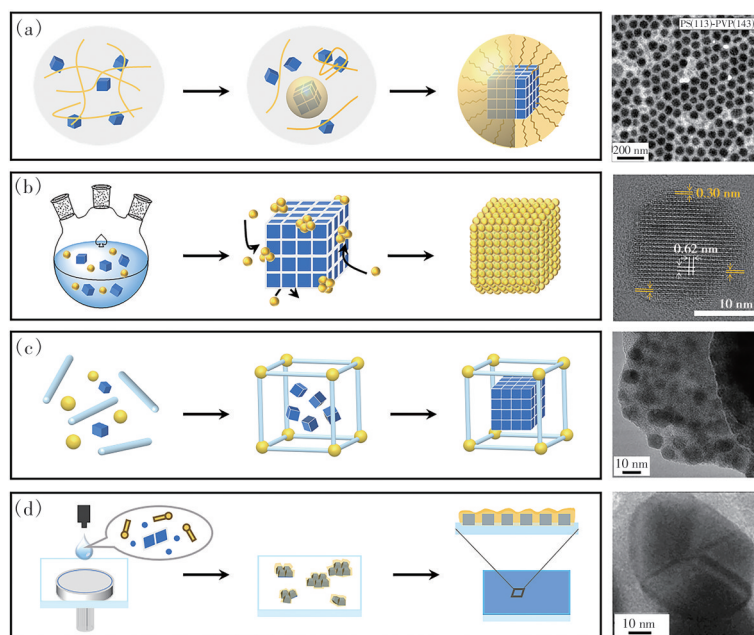


图1 核/壳结构钙钛矿纳米晶的制备方法。(a)聚合物包覆法及对应的代表性TEM照片^[35];(b)半导体壳层外延生长法及对应的代表性TEM照片^[41];(c)在MOF中的原位限域生长法及对应的代表性TEM照片^[58];(d)原位制备核/壳结构法及对应的代表性TEM照片^[66]

Fig.1 Preparation methods of core/shell structured perovskite nanocrystals. (a) Polymer coating method and corresponding representative TEM images^[35]. (b) Semiconductor shell epitaxial growth method and corresponding representative TEM images^[41]. (c) The method of *in situ* confined growth in MOF and corresponding representative TEM images^[58]. (d) *In situ* core/shell structure method and corresponding representative TEM images^[66]

2.2 外延生长半导体壳层的钙钛矿纳米晶

受传统核/壳结构的镉基QDs启发,研究人员发展了多种二元半导体壳层材料(如硫化镉CdS、硒化锌ZnSe等II-VI族^[37-39]和IV-VI族^[40-41]半导体),并通过外延生长的方式对钙钛矿纳米晶进行壳层包覆。如图1(b)所示,注入的壳层前驱体(黄色球体)在溶液中动态结合到钙钛矿纳米晶的表面,并最终生长形成半导体壳层。以CsPbI₃/PbS体系为例,其核/壳结构可在高分辨率TEM图像(图1(b)右)中清晰辨识:核心区域的晶面间距为0.62 nm,与立方相CsPbI₃的(100)面相吻合;而壳层区域的晶面间距为0.30 nm,与PbS的(200)面完美匹配^[41]。

在壳层材料的选择上,与传统无机核/壳量子点体系类似,钙钛矿核与壳层材料之间的晶格失配度(f)通常需要控制在15%以内,以避免在核/壳界面处产生严重的晶格应变和高缺陷密度(图2),从而维持钙钛矿材料优异的光致发光效率^[42-43]。常见用于制备钙钛矿核/壳结构的发光层(a_c)和壳

层(a_s)材料以及对应的晶格参数在表1中列出,晶格失配度可通过公式 $f = (a_s - a_c)/a_c$ 计算。此外,还需要对核/壳结构的能带排列进行合理设计,以实现载流子的有效注入与电荷传输平衡^[47]。针对具有不同电学特性的钙钛矿,精心设计的壳层有望调节钙钛矿核内的电荷失衡问题。值得注意的是,传统共价键半导体的形成能较高,键合具有高度的方向性和饱和性,倾向于在钙钛矿表面的高能位点(如缺陷、棱角)优先成核,并通过岛状生长模式形成非连续的壳层^[48]。这种岛状生长模式容易形成异质结结构,导致壳层覆盖率低,使大量钙钛矿表面缺陷(如卤素空位)暴露,无法得到有效钝化。而卤素空位作为非辐射复合中心,其局域电子态位于钙钛矿纳米晶的带隙内,形成缺陷能级。当载流子扩散至空位附近时,易被缺陷捕获,随后通过晶格振动释放能量,最终导致PLQY显著下降。此外,不完整壳层还会在界面引入大量悬空键和位错,无法有效阻隔氧气、湿气

及离子迁移,最终导致这类核/壳结构的钙钛矿热稳定性和化学稳定性提升有限^[49]。

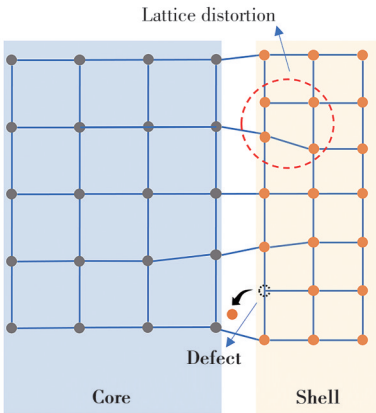


图2 核/壳结构晶格失配示意图

Fig.2 Schematic diagram of lattice mismatch in core/shell perovskite structure

表 1 钙钛矿纳米晶和常见壳层材料及晶格参数

Tab.1 Summary of lattice parameters of perovskites and common shell materials

	化学式	晶系	晶格常数/nm
钙钛矿	CsPbCl ₃	立方	$a=0.568^{[42]}$
	CsPbBr ₃	立方	$a=0.595^{[42]}$
	CsPbI ₃	立方	$a=0.628^{[42]}$
	Cs ₄ PbBr ₆	六方	$a=1.373, c=1.7321^{[44]}$
壳层	ZnS	立方	$a=0.5401^{[45]}$
	ZnSe	立方	$a=0.567^{[45]}$
	PbS	立方	$a=0.5936^{[46]}$
	CdS	六方	$a=0.4138, c=0.6718^{[45]}$

除传统半导体外,钙钛矿及其衍生物也构成了另一类重要的壳层材料。由于其离子特性,钙钛矿可通过卤素阴离子或A位阳离子交换反应形成钙钛矿核/钙钛矿壳结构^[50-51]。在该过程中,界面处可以自发形成一个成分渐变的合金中间层,以缓解核与壳之间的晶格失配。此外,一些具有更高结构稳定性的低维钙钛矿衍生材料,如二维CsPb₂Br₅和零维Cs₄PbBr₆/Rb₄PbBr₆,也被开发用于包覆三维钙钛矿,从而在一定程度上提升其发光性能与稳定性^[52-55]。

2.3 主客体核/壳结构钙钛矿纳米晶

将钙钛矿晶体嵌入到基质材料中构建主客体结构,这在广义上可以认为是一种核/壳结构,其中基质材料作为壳层。基质材料可以是聚合物等多孔材料,例如MOF和聚合物,甚至也可以是钙钛矿多晶薄膜。其中,MOF拥有大的比表面积和孔隙体积,可作为容纳钙钛矿的主体,从而有效阻止钙钛矿晶体的团聚。此外,作为一种具有动态

和柔性骨架的杂化材料,其在提升钙钛矿稳定性方面具有显著优势。首先,MOF材料的多孔骨架能有效构筑物理屏障,抑制水分、氧气等的渗透^[56]。其次,MOF自身良好的化学稳定性可保护内部的钙钛矿免受外界刺激而分解。第三,MOF可以通过提供有序的成核位点,促进钙钛矿晶体的均匀生长,从而获得缺陷更少的高质量薄膜。最后,MOF骨架中含有丰富的官能团(如—COOH、—NH₂、—SH等),能与钙钛矿中的Pb²⁺或卤素离子形成强配位或静电相互作用,从而有效抑制离子迁移^[57]。图1(c)展示了将钙钛矿纳米晶嵌入MOF孔隙中的一种制备策略:在室温条件下,将MOF的初始前驱体(黄色球体:金属离子;蓝色短棒:有机配体)与钙钛矿前驱体混合。在这种两步法过程中,钙钛矿前驱体首先被限域在MOF的孔隙内,随后通过添加成核溶剂触发钙钛矿的成核过程。右侧的TEM图像展示了典型的MAPbBr₃-Pb-MOF结构的形貌,可以清晰地观察到主体MAPbBr₃纳米晶被嵌入到客体Pb-MOF基质中^[58]。研究表明,MOF基质能够保护钙钛矿免受紫外辐射和极性溶剂的破坏^[59]。

