

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2021.09.006

基于长链胺及聚合物的高效蓝色发光器件^①

杨小丽, 何丽红, 连亚军, 吴燕婷, 肖择武

西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715

摘要: 为了促进钙钛矿发光器件在显示和照明方面的应用, 钙钛矿蓝光器件的研究受到广泛关注. 在混卤素钙钛矿发光层 MAPbBr_2Cl 中引入长链丁基胺阳离子和聚合物添加剂聚环氧乙烷, 通过减小晶粒尺寸, 钝化缺陷, 较好地抑制了离子迁移与非辐射复合. 采用这种方法制备了发光最大波长位于 484 nm、最大亮度为 $2\,876\text{ cd/m}^2$ 和最高电流效率为 3.7 Cd/A 的天蓝色钙钛矿发光器件, 较发光层为 MAPbBr_2Cl 器件的效率提高了近 15 倍.

关键词: 蓝色发光器件; 准二维钙钛矿; 卤素混杂; 长链胺; 聚合物添加剂

中图分类号: O469 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5471(2021)09-0043-07

High-Efficiency Blue Light-Emitting Diodes Based on Long-Chain Ammonium and Polymers

YANG Xiaoli, HE Lihong,
LIAN Yajun, WU Yanting, XIAO Zewu

School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to facilitate the application of perovskite light-emitting devices in display and lighting, the research of blue perovskite light-emitting diodes (PeLEDs) has received extensive attention. In this paper, long-chain butylammonium cations and polymer additive polyethylene oxide are introduced into halide-doped perovskite- MAPbBr_2Cl . By reducing the grain size and passivating defects, ion migration and non-radiative recombination are satisfactorily suppressed. In this way, a sky blue perovskite light-emitting device with the emission peak at 484 nm is produced, its maximum brightness being $2\,876\text{ cd/m}^2$ and its maximum current efficiency being 3.7 Cd/A , which is nearly 15 times higher than that of the MAPbBr_2Cl device.

Key words: blue light-emitting device; quasi-two-dimensional perovskite; mixed halide; long-chain amine; polymer additive

金属卤化物钙钛矿材料 AMX_3 (A : CH_3NH_3^+ , Cs^+ ; M : Pb^{2+} , Sn^{2+} ; X : Cl^- , Br^- , I^-) 具有高荧光量子产率、带隙可调、可溶液加工、高载流子迁移率和独特的缺陷容忍特性等优点^[1-3], 在钙钛矿太阳能电

① 收稿日期: 2020-08-21
基金项目: 国家自然科学基金项目(11474232).
作者简介: 杨小丽, 硕士研究生, 主要从事钙钛矿发光器件的研究.

池^[4]、发光器件^[5]、激光^[6]和光电探测器^[7]等方面展现出广泛的研究和应用前景. 2014 年, Tan 等人^[8]报道了基于三维钙钛矿在室温下操作的近红外和绿色发光器件, 其外部量子效率(external quantum efficiency, EQE)分别为 0.8% 和 0.1%. 自这项开创性工作以来, 通过改善薄膜形貌^[9-10], 调控组分, 优化器件结构和修饰界面^[11]等方法, 钙钛矿发光器件的性能得到了显著提高, 绿色、红色和近红外发光器件的最大 EQE 均超过 20%.

传统的金属卤化物呈现出 MAPbX_3 的三维结构, 混合卤化物钙钛矿的带隙可以通过控制卤素组分来调节. 目前, 蓝色发光器件因其电荷注入效率低、界面发光猝灭、钙钛矿层缺陷密度大等原因^[12], 其性能落后于红色和绿色发光器件, 这使得钙钛矿发光器件在显示和照明领域的发展应用受到了阻碍. 通常, 蓝色发光器件的制备方法有两种: ①采用高带隙混合卤化物钙钛矿发光材料 $\text{MAPbBr}_x\text{Cl}_{1-x}$ 来制备蓝色钙钛矿发光器件(发光波长在 450~490 nm 之间). Sadhanala 等人^[13]通过改变氯溴离子比例来调控钙钛矿材料的发光波长, 所制备的蓝色发光器件最大 EQE 约为 0.1%. 虽然 $\text{MAPbBr}_x\text{Cl}_{1-x}$ 这种混合卤化物发光材料能够制备蓝光器件, 但是, 在光照和电压偏置下, 卤素离子的迁移使相分离成富氯相和富溴相, 因此, 在器件工作期间, 电致发光波长会从蓝色发光区域移至绿色, 波长红移是这种制备方法的不足之处. ②制备低维钙钛矿材料. 二维层状钙钛矿材料具有自然的多量子阱结构, 阱间能实现有效的能量传递, 提高了低带隙发光相中的激发态密度, 抑制了非辐射复合损耗^[14], 基于二维层状蓝色发光器件的最大 EQE 为 1%~3%^[5]. Li 和 Vashishtha 等人^[15-16]报道了基于混合卤化物准二维层状钙钛矿的蓝色发光器件, 其发光波长约为 480 nm, 最大 EQE 分别为 5.7% 和 6.2%.

