[文章编号] 1003－4684(2026)04-0121-06

PEDOT：PSS/MABr 复合空穴传输层对准二维钙钛矿发光二极管的性能提升

何宏珅[1]，艾岩松[1]，沈 鹏[1]，周远明[1,2]

(1 湖北工业大学理学院，湖北 武汉 430068；
2 湖北工业大学太阳能高效利用及储能系统运行控制湖北省重点实验室，湖北 武汉 430068)

[摘 要] 钙钛矿发光二极管(PeLED)因其卓越的性能被广泛应用于光电领域中。空穴传输层(HTL)对器件的性能起着至关重要的作用。通过向 PEDOT：PSS 掺杂 MABr 作为复合空穴传输层，制备了准二维钙钛矿发光二极管，并研究了器件的光电性能。结果表明，掺杂 MABr 后，器件的最高亮度及最大电流效率均有显著提升，分别提高至 6901 cd/m^2 和 6.70 cd/A。这主要是由于 PEDOT：PSS/MABr 复合空穴传输层作为基底改善了钙钛矿薄膜的形貌，钝化了钙钛矿薄膜的缺陷，抑制了复合空穴传输层/钙钛矿发射层(EML)界面处激子的猝灭。此外，MABr 的掺入增强了复合空穴传输层的空穴传输能力，提升了激子复合效率，进而提高了器件的整体性能。

[关键词] 钙钛矿发光二极管；准二维钙钛矿；空穴传输层；PEDOT：PSS；MABr
[中图分类号] TN312.8 [文献标识码] A

钙钛矿金属卤化物因其具有较高的量子效率、快速的载流子传输速度、宽波长范围的发光特性以及良好的光学调控性能而备受关注，在显示技术、照明应用和柔性电子等领域具有巨大的潜力[1-5]。而准二维钙钛矿则是一种具有不同晶体结构的钙钛矿材料，其晶体结构被限制在二维平面上而不是传统的三维结构。这样的结构特征赋予了准二维钙钛矿卓越的光电转换性能、较长的载流子寿命和较高的稳定性[6-10]。近些年来，PeLEDs 的研究和发展取得了显著进展，发绿光和红光的 PeLEDs 的外量子效率(EQE)都已超过 20%，其性能接近甚至超越传统有机发光二极管[11-12]。但是，钙钛矿薄膜的形貌与 HTL/EML 之间的激子猝灭等问题仍需要改进。

在钙钛矿发光二极管中空穴传输层起到了提供载流子传输通道、提高空穴注入效率和维持电荷平衡等重要作用，对于实现高效的发光器件至关重要。聚(3,4-乙烯二氧噻吩)：聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT：PSS)由于其较高的导电性和透明性，以及旋涂在 ITO 上时可以降低基底表面的粗糙度等优点，作为空穴传输层广泛应用于有机光电器件中[13-16]。然而，由于 PEDOT：PSS 的酸性性质影响了钙钛矿薄膜的质量，产生了大量的非辐射衰减和激子的猝灭。并且，常规的 PEDOT：PSS 旋涂在 ITO 上时通常呈现较差的形貌，这将会导致电流的损失和器件性能的劣化[17-20]。为了解决这些问题，已经有多种策略来改善。例如 Jeong 等人通过向 PEDOT：PSS 中添加 MAI/DMSO 或 MABr/DMSO，提升了 PeLEDs 的性能，研究发现原始的 PEDOT：PSS 中 PEDOT 与 PSS 链之间呈现弱相分离，添加 MABr/DMSO 或 MAI/DMSO 的 PEDOT：PSS 旋涂的薄膜上 PEDOT 的晶粒之间有更好的连接。通过添加剂改善了 PEDOT：PSS 薄膜的形貌，减少了激子的猝灭，添加 MABr/DMSO 或 MAI/DMSO 的 PEDOT：PSS 作为空穴传输层的器件的最大电流效率分别达到了 51.82 cd/A 和 52.86 cd/A[21]；Huang 等人在 PEDOT：PSS 溶液中掺杂 NaCl 来改善 HTL/EML 界面，降低了 PEDOT：PSS 表面功函数，优化了器件中注入的空穴载流子并改善了电荷平衡[22]；Lee 等人通过向 PEDOT：PSS 中掺杂氧化镍(NiO_x)优化了 PEDOT：PSS 与钙钛矿层之间的界面，平衡了载流子传输，钝化了缺陷，制备的钙钛矿发光二极管的最大外量子效率达到了