钙钛矿多晶薄膜也被开发为一种新型基质来嵌入钙钛矿纳米晶^[60-61]。为了在钙钛矿基质中稳定构建钙钛矿纳米晶,通常需要对其进行表面处理,以提高其对极性前驱体溶剂的耐受性。此外,在这种全钙钛矿主客体结构中,需要满足两个关键设计原则:其一,客体应具有比主体更宽的带隙,以实现I型能带对齐,从而将载流子有效限域在发光主体内部;其二,客体与主体之间应具有较小的晶格失配,以降低界面缺陷密度。为实现宽带隙客体,常用的策略包括B位阳离子掺杂/合金化和混合卤素。例如,具有强量子限域效应的CsPbBr₃纳米晶带隙大于2.55 eV,可实现蓝光发射。为了在主-客体体系中实现I型能带对齐,可以通过混合超过30%的氯离子将CsPbBr₃基钙钛矿的带隙调至2.6 eV以上^[62]。然而,高氯含量会导致混合卤素钙钛矿发生卤素偏析。此外,混合卤素钙钛矿基质与CsPbBr₃纳米晶之间的晶格失配,使得这些材料在基于[PbBr₆]⁴⁻八面体在CsPbBr₃纳米晶上外延生长时,易发生不均匀结晶^[63]。相比之下,通过改变客体中的阳离子来调控其带隙,可在拓宽带隙的同时避免引入晶格畸变。例如,由于Sr²⁺与Pb²⁺具有相近的离子半径,引入Sr²⁺可基本保持

晶格结构稳定,同时铟合金化钙钛矿的带隙可超过 2.6 eV,为实现高效天蓝色发光二极管提供了可行途径^[64]。

2.4 原位形成核/壳结构钙钛矿纳米晶

原位制备具有核/壳结构的钙钛矿薄膜,省去了钙钛矿纳米晶复杂的合成步骤。通常,实现这种结构有两种途径:一步法和两步法。在一步法中,将小分子或如 1,3,5-三(1-苯基-1H-苯并咪唑-2-基)苯这样的大分子半导体材料引入钙钛矿前驱体溶液中,使其在钙钛矿结晶后覆盖于晶界处形成壳层(图 1(d))。对于两步法,则需要一个后处理过程:溶液中的小分子渗入固态钙钛矿薄膜,锚定在具有缺陷的表面,从而形成壳层。例如,通过苄基膦酸后处理,可在原位构建纳米级核/壳结构钙钛矿(尺寸为 (10 ± 2) nm),其三维钙钛矿核被壳层包围的结构可在 TEM 图像中清晰地观察到^[65]。膦酸和含铵配体已被证实能够渗透钙钛矿薄膜,因此两者均有益于壳层对带电缺陷位点的钝化,以上两种方法均可改善钙钛矿的发光特性。此外,还可通过过量掺杂异质 A 位阳离子先改变表面化学性质,然后利用聚丙烯酸进行横向表面包覆,原位获得了尺寸为数十纳米的立方体核/壳结构纳米晶。其 TEM 图像(图 1(d)右)显示,二维

相在晶界附近形成壳层^[66]。与在预合成的纳米晶上进行壳层包覆相比,原位合成方法的另一显著优势在于避免了长链表面配体的使用,从而克服了胶体不稳定性及电荷传输性能损失的问题。因此,这种原位合成方法为构建核/壳结构钙钛矿纳米晶提供了一条新途径。

3 壳层对钙钛矿纳米晶的作用

显然,构建核/壳结构的钙钛矿纳米晶能够将钙钛矿与其周围环境隔离开,抑制外界环境对其晶体结构的影响,从而提升发光体的稳定性。更重要的是,这种表面壳层结构设计还会对材料的光物理性质产生独特且积极的影响。

首先,在钙钛矿纳米晶进行壳层生长之前,需精心选择壳层材料以设计核/壳结构,从而实现有利的能带对齐。在 I 型核/壳结构中,壳层材料具有比核更宽的带隙,因此核材料的导带底和价带顶均位于壳层的带隙之内,导致电子和空穴被限域在核内(图 3(a))。核材料的带隙决定了该异质结构的带隙能量,而壳层则起到钝化表面缺陷和限制电子和空穴的作用,从而提升纳米晶的整体光学性能和稳定性^[67]。II 型结构则具有交错的能带排列,其中核材料的价带顶和导带底的能

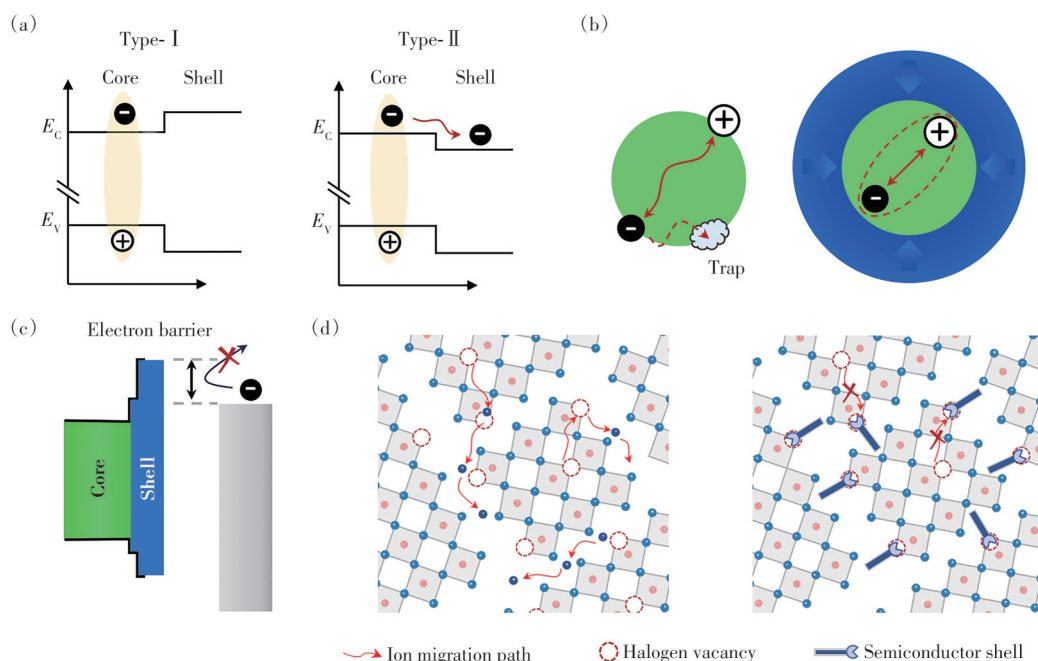


图 3 壳层对钙钛矿纳米晶的作用机理示意图。(a) I 型和 II 型核壳结构能带排布示意图;(b)壳层钝化钙钛矿晶界缺陷示意图;(c)核/壳结构调控载流子注入势垒示意图;(d)壳层包覆抑制离子迁移示意图

Fig.3 Schematic of the mechanisms of "core/shell" nanostructures. (a)The energy band alignment of Type I and Type II core-shell structures. (b)Schematic diagram of perovskite grain boundary defect passivation by a shell layer. (c)Modulation of carrier injection barrier through core-shell structure. (d)Schematic diagram of shell coating for suppressing ion migration

量均高于或低于壳层材料的相应能带边缘,电子或空穴可以从核内离域。II型结构的带隙由一种半导体的导带底与另一种半导体的价带顶之间的能量差决定。在该类结构中,载流子在空间上被分离,从而在光伏和光催化等应用中具有明显优势^[68]。该核/壳能带排列也被报道应用于自旋发光二极管(Spin light-emitting diodes, Spin-LEDs)。自旋注入层(通常为手性材料)负责产生特定自旋取向的载流子,得益于II型能带结构,这些自旋极化载流子能够被高效地转移至非手性且具有高辐射复合效率的发光层中复合发光。这种空间上的功能分离,一方面规避了在同一材料中同时实现高自旋极化率和高发光效率的挑战;另一方面,有效抑制了非自旋极化的载流子复合和界面非辐射损失,从而确保自旋信息被高效地转化为圆偏振光输出^[69]。

其次,一个合适的壳层能够确保载流子有效注入钙钛矿的同时抑制其损耗,这有助于实现发光层中载流子注入与传输的平衡,从而消除薄膜光致发光与发光二极管电致发光效率之间的差异。与有机及传统无机发光材料相比,钙钛矿单晶虽然具有高出数个数量级的载流子迁移率^[70]和扩散长度^[71],但早期由微米级大晶粒组成的钙钛矿薄膜由于存在大量孔洞或缺陷,载流子极易发生泄露或被非辐射复合中心捕获,导致器件难以产生高效的电致发光。为了解决这一问题,研究者们通过组分优化^[72]、添加剂限制晶体生长^[73]、反溶剂处理^[74]以及界面工程^[75]等策略,将钙钛矿晶粒尺寸从微米级减小至数百甚至几十纳米。晶粒细化有效改善了薄膜致密性和平整度,抑制了漏电流,使得器件的电致发光效率得到显著提升。然而,如图3(b)所示,随着晶粒尺寸减小,晶界迅速增多,这些晶界处的悬挂键和缺陷成为新的非辐射复合中心,导致载流子在穿越晶界时发生严重损耗,使得器件电致发光效率受限^[76]。尽管多种表面缺陷钝化策略能够在一定程度上改善载流子在晶界处的输运,但其物理机制在于将缺陷态能级移至带边能级附近,这可能导致载流子在钙钛矿层中更倾向于以自由载流子形式存在,而非形成激子复合发光^[77]。构建合适的壳层结构,有望在钝化缺陷的同时,使载流子以变程跳跃或隧穿方式在钙钛矿晶粒间传输,即通过改变壳层组分和厚度来调控钙钛矿薄膜的载流子迁移率,进

