

三氟乙酸盐诱导的光谱稳定的蓝光钙钛矿发光二极管

袁豪, 孔令媚, 王林, 窦永江, 罗云, 杨绪勇

引用本文:

袁豪, 孔令媚, 王林, 等. 三氟乙酸盐诱导的光谱稳定的蓝光钙钛矿发光二极管[J]. 液晶与显示, 2021, 36(1): 123-133.

YUAN Hao, KONG Ling-mei, WANG Lin, et al. Highly stable blue perovskite light-emitting diodes induced by trifluoroacetate[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(1): 123-133.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0286>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蓝光钙钛矿材料及其电致发光器件

Blue perovskite materials for light-emitting diodes

液晶与显示. 2021, 36(1): 113-122 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0215>

钙钛矿发光二极管的研究进展

Research progress of perovskite light-emitting diodes

液晶与显示. 2021, 36(1): 105-112 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0284>

无镉无铅环保型蓝光量子点及其发光二极管器件

Cadmium-free and lead-free environment-friendly blue quantum dots and light-emitting diodes

液晶与显示. 2021, 36(1): 203-215 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0271>

氯化铯掺杂PEDOT : PSS助力高效率、高亮度钙钛矿发光二极管

PEDOT: PSS doped with cesium chloride for highly efficient and bright metal halide perovskite light-emitting diodes

液晶与显示. 2021, 36(1): 141-148 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0272>

有机添加剂在钙钛矿电致发光器件中的应用

Application of organic additive in perovskite light-emitting diodes

液晶与显示. 2021, 36(1): 149-157 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0261>

文章编号:1007-2780(2021)01-0123-11

三氟乙酸盐诱导的光谱稳定的蓝光 钙钛矿发光二极管

袁 豪, 孔令媚, 王 林*, 窦永江, 罗 云, 杨绪勇*

(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)

摘要:近年来,金属卤化物蓝光钙钛矿发光二极管(Perovskite light-emitting diodes, PeLEDs)的发展十分迅速。然而,氯/溴混合的蓝光钙钛矿在电场作用下容易发生卤素离子迁移,致使发光光谱发生红移。光谱的不稳定性已严重地阻碍了蓝光 PeLEDs 的商业应用。本文通过在钙钛矿前驱体中引入三氟乙酸铯(CsTFA)来提高 CsPbClBr₂ 晶体的成核密度,诱导形成了小晶粒的钙钛矿发光薄膜,进而增加了钙钛矿薄膜的致密度。更重要的是,CsTFA 中的碳氧双键(C=O)可以有效钝化 CsPbClBr₂ 晶粒晶界处的缺陷,抑制卤素阴离子发生离子迁移,极大地提升蓝光 PeLEDs 的光谱稳定性。在 10 V 的电压下,PeLEDs 的发光光谱仍可以保持非常稳定。此外,对比参比器件,PeLEDs 的最大亮度和最高外量子效率也分别提高了 31 倍和 8 倍。

关键词:蓝光钙钛矿薄膜;发光二极管;三氟乙酸铯;稳定性

中图分类号:TP394.1;TN383+.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2020-0286

Highly stable blue perovskite light-emitting diodes induced by trifluoroacetate

YUAN Hao, KONG Ling-mei, WANG Lin*, DOU Yong-jiang, LUO Yun, YANG Xu-yong*

(Key Laboratory of Advanced Display and System Applications of Ministry of Education,
Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Recently, blue perovskite light emitting diodes (PeLEDs) is becoming a research hot spot. However, the electroluminescence (EL) spectra of blue PeLEDs based on Cl/Br mixed perovskites will be redshifted under bias, due to the ion migration of Cl and Br anions, which badly hinders the commercialization of blue PeLEDs. In this work, the cesium trifluoroacetate (CsTFA) is introduced to the CsPbClBr₂ perovskite precursor to enhance the nucleation density, leading to the formation of small nanoparticle-based perovskite films and thus enhancing the film morphology. Most importantly, the C=O bonds in CsTFA can function effectively in passivating the defects at grain boundaries and preventing the ion migration of halide anions, which largely stabilize the EL spectra. The EL spectra can maintain even under high driven voltage. The maximum luminance and the external quantum

收稿日期:2020-10-24;修订日期:2020-11-13.

基金项目:国家自然科学基金(No.51675322, No.61735004)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.51675322, No.61735004)

* 通信联系人, E-mail: lin_wang@shu.edu.cn; yangxy@shu.edu.cn

efficiency (EQE) is enhanced by 31- and 8-fold compared with control devices, respectively.

Key words: blue perovskite film; light-emitting diodes; trifluoroacetate; stability

1 引言

金属卤化物钙钛矿(Metal halide perovskite, MHP)由于具有良好的电学和光学性能,例如载流子迁移率高^[1-2]、色纯度高^[3-4]和带隙易调^[5-6]等,在显示及照明领域展现出广阔的应用前景,因而引起了研究人员的广泛关注。基于蓝光钙钛矿的发光二极管(Perovskite light emitting diodes, PeLEDs)是钙钛矿领域的一个研究热点。2015年,Kumawat 等人^[7]首次报道了基于 MAPb(Br_{1-x}Cl_x)₃的蓝光 PeLEDs,其亮度和外量子效率(EQE)分别为 2 cd·m⁻²和 0.0001%。You 等人^[8]通过在 PEA₂(CsPbBr₃)₂PbBr₄ 钙钛矿前驱体中引入较大的间隔阳离子乙胺(Ethylammonium, EA),获得了发光峰位于 488 nm,亮度和 EQE 分别为 2 191 cd·m⁻²和 12.1%的蓝光 PeLEDs。然而,光谱的不稳定性仍是蓝光 PeLEDs 面临的一大挑战^[9-11]。

金属卤化物钙钛矿的一般化学通式为 ABX₃(A 位是一价的有机或者无机阳离子,例如 CH₃NH₃⁺(MA⁺)、CH(NH₂)₂⁺(FA⁺)和 Cs⁺等;B 位是二价金属阳离子,例如 Pb²⁺和 Sn²⁺等;X 位是卤素离子,包括 Cl⁻、Br⁻和 I⁻)。目前,蓝光 PeLEDs 的实现主要通过 3 种策略。第一种策略是采用 Sn²⁺、Bi²⁺、Sb²⁺等二价阳离子替换 Pb²⁺,使晶格发生扭曲,带隙变大,光谱发生蓝移来实现蓝光发射^[12-14]。然而,这种非铅钙钛矿不仅光致发光量子产率(PLQY)较低且二价阳离子极易被氧化成四价,稳定性极差,不利于提高蓝光 PeLEDs 的稳定性^[15]。第二种策略是通过引入长链的间隔阳离子,例如苯乙胺(PEA⁺)^[16]、苯丁胺(PBA⁺)^[17]、丁胺(BA⁺)^[18]、乙胺(EA⁺)^[19]等到 3D 结构的钙钛矿中,使得无机八面体的层数(*n*)减少,形成准二维(quasi-2D)钙钛矿(M₂A_{n-1}B_nX_{3n+1},其中 M 为长链间隔阳离子),带隙也从 2.6 eV (*n*=4)增加到 2.7 eV (*n*=3),2.9 eV (*n*=2),3.1 eV (*n*=1)^[20],发光光谱随之发生蓝移,因而实现蓝色发光。相比于 3D 蓝光钙钛矿,quasi-2D 蓝光钙钛矿的成膜性更好,