聚合物添加剂如聚环氧乙烷(PEO)^[17-18]、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)^[19]和聚丙烯腈(PAN)^[20]可以通过改善钙钛矿薄膜形貌, 钝化缺陷, 增强湿度稳定性, 来显著提高钙钛矿发光器件的性能. Bi 等人^[18]的研究指出 PEO 添加剂不仅可以改善薄膜形貌, 而且能抑制发光效率较低的 $n=1$ 相形成, 进而有效抑制激发态的非辐射复合, 提高器件发光效率. 尽管聚合物-钙钛矿复合薄膜能有效提高有机金属卤化物钙钛矿薄膜形貌和发光性能, 但基于聚合物-钙钛矿复合薄膜的蓝色发光器件的性能还有待进一步提高.

本研究通过引入长链胺和聚合物添加剂的方法制备钙钛矿蓝色发光器件, 长链丁基胺阳离子(BA^+)形成的准二维层状钙钛矿有效地改善了薄膜形貌, 降低了缺陷密度^[21]. 聚合物添加剂(PEO)进一步减小晶粒尺寸, 钝化薄膜缺陷态, 抑制离子迁移与非辐射复合损耗. 采用这种方法制备了发光波长为 484 nm, 最大亮度为 2 876 cd/m^2 , 最高电流效率为 3.7 Cd/A 的蓝色发光器件.

1 实验部分

1.1 实验材料

甲基氯化胺(MACl)、溴化铅(PbBr_2)、丁基溴化胺(BABr)、丁基氯化胺(BACl)、聚(9-乙烯基咔唑)(PVK)和 1, 3, 5-三[(3-吡啶基)-3-苯基]苯(TmPyPB)购自西安宝莱特光电科技有限公司(中国); 聚(3, 4-乙烯二氧噻吩)-聚(苯乙烯磺酸盐)(poly(3, 4-ethylene-dioxythiophene))(PEDOT:PSS)购于德国贺利氏公司. 二甲基甲酰胺(DMF)、乙醚(DEE)、氯苯(CB)和聚环氧乙烷(PEO)($M_v=600\ 000$)购于西格玛奥德里奇公司. 所有材料均按原样使用.

1.2 器件结构

器件结构见图 1, 其中 PEDOT:PSS 和氟化铯(CsF)作为空穴和电子注入层, PVK 和 TmPyPB 作为空穴传输层和电子传输层, 氧化铟锡(ITO)和铝(Al)分别是透明的阳极和阴极.

1.3 钙钛矿发光层的制备

通过以 0.5 : 0.5 : 0 : 0, 0.5 : 0.5 : 0.25 : 0.25, 0.5 : 0.5 : 0.375 : 0.375 和 0.5 : 0.5 : 0.5 : 0.5