[收稿日期] 2024－04－25
[基金项目] 国家自然科学基金(12275074)；湖北工业大学绿色工业科技引领计划项目(XJ2021003702)
[第一作者] 何宏珅(1998－)，男，湖北武汉人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为钙钛矿发光二极管。
[通信作者] 周远明(1984－)，男，湖北仙桃人，湖北工业大学副教授，研究方向为半导体材料与器件。

14.6%[23];Zhang 等人通过在 PEDOT：PSS 和钙钛矿层之间添加 PVK 作为插入层,有效增强了空穴注入能力,制备了高性能的 PeLED[24]。由此可见,空穴传输层的优化对钙钛矿发光二极管性能的提升起着至关重要的作用。

在本文中,通过向 PEDOT：PSS 中掺杂 MABr 作为复合 HTL,抑制了 HTL/EML 界面处激子的猝灭、抑制了非辐射复合、增强了空穴注入能力并改善了钙钛矿薄膜的形貌,从而提升了器件的性能。文中对相关物理机制也进行了讨论与分析。

1 实验

1.1 实验试剂

苯甲基溴化铵(PEABr,＞99%),甲基溴化铵(MABr,99.99%),溴化铅($PbBr_2$),PEDOT：PSS(Clevios P AI4083),1,3,5-三(1-苯基-1H-苯并咪唑-2-基)苯(TPBi,99.5%),购买自西安日光浴能光电有限公司。铝块(Al,99.99%)购买自 Alfa Aesar。乙酸乙酯(EA)购买自 Aladdin。氟化锂(LiF,99.5%),N,N-二甲基甲酰胺(DMF,99.9%)购买自 Sigma-Aldrich。

1.2 前驱体制备

称取 0.0448 mg 的 MABr 粉末、0.1468 mg 的 $PbBr_2$ 粉末、0.0202 mg 的 PEABr 粉末按比例(4：4：1)溶于 1 mL 的 DMF 溶剂中,将所得的钙钛矿前驱体溶液在磁力搅拌机上在 60℃下搅拌 6～7 h 以备使用。取 1 mL PEDOT：PSS 溶液和不同重量的 MABr(6 mg,8 mg,10 mg)混合以获取需浓度比(6 mg/mL,8 mg/mL,10 mg/mL)的 PEDOT：PSS/MABr 混合溶液,再依次通过 0.45 μm 和 0.22 μm PTFE 过滤器过滤以备使用。

1.3 器件制备

本文采用 ITO 玻璃作为基底制备 PeLEDs。在器件制备前,按序使用丙酮、乙醇和去离子水在超声波清洗器中清洗 ITO 玻璃 10 min,去除其表面杂质及有机物质。随后,用氮气枪将玻璃表面吹干,再经过 12 min 的氧离子体预处理,以调整表面性质并优化功函数。在氮气氛围的手套箱中,将不同浓度的 PEDOT：PSS/MABr 混合溶液以 8000 r/min 的转速旋涂于 ITO 基底上,持续 30 秒,随后在 130℃下退火 15 min。接着,以 4000 r/min 的转速将钙钛矿前驱体溶液旋涂于不同浓度的 PEDOT：PSS/MABr 薄膜上,旋涂时长为 60 秒。在旋涂开始的 6 s 后,滴加 300 μL 的乙酸乙酯,旋涂完毕后,将样品在 80℃下退火 10 min。最后,将所有样品移至真空热蒸发系统中,依次沉积 40 nm 的 TPBi 电子传输层、1 nm 的 LiF 电子传输层以及 110 nm 的 Al 阴极。每个器件的有效发光面积均控制为 0.1 cm^2。

1.4 表征测试

使用台阶仪(Alpha-Step D-600)来测量掺杂不同量 MABr 的 PEDOT：PSS/MABr 薄膜和钙钛矿薄膜的厚度。使用紫外/可见分光光度计(HITACHI U-3900)和光致发光光谱仪(HITACHI F-4600)分别测量透射光谱和光致发光(PL)光谱(激发波长:370 nm)。使用 FLS 1000 光谱仪测量钙钛矿薄膜的时间分辨光致发光(TRPL)的光谱图(激发波长:370 nm)。用扫描电子显微镜(FEI)和 X 射线衍射仪(Panalytic XRD)测量了钙钛矿晶体的表面形貌和 XRD 图谱。使用与硅光电探测器连接的源表(Keithley 2400)和光电转换器(Keithley 2000)来检测 PeLEDs 的光电特性(1 cm 直径)。使用 Ocean Optics USB 4000-XR 1 型光纤光谱仪测量 PeLEDs 的电致发光(EL)光谱。

