

文章编号:1007-2780(2026)03-0333-11

基于原位缓慢缩聚法构建的 CsPbBr₃@PZS 复合材料及其高稳定性发光性能

张世瑞^{1,2}, 谢金峰¹, 汤文韬¹, 杜海琼¹, 韩雨洁¹, 吴运全²,
Craig P YU^{3*}, 薛琪^{2*}, 黄河^{1*}

(1. 苏州大学 光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;

2. 苏州大学 物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006;

3. 苏州大学 功能纳米与软物质研究院, 江苏 苏州 215123)

摘要:全无机 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点因其优异的光学特性在新型显示领域展现出巨大潜力,但表面缺陷与离子迁移导致的环境不稳定性严重制约其应用。尽管聚合物包覆可提升其稳定性,但发光衰减和分散性不足仍是制约复合材料性能的关键问题。本文提出一种原位缓慢缩聚法,在 CsPbBr₃ 量子点表面构建聚磷腈(PZS)包覆层,通过温和聚合实现量子点在聚合物基体中均匀分散,并利用 PZS 中 N、P、S 等杂原子的 Lewis 碱配位作用钝化表面缺陷并抑制离子迁移。结果表明,复合材料的平均荧光寿命由原始样品的 7.50 ns 显著提升至 20.92 ns,且在水、光、热等环境条件下均表现出优异的稳定性。在连续紫外光照射 10 h 后,其荧光保持率较初始量子点提高了 34%。基于该复合材料构建的色转换器件在约 520 nm 处呈现窄带发射,CIE 色坐标为(0.155 6, 0.702 9)。本研究为开发高稳定性钙钛矿复合材料提供了新思路,并为其在高性能显示领域的应用奠定了基础。

关键词: CsPbBr₃ 钙钛矿量子点;聚磷腈;表面包覆;稳定性;色转换器件

中图分类号:O482.31 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2026-0022 CSTR:32172.14.CJLCD.2026-0022

CsPbBr₃@PZS composites constructed *via in-situ* slow polycondensation for highly stable photoluminescent properties

ZHANG Shirui^{1,2}, XIE Jinfeng¹, TANG Wentao¹, DU Haiqiong¹, HAN Yujie¹,
WU Yunquan², Craig P YU^{3*}, XUE Qi^{2*}, HUANG He^{1*}

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;

3. Institute of Functional Nano and Soft Materials, Soochow University, Suzhou 215123, China)

Abstract: All-inorganic CsPbBr₃ perovskite quantum dots (QDs) have demonstrated immense potential for next-generation display technologies owing to their exceptional optical properties. However, surface

收稿日期:2026-02-20;修订日期:2026-02-28.

基金项目:国家自然科学基金(No. 52402198);江苏省科技厅前沿技术基础研究重大项目(No. BK20240821)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52402198); Jiangsu Provincial Department of Science and Technology Leading Technology Basic Research Major Project (No. BK20240821)

*通信联系人, E-mail: craigpyu@suda.edu.cn; xq@suda.edu.cn; hh@suda.edu.cn

defects and ion migration induce environmental instability, thereby limiting their practical applications. Although polymer encapsulation can enhance stability, luminescence degradation and poor dispersion remain critical challenges for high-performance composites. In this work, an *in-situ* slow polycondensation strategy is proposed to construct a polyphosphazene (PZS) coating on CsPbBr₃ QDs. The mild polymerization process enables uniform dispersion of QDs within the polymer matrix, while the abundant heteroatoms (N, P, and S) in the PZS effectively passivate surface Pb²⁺ defects through Lewis base coordination and suppress ion migration. As a result, the average photoluminescence (PL) lifetime is significantly prolonged from 7.50 ns for the pristine QDs to 20.92 ns for the composite, and the composites exhibit excellent stability under water, light, and thermal conditions. After continuous ultraviolet irradiation for 10 h, the PL intensity retention of the composites is improved by 34% compared to that of the pristine QDs. A prototype color-conversion device based on the composite exhibits a narrow-band emission centered at approximately 520 nm with CIE coordinates of (0.155 6, 0.702 9). This study provides a facile strategy for developing highly stable perovskite-based composites and establishes a solid foundation for their application in high-performance display technologies.

Key words: CsPbBr₃ perovskite quantum dots; polyphosphazene; surface encapsulation; stability; color-conversion devices

1 引 言

随着超高清与广色域显示技术的快速发展,对具有窄发射带宽和高发光效率的新型发光材料的需求日益迫切。全无机卤化铅钙钛矿量子点(CsPbX₃, X=Cl, Br, I)作为一种新兴的半导体发光材料,凭借其高吸收系数、窄发射带宽(≈20 nm)、高荧光量子产率(PLQY可接近100%)、发射波长可调谐等优异特性^[1-2],被视为液晶显示器(LCDs)^[3-4]和发光二极管(LEDs)^[5-6]等新型显示应用的理想候选材料^[7]。然而,受限于本征的离子晶体特性,CsPbX₃量子点在实际应用过程中表面易形成未配位的离子和缺陷态,从而引发非辐射复合并降低发光效率^[8]。同时,由于其晶格能较低,在外界环境因素如水分、高强度光照及热辐射的诱导下,极易发生配体动态脱附和离子迁移,进而导致发光性能和稳定性显著下降^[9-10]。

针对上述问题,已有研究提出通过小分子配体钝化、无机壳层封装及聚合物包覆等多种策略改善钙钛矿量子点的稳定性^[11]。其中,SiO₂^[12]、Al₂O₃^[13]等无机氧化物壳层可通过物理隔离作用提高量子点的环境稳定性,但会引入额外的界面缺陷,进而影响光学性能。苯乙胺(PEA)^[14]、双十二烷基二甲基溴化铵(DDAB)^[15]等小分子配体以及硫醇类^[16]、羧酸类^[17]和膦类^[18]等具有Lewis

碱特性的功能分子,可通过与CsPbX₃量子点表面Pb²⁺配位或补偿卤素空位,降低表面缺陷密度以提升稳定性。然而,这类策略主要依赖小分子或配体修饰,其作用仅限于局部界面钝化,难以实现对水分和氧气等外界环境的长期有效阻隔。相比之下,聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)^[19]、聚苯乙烯(PS)^[20]等聚合物因具有高柔韧性、高透光率和优异的稳定性,已成为提升钙钛矿量子点稳定性的热门材料。