但是长链间隔阳离子的引入会使钙钛矿层间的电荷传输能力减弱。且 quasi-2D 钙钛矿薄膜的低维相(*n*≤3)不稳定,在器件运行的过程中,会逐渐向大 *n* 相(*n*>3)转变,导致带隙变窄,光谱也随之发生红移。通过这种策略获得的 PeLEDs 表现出较低的 EQE 以及较宽的电致发光(Electroluminescent, EL)光谱^[17,19,21-22]。Sargent 等人^[23]通过在 PEA₂Cs_{n-1}Pb_nBr_{3n+1}中引入 γ-氨基丁酸,来抑制大 *n* 相的形成,来提高蓝光 PeLEDs 的稳定性。第三种策略是通过调控 3D 混卤素钙钛矿(ABCl_xBr_{3-x})中 Cl/Br 的比例,实现从天蓝色(490 nm)到深蓝色甚至紫外光(410 nm)的可调发光。然而,混卤素的钙钛矿在偏压的作用下,会发生离子迁移并导致相分离,使得蓝光钙钛矿发射峰位出现红移^[24-25]。且 3D 混卤素钙钛矿薄膜的覆盖率低和缺陷密度较高,所以很难获得性能优异的 3D 蓝光 PeLEDs。已有文献报道,通过对钙钛矿中 A 位阳离子掺杂(例如碱金属离子 Rb⁺等)或者 B 位阳离子掺杂(例如稀有金属离子 Y³⁺等)^[26-27],可以改善钙钛矿薄膜的成膜性,得到连续致密、小晶粒的薄膜。同时 A 位或 B 位阳离子还可以起到钝化钙钛矿晶界处的缺陷,抑制卤素离子迁移的作用,有助于提高蓝光发射的稳定性。

本文通过在蓝光钙钛矿 CsPbClBr₂ 前驱体中引入 CsTFA,制备得到了致密的小晶粒钙钛矿薄膜,CsTFA 中的碳氧双键(C=O)可以有效钝化晶界和钙钛矿表面的缺陷,抑制混卤素钙钛矿薄膜的离子迁移现象,提高了蓝光 PeLEDs 的光谱稳定性。PeLEDs 的发光光谱在 10 V 的高压下仍可以保持稳定。蓝光 PeLEDs 在 484 nm 发光峰处的最大亮度为 3 594.28 cd·m⁻²,对应的最大 EQE 为 0.96%。相比于无 CsTFA 修饰的器件,器件亮度和 EQE 分别提升了 31 倍和 8 倍。

2 实验

2.1 材料的制备

三氟乙酸铯(CsTFA)的制备:将 10 g 碳酸铯(Cs₂CO₃, Innochem, 纯度 90%)溶解于 30 mL 的

去离子水中,搅拌至 Cs_2CO_3 全部溶解,然后将 6 mL 的三氟乙酸(HTFA, Innochem, 纯度 99.9%)缓慢滴加到 Cs_2CO_3 的水溶液中,搅拌 4 h 后,将该溶液放进真空干燥柜里,60 °C 干燥 4 h,得到 CsTFA 粉末,保存在手套箱中。

钙钛矿前驱体溶液的制备:将三氟乙酸铯(36.5 mg)、溴化铅(PbBr_2 , Sigma, 纯度 99.99%, 38.9 mg)、氯化铅(PbCl_2 , Sigma, 纯度 99.99%, 29.5 mg)和溴化铯(CsBr , Alfa Aesar, 纯度 99.99%, 45.1 mg)溶解于 1.5 mL 的二甲基亚砜(DMSO, Alfa Aesar, 纯度 99.9%)中,60 °C 加热搅拌 4 h,得到浓度为 0.2 mol/L 前驱体溶液,过滤后氮气环境保存以备使用。

NiO_x 前驱体溶液的制备:将 0.062 2 g 的乙酸镍四水合物(Nickel acetate tetrahydrate, Sigma, 纯度 99.998%)溶解于 5 mL 的乙醇(Ethyl acetate, Innochem, 99.8%)中,随后加入 15 μL 乙醇胺(Ethanolamine, Alfa Aesar, >99%),搅拌 4 h 至完全溶解,过滤后氮气环境保存以备使用。

十二烷基磺酸钠(SDS)溶液的制备:将 5 mg 十二烷基磺酸钠(SDS, Innochem, 纯度 99.9%)溶解于 1 mL 的乙醇,搅拌 1 h 至完全溶解,过滤后氮气环境保存以备使用。

2.2 器件制备

选用方块电阻为 $15 \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$ 的氧化铟锡(Indium tin oxide, ITO)玻璃基板作为器件阳极。进行实验前,对其进行清洗。首先使用沾有洗洁精的无尘布对 ITO 玻璃基板进行擦拭,然后依次用去离子水、丙酮和异丙醇分别对其超声清洗 15 min,再用氧等离子气体对其表面处理 15 min,来提高 ITO 玻璃基板表面的亲水性和功函数。在 ITO 玻璃基板上,采用旋涂法制备 NiO_x 空穴传输层,旋涂转速为 8 000 r/min,旋涂时间为 40 s,并在空气环境中 300 °C 退火 40 min。接着旋涂 SDS 薄膜作为界面修饰层,旋涂转速为 4 000 r/min,旋涂时间为 40 s。随后再次进行氧等离子气体处理 5 min。接着将其转移到充满氮气的手套箱中,旋涂钙钛矿前驱体溶液来制备钙钛矿薄膜,旋涂转速为 4 000 r/min,旋涂时间为 40 s,并在 150 °C 退火 2 min。最后在蒸镀箱中,依次蒸镀电子传输层 1, 3, 5-三(1-苯基-1H-苯并咪唑-2-基)苯(TPBi)、电子注入层/电极修饰层氟化锂(LiF)和负极铝(Al)。