2 结果与讨论

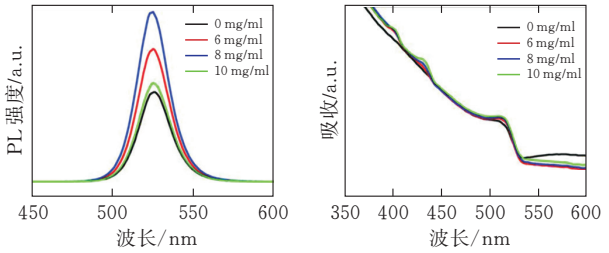
2.1 材料表征

图 1a 是 PEDOT：PSS/MABr 薄膜上的钙钛矿薄膜稳态光致发光光谱图。在所有的 PL 光谱中都在 525 nm 处出现了 PL 峰。与掺杂浓度为 0 mg/mL的样品相比,掺杂后钙钛矿薄膜 PL 峰的强度都有所增强,并且 PL 峰的位置不会发生偏移。在 PEDOT：PSS/MABr 掺杂浓度为 8 mg/mL 时钙钛矿薄膜 PL 的强度达到最大,在掺杂浓度为 10 mg/mL时 PL 强度与 8 mg/mL 相比反而有所下降,这表明 PEDOT：PSS 中掺杂适量的 MABr 能够提高钙钛矿薄膜光致发光强度,这主要是由于掺杂降低了空穴传输层与钙钛矿层之间激子被俘获的概率,减少了非辐射复合,从而提高了 PL 强度。

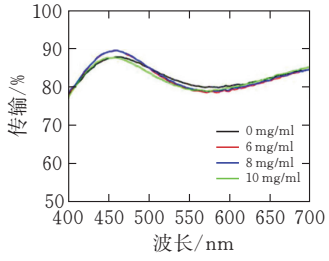
图 1b 是 PEDOT：PSS/MABr 薄膜上的钙钛矿薄膜的吸收光谱图。从图上可以看出,在 430 nm 和 400 nm 附近处均出现了钙钛矿吸收峰,在 400 nm处左右的吸收峰与 $n=1$ 的钙钛矿相对应,430 nm处的吸收峰则与钙钛矿 $n=2$ 的低维钙钛矿相对应[25]。在向 PEDOT：PSS 中掺杂 MABr 后,钙钛矿薄膜低 n 相吸收峰的强度随着掺杂浓度的增加而增强,这可能是由于 PEDOT：PSS 表面中形成了突出的 MABr 聚集体,这些聚集体增加了 PEDOT：PSS 层与钙钛矿薄膜之间的接触面积,促进了钙钛矿晶体的生长,增加了低 n 相钙钛矿晶体的数量,从而导致了吸收峰强度的增强[22]。在520 nm 处左右的吸收峰是典型的钙钛矿吸收峰,掺杂并不会对其造成明显影响。

图 1c 是 PEDOT：PSS/MABr 薄膜的透射曲线。在 MABr 掺杂浓度逐渐增加时，透射率逐渐缓慢降低。但值得注意的是，不同掺杂浓度的样品的透射率变化并不明显，并且整体最低透射率仍维持在 80%左右。因此 MABr 掺杂后的 PEDOT：PSS 作为复合空穴传输层并不会显著影响光透射率。

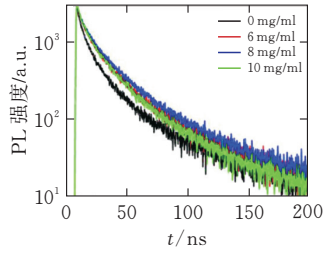
图 1d 是 PEDOT：PSS/MABr 薄膜上的钙钛矿薄膜的 TRPL 光谱图。所有的样品的 TRPL 结果都出现了双指数衰减行为，通过双衰减函数拟合 TRPL 数据就可以得到平均寿命（τ_{avg}）。与未掺杂的钙钛矿薄膜相比，在掺杂了 MABr 后，平均寿命（τ_{avg}）由 14.20 ns 逐步增长到 27.45 ns，而在 MABr 含量为 8 mg/mL 时，平均寿命（τ_{avg}）为 15.17 ns，增长值有所减少。这表明向 PEDOT：PSS 中引入适量的 MABr 作为新的空穴传输层可以减少 HTL/EML 界面处激子猝灭的数量、促进辐射复合速率从而提高 PL 寿命[26-27]。