而实现发光二极管中载流子注入与传输平衡,最大化钙钛矿发光器件的电致发光性能。

第三,壳层能够改变钙钛矿的能带结构,调节载流子在核/壳结构中的分布,在促进激子形成和辐射复合的同时,有效避免俄歇复合。值得注意的是,不同组分的钙钛矿往往表现出本征掺杂倾向。例如,铯基钙钛矿通常表现为n型^[78],这表明其电子与空穴浓度并不相等。另一方面,当钙钛矿晶体尺寸减小至纳米级时,由量子限域效应导致的激子结合能增大,载流子被限域在有限空间内使得浓度急剧升高,这往往也伴随着俄歇复合速率的加快。一个合适的壳层能有效应对上述问题。它不仅能促进钙钛矿晶体内的激子形成,还能通过将核内过剩的载流子以可控方式离域至壳层中(图3(c)),从而降低核内的局域载流子浓度,抑制俄歇复合。这将平衡激子的形成速率与其辐射复合速率。这种平衡不仅有助于提高发光体中激子浓度的极限,还有助于在高载流子浓度下维持优异的发光效率,最终使发光二极管兼具高亮度与高效率。

最后,核/壳结构的构建能够有效抑制钙钛矿中的离子迁移,这也是导致钙钛矿发光二极管器件性能衰退的重要来源之一。钙钛矿因其离子特性而具有较低的形成能。因此,光、电场及其他环境因素极易引发离子重新分布,从而改变其晶体结构与光电性质。尤其是在发光二极管中,外加电场会驱使离子在晶界处高速迁移,导致器件内载流子失衡及性能衰减。在极端情况下,离子迁移甚至可能引起晶体结构坍塌,造成发光二极管永久性失效。当采用混合卤素钙钛矿作为发光层时,卤素离子的重新分布会改变发光体的禁带宽度,导致发射光谱展宽和峰位移动。尽管目前通过离子掺杂和维度调控等策略可以提升钙钛矿的形成能,并在一定程度上提高离子迁移的活化能,从而在一定程度上锚定离子,但无法完全阻止其迁移。相比之下,采用具有高形成能的半导体材料构建壳层结构,则能够在兼顾发光层导电性的同时,锚定钙钛矿晶体表面的离子,并切断离子迁移通道(图3(d))。例如,对PbS壳层包覆前后CsPbI₃所制备的LED器件测试电流密度在正向和反向电压扫描下的特性曲线,结果显示壳层包覆后的钙钛矿器件表现出较小的回滞现象,这表明PbS壳层有助于抑制离子迁移^[44]。另外,对放置75天后

的 Cs_2SnBr_6 壳层包覆和未包覆的 CsPbBr_3 钙钛矿进行 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 测试, 后者的特征峰发生分裂, 而前者由于壳层结构抑制了晶体中的离子迁移, 仍保持完整的相结构^[43]。因此, 得益于发光材料的稳定性提升, 钙钛矿发光二极管的寿命显著延长。

4 壳层包覆实现高质量钙钛矿纳米晶

发光材料本身的性质决定了 LED 器件的最终性能, 如何制备高质量的钙钛矿材料是一个核心课题。本节将概述壳层包覆策略对钙钛矿光电性质和稳定性两方面的重要性, 并列举相关研究说明。

4.1 光电性质

在核/壳结构中, 壳层的引入能够通过调控表面缺陷态和电子结构显著影响钙钛矿核的发光性能, 如光致发光量子产率、光致发光寿命等关键光学参数。尽管这种调控作用在很大程度上取决于核/壳界面类型及其界面处的相互作用, 但普遍认为壳层能够有效钝化钙钛矿纳米结构表面的缺陷位点。由于钙钛矿材料表面通常存在未配位离子或结构不完整的晶格位点, 这些表面缺陷态作为光生载流子的陷阱并提供非辐射复合位点, 从而降低材料光致发光强度和效率^[25]。因此, 壳层的引入通常能够降低缺陷密度, 并提高辐射复合概率, 从而提升材料的发光性能。此外, 壳层或基质材料还能够通过调控体系中的载流子密度及其空间分布, 有效抑制俄歇复合。在高载流子密度条件下, 钙钛矿纳米晶中易发生俄歇复合等非辐射复合过程, 这些过程会显著降低发光效率。通过壳层包覆或将发光体嵌入基质中, 可分散载流子的空间分布并降低局部载流子密度, 从而减弱载流子间的相互作用, 最终提升材料的发光性能。

核/壳结构对发光性能的提升已在多个实验体系中得到验证。例如, 通过在 FAPbBr_3 纳米晶和全无机 CsPbBr_3 壳层中间生长合金化的 $\text{FA}_x\text{Cs}_{1-x}\text{PbBr}_3$ 中间层, 成功解决了核与壳之间的晶格失配问题。进一步优化合成条件与纳米晶组分后, 所制备的 $\text{FAPbBr}_3/\text{CsPbBr}_3$ 核/壳纳米晶显著降低了表面缺陷密度, 并实现了高达 93% 的稳定光致发光量子产率^[79]。将钙钛矿纳米晶从溶液态转化为固态薄膜时, 其发光效率往往会因纳米晶团聚和量子限

域效应减弱而显著下降, 这限制了其在光电器件中的实际应用。针对这一问题, Quan 等^[80]通过将绿色钙钛矿纳米晶嵌入坚固且空气稳定的 Cs_4PbBr_6 基质中, 成功实现了薄膜状态下高达 90% 的 PLQY (图 4(a))。研究表明, 纳米晶与基质之间的良好晶格匹配有助于改善表面钝化效果, 同时空间限域效应增强了纳米晶的辐射复合速率。此外, 将纳米晶分散于基质中有效防止了团聚现象, 这解释了其固态状态下高 PLQY 的原因。

除了无机壳层与基质包覆策略外, 有机配体壳层同样能够有效钝化钙钛矿纳米晶的表面缺陷。Wang 等^[81]设计并合成了两种有机树突状胺基配体 (G1 和 G2), 并将其直接用于原位合成 CsPbX_3 纳米晶。得益于 π 共轭和分子间相互作用形成的刚性配体壳层, 所得钙钛矿纳米晶的稳定性显著提高。时间分辨光致发光测量显示, 油酸配体稳定的绿色钙钛矿纳米晶、G1 纳米晶和 G2 纳米晶在甲苯中的荧光寿命分别为 40 ns、48.3 ns 和 64.7 ns (图 4(b)), 这表明树突状配体有效钝化了表面缺陷, 从而减少了钙钛矿纳米晶中的非辐射复合路径。

此外, 通过阳离子交换在钙钛矿薄膜中原位构建准核/壳结构同样可有效钝化缺陷。Jang 等^[82]引入了 R-/S-1-(2-(萘基)乙胺) (R-/S-1-(2-(naphthyl) ethylamine), R-/S-NEA) 替代传统的 R-/S-甲基苄胺提升了核/壳纳米晶的发光效率。系统的定量缺陷分析表明 (图 4(c)), 未包覆 NEA 壳层和包覆 NEA 壳层的 CsPbBr_3 量子点薄膜的 V_{TFL} 值分别为 2.85 V 和 1.54 V, 相应的缺陷态密度分别为 $2.23 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 和 $1.19 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 缺陷态密度降低了 46%, 表明 NEA 二维阳离子成功钝化了 CsPbBr_3 核的缺陷。得益于缺陷钝化, 具有 R-/S-NEA 壳层的核/壳量子点展现了高达 78% 的 PLQY。

除了上述策略外, 通过对钙钛矿量子点表面进行离子配体处理, 也可实现其在极性溶剂中的稳定分散, 进而构建量子点嵌入基质的复合结构。Liu 等^[83]通过引入由富含碘的阴离子壳层及溶剂化的阳离子壳层构成的体系, 实现对钙钛矿量子点的静电稳定化分散。经表面处理后, 带电离子配体与残留有机配体的协同作用使量子点能够耐受极性溶剂环境, 在基质生长过程中仍能保持其光电性质。在量子点嵌入基质的固态薄膜中, 量子点表面受到基质的保护。此外, 电荷部分离域