2.3 测试与表征

扫描电子显微镜(Field emission-scanning electron microscopy, FE-SEM, 型号:JSM-7500F)被用来测试薄膜的横截面图。布鲁克 AXS 公司的 D8 ADVANCE 衍射仪被用来测试 X 射线粉末衍射(X-ray powder diffraction, XRD)图谱。可编程电源表 Keithley 2400 用来测试电流密度-电压(J - V)曲线。测试使用的亮度计是 LS110, Konica Minolta, 光谱光度计是 Spectrascan PR670, Photo Research。Escalab 250Xi 紫外光电子能谱仪来测试紫外光电子能谱(Ultraviolet photo emission spectroscopy, UPS)。使用 FLS920 荧光光谱仪测试薄膜的光致发光(Photo-luminescence, PL)光谱和荧光寿命(Photoluminescence lifetime, PL lifetime)。蓝光 PeLEDs 寿命的测试使用的是研华科技(ADVANTECH)的 610L CRYSCO。

3 结果与讨论

3.1 钙钛矿薄膜形貌

CsTFA 的引入提高了钙钛矿薄膜的均匀性和致密性,如图 1(a)和图 1(b)的 SEM 图所示。对比钙钛矿薄膜的晶粒尺寸分布不均一,薄膜覆盖率低、连续性差,存在大量的孔洞。基于对比钙钛矿薄膜组装成的器件,在偏压下会产生较大的漏电流,空穴和电子不能在发光层中进行有效的辐射复合。CsTFA 的使用,导致组成钙钛矿薄膜的晶粒形貌更均匀,尺寸分布更均一。这是由于引入 CsTFA 导致钙钛矿的成核密度更高,形成了大量小晶粒组成的钙钛矿薄膜,使得薄膜的均匀性和致密性都有了显著的提升,有利于 PeLEDs 中空穴和电子在发光层进行有效的辐射复合,展现出更好的器件性能。图 1(c)是退火过后钙钛矿薄膜的 XRD 图谱。CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜在 15.3° 和 30.7° 出现了两个明显的特征峰,分别对应了正交相(Pnma) CsPbClBr_2 的 (101) 和 (202) 晶面^[28-32]。与对比钙钛矿薄膜相比,CsTFA 引入导致晶面(121)消失,这是由于 CsTFA 会诱导钙钛矿晶粒沿着(101)和(202)晶面方向生长。并且衍射峰的强度明显提高,说明 CsTFA 显著提高了钙钛矿晶粒的结晶度,有利于提升钙钛矿薄膜的光学性能和稳定性。

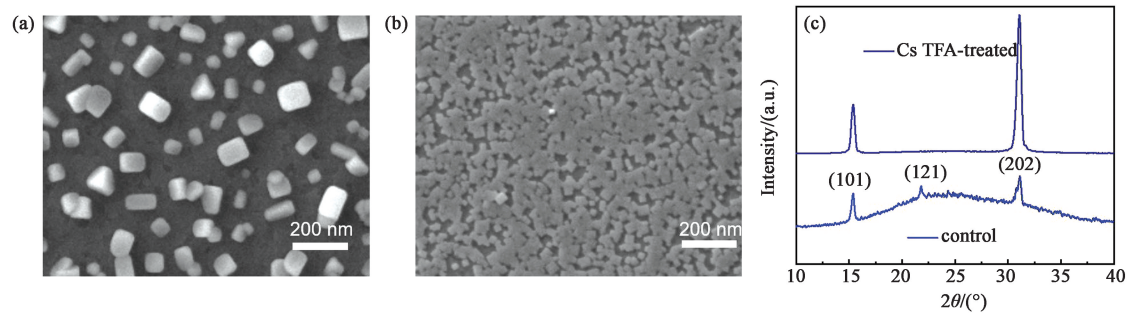


图 1 (a) 对比钙钛矿薄膜的 SEM 图; (b) CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜的 SEM 图; (c) 对比钙钛矿薄膜和 CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜的 XRD 图谱。

Fig.1 (a) SEM image of control perovskite film; (b) SEM image of CsTFA-treated perovskite film; (c) XRD patterns of control and CsTFA-treated perovskite films.

此外, XRD 衍射峰的半高宽(Full width at half maximum, FWHM)变宽,说明引入 CsTFA 减小了钙钛矿的晶粒尺寸,与 SEM 图展现的薄膜形貌一致。

3.2 薄膜的光学性能和热稳定性

图 2(a)为玻璃基底上两种钙钛矿薄膜的稳

态荧光光谱,激发光源的波长为 385 nm。如图 2 (a)所示,对比钙钛矿薄膜 PL 强度较低,CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜的 PL 强度提高了 2.64 倍。同时,PLQY 也从 1.27% 提高到了 15.3%。图 2(b)所示是两种钙钛矿薄膜的 PL 的衰减曲线,结果表明,对比钙钛矿薄膜的 PL 寿命仅有 16.3 ns。

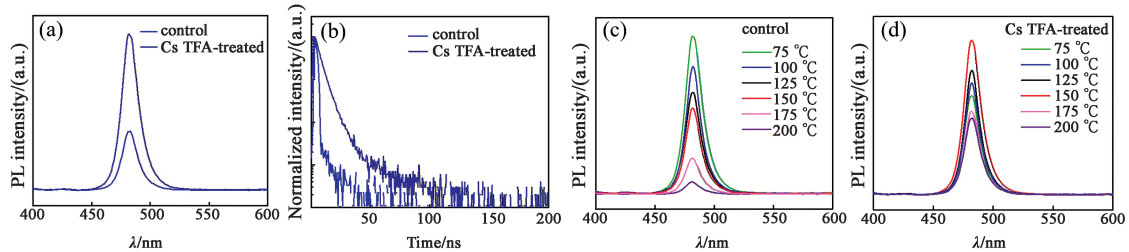


图 2 对比钙钛矿薄膜和 CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜的光学性能表征。(a) PL 光谱; (b) 荧光寿命; (c) 不同退火温度下对比钙钛矿薄膜的 PL 光谱; (d) 不同退火温度下 CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜的 PL 光谱。

Fig.2 Optical properties of control and CsTFA-treated perovskite films.(a) PL spectra; (b) PL lifetime; (c) PL spectra of control perovskite film annealed at different temperatures; (d) PL spectra of CsTFA-treated perovskite film annealed at different temperatures.

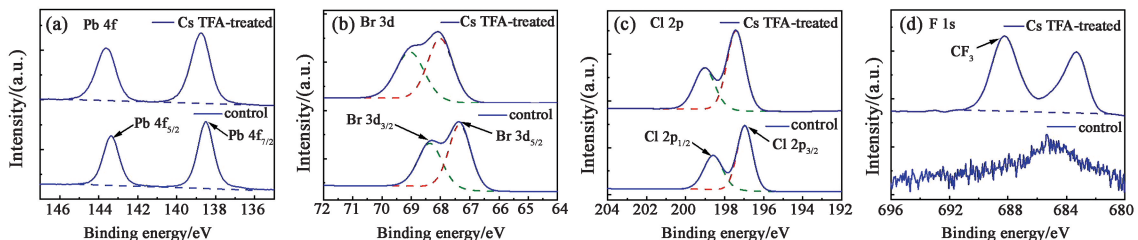


图 3 对比钙钛矿薄膜和 CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜的 XPS 图谱。(a) Pb 4f; (b) Br 3d; (c) Cl 2p; (d) F 1s

Fig.3 XPS spectra of control and CsTFA-treated perovskite films.(a) Pb 4f; (b) Br 3d; (c) Cl 2p; (d) F 1s.