（a）稳态光致发光图谱　（b）吸收图谱



（c）透射图谱



（d）瞬态光致发光图谱

图 1　薄膜特征图谱

图 2 是 PEDOT：PSS/MABr 薄膜上的钙钛矿薄膜的 XRD 图谱。从图上可以看到，在 5°～10°、15°以及 30°都出现了衍射峰。5°～10°的衍射峰可以归因于二维钙钛矿相[28]，改变 MABr 的掺杂浓度并不会对这个衍射峰造成改变。15°和 30°的衍射峰分别属于三维钙钛矿晶体位于（100）和（200）的晶面[29-30]，在掺杂 MABr 后衍射峰的强度都有所增强，在掺杂浓度为 8 mg/mL 时，衍射峰的强度最高。结果表明向 PEDOT：PSS 掺杂适量的 MABr 能促进三维钙钛矿晶体的生长，提高钙钛矿颗粒的结晶度。

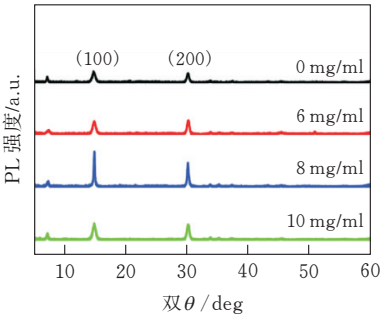
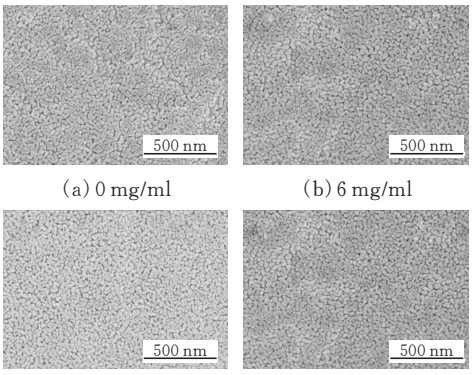


图 2　XRD 图谱

图 3 是 PEDOT：PSS/MABr 薄膜上的钙钛矿薄膜的 SEM 图像。从图上可以看到钙钛矿薄膜的形貌受到 PEDOT：PSS/MABr 中 MABr 的掺杂量的影响。在使用未掺杂的 PEDOT：PSS 作为空穴传输层时，钙钛矿薄膜存在表面不均匀、不平整的区域。当 MABr 的掺杂量为 6 mg/mL 时钙钛矿薄膜表面整体变得平整，但部分钙钛矿颗粒之间仍存在针孔。当 MABr 的掺杂量为 8 mg/mL 时，薄膜表面变得更加平整，钙钛矿颗粒之间间隙明显减小，针孔明显减少。当掺杂量为 10 mg/mL 时，薄膜表面间隙开始变大，这可能是由于过量的 MABr 会影响 PEDOT：PSS/MABr 的成膜状况，进而影响钙钛矿薄膜的形貌。结果表明向 PEDOT：PSS 中掺杂适量的 MABr 可以改善钙钛矿薄膜的形貌。



（a）0 mg/ml　（b）6 mg/ml

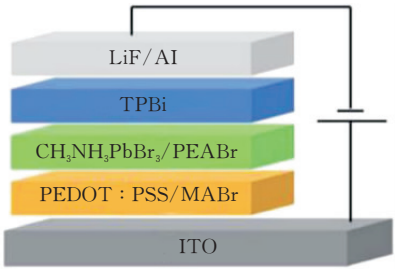
（c）8 mg/ml　（d）10 mg/ml

图 3　SEM 图像

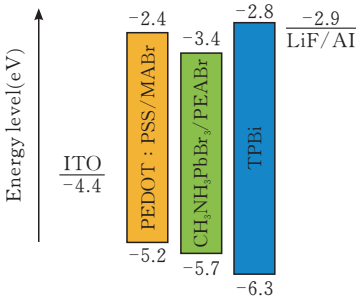
2.2　器件性能

图 4 a 是器件的结构示意图，使用 $CH_3NH_3PbBr_3$/PEABr 作为 EML 和 MABr 改性的 PEDOT：PSS 作为复合 HTL。图 4b 是 PeLED 的能级图，PEDOT：PSS 与钙钛矿层之间的能级差约为 0.5 eV，这导致 HTL/EML 界面处存在较大的空穴注入势垒。并且纯 PEDOT：PSS 旋涂在 ITO 上通