然而,传统聚合物包覆主要依赖于物理封装,对量子点表面缺陷的化学钝化能力相对有限。此外,离子型钙钛矿量子点具有较强极性,而多数聚合物为非极性,两者之间的极性差异容易导致量子点在聚合物基体中的分散性较差并发生聚集^[21],从而引发发光淬灭和自吸收效应^[22-23]。因此,开发一种兼具界面缺陷调控、物理隔离保护并维持量子点良好分散性的聚合物包覆策略,对于推动CsPbBr₃量子点在显示领域中的应用具有重要意义。

基于此,本文提出一种原位缓慢缩聚策略,在CsPbBr₃量子点表面原位构筑聚磷腈(PZS)包覆层,制备CsPbBr₃@PZS复合材料。与传统小分子配体钝化或剧烈的自由基聚合过程不同,该缓慢缩聚过程有效避免了自由基对量子点表面的化学损伤,实现了量子点在PZS基体中的均匀分散。

此外,PZS骨架中N、P、S等杂原子可通过Lewis碱配位作用有效钝化量子点表面缺陷并抑制非辐射复合。同时,包覆层可抑制离子迁移并阻隔外界环境,从而在化学钝化与物理包覆两个层面协同提升CsPbBr₃量子点的光学和环境稳定性。本文系统研究了PZS包覆对CsPbBr₃量子点形貌结构、光学性能及环境稳定性的影响,并进一步利用蓝色LED芯片构建了色转换发光器件,验证其在显示与背光应用中的可行性。

2 实 验

2.1 药品与试剂

油酸(OA,90%)、十八烯(ODE,90%)、碳酸铯(Cs₂CO₃,99.995%)、溴化铅(PbBr₂,99.995%)购买于Sigma-Aldrich;油胺(OAm,80-90%)购买于Thermo Scientific;4,4'-磺酰基二苯酚(BPS,99.8%)购买于Adamas-beta;六氯三聚磷腈(HCCP,98%)、三乙胺(TEA,99.5%)购买于Aladdin;乙酸乙酯(Ethyl acetate,99.5%)、甲苯(Toluene,99.5%)、四氢呋喃(THF,99.5%)购买于江苏强盛功能化学股份有限公司;聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)购买于上海旭硕生物科技有限公司。所有药品未进一步提纯直接使用。

2.2 CsPbBr₃量子点的制备

采用经典的热注入法合成CsPbBr₃量子点。将0.2035g Cs₂CO₃、0.75mL OA和10mL ODE混合于50mL三颈烧瓶中,制备油酸铯(前驱体A)。另取一个烧瓶,将0.069g PbBr₂、0.5mL OA、0.5mL OAm和5mL ODE混合,制备PbBr₂溶液(前驱体B)。将两种溶液在120℃真空环境下干燥1h。之后,在N₂氛围中将溶液A加热至150℃直至Cs₂CO₃完全溶解,将溶液B加热至180℃直至PbBr₂完全溶解。随后取0.4mL溶液A快速注入溶液B中,反应5s后立即置于冰水浴中冷却获得粗溶液。通过加入体积比为1:3的乙酸乙酯以8000r/min的转速离心洗涤10min,将沉淀分散于甲苯中可获得CsPbBr₃量子点。

2.3 CsPbBr₃@PZS复合材料的制备

将离心提取的CsPbBr₃量子点重新分散在甲苯中,原位缩聚实现PZS致密包覆。首先,将2.75mg BPS超声溶解于0.5mL四氢呋喃,再加入0.5mL甲苯超声混合,以制备BPS前驱体溶液。

将6μL TEA与1mL甲苯室温超声混合,制备TEA前驱体溶液。然后,取4mL CsPbBr₃甲苯溶液与2.5mg HCCP混合,磁力搅拌直至HCCP完全溶解。接着向溶液中缓慢滴加BPS前驱体溶液,搅拌直至充分混合。最后,加入TEA前驱体溶液作为催化剂。将混合溶液室温搅拌4h,以8000r/min的转速离心10min,沉淀分散于甲苯中可获得CsPbBr₃@PZS复合材料。

2.4 色转换发光器件的制备

取2mL CsPbBr₃@PZS甲苯溶液与0.5g PMMA混合,80℃条件下加热搅拌,直至PMMA完全溶解并形成均匀溶液。随后,将混合溶液均匀涂覆在硅基玻璃片上,并在80℃真空环境下干燥1h,以去除残余溶剂。以蓝色LED芯片作为激发光源,将涂覆复合材料的玻璃片置于LED芯片顶部作为发射层,可制备简易色转换发光器件。

2.5 表征手段与测试方法

透射电子显微镜(TEM)、高角环形暗场扫描透射电子显微镜(HAADF-STEM)以及能量色散X射线光谱(EDS mapping)的元素映射图像在场发射高分辨透射电子显微镜(FEI Talos F200X, Thermo Scientific)上以200kV采集;X射线衍射图谱(XRD)在台式衍射仪(D8 Advance,德国Bruker)上使用Cu Kα源(λ=0.154056nm)测定;傅里叶变换红外光谱(FTIR)使用红外吸收光谱仪(VERTEX 70,德国Bruker)测定;吸收光谱在光源(Ocean Insight,DH-2000-BAL)照射下检测,光致发光(PL)光谱采用365nm激发光源(Ocean Insight,L365A)测量,所有光谱数据均使用光谱仪(Ocean Insight QEPRO,美国)记录;时间分辨瞬态光致发光(TRPL)衰减测量在配备375nm激光器(FLS980)的爱丁堡仪器LifeSpec II系统上完成;采用数字源表(Keithley,2400)为LED芯片施加恒定直流电压,在不同驱动电压条件下收集器件的发射光谱。

3 结果与讨论

3.1 CsPbBr₃和CsPbBr₃@PZS的形貌与结构表征

与传统Lewis碱配位策略相比,PZS作为一种无机-有机杂化聚合物,其主链中丰富的N、P、S等功能基团可与量子点表面未配位Pb²⁺发生配位

作用,同时连续的聚合物包覆层可有效阻隔水氧等外界环境,从而实现化学钝化与物理包覆的协同保护,较单一分子配体修饰更有利于获得稳定的发光性能。本文采用原位缓慢缩聚法制备了CsPbBr₃@PZS复合材料,具体合成过程见图1。以HCCP为交联中心、BPS作为功能单体、微量的TEA作为催化剂在预先制备的CsPbBr₃量子点