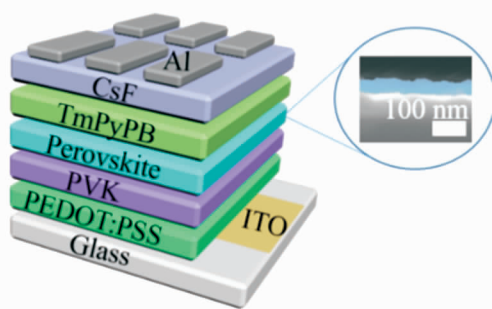


图 1 器件结构

的物质的量之比在 DMF 中溶解 PbBr_2 , MACl , BABr 和 BACl , 来制备钙钛矿前体溶液, 分别表示为 BA 0, BA 0.5, BA 0.75 和 BA 1.0. 在最优化的 BA 0.75 基础上, 制备了 BA 0.75 与 PEO 不同质量分数之比 (0.625%, 1.25%, 2.5%) 的混合溶液 (分别以 PEO 0.625, PEO 1.25, PEO 2.5 来表示). 首先, 将已清洁的 ITO 基板用 UV-臭氧处理 30 min. 接着, 将聚(4-苯乙烯磺酸钠)(S-PSS)改性的 PEDOT:PSS 层以 5 000 r/min 的速度旋涂到 ITO 基板上, 在 170 °C 的温度下退火 10 min 以去除残留的水分^[22]. 将 PVK 层以 3 000 r/min 的速度旋涂到 PEDOT:PSS 层上, 在 150 °C 的温度下退火 5 min, 再暴露于 UV-臭氧中 30 s 以形成亲水性表面, 从而改善钙钛矿层的附着力. 将钙钛矿层以 3 000 r/min 的速度旋涂在 PVK 层上, 在成膜过程中, 将 300 μL DEE 滴在样品上, 以加快结晶过程^[23]. 将样品在 80 °C 下退火 15 min. 最后, 通过热蒸发将 TmPyPB(60 nm), CsF(1 nm) 和 Al(100 nm) 依次沉积在钙钛矿层上.

钙钛矿前驱体溶液的具体制备过程见图 2.

1.4 测试

使用编程的 Keithley 2400 源表和 Konica-Minolta Cs-100A 色度计测量器件的电流密度-电压-亮度(J-V-I)特性; 通过配备有 Cu-K α 辐射源的 Rigaku D/Max-B X 射线衍射仪分析晶体结构; 用 JSM-7100F 场发射扫描电子显微镜(SEM)观察薄膜表面形貌; 用 Ocean Optics USB4000 UV-Vis 光谱仪记录电致发光光谱; 用爱丁堡 FLS920 分光光度计记录稳态光致发光光谱; 用 Shimadzu UV-2600 分光光度计获得 UV-Vis 吸收光谱.

2 结果与讨论

2.1 钙钛矿薄膜形貌

图 3a 展示了不同 BA⁺ 浓度样品的 SEM 俯视图像. BA 0 样品的表面不连续, 存在较多孔洞, 这将引起严重的漏电流. 对于 BA 0.5, BA 0.75 和 BA 1.0 样品, 钙钛矿薄膜的覆盖率显著提高. 同时, 随着 BA⁺ 浓度的增加, 晶粒尺寸逐渐减小, 这归因于 BA⁺ 成分对结晶的限制^[24].

图 3b 是不同 PEO 质量分数样品的 SEM 图. 从图中能够明显地看出, 引入 PEO 之后, 钙钛矿薄膜表面变得光滑且无孔洞, 晶粒尺寸也明显减小^[25]. 在 2.5% 的比例以下, 薄膜表面非常平整, 很难看出晶粒, 比例达到 2.5%, 复合薄膜表面出现的一些大晶粒, 可能来源于薄膜表面上 PEO 的富集.

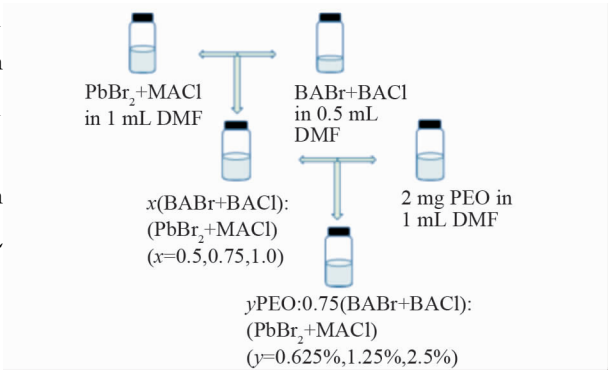
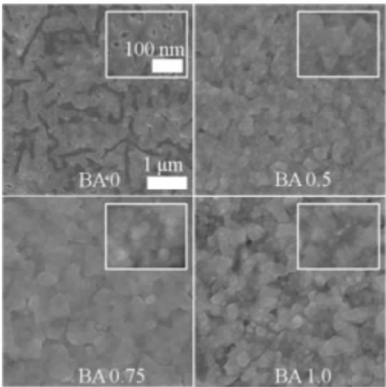
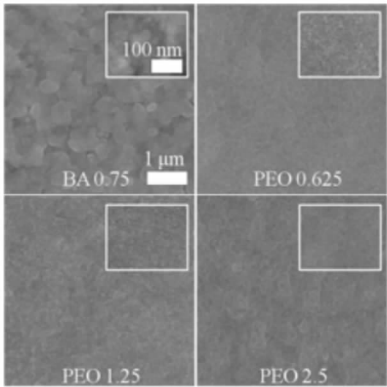