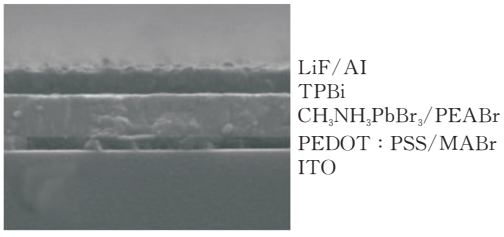
常呈现较差的形貌，影响钙钛矿薄膜的质量，以上原因都会导致器件性能的降低。通过对薄膜表征已经得知，向 PEDOT：PSS 中掺杂 MABr 能够钝化薄膜的缺陷、抑制 HTL/EML 界面处激子的猝灭、促进辐射复合。图 4c 是 PeLED 横截面图。



(a)PeLED 结构示意图



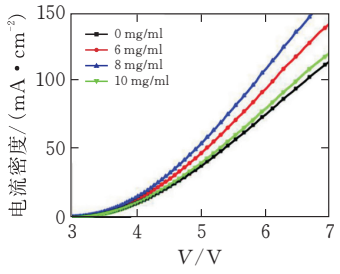
(b)PeLED 的能级图



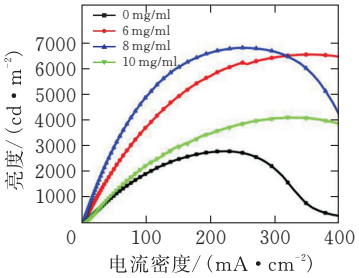
(c) PeLED 的横截面图

图 4 PeLED 结构、能级、横截面图像

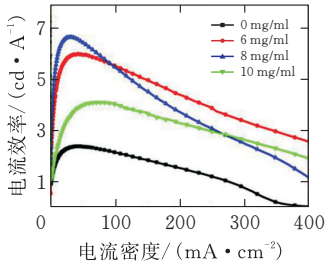
图 5 是 PEDOT：PSS/MABr 作为复合空穴传输层的 PeLEDs 光电性能曲线，PeLED 的各项参数列于表 1 中。掺杂适量(8 mg/mL)的 MABr 后，器件的最小开启电压为 3.05 V，这小于未掺杂的器件的开启电压(3.30 V)。图 5b－d 分别是不同 PeLEDs 的亮度、电流效率、外量子效率与电流密度的函数图像。当 MABr 掺杂浓度为 0 mg/mL，器件的最高亮度、最大电流效率、外量子效率分别为 2868 cd/m^2、2.44 cd/A、0.47%。在向 PEDOT：PSS 中掺杂 MABr 后，器件性能的各项参数都有所提升，当掺杂浓度为 8 mg/mL 时，器件性能的各项参数达到最佳，最高亮度、最大电流效率、外量子效率分别达到了 6901 cd/m^2、6.70 cd/A、1.31%。与未掺杂器件相比，最高亮度、最大电流效率、外量子效率分别提高了 240%、270%、278%。



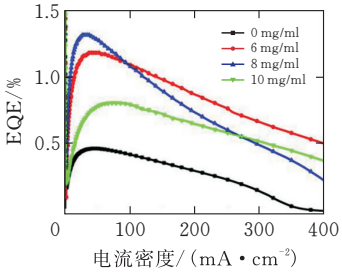
(a)电流密度和电压曲线



(b)亮度和电流密度曲线



(c)电流效率和电流密度曲线



(d)外量子效率和电流密度曲线

图 5 PeLEDs 光电性能曲线

表 1 PeLEDs 的器件参数

不同 MABr 掺杂量/(mg·mL^{-1})	最大亮度/(cd·m^{-2})	最大电流效率/(cd·A^{-1})	外量子效率/%	开启电压/V
0	2868	2.44	0.47	3.30
6	6638	6.03	1.18	3.10
8	6901	6.70	1.31	3.05
10	4184	4.16	0.81	3.15

为了进一步探究掺杂 MABr 对于空穴传输层的作用，制备了 ITO/HTL/($CH_3NH_3PbBr_3$/PEABr)/MoO_3/Al 结构的单空穴器件并进行了测试。图 6 是不同器件的电流密度与电压关系的函数图像。从图 6 中可知，在往 PEDOT：PSS 中掺杂了 MABr 之后，与未掺杂器件相比，电流密度都有所增加，这能够说明 PEDOT：PSS/MABr 的复合