溶液中进行原位缩聚反应,实现PZS的缓慢聚合,在量子点表面形成连续包覆层。缓慢的聚合过程可以有效减少自由基在聚合过程中对量子点表面造成的化学损伤。CsPbBr₃量子点采用Protesescu等人^[1]提出的经典热注入法制备,并对前驱体配比、注入体积及纯化条件进行了优化,以提高量子点的尺寸均一性与分散稳定性。

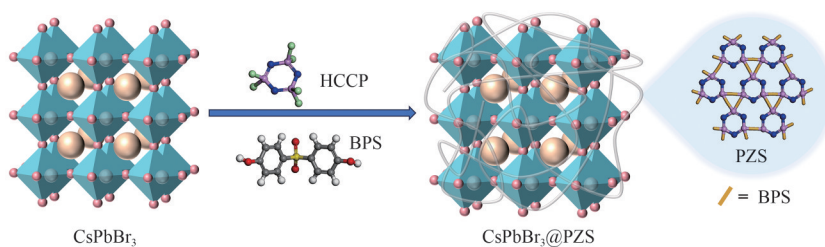


图1 CsPbBr₃@PZS复合材料的原位缓慢缩聚制备示意图

Fig. 1 Schematic of the fabrication of CsPbBr₃@PZS composites *via in-situ* slow polycondensation

为评估PZS包覆对CsPbBr₃量子点形貌与分散性的影响,采用TEM对包覆前后样品的形貌进行对比。由图2(a)可见,未包覆的CsPbBr₃量子点呈现出规则的立方形貌,尺寸分布均匀且具有良好的单分散性。在高分辨透射电镜(HRTEM)图像中,可清晰分辨出规则的晶格条纹,其晶面间距约为0.58 nm,对应于立方相CsPbBr₃的(100)特征晶面^[24]。如图2(b)所示,CsPbBr₃@PZS复合材料中的量子点在基体中分布均匀且仍保持清晰的立方边缘与规则的晶体形貌,未观察到明显团聚或颗粒长大现象,表明缓慢的原位缩聚过程未对量子点表面造成化学破坏,维持了量子点的形貌和分散性。进一步放大的TEM图像显示,量子点周围存在连续分布的低对比度无定形区域,表明PZS在量子点表面形成了较为连续且均匀的包覆层,可为其提供有效的物理保护。

为进一步确认CsPbBr₃@PZS复合材料的元素组成,对样品进行了EDS图谱分析,如图2(c)所示。可以观察到,Cs、Pb和Br元素在空间分布上高度一致,表明钙钛矿量子点的结构保持完整。同时,属于PZS聚合物的C、N、P和S元素在同一区域内呈现出均匀分布且保持一致,并与CsPbBr₃量子点的元素分布区域高度重叠。这说明PZS已通过原位缩聚过程成功均匀地包覆在CsPbBr₃量子点表面,形成致密的包覆结构。图2(d)展示了CsPbBr₃量子点在PZS包覆前后样品的XRD。未

包覆的CsPbBr₃量子点的特征峰位于15.2°和30.7°,这与立方相CsPbBr₃的标准比对卡(PDF#18-0364)一致,分别对应于(100)和(200)特征晶面,表明其具有良好的结晶性^[25]。经PZS缩聚包覆后,复合材料的主要特征峰位置基本保持不变,说明CsPbBr₃量子点的晶体结构在缩聚过程中得以保持。此外,在衍射角为15°~30°区域范围内观察到的宽峰对应于无定形的PZS^[26],证实了PZS包覆层的存在。为了探究PZS包覆层与CsPbBr₃量子点之间的相互作用,对包覆前后的样品进行了FTIR测试,如图2(e)所示。两个样品均在2924 cm⁻¹和2853 cm⁻¹处显示出相同的信号,分别归属于—CH₂和—CH₃的反对称伸缩振动。1466 cm⁻¹处的信号与OA(油酸)和OAm(油胺)配体的—CH₂弯曲振动相关^[27],表明仍有少量配体存在以维持CsPbBr₃量子点的稳定性。与原始CsPbBr₃量子点相比,在CsPbBr₃@PZS复合材料中观察到磷腈骨架特有的P=N(1217 cm⁻¹)和P—N(836 cm⁻¹)伸缩振动峰^[28],证明PZS主链结构的成功构建。1170 cm⁻¹和1144 cm⁻¹处出现的吸收峰可归因于磷腈环相关振动模式。同时,还可观察到由BPS单体引入的苯环骨架C=C(1496 cm⁻¹)的伸缩振动峰和磺酰基(O=S=O, 1282 cm⁻¹)的对称伸缩振动^[26]。1104 cm⁻¹处出现的P—O—Ar伸缩振动峰证实了HCCP中的P原子与BPS上的酚羟基(—OH)发生脱氢缩合反