图 2 基于 $\text{MAPbBr}_2\text{Cl} + \text{BA} + \text{PEO}$ 钙钛矿前驱体溶液的制备过程



a. 不同BA⁺浓度样品的SEM俯视图像



b. 不同PEO质量分数样品的SEM俯视图像

图 3 样品的 SEM 俯视图像

2.2 光学性能

通过 X 射线衍射(XRD)对钙钛矿复合薄膜的结晶度进行表征,图 4 显示了 BA 0,BA 0.75,PEO 1.25 等 3 个样品的 XRD 图. BA 0 样品在 15.2°和 30.6°处的衍射峰,分别对应于立方相的(100)和(200)晶面^[26]. BA 0.75 样品在低 2θ 区域(<10°)表现出明显的衍射峰,表明三维钙钛矿相向二维层状钙钛矿相的转变^[21]. 使用 Brag 方程计算出 3.6°和 7.0°衍射峰的晶格常数分别为 2.43 nm 和 1.26 nm,对应于 $n=3$ 和 $n=1$ 的钙钛矿相的层间间距^[27]. 与 BA 0.75 的薄膜相比,PEO 1.25 样品的主要衍射峰位置基本不变,而衍射峰变宽,强度变弱,表明钙钛矿薄膜结晶度下降^[17].

图 5a 给出了不同样品的紫外-可见吸收光谱. BA 0 样品显示出大约 500 nm 的吸收边,材料吸光度在较短波长下逐渐增加. BA⁺ 的添加导致材料吸收边蓝移,在材料吸收谱中,379,417 和 436 nm 处出现尖锐的激子吸收峰,这些吸收峰分别对应于 $n=1,2$ 和 3 的钙钛矿相^[24]. 小 n 值钙钛矿相的吸光度随 BA⁺ 浓度的增大而增加. BA⁺ 的加入导致了三维钙钛矿相到二维层状钙钛矿相的转变,这与 XRD 结果一致. 进一步讨论加入 PEO 是否会影响钙钛矿相的分布,UV-Vis 测试结果见图 5b,从图 5 中可以看出,随着 PEO 质量分数的增加, $n=3$ 处的激子吸收峰强度逐渐增强,这表明 PEO 的引入会促进大 n 相的形成^[18].