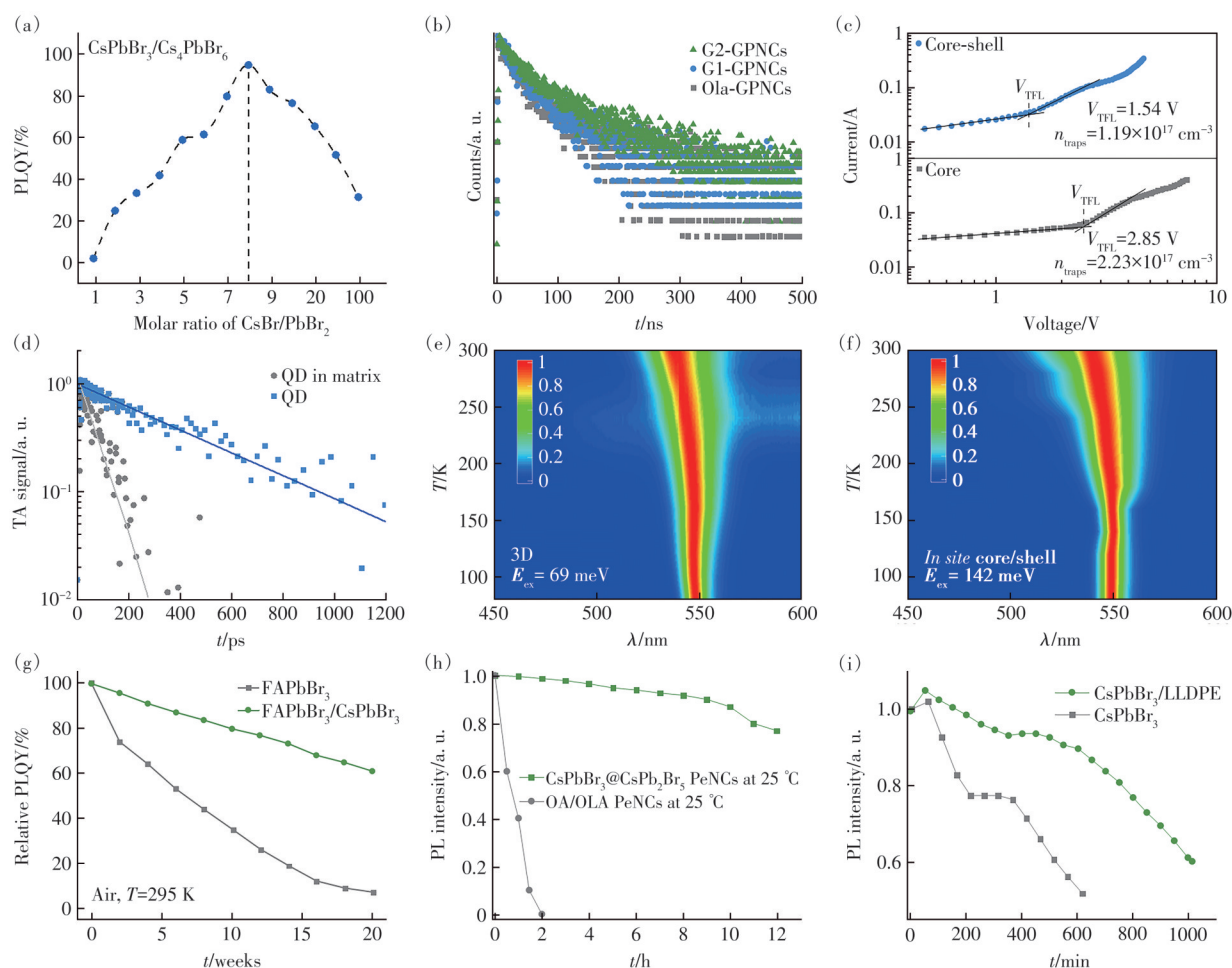


图4 壳层包覆对钙钛矿材料光电性质和稳定性的影响。(a)CsPbBr₃纳米晶嵌入Cs₄PbBr₆基质后的PLQY^[80];(b)CsPbX₃纳米晶经过有机配体壳层G1、G2包覆后在甲苯中的荧光寿命^[81];(c)基于对照组和富铯Cs_xFA_{1-x}PbI₃准壳层结构纳米晶制备的单空穴器件的电流-电压曲线^[82];(d)从瞬态吸收中提取的纯量子点和嵌入基质的量子点的双激子动力学^[83];(e)三维钙钛矿和(f)原位核/壳钙钛矿纳米晶薄膜的温度相关PL光谱的二维彩图^[66];(g)空气中FAPbBr₃纳米晶经过CsPbBr₃包壳前后的时间相关PLQY^[79];(h)CsPbBr₃@CsPb₂Br₅钙钛矿纳米晶和OA/OLA钙钛矿纳米晶在甲苯和水的混合物中的时间相关PL强度^[89];(i)CsPbBr₃/LLDPE纳米晶和纯CsPbBr₃纳米晶在365 nm紫外照射下的时间相关PL强度归一化图^[90]

Fig.4 Influence of shell coating on the photoelectric properties and stability of perovskite materials. (a) PLQYs of CsPbBr₃ NCs embedded in Cs₄PbBr₆ matrix^[80]. (b) Time-resolved PL spectra of CsPbX₃ NCs coated with organic shells in toluene^[81]. (c) Current-voltage curves of hole-only devices based on control and Cs-rich Cs_xFA_{1-x}PbI₃ core/shell perovskite nanocrystals^[82]. (d) Bi-exciton kinetics of QD and QD in matrix samples extracted from transient absorption^[83]. Two-dimensional map of temperature-dependent PL spectra of (e) 3D and (f) *in situ* core/shell perovskite film^[66]. (g) Time-dependent PLQYs of FAPbBr₃ NCs in the air before and after being coated with CsPbBr₃^[79]. (h) Time-dependent PL intensity of CsPbBr₃@CsPb₂Br₅ NCs and OA/OLA NCs in a toluene/water mixture^[89]. (i) Normalized time-dependent PL intensity of CsPbBr₃/LLDPE NCs and pure CsPbBr₃ NCs under UV light irradiation^[90]

至基质中,减小了俄歇过程中涉及的初态与末态之间的波函数重叠,从而显著抑制了双激子俄歇过程,与纯量子点样品相比,该复合结构中双激子俄歇慢约10倍(图4(d))。

上述核/壳策略虽能有效提升钙钛矿的发光性能,但多数研究仍基于预先合成的纳米晶体系,在实际器件制备过程中,通常需要经历溶液组装

与成膜过程,而这一过程往往会导致纳米晶团聚并引起发光性能下降。相比之下,三维多晶钙钛矿薄膜具有良好的电荷传输特性和简便的制备工艺,但因晶粒尺寸较大(>100 nm)导致的弱限域效应以及晶界处的非辐射复合缺陷,其发光效率较低^[84-85]。Kim等通过使三维钙钛矿薄膜与苄基膦酸(Benzyl-phosphonic acid, BPA)反应,原位构

建了核/壳结构的纳米晶,其中BPA作为有机壳层材料。该策略利用BPA小分子对三维钙钛矿晶粒的渗透与分割作用,使晶粒尺寸显著减小至约10 nm,激子结合能提高2.4倍。同时,BPA的膦酸基团通过与未配位的 Pb^{2+} 形成共价键,有效钝化了缺陷位点。Jiang等^[66]通过过量掺杂异质A位阳离子并诱导自发表面偏析,改变了钙钛矿晶体的表面化学性质。随后,利用聚丙烯酸横向终止了带正电离子壳层的钙钛矿的原位晶体生长,获得了原位制备的尺寸均一、直径小于30 nm核/壳结构纳米晶,激子结合能是3D钙钛矿薄膜的两倍左右(图4(e)、(f))。因此,原位核/壳结构可在保持钙钛矿良好电荷传输性能的前提下,实现低缺陷态密度和提高的辐射复合效率。

4.2 稳定性

目前,多种组分的钙钛矿纳米晶在室温下已实现超过90%的PLQY,这推动了PeLED性能的显著提升。尽管取得了这些重要进展,但一些制约PeLED实际应用的关键问题仍有待解决。首先,器件在工作情况下,钙钛矿材料普遍表现出发光效率随温度升高而显著下降的现象,即所谓的热致发光猝灭^[86-87]。该现象源于热激活的载流子俘获与声子辅助的非辐射跃迁的共同作用^[79]。此外,钙钛矿的软晶格特性导致其结构稳定性差,在潮湿环境中易分解,从而限制了其光电应用。最后,光致分解是钙钛矿降解的另一重要原因,特别是紫外光能够引发钙钛矿中有机阳离子的解离,而空气中的氧气则会进一步加速这一光降解过程^[17]。

通过对钙钛矿纳米晶进行壳层包覆是提高其稳定性的有效途径。Liu等^[88]通过氟化物后处理使得纳米晶表面形成了富氟层,从而有效抑制 CsPbBr_3 纳米晶的热猝灭效应。经处理的纳米晶在高达370 K的温度下仍保持90%的稳定PL强度,且在连续热循环中未出现明显热退化现象。Zhang等^[79]开发出一种用于合成单分散核/壳结构钙钛矿纳米晶的策略,该结构通过在 FAPbBr_3 纳米晶表面外延生长全无机 CsPbBr_3 壳层实现。 CsPbBr_3 壳层的存在赋予了 FAPbBr_3 纳米晶更优异的环境稳定性,在环境条件下长期储存70天后,其光致发光量子产率仍能保持初始值的约80%(图4(g))。此外,Jin等^[89]利用4-十二烷基苯磺酸配体诱导钙钛矿纳米晶发生表面重构,使其

逐渐转变为 $\text{CsPbBr}_3@\text{CsPb}_2\text{Br}_5$ 核壳结构。该结构使钙钛矿纳米晶在注水环境下12 h后仍能保持80%的光致发光强度(图4(h)),相比以油酸(Oleic acid, OA)和油酸酰胺(Oleamide, OLA)为表面壳层的样品表现出显著提升的水稳定性。进一步地,Dong等^[90]基于压力效应与空间位阻效应,通过原位热注入法合成了钙钛矿/线性低密度聚乙烯(LLDPE)核/壳结构的钙钛矿纳米晶,实现了高PLQY与高稳定性的协同提升。该纳米晶在环境条件下老化166天后,仍保持高达92.5%的PLQY;同时,在365 nm紫外光照射1 000 min后,其PL强度仍维持初始值的61.74%(图4(i)),性能优于常规 CsPbBr_3 纳米晶。

5 高性能核/壳结构钙钛矿LED

对钙钛矿纳米晶进行合适的壳层包覆不仅改善薄膜的光电性能和稳定性,也必将助力实现高效稳定的PeLED。本节将概述核/壳结构对能带结构、光谱稳定性、载流子平衡、辐射复合速率、效率滚降和稳定性等方面的调控作用。