空穴传输层拥有更好的空穴传输能力。且从图 3 可以看到，未掺杂器件的钙钛矿薄膜不平整且有较多的针孔，这可能会导致较多漏电流的产生，在向 PEDOT：PSS 中掺杂 MABr 改性之后，器件的电流密度明显升高，这表明改善钙钛矿薄膜质量从而减少了漏电流情况的发生。此外，从钙钛矿薄膜的 PL 与 TRPL 光谱图可以得知，掺杂 MABr 的 PEDOT：PSS 作为复合空穴传输层时，有效抑制了 HTL/EML 界面处激子的猝灭，增强了辐射复合，提高了激子复合效率，钝化了钙钛矿薄膜的缺陷。综合以上因素，器件的各项性能均得到了提升。

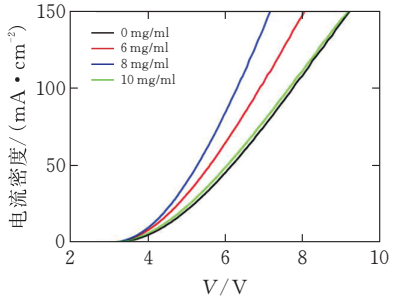
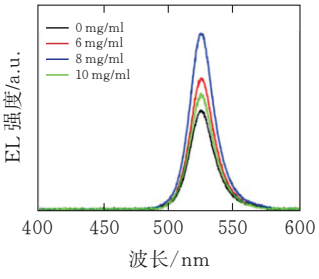
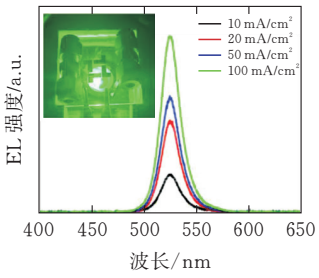


图 6　掺杂不同量的 MABr 的 PEDOT：PSS/MABr HTL 的仅空穴器件的电流密度和电压关系曲线

图 7a 是在 50 mA/cm² 电流密度下 PEDOT：PSS/MABr 作为复合空穴传输层的器件电致发光(EL)光谱图。所有的 EL 光谱图都在 525 nm 处出现了 EL 峰。与未掺杂的器件相比，掺杂不同量的 MABr 都会使 EL 峰的强度增强，并且不会使 EL 峰的位置发生偏移，在掺杂量为 8 mg/mL 时 EL 峰的强度达到最大，与 PL 光谱图能很好的对应。图 7b 是在最佳掺杂量 8 mg/mL 下 PeLEDs 不同电流密度的 EL 光谱图。



(a) 50 mA/cm² 电流密度下器件电致发光光谱图



(b)在掺杂量 8 mg/mLMABr 的器件电致发光光谱图

图 7　器件电致发光光谱图

随着电流密度的增强，EL 峰的强度随之增强。所有的 EL 光谱图都在 525 nm 出现了相同的峰位。这些结果说明了 PeLEDs 具有良好的颜色稳定性。

3　结论

综上所述，本文通过向 PEDOT：PSS 中掺杂 MABr 作为复合空穴传输层提高了器件的性能。稳态和时间分辨 PL 的测量说明了掺杂 MABr 能够有效抑制激子的猝灭和非辐射复合，并延长荧光寿命。MABr 的引入钝化了钙钛矿薄膜表面的缺陷从而减少了漏电流的产生，并且提高了钙钛矿颗粒的结晶度。通过制备仅空穴器件进一步说明了掺杂 MABr 能够提升空穴传输层的空穴注入能力，从而提高了器件的性能。在 MABr 掺杂浓度为 8 mg/mL 下，与未掺杂器件相比，器件的最大亮度从 2868 cd/m² 提升至 6901 cd/m²、最大电流效率从 2.44 cd/A 提升至 6.70 cd/A、最大外量子效率从 0.47% 提升至 1.31%，分别提高了 240%、270%、278%。这些结果都可以作为制备钙钛矿发光二极管的实验基础。

[参　考　文　献]

[1] Wang L, Xue Y, Cui M, et al. A chiral reduced - dimension perovskite for an efficient flexible circularly polarized light photodetector[J]. Angewandte Chemie, 2020, 132(16): 6504-6512.

[2] Cho H, Kim Y H, Wolf C, et al. Improving the stability of metal halide perovskite materials and light-emitting diodes[J]. Advanced Materials, 2018, 30(42): 1704587.

[3] Wang H C, Bao Z, Tsai H Y, et al. Perovskite quantum dots and their application in light-emitting diodes[J]. Small, 2018, 14(01): 1702433.