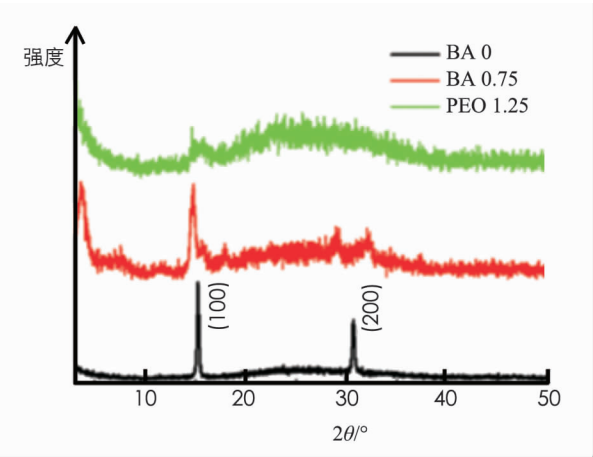


图 4 BA 0,BA 0.75,PEO 1.25 3 个样品在 PVK 上的 XRD 图谱

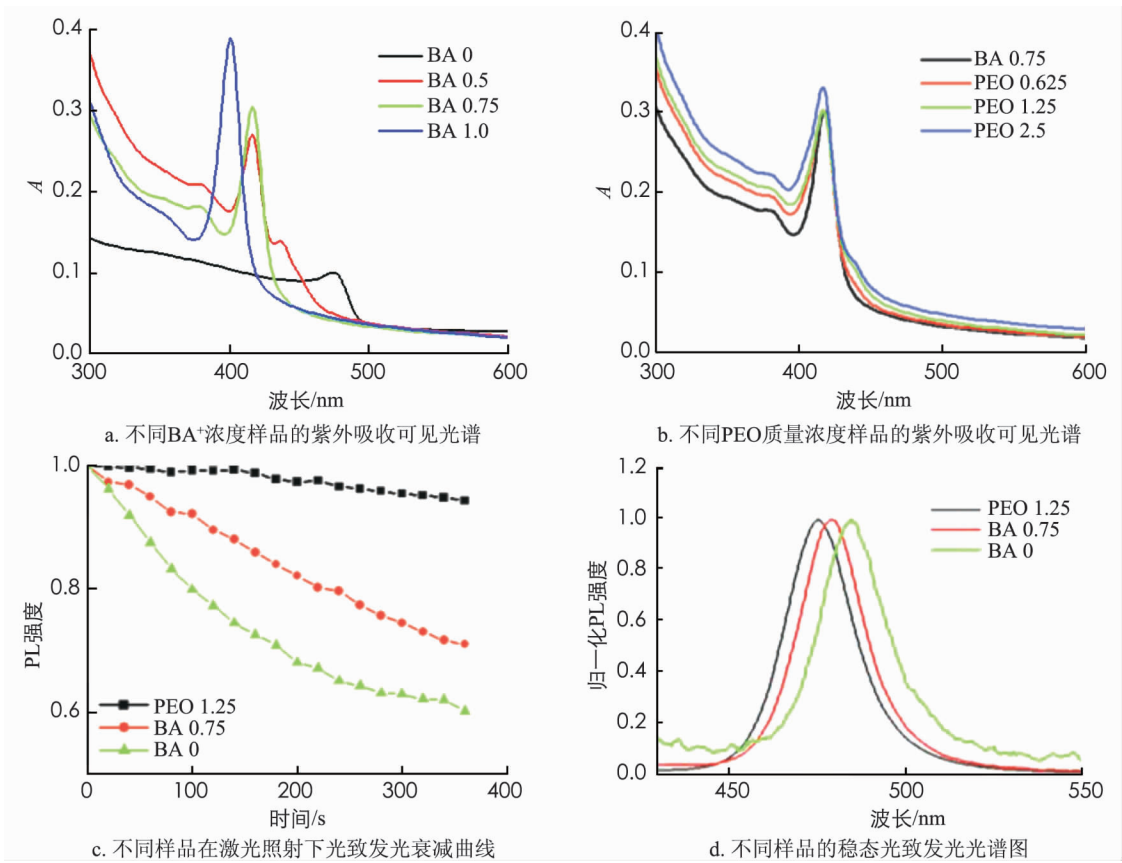


图 5 含不同添加剂样品的光学性能表征

在 30 mW/cm², 波长为 405 nm 的激光持续照射 6 min 后,样品的光致发光(PL)强度衰减曲线见图 5c,BA 0 样品的 PL 强度衰减为照射前的 60%,引入了长链胺的样品 BA 0.75 衰减为 70%左右,而加入长

链丁基胺及 PEO 的样品 PEO 1.25 仍保持原来的 95% 左右, 这表明引入长链丁基胺及聚合物有利于 PL 稳定性的提高^[28]. 图 5d 为样品的稳态光致发光(PL)光谱. 原始钙钛矿前驱体溶液制备的样品(BA 0)PL 发射峰为 485 nm. 与 BA 0 样品相比, BA 0.75 样品的 PL 谱发生了明显的蓝移, 其发射峰位于 478 nm, 我们把 PL 最大值的蓝移归因于样品中小 n 值钙钛矿相的增加^[18]. PEO 1.25 样品的 PL 发射峰位于 475 nm, 相比于 BA 0.75 样品, 也有微小的蓝移, 我们认为这是引入 PEO 之后, 晶粒尺寸减小导致的.