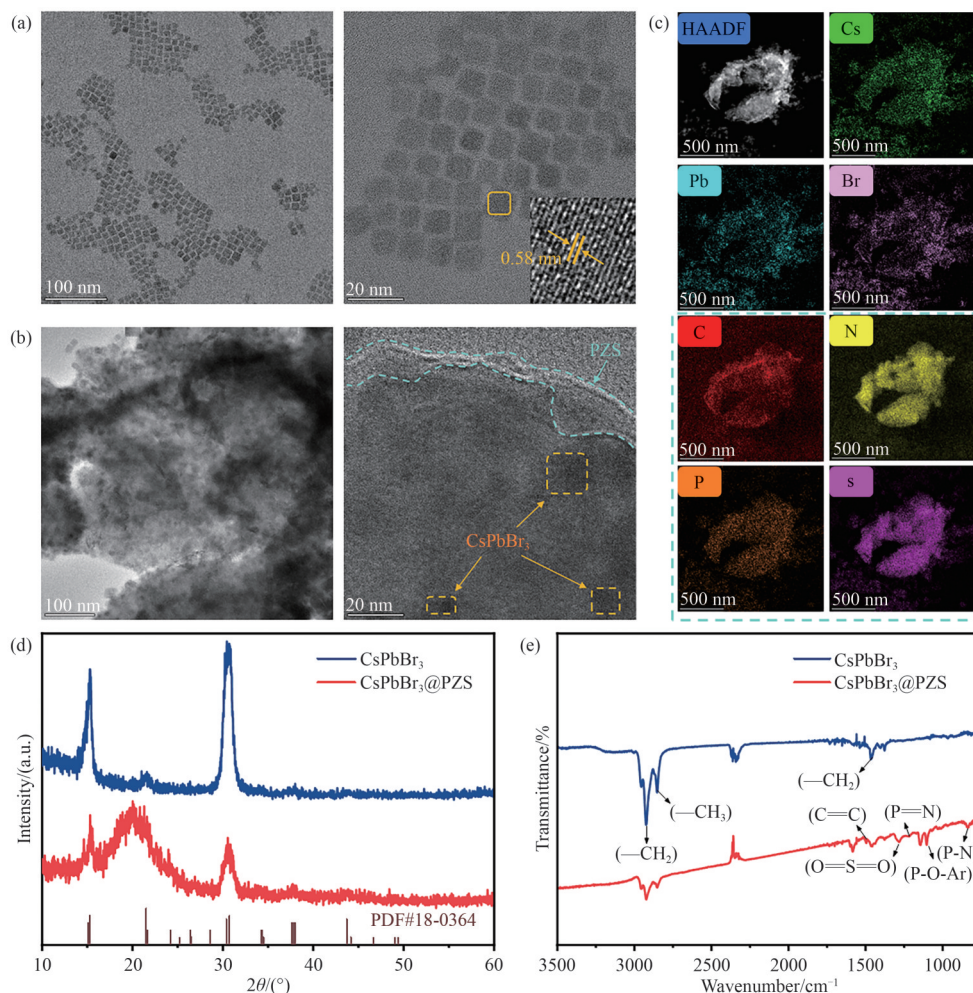


图 2 CsPbBr₃和CsPbBr₃@PZS的形貌与结构表征。不同放大倍数下,(a) CsPbBr₃量子点的TEM图像(插图:晶格条纹)和(b) CsPbBr₃@PZS复合材料的TEM图像(蓝色虚线:PZS包覆层;黄色虚线框:内嵌CsPbBr₃量子点);(c) CsPbBr₃@PZS的HAADF图及对应的EDS元素分布图;CsPbBr₃和CsPbBr₃@PZS的(d) XRD图谱和(e) FT-IR光谱。

Fig. 2 Morphological and structural characterization of CsPbBr₃ and CsPbBr₃@PZS. TEM images at different magnifications of (a) pristine CsPbBr₃ QDs (inset: lattice fringes) and (b) CsPbBr₃@PZS composites (blue dashed regions: PZS shell; yellow dashed boxes: embedded QDs); (c) HAADF image and corresponding EDS mapping of the CsPbBr₃@PZS; (d) XRD patterns and (e) FTIR spectra of pristine CsPbBr₃ and CsPbBr₃@PZS.

应,形成了稳定的共价连接^[29]。除此之外,原始量子点表面的长链有机配体(OA和OAm)的峰强度在包覆后明显降低,表明HCCP与BPS发生了高效的缩聚反应,在量子点表面构建了富含杂原子的PZS包覆层。PZS结构中富含的N、P、S等Lewis碱位点,为其与CsPbBr₃量子点表面未配位的Pb²⁺产生多位点相互作用提供了结构基础^[30-33]。

3.2 CsPbBr₃和CsPbBr₃@PZS的光学性能分析

图3(a)展示了CsPbBr₃量子点在PZS包覆前后的吸收光谱。包覆后的样品仍保留约500 nm

处的激子吸收峰及510~530 nm范围内的陡峭吸收边,且峰位基本不变,说明原位缓慢缩聚过程较为温和,未引起量子点尺寸增长或相变,从而有效维持了量子点的带隙和基本光学特性^[34]。相较于原始量子点,CsPbBr₃@PZS复合材料在全波段吸光度均有提升,在大于550 nm的长波区观察到明显的基线抬升,可归因于PZS包覆层引起的光散射效应^[35],从侧面证明了PZS的有效包覆。图3(b)为对应的PL光谱,两个样品的发射峰位基本一致且均具有较窄的半峰宽,说明PZS

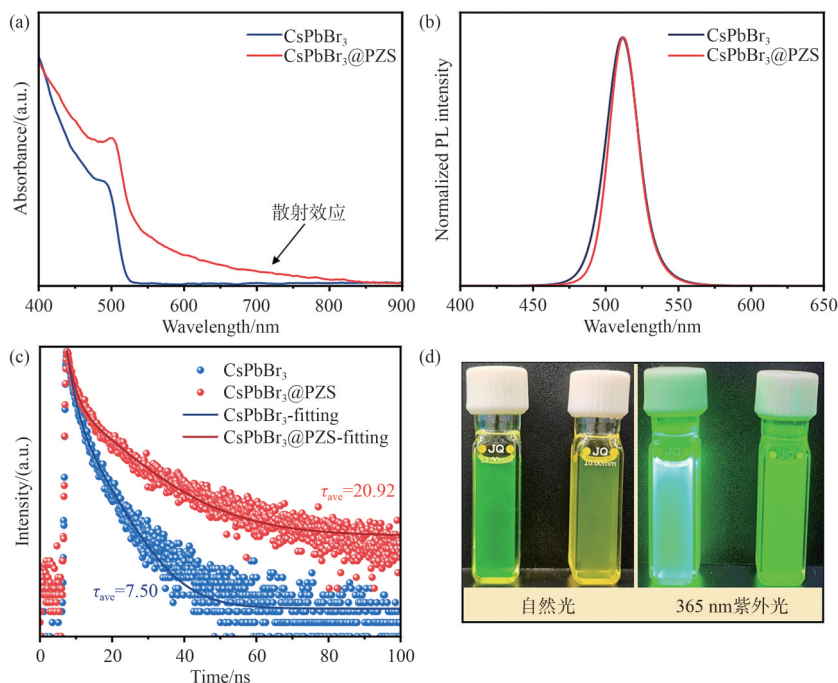


图3 CsPbBr₃量子点在PZS包覆前后的光学性能。(a)吸收光谱;(b)PL光谱;(c)TRPL曲线;(d)自然光及365 nm紫外光照射下的实物照片(左:CsPbBr₃,右:CsPbBr₃@PZS)。

Fig. 3 Optical properties of CsPbBr₃ QDs before and after PZS encapsulation. (a) UV-vis absorption spectra; (b) PL spectra; (c) TRPL decay curves; (d) Digital photographs under ambient light and 365 nm UV irradiation (left: pristine CsPbBr₃; right: CsPbBr₃@PZS).