[4] Liu X K, Xu W, Bai S, et al. Metal halide perovskites for light-emitting diodes[J]. Nature Materials, 2021, 20(01): 10-21.

[5] 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(09): 687-692.

[6] 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.

[7] He B, Liu T, Wang B, et al. Boosting the efficiency of quasi-2D perovskite light-emitting diodes via tailoring the PEDOT： PSS hole transport layer[J]. Applied Surface Science, 2022, 585: 152692.

[8] Byun J, Cho H, Wolf C, et al. Efficient Visible Quasi-

2D Perovskite Light-Emitting Diodes[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.), 2016, 28(34): 7515-7520.

[9] Chen S, Shi G. Two-dimensional materials for halide perovskite-based optoelectronic devices[J]. Advanced Materials, 2017, 29(24): 1605448.

[10] Wang N, Cheng L, Ge R, et al. Perovskite light-emitting diodes based on solution-processed self-organized multiple quantum wells[J]. Nature Photonics, 2016, 10(11): 699-704.

[11] Chiba T, Hayashi Y, Ebe H, et al. Anion-exchanged perovskite quantum dots with ammonium iodine salts for highly efficient light-emitting devices[J]. Nature Photonics, 2018, 12(11): 681-687.

[12] Ma D, Lin K, Dong Y, et al. Distribution control enables efficient reduced-dimensional perovskite LEDs[J]. Nature, 2021, 599(7886): 594-598.

[13] Fan Z, Ouyang J. Thermoelectric properties of PEDOT : PSS[J]. Advanced Electronic Materials, 2019, 5(11): 1800769.

[14] Lin C, Chen P, Liu D, et al. Interfacial engineering with ultrathin poly (9, 9-di-n-octylfluorenyl-2, 7-diyl) (PFO) layer for high efficient perovskite light-emitting diodes[J]. Nanotechnology, 2018, 29(07): 075203.

[15] Volkov A V, Wijeratne K, Mitraka E, et al. Understanding the Capacitance of PEDOT : PSS[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(28): 1700329.

[16] Wang Z, Li Z, Zhou D, et al. Low turn-on voltage perovskite light-emitting diodes with methanol treated PEDOT : PSS as hole transport layer[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(23).

[17] Li Z, Cao K, Li J, et al. Modification of interface between PEDOT : PSS and perovskite film inserting an ultrathin LiF layer for enhancing efficiency of perovskite light-emitting diodes[J]. Organic Electronics, 2020, 81: 105675.

[18] Cameron J, Skabara P J. The damaging effects of the acidity in PEDOT : PSS on semiconductor device performance and solutions based on non-acidic alternatives [J]. Materials Horizons, 2020, 7(07): 1759-1772.

[19] Lang U, MÜLler E, Naujoks N, et al. Microscopical investigations of PEDOT : PSS thin films[J]. Advanced Functional Materials, 2009, 19(08): 1215-1220.

[20] Jin X, Chang C, Zhao W, et al. Balancing the electron and hole transfer for efficient quantum dot light-emitting diodes by employing a versatile organic electron-blocking layer[J]. ACS applied materials & interfaces, 2018, 10(18): 15803-15811.

[21] Jeong S H, Kim H, Park M H, et al. Ideal conducting polymer anode for perovskite light-emitting diodes by molecular interaction decoupling[J]. Nano Energy, 2019, 60: 324-331.

[22] Huang X, BÄUerle R, Scherz F, et al. Improved performance of perovskite light-emitting diodes with a NaCl doped PEDOT : PSS hole transport layer[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(12): 4344-4350.

[23] Lee S, Kim D B, Hamilton I, et al. Control of interface defects for efficient and stable quasi-2D Perovskite light-emitting diodes using nickel oxide hole injection layer[J]. Advanced Science, 2018, 5(11): 1801350.

[24] Zhang K, Yu S, Tu P, et al. Optoelectronic properties of MAPbBr3 perovskite light-emitting diodes using anti-solvent and PEDOT : PSS/PVK double-layer hole transport layers[J]. Micromachines, 2022, 13(12): 2122.

[25] Tanaka K, Kondo T. Bandgap and exciton binding energies in lead-iodide-based natural quantum-well crystals[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2003, 4(06): 599-604.

[26] Guo Z, Zhang Y, Wang B, et al. Promoting energy transfer via manipulation of crystallization kinetics of quasi-2D perovskites for efficient green light-emitting diodes[J]. Advanced Materials, 2021, 33(40): 2102246.