与对比钙钛矿薄膜相比,CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜的荧光寿命明显增加,达到了 28.5 ns。较长的荧光寿命证明了 CsTFA 有效地钝化了钙钛矿薄膜中存在的缺陷态,降低载流子在薄膜中发生非辐射复合的几率。

钙钛矿薄膜的热稳定性是其能否进行商业应用的关键因素。为了研究 CsTFA 对钙钛矿薄膜热稳定性的影响,我们分别对两种钙钛矿薄膜在 75~200 °C 范围内分别退火 2 min 研究 PL 的强度变化,结果如图 2(c)和 2(d)所示。CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜的热稳定性显著提升,当温度升高到 200 °C 后,其 PL 强度仍为初始发射强度的 50.1%。而相同测试条件下,对比钙钛矿薄膜的 PL 强度迅速降低至初始发射强度的 8%。图 3 是对比钙钛矿薄膜和 CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜中 Pb、Br、Cl 和 F 的 X 射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)。对比钙钛矿薄膜的 Pb 4f 光谱显示两个主峰,分别位于 138.48 eV 和 143.38 eV,分别对应 Pb 4f_{7/2} 和 Pb 4f_{5/2} 能级,在 Br 3d 和 Cl 2p 光谱中,可以观察到 Br 3d 的结合能峰在 68.53 eV(Br 3d_{5/2})和 69.33 eV(Br 3d_{3/2}),Cl 2p 的结合能峰在 198.08 eV(Cl 2p_{3/2})和 199.83 eV(Cl 2p_{1/2})。值得注意的是,CsTFA 修饰过的钙钛矿薄膜的 Pb 4f、Br 3d 和 Cl 2p 的峰位均向高结合能方向发生了移动,证明晶体结构的稳定性提高了,有利于提升钙钛矿薄膜的热稳定性^[33-35]。在图 3(d)中,F1s 的 XPS 图谱证实了 CsTFA 修饰过的钙钛矿薄膜中 TFA⁻ 的存在。

3.3 PeLEDs 器件性能

图 4(a)为蓝光 PeLEDs 的示意图,器件的结构为: ITO/NiO_x-SDS/Perovskite/TPBi/LiF/Al。图 4(b)为器件的横截面 SEM 图,从下到上依次

为玻璃基板、ITO 阳极(100 nm)、NiO_x 空穴传输层(40 nm)、SDS 界面修饰层(5 nm)、钙钛矿发光层(40 nm,CsPbClBr₂ 和 CsTFA : CsPbClBr₂)、TPBi 电子传输层(35 nm)、LiF 电子注入层/电极修饰层(1 nm)和阴极 Al(100 nm)。图 4(c)为器件的能带结构示意图,其中阳极 ITO 和 LiF/Al 电极的功函数值,NiO_x 空穴传输层的导带底值(CBM)和价带顶值(VBM)以及 TPBi 的最低未占轨道(LUMO)值和最高已占轨道(HOMO)值均来自自己发表的实验数据值^[36-37]。NiO_x 与钙钛矿发光层直接接触时,NiO_x 表面存在的氧空位缺陷,不仅不利于钙钛矿晶粒成膜,还会造成钙钛矿薄膜的荧光猝灭,降低钙钛矿薄膜的稳定性^[38-39]。同时,NiO_x 和钙钛矿层之间能级势垒为 0.5 eV,能级严重不匹配,导致空穴注入非常困难。通过进行 PL 光谱可以证明 SDS 可以有效地抑制 NiO_x 对钙钛矿薄膜的荧光猝灭,如图 4(d)所示,引入 SDS 之后,钙钛矿薄膜的 PL 强度明显增强。采用吸收光谱和 UPS 光谱对 SDS 修饰的 NiO_x 和钙钛矿发光层的 CBM 和 VBM 进行研究,测试结果如图 5(a)~(c)所示。从吸收光谱可知,SDS 修饰的 NiO_x 的带隙并不会变宽,仍然为 3.5 eV。由 UPS 光谱可知 NiO_x 和 NiO_x-SDS 薄膜的费米能级分别位于 -4.23 eV 和 -4.43 eV,费米能级到价带的距离分别为 1.07 eV 和 1.17 eV,因此我们可以算出 NiO_x 和 NiO_x-SDS 薄膜的价带位置分别为 -5.3 eV 和 -5.6 eV。又由于它们的禁带宽度都为 3.5 eV,可推断出导带位置分别为 -1.8 eV 和 -2.1 eV。所以在 NiO_x 与钙钛矿发光层之间引入界面修饰层 SDS 不仅可以钝化 NiO_x 表面缺陷,从而抑制发光层的荧光猝灭,同时还降低了空穴的注入势垒(0.3 eV),利于空穴有效注入到钙钛矿发光层。

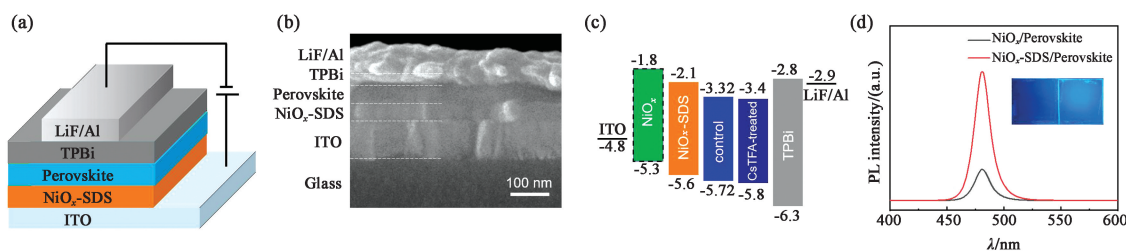


图 4 (a) 器件结构示意图;(b) 器件 SEM 横断面图;(c) 器件能级结构图。

Fig.4 (a) Schematic diagram of device structure;(b) SEM cross section of device;(c) Diagram of device energy level structure.