原位缩聚包覆过程未改变CsPbBr₃量子点的发射中心,也未引起量子点的明显团聚^[36]。为进一步探究PZS对量子点表面缺陷的钝化机理,对样品进行了TRPL测试,如图3(c)所示。未包覆的CsPbBr₃量子点荧光衰减较快,而CsPbBr₃@PZS复合材料的衰减明显变缓。采用双指数函数对衰减曲线进行拟合^[37],可获得快衰减寿命(τ_1)和慢衰减寿命(τ_2)及对应过程的系数(A_1 、 A_2),并计算得到平均荧光寿命(τ_{ave}),结果汇总于表1。与CsPbBr₃量子点相比,CsPbBr₃@PZS复合材料的 τ_{ave} 由7.50 ns显著延长至20.92 ns,同时慢衰减过程的权重 A_2 由38.89%增加至66.25%。这一动态演变过程反映了PZS与CsPbBr₃量子点间的界面相互作用:PZS分子结构中丰富的Lewis碱位点可与量子点表面未配位的Pb²⁺发生多位点相互

作用^[38-39],从而有效抑制表面缺陷引起的非辐射复合过程,显著延长载流子寿命^[40-41]。图3(d)展示了CsPbBr₃量子点在PZS包覆前后于自然光及365 nm紫外光照射下的实物照片。与吸收和荧光光谱相对应,原始的CsPbBr₃量子点溶液在自然光下呈现出绿色和较好的透明度,在紫外光激发下表现出明亮的绿光发射;而CsPbBr₃@PZS复合材料在自然光下表现为黄绿色且较为浑浊,在紫外光照射下可见发光强度相对减弱,但仍保持良好的绿色发光。该现象与图3(a)中观察到的长波区基线抬升相一致,主要归因于PZS包覆层引入后产生的光散射效应。同时,量子点在聚合物基体中的分散也可能带来一定的浓度稀释效应,从而使整体发光强度有所降低。

3.3 CsPbBr₃和CsPbBr₃@PZS的环境稳定性评价

环境稳定性是衡量钙钛矿量子点能否实现商业化应用的核心指标。图4对比分析了CsPbBr₃量子点包覆前后分别经历水、光及热处理条件下的发光稳定性。由于CsPbBr₃量子点本征的离子晶体特性且表面存在未配位的离子,暴露在水等极性溶剂中易发生结构退化^[42],因此在引入体积

表1 TRPL衰减曲线拟合数据

Tab. 1 Fitting parameters of the TRPL decay curves

Samples	τ_1 /ns	A_1 /%	τ_2 /ns	A_2 /%	τ_{ave} /ns
CsPbBr ₃	2.795 1	61.11	14.887 3	38.89	7.50
CsPbBr ₃ @PZS	4.015 9	33.75	29.531 0	66.25	20.92

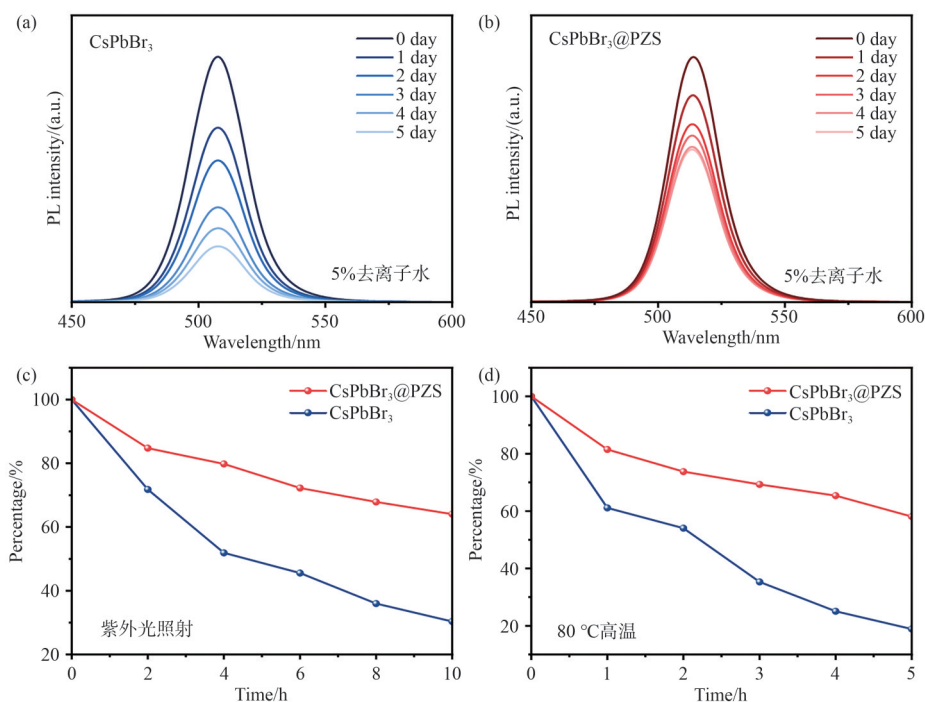


图4 CsPbBr₃和CsPbBr₃@PZS的环境稳定性。(a) CsPbBr₃量子点和(b) CsPbBr₃@PZS复合材料加入去离子水后不同时间下的PL光谱;(c) 连续紫外照射下PL强度随时间的变化;(d) 80 °C加热过程中PL强度的变化。

Fig. 4 Environmental stability of CsPbBr₃ and CsPbBr₃@PZS. PL spectra of (a) CsPbBr₃ QDs and (b) CsPbBr₃@PZS after adding deionized water at different times; (c) PL intensity evolution under continuous UV irradiation; (d) Evolution of PL intensity during heating at 80 °C.