2.3 电学性能

图 6a 为器件的电流密度-电压-亮度性能曲线, 图 6b 为电流效率-电流密度的性能曲线, BA 0 器件的电流密度明显高于含有长链胺(BA⁺)的器件, 从该器件的 SEM 图可以看出, 钙钛矿薄膜晶粒覆盖率低, 有较多的孔洞, 容易引起较大的漏电流, 导致电子空穴对难以在发光层中进行有效的辐射复合, 相应的性能也较差, 最大亮度为 490.5 cd/m², 最高电流效率为 0.25 Cd/A. 加入 BA⁺后, 器件的电流密度明显减小, 亮度和效率也有一定程度的提高, 在最好的比例下(BA 0.75), 最大亮度为 1 882 cd/m², 最大电流效率为 2.3 Cd/A. 我们将这些性能的提高归因于 BA⁺的引入将无机八面体分隔开, 三维钙钛矿转变为二维钙钛矿, 具有更好的成膜性. 另外, 二维钙钛矿中, 多量子阱结构的自然形成, 产生了量子限域效应和介电效应, 而量子限域效应和介电效应的存在提高了激子束缚能和辐射复合效率. 为了进一步提高器件的电学性能, 在 BA 0.75 的基础上继续引入添加剂 PEO, 在最佳的 PEO 质量分数下(PEO 1.25), 得到最大亮度为 2 876 cd/m², 最高电流效率为 3.7 Cd/A 的蓝色发光器件, 与器件 BA 0 相比, 效率提高了近 15 倍. 综上所述, 不同钙钛矿发光层薄膜的电学性能变化与其他的光学性能变化和薄膜形貌紧密相连. 图 6c 为 5 种器件的功率效率图, 图 6d 为 BA 0, BA 0.75, PEO 1.25 等 3 种器件归一化后的电致发光光谱图, BA 0 的发光峰位于 492 nm, 半峰宽(FWHM)为 36 nm, BA 0.75 的发光峰为 487 nm, 半峰宽为 30 nm, PEO 1.25 的发光峰为 484 nm, 半峰宽为 28 nm. 与 PL 光谱比较, EL 发光谱存在一些红移现象.