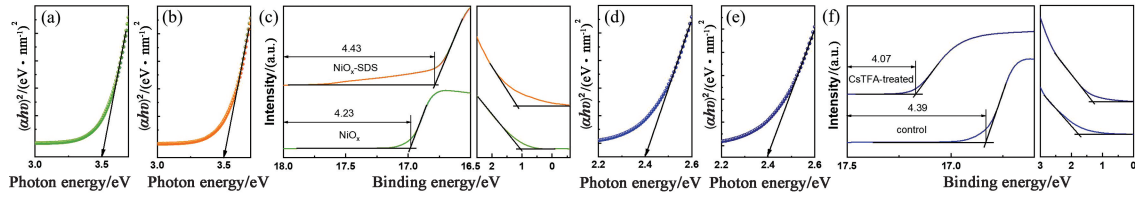


图 5 空穴传输层和钙钛矿发光层的带隙表征和 UPS 光谱。(a) NiO_x 的带隙；(b) NiO_x -SDS 的带隙；(c) 空穴传输层的 UPS 光谱；(d) CsPbClBr_2 的带隙；(e) $\text{CsTFA}:\text{CsPbClBr}_2$ 的带隙；(f) 钙钛矿发光层的 UPS 光谱。

Fig.5 Band gap characterization and UPS spectra of the hole transport layer and perovskite light-emitting layer. (a) Band gap of NiO_x ; (b) Band gap of NiO_x -SDS; (c) UPS spectra of hole transport layer; (d) Band gap of CsPbClBr_2 ; (e) Band gap of $\text{CsTFA}:\text{CsPbClBr}_2$; (f) UPS spectra of perovskite light-emitting layer.

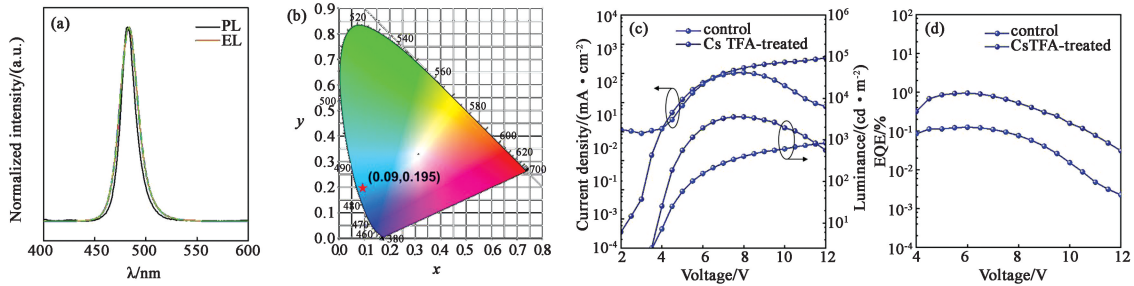


图 6 (a) 归一化后的器件电致发光和薄膜光致发光光谱；(b) 国际照明委员会色坐标图；(c) 电流密度-电压-亮度曲线；(d) 外量子效率-电压曲线。

Fig.6 (a) Normalized EL and PL spectra; (b) Commission Internationale de l'Eclairage coordinates; (c) Current density-voltage-luminance curve; (d) EQE-voltage curve.

图 5(d)~(f) 是 CsPbClBr_2 和 $\text{CsTFA}:\text{CsPbClBr}_2$ 钙钛矿发光层的光学带隙测试和 UPS 测试结果。在引入 CsTFA 后,钙钛矿的带隙几乎不发生宽化,这表明 TFA^- 是位于钙钛矿表面和晶界处,并没有进入钙钛矿的晶格。从 UPS 的测试结果我们得出 CsPbClBr_2 和 $\text{CsTFA}:\text{CsPbClBr}_2$ 钙钛矿薄膜的费米能级的位置分别为 -4.39 eV 和 -4.07 eV ,费米能级到价带的距离分别为 1.33 eV 和 1.73 eV ,得出对应的价带的位置分别为 -5.72 eV 和 -5.8 eV ,再结合它们的光学带隙,可以算出 CsPbClBr_2 和 $\text{CsTFA}:\text{CsPbClBr}_2$ 钙钛矿薄膜的导带的位置为 -3.32 eV 和 -3.4 eV 。以上的测试结果表明,在引入 TFA^- 后,钙钛矿薄膜的空穴注入势垒仅仅增加了 0.08 eV ,在可以接受的范围内。电子由 LiF 修饰的 Al 电极注入后,通过电子传输层 TPBi 传输到钙钛矿发光层。 TPBi 和钙钛矿之间的电子注入势垒大约仅为 0.1 eV ,因此电子可以有效地注入到钙

钛矿发光层中。

基于对比钙钛矿薄膜和 CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜作为发光层制备了 PeLEDs。如图 6(a) 所示,对比 PeLEDs 的初始发光峰位为 484 nm (FWHM 为 20 nm),与 PL 发光峰位 482 nm 相比,红移了 2 nm ,这是由于在电场作用下产生的斯塔克效应和点间库仑相互作用的影响导致的^[40-41]。如图 6(b) 所示, CsTFA -PeLEDs 发射光的色坐标位于 $(0.09, 0.195)$,是纯正的天蓝色发光。如图 6(c)~(d) 所示,分别是 PeLEDs 的电流密度-电压-亮度(J - V - L)曲线和外量子效率-电压(EQE- V)曲线。由图可知,两器件的启动电压均为 3.5 V ,而基于对比钙钛矿薄膜的 PeLEDs (对比 PeLEDs) 在 2 V 电压下,具有很高的电流密度($1.23\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$),漏电流较大,这是由于发光层薄膜覆盖率低导致的。而基于 CsTFA 修饰的 PeLEDs (CsTFA -PeLEDs),在 2 V 电压时对应的电流密度为 $3.58\times 10^{-3}\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,表明漏

电流很小。这与上述钙钛矿薄膜形貌研究结果是一致的。对比 PeLEDs 的最大亮度和 EQE 分别为 $115.81 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 0.12% , 而 CsTFA-PeLEDs 的最大亮度和 EQE 分别为 $3594.28 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 0.96% , 分别提高了 31 倍和 8 倍。

3.4 PeLEDs 器件寿命

器件寿命是衡量 PeLEDs 性能的一个很重要参数, 只有兼具高的寿命和高效率的器件才具有商业化的应用前景。图 7 为器件寿命曲线, 在初始亮度为 $100 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 的情况下, 对比 PeLEDs 的亮度迅速衰减, 半衰期 (T_{50}) 仅为 5.1 min, 而 CsTFA-PeLEDs 的寿命得到了一定的改善, T_{50} 延长至 10.3 min, 提升了 2.02 倍。寿命的提高主要归因于光滑、少孔洞、经 CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜。这一结果再次证明了 CsTFA 对提升钙钛矿薄膜质量和优化 PeLEDs 的稳定性起到显著作用。