分数为5%的去离子水后(图4(a)),其PL强度随时间延长迅速衰减。而CsPbBr₃@PZS复合材料在相同条件下(图4(b)),发光衰减速率明显减缓,5天后仍能维持较高的PL强度,且发射峰位及图谱形状基本保持不变。这表明PZS包覆层能够有效阻隔水分入侵,抑制CsPbBr₃量子点在极性环境中的降解过程。在连续紫外光照射(365 nm, 0.6 W)条件下,两种样品的PL强度变化如图4(c)所示。CsPbBr₃量子点在连续光照10 h后PL强度仅为初始值的30%,该现象可归因于光照诱导的表面配体动态脱附及缺陷态演化^[43]。相比之下,CsPbBr₃@PZS复合材料的PL强度在10 h后仍保留初始值的64%,说明PZS对量子点表面缺陷的钝化作用有助于抑制配体脱附,使复合材料的荧光保持率较初始量子点提高了34%。此外,在80 °C条件下进行热稳定性测试时(图4(d)),CsPbBr₃量子点的PL强度在5 h内迅速下降至初始值的19%,这可能与高温诱导晶体团聚及表面缺陷密度增加有关^[44]。得益于PZS优异的热稳定性,CsPbBr₃@PZS复合材料在热处理5 h后

仍能维持初始PL强度的58%。PZS包覆层在维持CsPbBr₃量子点本征发光特性的同时,有效提升了其对水、光和热等外界环境的稳定性,为其在背光及显示器件中的长期稳定运行提供了重要保障。

3.4 CsPbBr₃@PZS在背光显示器件中的应用

为评估CsPbBr₃@PZS复合材料在背光显示器件中的实际应用可行性,本文采用商业化蓝色LED芯片作为激发光源,将涂覆CsPbBr₃@PZS复合材料的玻璃片置于芯片顶部作为发射层,构建了简易的色转换发光器件。如图5(a)所示,在2.8 V驱动电压下获得的器件发射光谱在绿光区域呈现出与CsPbBr₃@PZS复合材料PL光谱相对应的特征发射峰,表明器件输出的绿光主要源自于复合材料的光致发光过程。图5(b)展示了不同驱动电压(2.5~2.8 V)下器件的发射光谱。随着驱动电压的增加,器件整体发射强度逐渐增强,且发射峰的位置及图谱形状基本保持不变,表明CsPbBr₃@PZS色转换层在不同工作条件下具有良好的光谱稳定性。图5(c)为器件背光发射光谱,

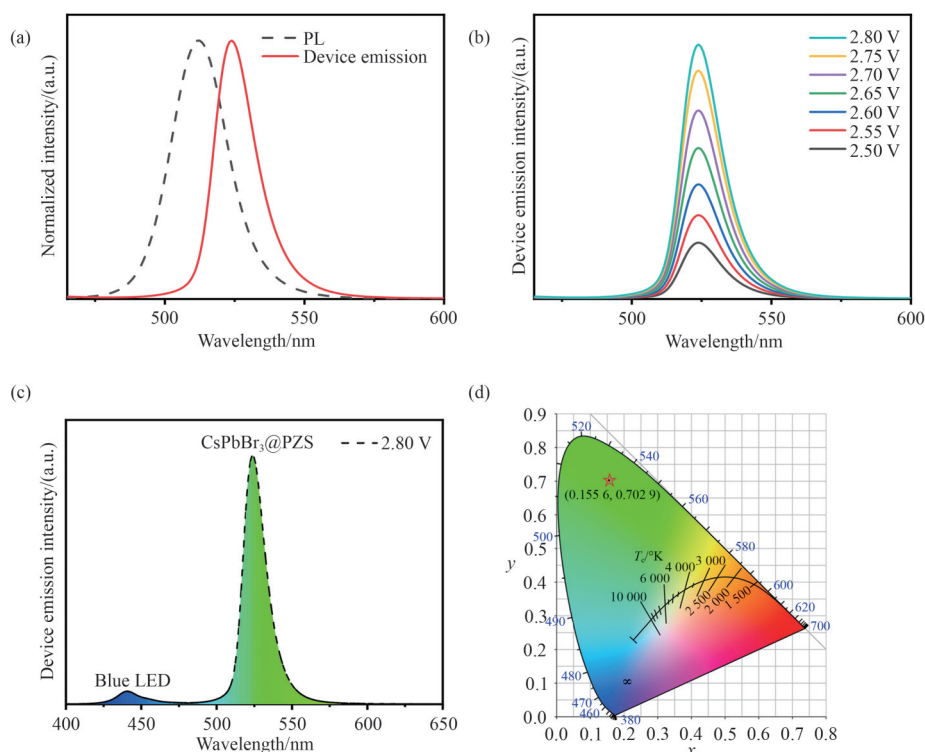


图 5 CsPbBr₃@PZS 复合材料的实际应用可行性分析。(a) CsPbBr₃@PZS 复合材料的 PL 光谱(虚线)和 2.8 V 驱动电压下的器件发射光谱(实线);(b) 不同驱动电压下器件的发射光谱;(c) 器件背光发射光谱;(d) 2.8 V 驱动电压下的 CIE 色度坐标分布图。

Fig. 5 Application performance of CsPbBr₃@PZS composites. (a) PL spectrum of CsPbBr₃@PZS (dashed line) and emission spectrum of the device (solid line) at a driving voltage of 2.8 V; (b) Emission spectra of the device at different voltages; (c) Backlight emission spectrum of the device; (d) CIE chromaticity coordinates of the device at 2.8 V.

其中短波段发射峰对应于蓝色 LED 芯片,而位于约 520 nm 的窄带绿光发射峰源于 CsPbBr₃@PZS 复合材料的色转换发射,体现出其作为背光显示与色转换材料的应用潜力^[45]。根据 2.8 V 驱动电压下的器件发射光谱可计算得到 CIE 色度坐标为(0.155 6,0.702 9),如图 5(d)所示,位于高饱和度绿色区域,进一步验证了 CsPbBr₃@PZS 复合材料能够实现窄带绿光输出并满足显示色域需求。

4 结 论

本文提出了一种原位缓慢缩聚包覆策略,在 CsPbBr₃量子点表面构建了 PZS 均匀包覆层,用于提升 CsPbBr₃量子点的光学和环境稳定性。形貌、结构及光谱测试表明,PZS 包覆层在未破坏 CsPbBr₃量子点的分散性和晶体结构的同时,能