5.1 能带对齐

于LED而言,钙钛矿材料的能带结构是决定器件工作状态的重要因素。通过选择不同的壳层材料对核材料进行包覆,可以调控体系能带结构,形成I型或II型核/壳结构,并可针对特定应用进行定制设计。其中,I型核/壳结构因其具有更宽带隙的壳层材料能够将载流子限域在核内,从而增强载流子的辐射复合效率。因此,这类结构被认为是适用于照明、显示等领域的理想发光材料。

研究人员发展了多种策略以实现I型能带对齐。一种常见思路是通过阳离子合金化筛选出能增大钙钛矿带隙的组分,并选择与 Pb^{2+} 离子半径高度匹配的 Sr^{2+} 以最小化晶格失配。所得量子点-基质组合在紫外光电子能谱中显示出I型能带对齐(图5(a))^[64]。此外,还有研究通过引入油酸铷作为反应试剂,同时触发相变和阳离子交换过程,从而获得具有I型能带对齐的杂化 $\text{CsPbBr}_3/\text{Rb}_4\text{PbBr}_6$ 纳米晶^[91]。除阳离子调控外,阴离子交换法同样可用于构建I型结构。例如,采用阴离子交换法制备的 $\text{CsPbBr}_x\text{Cl}_{3-x}$ 量子点,其富Br的核和富Cl的壳层之间形成了天然的I型能带对齐^[92]。

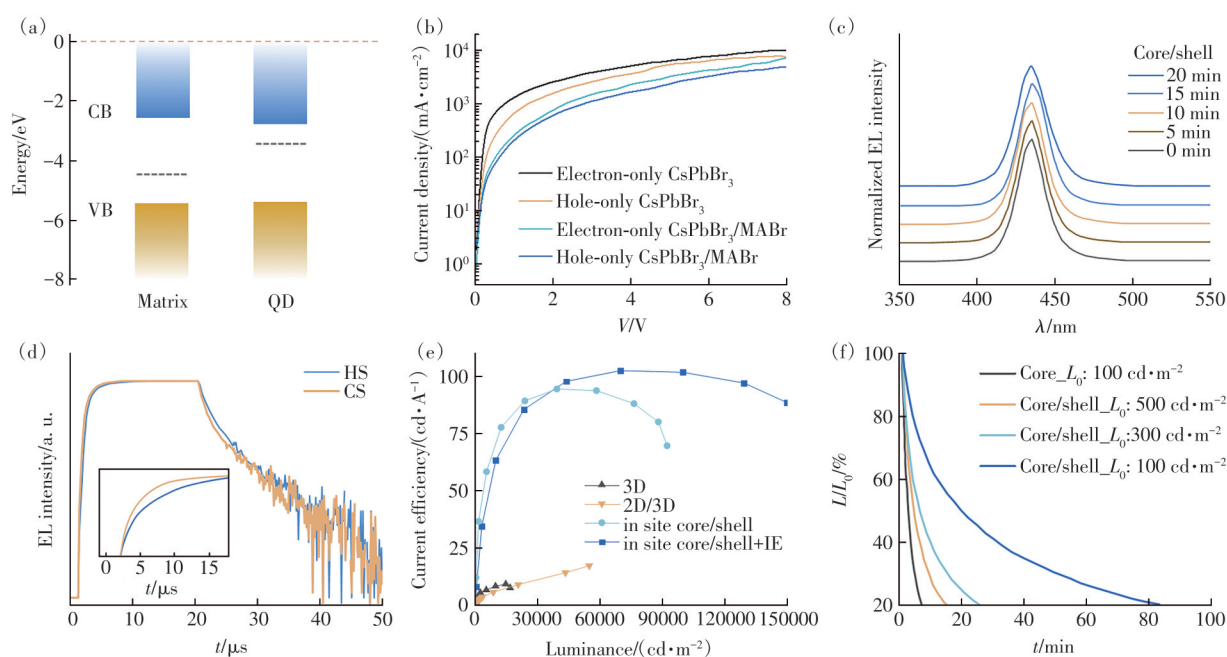


图5 核/壳结构对钙钛矿LED的光学性能、稳定性的作用。(a)量子点和基质间“Ⅰ型”能带排列示意图^[64];(b)单电子和单空穴器件的电流-电压曲线^[47];(c)核/壳结构钙钛矿发光二极管在稳定性测试期间的电致发光光谱^[95];(d)基于HS-纳米晶和CS-纳米晶的LED的TREL曲线^[92];(e)PeLED的电流效率-亮度曲线^[66];(f)PeLED的稳定性测试^[95]

Fig.5 Effects of “core-shell” structures on optical properties and operational stability of PeLED. (a) Band diagram showing a type-Ⅰ alignment between the matrix and QD^[64]. (b) Current density-voltage curves of electron-only and hole-only devices^[47]. (c) Electroluminescence spectra of the core/shell PeLEDs during the stability test^[95]. (d) TREL curves of the HS-NCs and CS-NCs LEDs^[92]. (e) Current efficiency-luminance curves of PeLEDs^[66]. (f) Operational lifetime of PeLEDs^[95]

5.2 载流子平衡

电荷平衡决定了钙钛矿发光二极管的效率和稳定性,它直接关系到器件能否在低电压下实现高亮度发光并抑制效率滚降^[93]。当电子与空穴的注入速率不匹配时,多余的载流子会在发光层积累,一方面会诱发严重的俄歇复合,导致效率骤降,另一方面可能加剧离子迁移,加速器件老化^[94]。核壳结构通过精准的能带工程,为实现电荷平衡提供了有效调控途径:壳层材料可以作为一种载流子注入的“缓冲层”或“阻挡层”,通过选择具有合适能级位置的壳层材料,能够同时调节电子和空穴的注入势垒,使二者达到动态平衡^[47]。

基于上述思路,研究者构建了基于准核/壳(CsPbBr₃/MABr)结构的钙钛矿,成功将高PLQY的薄膜与具备平衡的电荷注入的器件相结合。该结构底部由钙钛矿多晶组成,覆盖一层钝化晶界的缺陷钝化层;顶部则用于表面钝化,同时平衡注入发光层中的电荷,最终将器件效率最大化至20.3%^[47]。器件优异的发光性能不仅源于其高光致发光量子产率,还归因于改善的电荷注入平衡。单载流子器件的J-V特性曲线表明(图5(b)),MABr覆盖层有助于

减少电子注入,从而优化电荷平衡。在CsPbBr₃钙钛矿器件中,电子注入占主导地位;而在准核/壳钙钛矿器件中,则实现了更为平衡的电荷注入。

5.3 光谱稳定

光谱是否稳定是衡量钙钛矿发光二极管能否走向实际应用的核心指标之一,它直接决定了器件在长时间运行下能否维持纯净、恒定的发光颜色。对于显示和照明应用而言,光谱的峰位移动或展宽会直接损害器件的可靠性和商业化价值。核壳结构通过物理隔绝和化学钝化的双重机制,在提升光谱稳定性方面发挥着关键作用:一方面,坚固的壳层能够有效抑制电场和焦耳热诱发的卤素离子迁移,防止混合卤素钙钛矿发生相分离,从而避免因组分变化引起的发射峰位偏移;另一方面,壳层对表面缺陷的钝化减少了由缺陷导致的非辐射复合和局域热效应,从而抑制了光谱展宽。

基于上述机制,研究人员发展了多种核/壳结构以提升钙钛矿的光谱稳定性。Hong等^[95]引入活化硫前驱体硫-十八烯溶液,与油酸反应生成还原性硫化物,进而成功外延生长出晶格失配度仅为8.5%的核/壳结构CsPb(Br_{1-x}Cl_x)₃/ZnS。在该

过程中, ZnS 首先在 $\text{CsPb}(\text{Br}_{1-x}\text{Cl}_x)_3$ 纳米晶表面经阴离子钝化后外延形成一层薄锌基层, 随后进一步生长形成致密稳定的 ZnS 壳层。所得核/壳结构纳米晶在 451 nm 处表现出窄带宽的深蓝光发射。基于该纳米晶构建的 PeLED 不仅保持了高色纯度的深蓝色发光, 且在长时间工作过程中电致发光峰位保持不变(图 5(c))。高角度环形暗场扫描透射电子显微镜图像及能量色散 X 射线光谱面分布图表明, ZnS 壳层显著抑制了金属离子和卤素离子的迁移, 这是带隙未发生改变的内在原因。除传统半导体壳层外, MOF 也可作为稳定钙钛矿的有效基质。通过将 CsX 引入含有 Pb 金属节点的 MOF 薄膜中, 可以在 MOF 基质内原位形成尺寸为 10~20 nm 的 CsPbX_3 纳米晶^[59]。基于该复合结构的 LED 器件在驱动电压从 4~8 V 变化时, 电致发光强度增加但峰位未发生明显移动。飞行时间二次离子质谱深度剖析显示, 在经过强电压和注入电流应力后, 薄膜内部的组分分布均匀, 证实了钙钛矿-MOF 复合物内部离子迁移受到抑制, 从而大幅提升了器件的光谱稳定性。

5.4 高效辐射复合

辐射复合速率指的是单位时间内激子以光子形式释放能量的快慢。高辐射复合速率意味着光生载流子能够在被缺陷捕获或发生俄歇过程之前快速复合发光, 从而在根本上提升材料的光致发光量子产率, 抑制非辐射能量耗散^[9]。壳层对表面缺陷的化学钝化消除了竞争性的非辐射复合通道, 使载流子寿命得以延长, 并集中用于辐射跃迁。