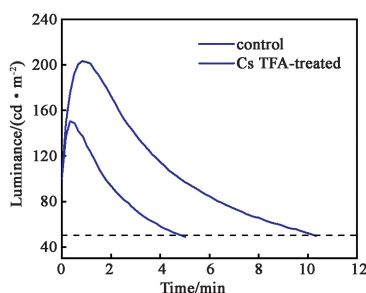


图 7 器件寿命曲线

Fig.7 Device operation lifetime curve

3.5 PeLEDs 光谱稳定性

目前 3D 蓝光 PeLEDs 普遍面临光谱不稳定的问题。图 8 是两器件随着电压变化的 EL 光谱。随着电压的增大, 对比 PeLEDs 的 EL 光谱发生了红移。当电压为 10 V 时, 红移至 504 nm。这是由于钙钛矿晶体结构中的混合卤素阴离子在电场作用下发生了离子迁移, 分别形成了富 Br 区和富 Cl 区产生了相分离所导致的^[42-44]。如图 8 (b)所示, CsTFA-PeLEDs 的 EL 光谱的发光强度随着电压升高而增强, 且发光峰位不发生移动。为了进一步验证 CsTFA 能够使器件的光谱稳定, 测试了在 5 V 条件下, 器件的光谱随时间的变化。如图 9 所示, 对比 PeLEDs 的光谱从器件开始工作就不断红移, 从 0 min 对应的 484 nm 移动到了 5 min 对应的 496 nm。但是, CsTFA-

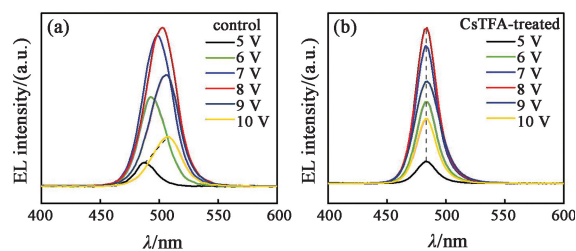


图 8 器件 EL 光谱随电压的变化。(a) 对比器件; (b) CsTFA 修饰的器件。

Fig.8 EL spectra of PeLEDs with different driving voltage. (a) Control PeLEDs; (b) CsTFA-PeLEDs.

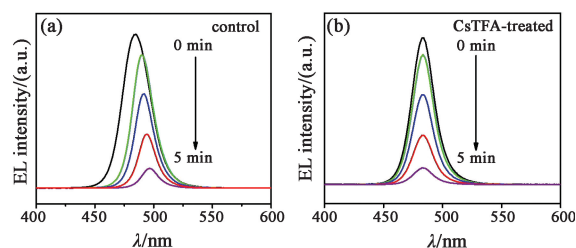


图 9 5 V 条件下, PeLEDs 的 EL 光谱图随时间的变化。(a) 对比器件; (b) CsTFA 修饰的器件。

Fig.9 EL spectra of PeLEDs with different time at 5 V. (a) Control PeLEDs; (b) CsTFA-PeLEDs.

PeLEDs 的光谱在 0~5 min 内不发生任何移动。这是因为在引入了 CsTFA 后, CsTFA 中的 C=O 键可以和晶界处的 Pb^{2+} 缺陷进行配位, 有效钝化晶界处存在的缺陷态, 抑制了离子迁移, 因而提高了光谱的稳定^[33]。为了证明 C=O 键对晶界处 Pb^{2+} 缺陷的钝化, 对 CsTFA · DMSO 粉末和 CsTFA · CsPbClBr₂ · DMSO 粉末进行了红外光谱测试, 测试结果如图 10 所示。在 CsTFA ·

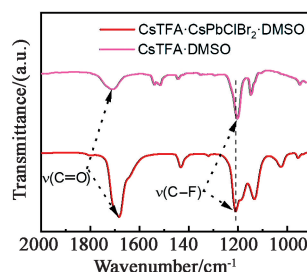


图 10 CsTFA · DMSO 粉末和 CsTFA · CsPbClBr₂ · DMSO 粉末的红外光谱

Fig.10 FTIR of CsTFA · DMSO powder and CsTFA · CsPbClBr₂ · DMSO powder

DMSO 红外光谱中, TFA⁻ 的 C=O 和 CF₃ 的拉伸振动峰分别位于 1 708 cm⁻¹ 和 1 201 cm⁻¹ [45]。在 CsTFA · CsPbClBr₂ · DMSO 复合体中, C=O 和 Pb²⁺ 之间发生配位反应使得电子密度增大, 从而导致 C=O 移动到较低的频率 (1 683 cm⁻¹), C—F 键移至更高的频率 (1 210 cm⁻¹) [46-50]。

我们对近年来已报道的蓝光 PeLEDs 进行了总结和比较, 如表 1 所示。显然, 蓝光发射的 PeLEDs 普遍都面临寿命较短的问题, 这是由于光谱稳定性差导致的。因此, 针对这一问题, 本文有效地提升了 PeLEDs 的光谱稳定性和操作寿命。

表 1 最近蓝光钙钛矿 LED 总结
Tab.1 Summary of the state-of-the-art blue PeLEDs

组份	种类	最大亮度/ (cd · m ⁻²)	EQE/ %	EL/ nm	寿命	FWHM/ nm	参考文献
CsPbBr ₃	QDs	90	12.3	484	20 min	30	[51]
MAPbBr _x Cl _{3-x}	QDs	2 673/2 452	1.38/1.13	445/495	—	17/22	[52]
Mn-CsPbBr _x Cl _{3-x}	QDs	245	2.12	466	—	18	[53]
PEA ₂ Cs _{n-1} Pb _n Br _{3n+1} : GABA	Quasi-2D	200	6.3	478	150 s	30	[23]
CsPbCl _{0.9} Br _{2.1} : PEABr : NaBr : PbBr ₂	Quasi-2D	2 060	11.7	488	900 s	20	[54]
PEA ₂ (Cs _{1-x} EA _x PbBr ₃) ₂ PbBr ₄	Quasi-2D	2 191	12.1	488	1 h	25	[55]
CsPbBr ₃ : PEACl : YCl ₃	Quasi-2D	5 183/9 040	4.8/11	477/487	120 min	40	[29]
Cs ₁₀ (MA _{0.17} FA _{0.83}) _{100-x} PbCl _{1.5} Br _{1.5}	3D	3 567	1.7	475	10 min	28	[56]
Rb _{0.17} Cs _{0.83} PbBr _{2.22} Cl _{0.78}	3D	9 243	1.66	484	15 min	18	[57]
CsTFA : CsPbClBr ₂	3D	3 594.28	0.96	484	10.3 min	20	本工作

4 结 论

本文通过在钙钛矿前驱体溶液中引入 CsTFA, 制备表面致密连续、小晶粒和少孔洞的全无机钙钛矿薄膜。CsTFA 对钙钛矿薄膜表面及晶界处存在的缺陷具有钝化作用, 有助于提升钙钛矿薄膜的光学性能。与对比的钙钛矿薄膜相比, CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜的 PL 强度提高了 2.64 倍, PLQY 提高了 11.9 倍, 从 1.27% 提高到了 15.3%。此外, CsTFA 还有助于提升钙钛矿薄膜的热稳定性, 在 200 °C 退火的条件下,

CsTFA 修饰的钙钛矿薄膜 PL 强度为原始强度的 50.1%, 而对比的钙钛矿薄膜的 PL 强度降低至仅为初始强度的 8%。CsTFA 有效地提高了 PeLEDs 的光谱稳定性, 实现了 10 V 高压下仍保持稳定的发光光谱, 使器件寿命延长了约 2.02 倍。与对比 PeLEDs 相比, CsTFA-PeLEDs 的发光亮度提高了 31 倍, 高达 3 594.28 cd · m⁻², EQE 提高了 8 倍, 达到了 0.96%。研究结果表明, CsTFA 对抑制电场作用下卤素离子迁移, 保持 PeLEDs 的 EL 光谱稳定性具有显著效果, 为制备稳定的蓝光 PeLEDs 提供了一种新方法。

参 考 文 献:

- [1] WEHRENFENNIG C, EPERON G E, JOHNSTON M B, *et al.* High charge carrier mobilities and lifetimes in organolead trihalide perovskites [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(10): 1584-1589.
- [2] ZENG J P, LI X M, WU Y, *et al.* Space-confined growth of CsPbBr₃ film achieving photodetectors with high performance in all figures of merit [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28(43): 1804394.