够通过其分子结构中丰富的 N、P、S 等杂原子与 CsPbBr₃表面的 Pb²⁺发生多位点相互作用,实现对表面缺陷的有效钝化,使得复合材料的平均荧光寿命从 7.50 ns 显著延长至 20.92 ns。在此基础上,CsPbBr₃@PZS 复合材料在水、光和热等外界刺激条件下均表现出优于未包覆量子点的发光稳定性,在连续紫外光照 10 h 后其荧光保持率较初始量子点提高了 34%,验证了 PZS 包覆层在抑制离子迁移、阻隔环境侵蚀及增强结构稳定性方面的协同作用。同时在器件应用方面,以蓝光 LED 芯片构建的色转换器件在约 520 nm 处呈现出窄带绿光发射,在 2.8 V 驱动电压下的 CIE 色坐标为(0.155 6,0.702 9),展现出稳定的发光特性和优异的色纯度。综上所述,PZS 包覆层为钙钛矿量子点的界面调控提供了一种有效且通用的途径,为其在显示与光电器件领域中的稳定化应用提供了新的材料设计思路。

参 考 文 献:

- [1] PROTESESCU L, YAKUNIN S, BODNARCHUK M I, *et al.* Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX₃, X=Cl, Br, and I): novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(6): 3692-3696.
- [2] STEPHEN A, BIJU A, SONA C P, *et al.* Recent trends in synthesis, properties, and applications of CsPbX₃ quantum dots: a review [J]. *Journal of Luminescence*, 2024, 269(1): 120462.
- [3] REN X X, ZHANG X, XIE H X, *et al.* Perovskite quantum dots for emerging displays: recent progress and perspectives [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(13): 2243.
- [4] 吴显刚,季洪雷,钟海政. 量子点液晶显示应用技术的进展与展望[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(3): 276-290.
WU X G, JI H L, ZHONG H Z. Technical progress and prospects of QD-LCD display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(3): 276-290. (in Chinese)
- [5] SHAN Q S, DONG Y H, XIANG H Y, *et al.* Perovskite quantum dots for the next-generation displays: progress and prospect [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(36): 2401284.
- [6] 刘王宇,陈斐,孔淑祺,等. 全无机钙钛矿量子点的合成、性质及发光二极管应用进展[J]. *发光学报*, 2020, 41(2): 117-133.
LIU W Y, CHEN F, KONG S Q, *et al.* Synthesis, properties and application of all-inorganic perovskite quantum dots [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(2): 117-133. (in Chinese)
- [7] DONG H, RAN C X, GAO W Y, *et al.* Metal halide perovskite for next-generation optoelectronics: progresses and prospects [J]. *eLight*, 2023, 3(1): 3.
- [8] XU Y Y, LYU M, ZHU J. Surface engineering in CsPbX₃ quantum dots: from materials to solar cells [J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2024, 8(9): 2029-2055.
- [9] DING S S, HAO M M, LIN T, *et al.* Ligand engineering of perovskite quantum dots for efficient and stable solar cells [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2022, 69: 626-648.
- [10] YANTARA N, MATHEWS N. Toolsets for assessing ionic migration in halide perovskites [J]. *Joule*, 2024, 8(5): 1239-1273.
- [11] WU Y J, JIA R J, XU J, *et al.* Strategies of improving CsPbX₃ perovskite quantum dots optical performance [J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 845977.
- [12] 马腾,谢金峰,张世瑞,等. 超声驱动水油两相中绿色合成高稳定性CsPbBr₃@MS-SiO₂复合材料[J]. *液晶与显示*, 2026, 41(1): 16-25.
MA T, XIE J F, ZHANG S R, *et al.* Ultrasound-driven green synthesis of highly stable CsPbBr₃@MS-SiO₂ composites in a water-oil biphasic system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2026, 41(1): 16-25. (in Chinese)
- [13] WANG B, ZHANG C Y, ZHENG W L, *et al.* Large-scale synthesis of highly luminescent perovskite nanocrystals by template-assisted solid-state reaction at 800 °C [J]. *Chemistry of Materials*, 2020, 32(1): 308-314.
- [14] NAWROCKI J, ANILKUMAR V, JIA G B, *et al.* Organic shell engineering of CsPbBr₃ perovskite quantum dots for efficient textile-based photodetectors [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2025, 13(20): 15257-15267.
- [15] ZHANG C Y, WAN Q, WANG B, *et al.* Surface ligand engineering toward brightly luminescent and stable cesium lead halide perovskite nanoplatelets for efficient blue-light-emitting diodes [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(43): 26161-26169.
- [16] UDDIN M A, MOBLEY J K, MASUD A A, *et al.* Mechanistic exploration of dodecanethiol-treated colloidal CsPbBr₃ nanocrystals with photoluminescence quantum yields reaching near 100% [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(29): 18103-18112.
- [17] QIU J Q, XUE W N, WANG W, *et al.* Effective surface passivation on CsPbBr₃ nanocrystals via post-treatment with aromatic carboxylic acid [J]. *Dyes and Pigments*, 2022, 198: 109806.
- [18] HASSAN M S, BASERA P, KHAN B, *et al.* Bidentate Lewis base ligand-mediated surface stabilization and modulation of the electronic structure of CsPbBr₃ perovskite nanocrystals [J]. *Journal of the American Chemical*