为验证壳层结构对辐射复合速率的提升作用, Xu 等^[92]提出了一种阴离子交换策略, 成功制备出具有梯度核/壳结构的高质量 $\text{CsPbBr}_x\text{Cl}_{3-x}$ 纳米晶。通过对阴离子交换前(HS)后(CS)的发光二极管进行时间分辨电致发光(Time-resolved electroluminescence, TREL)测量发现, 交换后量子点电致发光曲线表现出更迅速的上升趋势, 表明其激子辐射复合过程更迅速高效。在关闭脉冲电压后, 电致发光曲线开始衰减, 表明累积在发光层和界面区域的载流子逐渐耗尽, 同时量子点内被捕获的载流子发生再次复合。与交换前相比, 交换后纳米晶的电致发光曲线衰减更快, 这可归因于载流子积累减少、辐射复合效率提高以及缺陷态密度降低(图 5(d))。基于该核/壳纳米晶的蓝光 PeLED 实现了 16.28% 的高 EQE 和 $8\,423\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

的高亮度。

5.5 低效率滚降及长寿命

效率滚降快慢是衡量钙钛矿发光二极管在高亮度下能否保持高性能的关键指标。通常, 在高电压或大电流条件下, 载流子注入失衡、俄歇复合加剧以及焦耳热是引发器件效率滚降的主要原因^[96]。核壳结构通过多重机制有效抑制效率滚降。一方面, 壳层对表面缺陷的钝化消除了缺陷导致的非辐射复合路径, 降低了高载流子密度下的能量耗散; 另一方面, 核壳结构通过 I 型能带对齐将电子和空穴有效限域在发光核内, 减少了载流子在界面处的积累和非辐射俄歇复合概率; 此外, 坚固的壳层还能抵抗焦耳热诱导的晶格退化和离子迁移, 维持了发光层在高电流密度下的结构稳定性。

Jiang 等^[66]利用核/壳结构原位构建策略结合界面工程(Interface engineering, IE)优化制备了低效率滚降的 PeLED 器件, 在 $100\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 的超高亮度下, 效率相比最大值仅降低 0.58%(图 5(e))。Kim 等^[65]采用 BPA 形成原位核/壳钙钛矿, 其 LED 器件的外量子效率达 28.9%。这一性能提升主要归因于 BPA 壳层包覆显著降低缺陷密度并加速了载流子复合过程。同时, 该器件显示出高达 $473\,990\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 的最大亮度, 远高于传统三维钙钛矿器件(约 $20\,271\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$), 可与最先进的无机量子点发光二极管的最高亮度相媲美。在 $50\,000\sim 400\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 的超高亮度工作区间内, 原位核/壳 PeLED 的 EQE 值仍能保持在 20% 以上, 并在 $400\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 亮度下展现出约 5% 的极低效率滚降。该优异性能主要源于原位核/壳结构的构建方式, 通过短链分子对三维钙钛矿进行原位处理, 可以在不显著牺牲电荷传输的情况下实现高 PLQY 和低缺陷, 使器件获得高亮度、更均衡的电荷注入与更低的载流子积累及低效率滚降。该器件在 $1\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 初始亮度下表现出长达 520 h 的超长半衰期。通过使用加速寿命方程估算, 在 $100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 初始亮度下其半衰期可达约 31 808 h。此外, ZnS 作为壳层材料包覆 $\text{CsPb}(\text{Br}_{1-x}\text{Cl}_x)_3$ 钙钛矿纳米晶^[9], 由于缺陷密度降低和器件电荷平衡改善, 器件寿命得到显著延长, 其半衰期相比无壳层包覆的 PeLED 提高约 8 倍(图 5(f))。

6 总结与展望

钙钛矿核/壳纳米结构凭借其优异的光电性能及结构可调性, 有望推动钙钛矿 LED 器件的进

一步发展并加速其商业化应用进程。本文系统综述了金属卤化物钙钛矿核/壳结构的主要类型,重点阐述了壳层包覆的作用机制,以及其在提升材料稳定性与器件性能方面的重要作用。尽管核/壳异质结构已被证明是提升钙钛矿稳定性的有效策略,但该领域的研究尚处于快速发展阶段,仍有若干关键科学与技术挑战有待进一步深入探索。

首先,钙钛矿壳层本身的结构稳定性仍有待提升。部分钙钛矿衍生壳层在外界环境作用下易发生相变或结构退化,可能导致壳层剥离,不仅会造成重金属离子释放至环境中,还可能引起核/壳界面结构破坏并削弱器件性能。其次,壳层材料的可控生长工艺仍具有一定局限性。当前,共价型壳层材料的生长往往需要更高的温度和更长时间,限制了大规模制备及低成本加工应用,因此亟需发展更简便、高效的合成与界面调控方法。最后,部分用作构建壳层结构的钙钛矿衍生物和一

些传统半导体也含有重金属,这在环境安全性和应用范围方面均提出了新的要求。

综上所述,未来的研究应重点关注环境友好的壳层材料开发,探索更加高效的包覆策略,以实现高质量的核/壳结构的可控构筑。另外,核/壳结构钙钛矿纳米晶在其他光电器件中同样展现出较大应用潜力。在光伏领域,核/壳结构可通过壳层的钝化减少缺陷态,从而大幅提升载流子提取效率与器件开路电压。在光电探测领域,宽带隙、高绝缘性的壳层可作为天然阻挡层,显著抑制暗电流和电场诱导的离子迁移,赋予探测器超低的检测极限和长期运行稳定性。核/壳结构为钙钛矿材料迈向多功能实际应用提供了一种可行性路径。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260090>

参 考 文 献:

- [1] KOVALENKO M V, PROTESESCU L, BODNARCHUK M I. Properties and potential optoelectronic applications of lead halide perovskite nanocrystals [J]. *Science*, 2017, 358(6364): 745-750.
- [2] ZHANG F, ZHONG H Z, CHEN C, *et al.* Brightly luminescent and color-tunable colloidal $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ($X=\text{Br}, \text{I}, \text{Cl}$) quantum dots: potential alternatives for display technology [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4533-4542.
- [3] BRANDT R E, POINDEXTER J R, GORAI P, *et al.* Searching for “defect-tolerant” photovoltaic materials: combined theoretical and experimental screening [J]. *Chem. Mater.*, 2017, 29(11): 4667-4674.
- [4] CHO H, WOLF C, KIM J S, *et al.* High-efficiency solution-processed inorganic metal halide perovskite light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(31): 1700579.
- [5] WORKU M, TIAN Y, ZHOU C K, *et al.* Hollow metal halide perovskite nanocrystals with efficient blue emissions [J]. *Sci. Adv.*, 2020, 6(17): eaaz5961.
- [6] 李超, 宋宏伟, 陈聪. 单晶钙钛矿太阳能电池研究进展 [J]. *发光学报*, 2024, 45(5): 711-726.
LI C, SONG H W, CHEN C. Progress on single-crystal perovskite solar cells [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(5): 711-726. (in Chinese)
- [7] 孙锡娟, 夏梦玲, 许银生, 等. 钙钛矿直接型X射线探测成像研究进展 [J]. *发光学报*, 2022, 43(7): 1014-1026.
SUN X J, XIA M L, XU Y S, *et al.* Research progress of perovskite direct X-ray imaging [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(7): 1014-1026. (in Chinese)
- [8] BAI W H, XUAN T T, ZHAO H Y, *et al.* Perovskite light-emitting diodes with an external quantum efficiency exceeding 30% [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(39): 2302283.
- [9] LI M M, YANG Y G, KUANG Z Y, *et al.* Acceleration of radiative recombination for efficient perovskite LEDs [J]. *Nature*, 2024, 630(8017): 631-635.
- [10] PENG J Y, XUE X L, LIU S H, *et al.* Maximizing perovskite electroluminescence with ordered 3D/2D heterojunction [J]. *Nature*, 2026, 651(8104): 76-82.
- [11] LIU M, ZHANG Y, WANG S X, *et al.* Metal halide perovskite light-emitting devices: promising technology for next-generation displays [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(30): 1902008.
- [12] WU X G, JI H L, YAN X L, *et al.* Industry outlook of perovskite quantum dots for display applications [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2022, 17(8): 813-816.