- [3] TAN Z K, MOGHADDAM R S, LAI M L, *et al.* Bright light-emitting diodes based on organometal halide perovskite[J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2014, 9(9): 687-692.
- [4] HOYE R L Z, CHUA M R, MUSSELMAN K P, *et al.* Enhanced performance in fluorene-free organometal halide perovskite light-emitting diodes using tunable, low electron affinity oxide electron injectors [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(8): 1414-1419.
- [5] SICHERT J A, TONG Y, MUTZ N, *et al.* Quantum size effect in organometal halide perovskite nanoplatelets [J]. *Nano Lett.*, 2015, 15(10): 6521-6527.
- [6] WANG H R, LI X M, YUAN M J, *et al.* Fast postmoisture treatment of luminescent perovskite films for efficient light-emitting diodes [J]. *Small*, 2018, 14(15): 1703410.
- [7] KUMAWAT N K, DEY A, KUMAR A, *et al.* Band gap tuning of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{Br}_{1-x}\text{Cl}_x)_3$ hybrid perovskite for blue electroluminescence [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, 7(24): 13119-13124.
- [8] CHU Z M, ZHAO Y, MA F, *et al.* Large cation ethylammonium incorporated perovskite for efficient and spectra stable blue light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11: 4165.
- [9] LIU Y, CUI J Y, DU K, *et al.* Efficient blue light-emitting diodes based on quantum-confined bromide perovskite nanostructures [J]. *Nat. Photonics*, 2019, 13(11): 760-764.
- [10] VASHISHTHA P, NG M, SHIVARUDRAIAH S B, *et al.* High efficiency blue and green light-emitting diodes using ruddlesden - popper inorganic mixed halide perovskites with butylammonium interlayers [J]. *Chem. Mater.*, 2018, 31(1): 83-89.
- [11] LI Z C, CHEN Z M, YANG Y C, *et al.* Modulation of recombination zone position for quasi-two-dimensional blue perovskite light-emitting diodes with efficiency exceeding 5% [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10: 1027.
- [12] LENG M Y, YANG Y, ZENG K, *et al.* All-inorganic bismuth-based perovskite quantum dots with bright blue photoluminescence and excellent stability [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28(1): 1704446.
- [13] TAN Z F, LI J H, ZHANG C, *et al.* Highly efficient blue-emitting Bi-doped Cs_2SnCl_6 perovskite variant: photoluminescence induced by impurity doping [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28(29): 1801131.
- [14] LENG M Y, CHEN Z W, YANG Y, *et al.* Lead-free, blue emitting bismuth halide perovskite quantum dots [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2016, 55(48): 15012-15016.
- [15] ZHITOMIRSKY D, VOZNYI O, HOOGLAND S, *et al.* Measuring charge carrier diffusion in coupled colloidal quantum dot solids [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(6): 5282-5290.
- [16] WANG Z B, YUAN F L, SUN W D, *et al.* Multifunctional p-type carbon quantum dots: a novel hole injection layer for high-performance perovskite light-emitting diodes with significantly enhanced stability [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(24): 1901299.
- [17] CHENG L, CAO Y, GE R, *et al.* Sky-blue perovskite light-emitting diodes based on quasi-two-dimensional layered perovskites [J]. *Chin. Chem. Lett.*, 2017, 28(1): 29-31.
- [18] WANG Z B, WANG F Z, SUN W D, *et al.* Manipulating the trade-off between quantum yield and electrical conductivity for high-brightness quasi-2D perovskite light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28(47): 1804187.
- [19] WANG Q, REN J, PENG X F, *et al.* Efficient sky-blue perovskite light-emitting devices based on ethylammonium bromide induced layered perovskites [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(35): 29901-29906.
- [20] QUAN L N, ZHAO Y B, DE ARQUER F P G, *et al.* Tailoring the energy landscape in quasi-2D halide perovskites enables efficient green-light emission [J]. *Nano Lett.*, 2017, 17(6): 3701-3709.
- [21] CHEN Z M, ZHANG C Y, JIANG X F, *et al.* High-performance color-tunable perovskite light emitting devices through structural modulation from bulk to layered film [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(8): 1603157.
- [22] CONGREVED N, WEIDMAN M C, SEITZ M, *et al.* Tunable light-emitting diodes utilizing quantum-confined layered perovskite emitters [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(3): 476-481.
- [23] WANG Y K, MA D X, YUAN F L, *et al.* Chelating-agent-assisted control of CsPbBr_3 quantum well growth enables stable blue perovskite emitters [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11: 3674.
- [24] HOKE E T, SLOTCAVAGE D J, DOHNER E R, *et al.* Reversible photo-induced trap formation in mixed-halide hybrid perovskites for photovoltaics [J]. *Chem. Sci.*, 2015, 6(1): 613-617.