- Society*, 2025, 147(1): 862-873.
- [19] MA K Z, DU X Y, ZHANG Y W, *et al.* *In situ* fabrication of halide perovskite nanocrystals embedded in polymer composites via microfluidic spinning microreactors [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(36): 9398-9404.
- [20] CHEN T Y, HUANG M N, YE Z J, *et al.* Blinking CsPbBr₃ perovskite nanocrystals for the nanoscopic imaging of electrospun nanofibers [J]. *Nano Research*, 2021, 14(5): 1397-1404.
- [21] FAN W X, WANG S L, GONG C J, *et al.* Synthesis of highly efficient and dispersible OM-CsPbBr₃ quantum dots integrated into polymers by surface medium anchoring strategy [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 520: 165951.
- [22] 陈晓钢, 赵梦云, 蔡俊虎, 等. 基于量子点@有序介孔复合材料的 Micro-LED 色转换特性 [J]. *发光学报*, 2024, 45(1): 59-68.
- CHEN X G, ZHAO M Y, CAI J H, *et al.* Color conversion characteristics of micro-LED based on quantum Dot@Ordered mesoporous composite materials [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2024, 45(1): 59-68. (in Chinese)
- [23] 季雨荷, 陈琪, 王玉氏, 等. 卤化物钙钛矿与金属有机框架复合材料合成及其在光电领域研究进展 [J]. *发光学报*, 2024, 45(10): 1622-1638.
- JI Y H, CHEN Q, WANG Y M, *et al.* Synthesis of halide perovskite and metal-organic framework composites and their research progress in field of optoelectronics [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2024, 45(10): 1622-1638. (in Chinese)
- [24] THAPA S, BHARDWAJ K, BASEL S, *et al.* Long-term ambient air-stable cubic CsPbBr₃ perovskite quantum dots using molecular bromine [J]. *Nanoscale Advances*, 2019, 1(9): 3388-3391.
- [25] BAI T X Y, WANG S W, BAI L Y, *et al.* Vacuum evaporation of high-quality CsPbBr₃ thin films for efficient light-emitting diodes [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2022, 17(1): 69.
- [26] ZHANG X Y, WO X X, HAN T W, *et al.* Synthesis and application of new polyphosphazene microsphere photocatalysts [J]. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2020, 30(4): 1281-1286.
- [27] GAO F, YANG W Q, LIU X L, *et al.* Highly stable and luminescent silica-coated perovskite quantum dots at nanoscale-particle level via nonpolar solvent synthesis [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 407: 128001.
- [28] QIU S L, MA C, WANG X, *et al.* Melamine-containing polyphosphazene wrapped ammonium polyphosphate: a novel multifunctional organic-inorganic hybrid flame retardant [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 839-848.
- [29] ZHOU X, QIU S L, XING W Y, *et al.* Hierarchical polyphosphazene@molybdenum disulfide hybrid structure for enhancing the flame retardancy and mechanical property of epoxy resins [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(34): 29147-29156.
- [30] WANG C, MYOUNG J M. Spatially confined synthesis of CsPbBr₃ quantum dots for high-performance pure-blue light-emitting diodes [J]. *Matter*, 2026, 9(1): 102416.
- [31] CHOI Y, CHO S B, LI C X, *et al.* Near unity quantum yield of strongly-confined blue-emitting CsPbBr₃ quantum dots via Lewis base phosphide ligand passivation [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1036: 181673.
- [32] KIM J Y, IM T Y, LIM J, *et al.* Pb-S coordination-assisted *in situ* ligand engineering of CsPbBr₃ nanocrystals using (3-mercaptopropyl) methyltrimethoxysilane for enhanced robustness and optoelectronic properties [J]. *Materials Horizons*, 2026, 13(2): 1068-1077.
- [33] GAO C J, YU P, YANG H Y, *et al.* Enhanced photoluminescence and stability of CsPbBr₃ quantum dots by anchoring on metal-organic frameworks for Cu²⁺ detection fluorescence probe [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1023: 180159.
- [34] AHIRWAR P, KUMAR R. Probing the physical properties of encapsulated CsPbBr₃ perovskite quantum dots thin film: a case study for enhancing stability and optoelectronic performance [J]. *Journal of Applied Physics*, 2025, 138(11): 114305.
- [35] GUO H. Enhancing the stability and photoluminescence of CsPbBr₃ nanocrystals through Au nanoparticle integration [J]. *Journal of Materials Science*, 2025, 60(10): 4615-4624.
- [36] ZHU L D, YUAN S L, CHENG J, *et al.* Room temperature *in-situ* synthesis of inorganic lead halide perovskite nanocrystals sol using ultraviolet polymerized acrylic monomers as solvent and their composites with high stability [J].

Applied Sciences, 2020, 10(9): 3325.

- [37] 余超, 楚学影, 姜丽, 等. ZnO微米棒基质中铕离子的偏振敏感发光特性[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(4): 742-749.
- YU C, CHU X Y, JIANG L, *et al.* Polarization sensitive luminescence properties of europium ions in ZnO microrod matrix [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 742-749. (in Chinese)
- [38] ZHANG W Y, LI Q S, LI Z S. Understanding the surface passivation effects of Lewis base in perovskite solar cells [J]. *Applied Surface Science*, 2021, 563: 150267.
- [39] SONG Y S, CAO S, WANG Y J, *et al.* Efficient deep-blue LEDs based on colloidal CsPbBr₃ nanoplatelets meeting the Rec. 2020 standard [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 336.
- [40] CHEN J X, JIA D L, QIU J M, *et al.* Multidentate passivation crosslinking perovskite quantum dots for efficient solar cells [J]. *Nano Energy*, 2022, 96: 107140.
- [41] PAN Q Y, ZHAO Q, WEI P X, *et al.* Surface ligands for perovskite quantum dots [J]. *ChemSusChem*, 2025, 18(4): e202401875.
- [42] GUO X X, LV Y C, WANG L W, *et al.* CsPbBr₃ perovskite quantum dots by mesoporous silica encapsulated for enhancing water and thermal stability via high temperature solid state method [J]. *Optical Materials*, 2024, 157: 116097.
- [43] BONATO L G, POGGETTO G D, MORAL R F, *et al.* Photostability of amine-free CsPbBr₃ perovskite nanocrystals under continuous UV illumination [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, 11(24): 8231-8242.
- [44] CHEN H Y, WANG Y F, WANG J N, *et al.* Thermal stability of CsPbBr₃ perovskite quantum dots assembled with SBA-15 [J]. *Coatings*, 2021, 11(8): 953.
- [45] 刘汉强, 涂永华, 魏俊青, 等. BN量子点与双戊酸协同诱导生长的Rec. 2020标准绿光CsPbBr₃纳米晶复合材料[J]. 发光学报, 2025, 46(4): 658-664.
- LIU H Q, TU Y H, WEI J Q, *et al.* Rec. 2020 standard green light emitting CsPbBr₃ nanocrystal composites based on synergistic induction growth of BNQD and glutaric acid [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2025, 46(4): 658-664. (in Chinese)

作者简介:



张世瑞,女,硕士研究生,2023年于合肥师范学院获得学士学位,主要从事水系锌离子电池和钙钛矿发光材料方面的研究。E-mail:19155175887@163.com



薛琪,女,博士,讲师,2018年于香港城市大学获得博士学位,主要从事多功能纳米材料、发光性质调控及光电器件应用等方面的研究。E-mail:xq@suda.edu.cn



Craig P YU,男,博士,教授,2021于东京大学获得博士学位,主要从事有机半导体材料设计、合成、电荷输运性质以及场效应晶体管等方面的研究。E-mail:craigpyu@suda.edu.cn



黄河,男,博士,教授,2017年于香港城市大学获得博士学位,主要从事光电材料的调控与器件制备、原位原位光谱监控与机理探究以及基于钙钛矿等新型光电材料器件和应用等方面的研究。E-mail:hh@suda.edu.cn