[27] Yu J C, Kim D B, Jung E D, et al. High-performance perovskite light-emitting diodes via morphological control of perovskite films[J]. Nanoscale, 2016, 8(13): 7036-7042.

[28] Meng L, Yao E P, Hong Z, et al. Pure formamidinium-based perovskite light-emitting diodes with high efficiency and low driving voltage[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.), 2016, 29(04).

[29] Ng Y F, Kulkarni S A, Parida S, et al. Highly efficient Cs-based perovskite light-emitting diodes enabled by energy funnelling[J]. Chemical Communications, 2017, 53(88): 12004-12007.

[30] Wu Y, Yuan F, Fu F, et al. Enhanced performance of spectra stable blue perovskite light-emitting diodes through Poly (9-vinylcarbazole) interlayer incorporation[J]. Organic Electronics, 2021, 96: 106259.

(下转第 138 页)

[6] 邓佳伟，张梅娟，王琪，等.PowperPC 架构下 USB 3.0 的 IP 核软硬件协作验证[J].电子技术应用，2022，48(05)：37-41.
[7] 郑杰良，杜越，赵培.基于 UVM 及 VIP 的 SoC 低速端口 CAN 验证系统设计[J].中国集成电路，2022，31(05)：27-31.
[8] 杜越，吴益然，郑杰良.基于 UVM 和 VIP 的 AXI 总线互连矩阵验证平台设计[J].电子技术与软件工程，2022(02)：111-116.
[9] Kiran A，Thrimurthulu V. Verification of AMBA AHB2APB bridge using universal verification methodology(UMM)[J].International Journal in IT and Engineering，2016，4(12)：1-10.
[10] Francesconi L，Rodriguez J A，JuliÁN P M. VM based testbench architecture for unit verification[C]. Technology and Applications，Piscataway：IEEE，2014：89-94.
[11] 刘森态，庞宇，魏东.基于 UVM 的 Wishbone-SPI 验证平台设计[J].电子技术应用，2022，8 (06)：36-41.

The Design of USB Device Controller Verification Platform Based on UVM

WANG Yang，HUANG Chuyun
(*School of Science，Hubei Univ. of Tech.，Wuhan* 430068，*China*)

Abstract：Aiming at the low verification efficiency of the simulation platform built by traditional hardware description language，which is difficult to meet the problem of ultra large-scale chip verification，a simulation platform built based on UVM methodology is proposed. The functional verification of the USB device controller is completed by random test excitation with constraints，and the automated comparison mechanism can output the verification results in real time，which is convenient for problem location and debugging. Compared with the traditional verification，this method improves the verification efficiency by 30%，makes the verification results more comprehensive and reliable，and meets the verification requirements of digital chips.

Keywords：UVM；simulation platform；verification efficiency

[责任编校：闫 品]

(上接第 126 页)

Performance Enhancement of Quasi-two-dimensional Perovskite Light-emitting Diodes by PEDOT：PSS/MABr Composite Hole Transport Layer

HE Hongshen[1]，AI Yansong[1]，SHEN Peng[1]，ZHOU Yuanming[1,2]
(1 *School of Science，Hubei Univ. of Tech.，Wuhan* 430068，*China*；
2 *Hubei Key Laboratory for High-efficiency Use of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System，Wuhan* 430068，*China*)

Abstract：Perovskite light-emitting diodes (PeLEDs) are widely used in the field of optoelectronics due to their excellent performance. The hole transport layer (HTL) plays a crucial role in the device performance. In this paper，quasi-two-dimensional perovskite light-emitting diodes were prepared by doping MABr into PEDOT：PSS as a composite HTL，and the optoelectronic performance of the devices was investigated. The results show that the maximum brightness and the maximum current efficiency of the devices were significantly improved by MABr doping to 6901 cd/m2 and 6.70 cd/A，respectively. This is mainly attributed to the fact that the PEDOT：PSS/MABr composite HTL as a substrate improves the morphology of the perovskite film，passivates defects in the perovskite film，and suppresses the HTL/ perovskite emissive layer (EML) exciton burst at the HTL/EML interface. In addition，the doping of MABr enhances the hole transport ability and exciton complex efficiency of HTL，which in turn improves the overall performance of the device. The results in this paper provide strong support for the development of perovskite light-emitting diodes.

Keywords：perovskite light-emitting diode；quasi-two-dimensional perovskite；hole transport layer；PEDOT：PSS；MABr

[责任编校：闫 品]