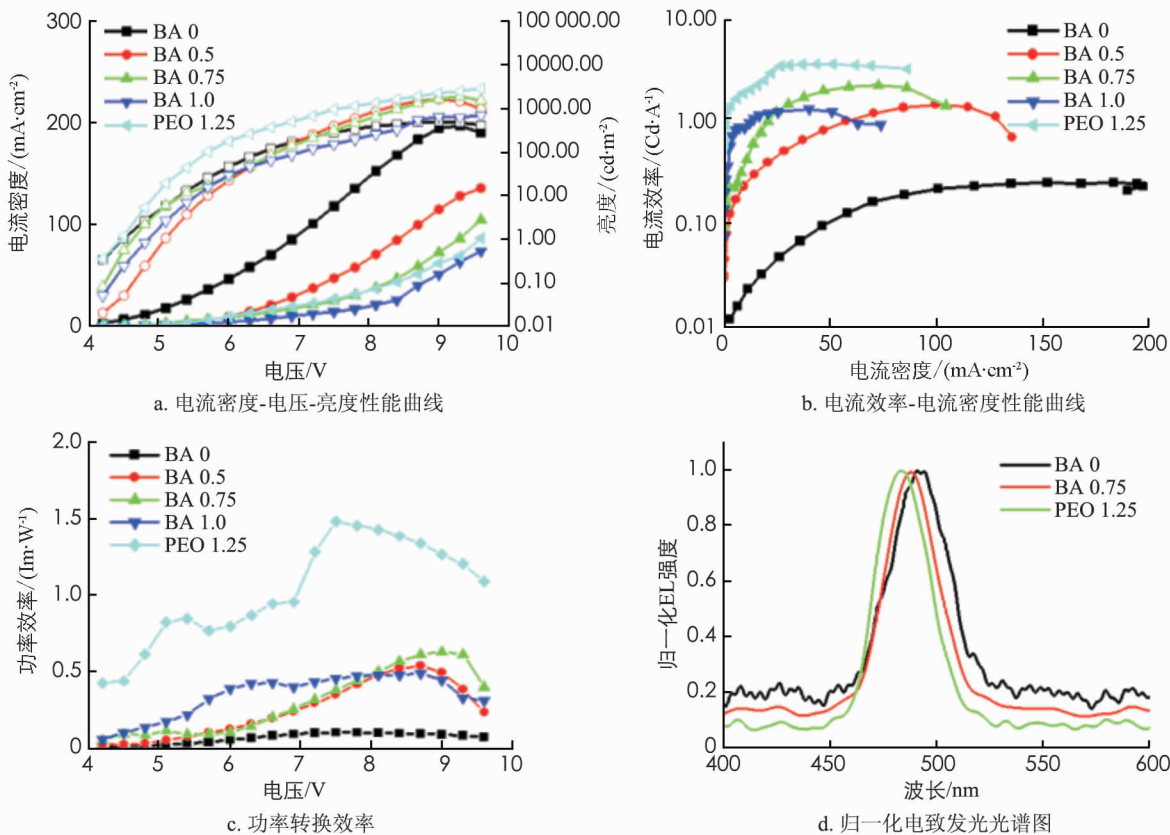


图 6 钙钛矿不同发光层器件的电学性能

3 结 论

在钙钛矿发光器件中,通过引入长链丁基胺阳离子(BA^+)和聚合物添加剂聚环氧乙烷(PEO),可以有效地改善钙钛矿薄膜形貌,减小晶粒尺寸,钝化薄膜表面缺陷态,从而抑制离子迁移与非辐射复合损耗,使得蓝色发光器件的效率得到了显著的提升,基于 $\text{BA}_x\text{MAPbBr}_{3-y}\text{Cl}_y$ -PEO 发光层的钙钛矿薄膜,获得的蓝色发光器件的最大亮度为 $2\,876\text{ cd/m}^2$,最高电流效率为 3.7 Cd/A ,功率效率为 1.5 lm/W ,与发光层为 MAPbBr_2Cl 的器件相比,发光效率提高近 15 倍. 蓝色发光材料的研究对实现钙钛矿白色发光二极管至关重要,本研究所制备的发光层薄膜成膜质量较好,在一定程度上避免了由于薄膜覆盖不完整导致的空穴传输层、电子传输层与钙钛矿发光层之间产生的漏电流,为提高薄膜的均匀性与覆盖率从而减少非辐射电流损失及增大发光量子效率提出了一个思路.

参考文献:

- [1] LIU D Y, KELLY T L. Perovskite Solar Cells with a Planar Heterojunction Structure Prepared Using Room-Temperature Solution Processing Techniques [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(2): 133-138.
- [2] DONG Q F, FANG Y J, SHAO Y C, et al. Solar Cells. Electron-Hole Diffusion Lengths $> 175\text{ Mm}$ in Solution-Grown $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Single Crystals [J]. *Science*, 2015, 347(6225): 967-970.
- [3] 姚 鑫, 丁艳丽, 张晓丹, 等. 钙钛矿太阳能电池综述 [J]. *物理学报*, 2015, 64(3): 145-152.
- [4] TAVAKOLI M M, YADAV P, PROCHOWICZ D, et al. Controllable Perovskite Crystallization via Antisolvent Technique Using Chloride Additives for Highly Efficient Planar Perovskite Solar Cells [J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(17): 1803587-1-1803587-10.
- [5] 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 Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(35): 29901-29906.
- [6] DESCHLER F, PRICE M, PATHAK S, et al. High Photoluminescence Efficiency and Optically Pumped Lasing in Solution-Processed Mixed Halide Perovskite Semiconductors [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2014, 5(8): 1421-1426.
- [7] DONG R, FANG Y J, CHAE J, et al. High-Gain and Low-Driving-Voltage Photodetectors Based on Organolead Triiodide Perovskites [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(11): 1912-1918.
- [8] TAN Z K, MOGHADDAM R S, LAI M L, et al. Bright Light-Emitting Diodes Based on Organometal Halide Perovskite [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(9): 687-692.
- [9] YANTARA N, BHAUMIK S, YAN F, et al. Inorganic Halide Perovskites for Efficient Light-Emitting Diodes [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2015, 6(21): 4360-4364.
- [10] CHO H, JEONG S H, PARK M H, et al. Overcoming the Electroluminescence Efficiency Limitations of Perovskite Light-Emitting Diodes [J]. *Science*, 2015, 350(6265): 1222-1225.
- [11] LU M, ZHANG Y, WANG S X, et al. Metal Halide Perovskite Light-Emitting Devices: Promising Technology for Next-Generation Displays [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(30): 1902008-1-1902008-35.
- [12] CHENG L, CAO Y, GE R, et al. Sky-Blue Perovskite Light-Emitting Diodes Based on Quasi-Two-Dimensional Layered Perovskites [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2017, 28(1): 29-31.
- [13] SADHANALA A, AHMAD S, ZHAO B D, et al. Blue-Green Color Tunable Solution Processable Organolead Chloride-Bromide Mixed Halide Perovskites for Optoelectronic Applications [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(9): 6095-6101.
- [14] PAN J, QUAN L N, ZHAO Y B, et al. Highly Efficient Perovskite-Quantum-Dot Light-Emitting Diodes by Surface Engineering [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(39): 8718-8725.
- [15] 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]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1027-1-1027-10.
- [16] 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]. *Chemistry of Materials*, 2019, 31(1): 83-89.
- [17] JI X X, PENG X F, LEI Y, et al. Multilayer Light Emitting Devices with Organometal Halide Perovskite: Polymer Composite Emission Layer: The Relationship of Device Performance with the Compositions of Emission Layer and Device Configurations [J]. *Organic Electronics*, 2017, 43: 167-174.
- [18] BI W T, HUANG X, TANG Y, et al. High-Performance Light-Emitting Diode with Poly(ethylene oxide) Passivated Quasi Two Dimensional Perovskite Emitting Layer [J]. *Organic Electronics*, 2018, 63: 216-221
- [19] ZHANG X, ZHOU Y, LI Y Z, et al. Efficient and Carbon-Based Hole Transport Layer-Free CsPbI₂Br Planar Perovskite Solar Cells Using PMMA Modification [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(13): 3852-3861. .
- [20] TAŃSKI T, MATYSIAK W, HAJDUK B. Manufacturing and Investigation of Physical Properties of Polyacrylonitrile Nanofibre Composites with SiO₂, TiO₂ and Bi₂O₃ Nanoparticles [J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2016, 7: 1141-1155.
- [21] 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]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(47): 1804187-1-1804187-10.
- [22] PENG X F, WU X Y, JI X X, et al. Modified Conducting Polymer Hole Injection Layer for High-Efficiency Perovskite Light-Emitting Devices: Enhanced Hole Injection and Reduced Luminescence Quenching [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2017, 8(19): 4691-4697.
- [23] XIAO M D, HUANG F Z, HUANG W C, et al. A Fast Deposition-Crystallization Procedure for Highly Efficient Lead Iodide Perovskite Thin-Film Solar Cells [J]. *Angewandte Chemie*, 2014, 126(37): 10056-10061.
- [24] XIAO Z G, KERNER R A, ZHAO L F, et al. Efficient Perovskite Light-Emitting Diodes Featuring Nanometre-Sized Crystallites [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(2): 108-115.
- [25] CHENG L P, HUANG J S, SHEN Y, et al. Efficient CsPbBr₃ Perovskite Light-Emitting Diodes Enabled by Synergetic Morphology Control [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(4): 1801534-1-1801534-9.
- [26] SHI D, ADINOLFI V, COMIN R, et al. Low Trap-State Density and Long Carrier Diffusion in Organolead Trihalide Perovskite Single Crystals [J]. *Science*, 2015, 347(6221): 519-522.
- [27] ZHANG X, REN X D, LIU B, et al. Stable High Efficiency Two-Dimensional Perovskite Solar Cells via Cesium Doping [J]. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10(10): 2095-2102.
- [28] 吴海妍, 唐建新, 李艳青. 基于缺陷态钝化的高效稳定蓝光钙钛矿发光二极管 [J]. *物理学报*, 2020, 69(13): 306-315.

责任编辑 潘春燕