- [13] YAO T L, YANG Z, GU L Y, *et al.* In situ fabrication of multi-site contacted perovskite/organic hybrid color converter for indoor lighting and light communication [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(2): 2400758.
- [14] ZHENG D M, PAUPORTÉ T. Advances in optical imaging and optical communications based on high-quality halide perovskite photodetectors [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(11): 2311205.
- [15] 邓艳红, 朱莹, 陈默, 等. 红光钙钛矿发光二极管研究进展 [J]. *发光学报*, 2024, 45(10): 1683-1698.
DENG Y H, ZHU Y, CHEN M, *et al.* Research progress of red perovskite light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(10): 1683-1698. (in Chinese)
- [16] WOO S J, KIM J S, LEE T W. Characterization of stability and challenges to improve lifetime in perovskite LEDs [J]. *Nat. Photonics*, 2021, 15(9): 630-634.
- [17] KONG L M, ZHANG X Y, ZHANG C X, *et al.* Stability of perovskite light-emitting diodes: existing issues and mitigation strategies related to both material and device aspects [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(43): 2205217.
- [18] LI R D, LUO Y X, YAO L B, *et al.* Structural softness in photovoltaic perovskites [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2025, 126(14): 140501.
- [19] CHO H, KIM Y H, WOLF C, *et al.* Improving the stability of metal halide perovskite materials and light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(42): 1704587.
- [20] HOU S C, GUO Y Z, TANG Y G, *et al.* Synthesis and stabilization of colloidal perovskite nanocrystals by multidentate polymer micelles [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(22): 18417-18422.
- [21] ALI A, HUSSAIN I, SEO H, *et al.* Exploring the recent progress in InP quantum dots and QLEDs: advances in synthesis, architecture, and applications [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(22): e01169.
- [22] SHEN X Y, KAMATH A, GUYOT-SIONNEST P. Mid-infrared cascade intraband electroluminescence with HgSe-CdSe core-shell colloidal quantum dots [J]. *Nat. Photonics*, 2023, 17(12): 1042-1046.
- [23] DUTTA A, BEHERA R K, PAL P, *et al.* Near-unity photoluminescence quantum efficiency for all CsPbX₃ (X=Cl, Br, and I) perovskite nanocrystals: a generic synthesis approach [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2019, 58(17): 5552-5556.
- [24] 韩悦, 李国辉, 梁强兵, 等. 全无机钙钛矿 CsPbX₃ 纳米晶的研究进展 [J]. *发光学报*, 2020, 41(5): 542-556.
HAN Y, LI G H, LIANG Q B, *et al.* Advances of all-inorganic perovskite CsPbX₃ nanocrystals [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(5): 542-556. (in Chinese)
- [25] ZHANG C X, CHEN J Y, KONG L M, *et al.* Core/shell metal halide perovskite nanocrystals for optoelectronic applications [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(19): 2100438.
- [26] ADHIKARI SDAS, REYES A F G, PAUL S, *et al.* Impact of core-shell perovskite nanocrystals for LED applications: successes, challenges, and prospects [J]. *Chem. Sci.*, 2023, 14(34): 8984-8999.
- [27] SALEEM M I, BATOOL A, HUR J. Cutting-edge developments in metal halide perovskites core/shell heterocrystals: from photodetectors to biomedical applications [J]. *Small*, 2025, 21(2): 2407032.
- [28] KIM J Y, KIM B G, KIM M, *et al.* One-step formation of core/shell structure based on hydrophobic silane ligands for enhanced luminescent perovskite quantum dots [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 886: 161347.
- [29] SHEN N F, BU J Y, LIU X, *et al.* Soft optical materials based on the integration of perovskite nanostructures and block copolymers [J]. *Chem. Commun.*, 2024, 60(99): 14703-14716.
- [30] HUANG H, LIN H, KERSHAW S V, *et al.* Polyhedral oligomeric silsesquioxane enhances the brightness of perovskite nanocrystal-based green light-emitting devices [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2016, 7(21): 4398-4404.
- [31] BARANOV D, CAPUTO G, GOLDONI L, *et al.* Transforming colloidal Cs₄PbBr₆ nanocrystals with poly(maleic anhydride-*alt*-1-octadecene) into stable CsPbBr₃ perovskite emitters through intermediate heterostructures [J]. *Chem. Sci.*, 2020, 11(15): 3986-3995.
- [32] WANG Z T, FU R, LI F, *et al.* One-step polymeric melt encapsulation method to prepare CsPbBr₃ perovskite quantum dots/polymethyl methacrylate composite with high performance [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(22): 2010009.
- [33] AHMED G H, YIN J, BAKR O M, *et al.* Successes and challenges of core/shell lead halide perovskite nanocrystals [J]. *ACS Energy Lett.*, 2021, 6(4): 1340-1357.
- [34] WANG S J, JIA G H, XIANG C Y. Development and opportunities of perovskite core-shell structures and encapsulation materials for micro-LED display applications [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(31): e01734.
- [35] HINTERMAYR V A, LAMPE C, LÖW M, *et al.* Polymer nanoreactors shield perovskite nanocrystals from degradation

- [J]. *Nano Lett.*, 2019, 19(8): 4928-4933.
- [36] WU Y T, LV Z X, LI X Y, *et al.* Star-shaped bridge-linking polymer for robust buried interface in high-efficiency and stable perovskite solar cells [J]. *Nano Res.*, 2026, 19(2): 94908049.
- [37] QIU H W, LI F, HE S, *et al.* Epitaxial CsPbBr₃/CdS Janus nanocrystal heterostructures for efficient charge separation [J]. *Adv. Sci.*, 2023, 10(13): 2206560.
- [38] VIGHNESH K, SERGEEV A A, HASSAN M S, *et al.* Red-emitting CsPbI₃/ZnSe colloidal nanoheterostructures with enhanced optical properties and stability [J]. *Small*, 2024, 20(40): 2400745.
- [39] 沈昭泽, 黄菲, 李家伟, 等. 壳层生长速率调控实现高效率蓝光量子点 [J]. *发光学报*, 2025, 46(7): 1151-1159.
SHEN Z Z, HUANG F, LI J W, *et al.* High-efficiency blue quantum dots achieved through shell growth rate regulation [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(7): 1151-1159. (in Chinese)
- [40] JIN Z X, HU C, LAN Y, *et al.* Epitaxial growth of PbS nanocrystals from PbI₂ nanosheet templates and its application in fast near-infrared photodetectors [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(22): 2001319.
- [41] ZHANG X Y, LU M, ZHANG Y, *et al.* PbS capped CsPbI₃ nanocrystals for efficient and stable light-emitting devices using *p-i-n* structures [J]. *ACS Cent. Sci.*, 2018, 4(10): 1352-1359.
- [42] YU Z Z, CHAN W K, ZHOU D L, *et al.* Overcoming lattice mismatch for core-shell NaGdF₄@CsPbBr₃ heterostructures [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 3891.
- [43] YUAN J C, DIAO J B, ZHENG Y Q, *et al.* Hierarchical microfluidic epitaxy of Sn⁴⁺-stabilized core-shell perovskites with lead-free double perovskite shells for highly efficient and ultra-stable emission [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2026, 36(10): e13146.
- [44] MING S, CHEN H, HUANG J, *et al.* Solution preparation of CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ polycrystalline composites [J]. *Physica B Condens. Matter*, 2022, 647: 414378.
- [45] HOTJE U, ROSE C, BINNEWIES M. Lattice constants and molar volume in the system ZnS, ZnSe, CdS, CdSe [J]. *Solid State Sci.*, 2003, 5(9): 1259-1262.
- [46] ZHANG Y, KE X Z, CHEN C F, *et al.* Thermodynamic properties of PbTe, PbSe, and PbS: first-principles study [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, 80(2): 024304.
- [47] LIN K B, XING J, QUAN L N, *et al.* Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 percent [J]. *Nature*, 2018, 562(7726): 245-248.
- [48] LEE D H, JEONG W H, CHOUNG S, *et al.* Surface defect recovery in perovskite nanocrystals with excess halide for core-shell structure [J]. *ACS Energy Lett.*, 2024, 9(11): 5413-5420.
- [49] HE J C, LIU Y, SUN B Q. Epitaxial growth of core/shell metal halide perovskite nanocrystals for optoelectronic applications [J]. *Small*, 2026, 22(9): e12047.
- [50] LI M, YIN Q, XU R, *et al.* Review on anion exchange of lead-halide perovskite nanocrystals: process, methods, and applications [J]. *Adv. Eng. Mater.*, 2025, 27: 2401776.
- [51] OTERO-MARTÍNEZ C, IMRAN M, SCHRENKER N J, *et al.* Fast A-site cation cross-exchange at room temperature: single-to double- and triple-cation halide perovskite nanocrystals [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2022, 61(34): e202205617.
- [52] ZHU Q L, YE F, YAN W, *et al.* Liquid-solid-Interpenetration surface reconstruction of monodisperse water stabilized CsPbBr₃/CsPb₂Br₅ core/shell perovskite nanocrystals [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(1): 2301211.
- [53] LIANG T Y, LIU W J, LIU X Y, *et al.* *In situ* phase-transition crystallization of all-inorganic water-resistant exciton-radiative heteroepitaxial CsPbBr₃-CsPb₂Br₅ core-shell perovskite nanocrystals [J]. *Chem. Mater.*, 2021, 33(13): 4948-4959.
- [54] ZENG Y C, CHEN W W, DENG Y, *et al.* FAPbBr₃/Cs₄PbBr₆ core/shell perovskite nanocrystals with enhanced stability and emission: implications for LEDs [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2022, 5(7): 9534-9543.
- [55] PENG X, QI F F, SHEN X, *et al.* Stabilized yolk-shell perovskite CsPbBr₃/Rb₄PbBr₆ nanocrystals for green-emitting light-emitting diodes [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2025, 8(14): 7383-7393.
- [56] PANCINI L, TONIOLO F, MIRANI D, *et al.* Metal organic frameworks as molecular encapsulants to prevent efficiency losses in perovskite solar cells [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(46): 22973-22978.
- [57] SONG Q L, CHEN W T, KONG T F, *et al.* Harnessing metal-organic frameworks to boost efficiency, stability, and safety in perovskite photovoltaics [J]. *J. Energy Chem.*, 2026, 114: 426-447.
- [58] ZHANG C Y, WANG B, LI W B, *et al.* Conversion of invisible metal-organic frameworks to luminescent perovskite nanocrystals for confidential information encryption and decryption [J]. *Nat. Commun.*, 2017, 8(1): 1138.