- [25] DRAGUTA S, SHARIA O, YOON S J, *et al.* Rationalizing the light-induced phase separation of mixed halide organic-inorganic perovskites [J]. *Nat. Commun.*, 2017, 8: 200.
- [26] WANG H L, ZHAO X F, ZHANG B H, *et al.* Blue perovskite light-emitting diodes based on RbX-doped polycrystalline CsPbBr₃ perovskite films [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(19): 5596-5603.
- [27] JIANG Y Z, QIN C C, CUI M H, *et al.* Spectra stable blue perovskite light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10: 1868.
- [28] LI J H, XU L M, WANG T, *et al.* 50-fold EQE improvement up to 6.27% of solution-processed all-inorganic perovskite CsPbBr₃ QLEDs *via* surface ligand density control [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(5): 1603885.
- [29] SONG J Z, LI J H, LI X M, *et al.* Quantum dot light-emitting diodes based on inorganic perovskite cesium lead halides (CsPbX₃) [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(44): 7162-7167.
- [30] 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.
- [31] HILLS-KIMBALL K, PÉREZ M J, NAGAOKA Y, *et al.* Ligand engineering for Mn²⁺ doping control in CsPbCl₃ perovskite nanocrystals *via* a quasi-solid solid cation exchange reaction [J]. *Chem. Mater.*, 2020, 32(6): 2489-2500.
- [32] CHENG J N, LI Y N, QU W, *et al.* Mechanochemical synthesis and characterization of Mn-doped CsPbCl₃ perovskite nanocrystals [J]. *J. Alloys Compd.*, 2020, 822: 153615.
- [33] WANG H R, ZHANG X Y, WU Q Q, *et al.* Trifluoroacetate induced small-grained CsPbBr₃ perovskite films result in efficient and stable light-emitting devices [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10: 665.
- [34] LIU M, ZHONG G H, YIN Y M, *et al.* Aluminum-doped cesium lead bromide perovskite nanocrystals with stable blue photoluminescence used for display backlight [J]. *Adv. Sci.*, 2017, 4(11): 1700335.
- [35] NAM J K, CHAI S U, CHA W, *et al.* Potassium incorporation for enhanced performance and stability of fully inorganic cesium lead halide perovskite solar cells [J]. *Nano Lett.*, 2017, 17(3): 2028-2033.
- [36] CAO F, WANG H R, SHEN P Y, *et al.* High-efficiency and stable quantum dot light-emitting diodes enabled by a solution-processed metal-doped nickel oxide hole injection interfacial layer [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(42): 1704278.
- [37] CHIH Y K, WANG J C, YANG R T, *et al.* NiO_x electrode interlayer and CH₃NH₂/CH₃NH₃PbBr₃ interface treatment to markedly advance hybrid perovskite-based light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(39): 8687-8694.
- [38] BAI Y, CHEN H N, XIAO S, *et al.* Effects of a molecular monolayer modification of NiO nanocrystal layer surfaces on perovskite crystallization and interface contact toward faster hole extraction and higher photovoltaic performance [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26(17): 2950-2958.
- [39] CHEN W, ZHOU Y C, CHEN G C, *et al.* Alkali chlorides for the suppression of the interfacial recombination in inverted planar perovskite solar cells [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2019, 9(19): 1803872.
- [40] MASHFORD B S, STEVENSON M, POPOVIC Z, *et al.* High-efficiency quantum-dot light-emitting devices with enhanced charge injection [J]. *Nat. Photonics*, 2013, 7(5): 407-412.
- [41] EMPEDOCLES S A, BAWENDI M G. Quantum-confined stark effect in single CdSe nanocrystallite quantum dots [J]. *Science*, 1997, 278(5346): 2114-2117.
- [42] BISCHAK C G, HETHERINGTON C L, WU H, *et al.* Origin of reversible photoinduced phase separation in hybrid perovskites [J]. *Nano Lett.*, 2017, 17(2): 1028-1033.
- [43] LI W, ROTHMANN M U, LIU A, *et al.* Phase segregation enhanced ion movement in efficient inorganic CsPbIBr₂ solar cells [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2017, 7(20): 1700946.
- [44] TANG X F, VAN DEN BERG M, GU E N, *et al.* Local observation of phase segregation in mixed-halide perovskite [J]. *Nano Lett.*, 2018, 18(3): 2172-2178.
- [45] LU W, XIE K, PAN Y, *et al.* Effects of carbon-chain length of trifluoroacetate co-solvents for lithium-ion battery electrolytes using at low temperature [J]. *J. Fluor. Chem.*, 2013, 156: 136-143.
- [46] SHAO Y C, FANG Y J, LI T, *et al.* Grain boundary dominated ion migration in polycrystalline organic-inorganic halide perovskite films [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2016, 9(5): 1752-1759.

- [47] MARANDI F, NIKPEY Z, KHOSRAVI M, *et al.* Synthesis and characterization of lead(II) complexes with substituted 2,2'-bipyridines, trifluoroacetate, and furoyltrifluoroacetate [J]. *J. Coord. Chem.*, 2011, 64(17): 3012-3021.
- [48] CAO X B, LI Y H, FANG F, *et al.* High quality perovskite films fabricated from Lewis acid-base adduct through molecular exchange [J]. *RSC Adv.*, 2016, 6(75): 70925-70931.
- [49] 马雪, 庄仕伟, 韩丽锦, 等. 合成及薄膜制备条件对 CsPbBr₃ 全无机钙钛矿量子点特性的影响[J]. *发光学报*, 2019, 40(8): 949-955.
- MA X, ZHUANG S W, HAN L J, *et al.* Effects of synthesis and film preparation conditions on properties of CsPbBr₃ inorganic perovskite quantum dots [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(8): 949-955. (in Chinese)
- [50] 朱红, 田宇, 唐建新. 基于纳米压印 PET 基底的高效柔性有机电致发光器件[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(8): 733-739.
- ZHU H, TIAN Y, TANG J X. High-efficiency flexible organic light-emitting diodes on nanoimprinted PET substrate [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Displays*, 2016, 31(8): 733-739. (in Chinese)
- [51] DONG Y T, WANG Y K, YUAN F L, *et al.* Bipolar-shell resurfacing for blue LEDs based on strongly confined perovskite quantum dots [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2020, 15(8): 668-674.
- [52] DENG W, XU X Z, ZHANG X J, *et al.* Organometal halide perovskite quantum dot light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26(26): 4797-4802.
- [53] HOU S C, GANG M K, QUAN Q M, *et al.* Efficient blue and white perovskite light-emitting diodes via manganese doping [J]. *Joule*, 2018, 2(11): 2421-2433.
- [54] PANG P Y, JIN G R, LIANG C, *et al.* Rearranging low-dimensional phase distribution of quasi-2D perovskites for efficient sky-blue perovskite light-emitting diodes [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(9): 11420-11430.
- [55] WANG H L, XU Y S, WU J, *et al.* Bright and color-stable blue-light-emitting diodes based on three-dimensional perovskite polycrystalline films via morphology and interface engineering [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2020, 11(4): 1411-1418.
- [56] KIM H P, KIM J, KIM B S, *et al.* High-efficiency, blue, green, and near-infrared light-emitting diodes based on triple cation perovskite [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, 5(7): 1600920.

作者简介:



袁 豪(1996—),男,四川绵阳人,硕士研究生,2018 年于重庆理工大学获得学士学位,主要从事钙钛矿发光二极管的研究。E-mail: 1466990946@qq.com



王 林(1992—),女,山西临汾人,博士,讲师,2018 年于湖北大学获得博士学位,研究主要涉及纳米发光材料与器件领域。E-mail: Lynn WANG@shu.edu.cn



杨绪勇(1982—),男,黑龙江大庆人,博士,教授,2015 年于新加坡南洋理工大学大学获得博士学位。研究主要涉及纳米发光材料与器件领域。E-mail: yangxy@shu.edu.cn