- [59] TSAI H, SHRESTHA S, VILÁ R A, *et al.* Bright and stable light-emitting diodes made with perovskite nanocrystals stabilized in metal-organic frameworks [J]. *Nat. Photonics*, 2021, 15(11): 843-849.
- [60] QUINTERO-BERMEDEZ R, SABATINI R P, LEJAY M, *et al.* Small-band-offset perovskite shells increase auger lifetime in quantum dot solids [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(12): 12378-12384.
- [61] GAO L, QUAN L N, DE ARQUER F P G, *et al.* Efficient near-infrared light-emitting diodes based on quantum dots in layered perovskite [J]. *Nat. Photonics*, 2020, 14(4): 227-233.
- [62] MA D X, TODOROVIĆ P, MESHKAT S, *et al.* Chloride insertion-immobilization enables bright, narrowband, and stable blue-emitting perovskite diodes [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2020, 142(11): 5126-5134.
- [63] LIU J, ZHANG J T. Nanointerface chemistry: lattice-mismatch-directed synthesis and application of hybrid nanocrystals [J]. *Chem. Rev.*, 2020, 120(4): 2123-2170.
- [64] LIU Y, LI Z L, XU J, *et al.* Wide-bandgap perovskite quantum dots in perovskite matrix for sky-blue light-emitting diodes [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2022, 144(9): 4009-4016.
- [65] KIM J S, HEO J M, PARK G S, *et al.* Ultra-bright, efficient and stable perovskite light-emitting diodes [J]. *Nature*, 2022, 611(7937): 688-694.
- [66] JANG J W, WOO J Y, LEE C B, *et al.* Chemically designed crystal growth termination for high-luminance and stable polycrystalline perovskite LEDs [J]. *ACS Energy Lett.*, 2024, 9(12): 6029-6038.
- [67] REISS P, PROTIÈRE M, Li L. Core/shell semiconductor nanocrystals [J]. *Small*, 2009, 5(2): 154-168.
- [68] CHAUDHURI R G, PARIA S. Core/shell nanoparticles: classes, properties, synthesis mechanisms, characterization, and applications [J]. *Chem. Rev.*, 2012, 112(4): 2373-2433.
- [69] YE C Y, JIANG J W, ZOU S L, *et al.* Core-shell three-dimensional perovskite nanocrystals with chiral-induced spin selectivity for room-temperature spin light-emitting diodes [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2022, 144(22): 9707-9714.
- [70] CHO H, KIM J S, WOLF C, *et al.* High-efficiency polycrystalline perovskite light-emitting diodes based on mixed cations [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(3): 2883-2892.
- [71] DONG Q F, FANG Y J, SHAO Y C, *et al.* Electron-hole diffusion lengths >175 μm in solution-grown $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ single crystals [J]. *Science*, 2015, 347(6225): 967-970.
- [72] YOON S M, MIN H, KIM J B, *et al.* Surface engineering of ambient-air-processed cesium lead triiodide layers for efficient solar cells [J]. *Joule*, 2021, 5(1): 183-196.
- [73] KUHN M, WENZEL F A, GREVE C, *et al.* Tailored supramolecular additives to control the crystallization process and morphology of MAPbI_3 [J]. *Small*, 2025, 21(9): 2410230.
- [74] DONG C, HAN X X, ZHAO Y, *et al.* A green anti-solvent process for high performance carbon-based CsPbI_2Br all-inorganic perovskite solar cell [J]. *Solar RRL*, 2018, 2(9): 1800139.
- [75] LIU X, GUO X Y, LV Y, *et al.* High brightness and enhanced stability of CsPbBr_3 -based perovskite light-emitting diodes by morphology and interface engineering [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, 6(24): 1801245.
- [76] MCMEEKIN D P, WANG Z P, REHMAN W, *et al.* Crystallization kinetics and morphology control of formamidinium-cesium mixed-cation lead mixed-halide perovskite *via* tunability of the colloidal precursor solution [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(29): 1607039.
- [77] XIE J H, LI D, LI H Z, *et al.* Surface and bulk defect passivation in MAPbI_3 perovskites with daminozide: effects on carrier dynamics and mobility [J]. *Adv. Sci.*, 2025, 12(23): 2500530.
- [78] DU X Y, LIU Y M, PAN W C, *et al.* Chemical potential diagram guided rational tuning of electrical properties: a case study of CsPbBr_3 for X-ray detection [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(17): 2110252.
- [79] ZHANG C X, WANG S, LI X M, *et al.* Core/shell perovskite nanocrystals: synthesis of highly efficient and environmentally stable $\text{FAPbBr}_3/\text{CsPbBr}_3$ for LED applications [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(31): 1910582.
- [80] QUAN L N, QUINTERO-BERMEDEZ R, VOZNYI O, *et al.* Highly emissive green perovskite nanocrystals in a solid state crystalline matrix [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(21): 1605945.
- [81] WANG A F, LIU J X, LI J J, *et al.* Dendrimer-encapsulated halide perovskite nanocrystals for self-powered white light-emitting glass [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2023, 145(51): 28156-28165.
- [82] JIANG G, JO D Y, MA S, *et al.* Core-shell perovskite quantum dots for highly selective room-temperature spin light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(5): 2309335.
- [83] LIU Y, DONG Y T, ZHU T, *et al.* Bright and stable light-emitting diodes based on perovskite quantum dots in perovskite

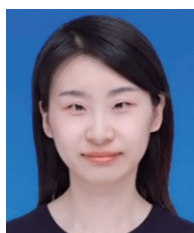
- matrix [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2021, 143(38): 15606-15615.
- [84] XU W D, HU Q, BAI S, *et al.* Rational molecular passivation for high-performance perovskite light-emitting diodes [J]. *Nat. Photonics*, 2019, 13(6): 418-424.
- [85] ZHANG L, YUAN F, XI J, *et al.* Suppressing ion migration enables stable perovskite light-emitting diodes with all-inorganic strategy [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(40): 2001834.
- [86] PALAZON F, DI STASIO F, LAUCIELLO S, *et al.* Evolution of CsPbBr₃ nanocrystals upon post-synthesis annealing under an inert atmosphere [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2016, 4(39): 9179-9182.
- [87] CONINGS B, DRIJKONINGEN J, GAUQUELIN N, *et al.* Intrinsic thermal instability of methylammonium lead trihalide perovskite [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2015, 5(15): 1500477.
- [88] LIU M M, WAN Q, WANG H M, *et al.* Suppression of temperature quenching in perovskite nanocrystals for efficient and thermally stable light-emitting diodes [J]. *Nat. Photonics*, 2021, 15(5): 379-385.
- [89] JIN X D, WANG C Q, MIAO Y Q, *et al.* *In situ* surface reconstruction in pure water by ice-confined freeze-thaw strategy for high-performance core-shell structural perovskite nanocrystals [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(28): 2401435.
- [90] DONG H R, ZHAO H Y, XUAN T T, *et al.* Constructing perovskite/polymer core/shell nanocrystals with simultaneous high efficiency and stability for mini-LED backlights [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(24): 29297-29307.
- [91] WANG B, ZHANG C Y, HUANG S Q, *et al.* Postsynthesis phase transformation for CsPbBr₃/Rb₄PbBr₆ core/shell nanocrystals with exceptional photostability [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(27): 23303-23310.
- [92] XU B, YUAN S C, WANG L Q, *et al.* Highly efficient blue light-emitting diodes enabled by gradient core/shell-structured perovskite quantum dots [J]. *ACS Nano*, 2025, 19(3): 3694-3704.
- [93] NGAI K H, SUN X W, ZOU X H, *et al.* Charge injection and Auger recombination modulation for efficient and stable quasi-2D perovskite light-emitting diodes [J]. *Adv. Sci.*, 2024, 11(18): 2309500.
- [94] LI Z Q, WEI Q, WANG Y, *et al.* Highly bright perovskite light-emitting diodes enabled by retarded Auger recombination [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 927.
- [95] HONG Y J, YU C, JE H, *et al.* Perovskite nanocrystals protected by hermetically sealing for highly bright and stable deep-blue light-emitting diodes [J]. *Adv. Sci.*, 2023, 10(23): 2302906.
- [96] FAKHARUDDIN A, GANGISHETTY M K, ABDI-JALEBI M, *et al.* Perovskite light-emitting diodes [J]. *Nat. Electron.*, 2022, 5(4): 203-216.



王继浩(2000–),男,山东聊城人,硕士研究生,2022年于青岛科技大学获得学士学位,主要从事钙钛矿发光二极管研究。
E-mail: wangjh@shu.edu.cn



张晓宇(1989–),男,吉林长春人,博士,教授,2016年于吉林大学获得博士学位,主要从事量子点器件与物理研究。
E-mail: zhangxiaoyu@jlu.edu.cn



孔令媚(1995–),女,内蒙古赤峰人,博士,特聘研究员,2024年于上海大学获得博士学位,主要从事低维发光半导体光电器件研究。
E-mail: klmmm@tongji.edu.cn



杨绪勇(1982–),男,黑龙江大庆人,博士,教授,2014年于新加坡南洋理工大学获得博士学位,主要从事杂化半导体显示技术与集成制造研究。
E-mail: yangxy@shu.edu.cn



王林(1992–),女,山西临汾人,博士,副研究员,2018年于湖北大学获得博士学位,主要从事新型半导体光电器件的微纳制造与系统集成研究。
E-mail: lin_wang@shu.edu.cn