光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.009

P3HT为空穴传输层的碳基钙钛矿太阳电池

万雪健[1,2*]，梁春军[1,2]

（北京交通大学 1.理学院；2.光电子研究所，北京 100044）

摘　要： 碳电极具有成本低、印刷方便、可有效隔离水氧等优点，因此有望利用碳电极材料实现低成本、高稳定性的钙钛矿太阳电池。无空穴传输层的传统碳基钙钛矿太阳电池面临着空穴提取率低、电子逆向传输，钙钛矿和碳电极界面的载流子复合等问题。文章引入聚(3-己基噻吩)(P3HT)作为器件的空穴传输层，使碳基钙钛矿太阳电池 ITO/SnO_2/$MAPbI_3$/P3HT/Carbon 的光伏性能得到了显著改善：器件的光电转化效率从 11.16% 提高到 13.37%。在氮气环境下，连续光照 1 000 h，太阳电池的光电转化效率可保持初始值的 87%，而传统器件在光照 500 h 后，其光电转化效率已下降至初始值的 60%。

关键词： 钙钛矿太阳电池；P3HT；碳电极；稳定；空穴传输层

中图分类号： TM914.4　**文章编号：** 1001－5868(2020)06－0802－06

Study on Perovskite Solar Cells with P3HT Hole Transport Layer

WAN Xuejian[1,2], LIANG Chunjun[1,2]

(1. School of Science; 2. Institute of Optoelectronics, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, CHN)

Abstract: Carbon electrode has the advantages of low-cost, convenient printing and the ability to isolate water and oxygen. Therefore, it is appealing to use carbon as the electrode material to achieve low-cost and highly stable perovskite solar cells (PSCs). However, conventional carbon-based perovskite solar cells (C-PSCs) without hole transport layers is still facing the problems of low hole extraction rate, electron reverse transfer, and undesired recombination at the perovskite/carbon interface. In this paper, poly (3-hexylthiophene) (P3HT) is applied as the hole transport layer of the device, thus the photovoltaic performance of solar cells with an architecture of ITO/SnO_2/$MAPbI_3$/P3HT/Carbon is significantly improved, achieving a power conversion efficiency (PCE) of 13.37%, which is 2.21% higher than that of the device without P3HT. Moreover, in nitrogen environment, the PCE of the device remains 87% of its initial value with continuous illumination for 1 000 h. In contrast, the PCE of the device without P3HT remains only 60% after illumination for 500 h.

Key words: perovskite solar cells; P3HT; carbon electrode; stability; hole transport layer

0　引言

自 2009 年首次被报道以来[1]，有机-无机混合钙钛矿太阳电池在世界范围内引起了人们极大的关注。钙钛矿材料的光电性能良好，它具有适当且可调的带隙、高吸收系数[2]、长载流子扩散长度[3]，以及双极电荷转移特性[4]等。近十年来，钙钛矿太阳电池技术取得了令人瞩目的进展，光电转化效率从最初的 3.8%快速提升至 25.2%[5-10]。然而钙钛矿太阳电池的工作稳定性不佳，这是该领域当前亟待解决的问题之一。

传统的钙钛矿太阳电池一般采用真空蒸镀的方

收稿日期：2020－04－20.

基金项目：国家自然科学基金项目(61874008,61574014)；北京市科委项目(Z181100004718004).

* **通信作者：**万雪健　**E-mail：** 17121595@bjtu.edu.cn

法制作电极，金、银等贵金属是常见的电极材料[11-12]，真空蒸镀是一个高消耗过程，而金、银等电极的价格也相对昂贵。此外，这些金属会渗入钙钛矿层，导致钙钛矿太阳电池的稳定性下降[13-14]。这些缺点不利于钙钛矿太阳电池的大规模商业开发[15]。石墨碳的功函数和金接近，具有成本低、制作方便、能有效隔离水氧等优点，因此利用石墨碳电极材料有利于实现低成本、高稳定性的钙钛矿太阳电池[11]。

在发展初期，碳基钙钛矿太阳电池不设空穴传输层，展现出结构简单、成本低廉[16-17]的特点。然而空穴传输层是实现器件高效率的重要组成部分，良好的空穴输运材料有助于实现钙钛矿和电极之间的能级匹配，改善空穴提取，抑制钙钛矿与碳电极界面的电子-空穴复合，从而降低载流子损耗。钙钛矿太阳电池的空穴传输层包括 PTAA[18]，spiro-MeOTAD[19]，NiO_x[20-21]，CuSCN[22-23]和 CuSCN 衍生物[24-25]。PTAA 及 Spiro-MeOTAD 中的掺杂物易吸水，会影响钙钛矿太阳电池的稳定性；NiO_x 的制备过程较为复杂；而 CuSCN 的制备需要真空工艺，不利于降低成本。空穴传输材料聚(3-己基噻吩)(P3HT)具有光电性能优异、成本低、易制备等优点，在以金电极[26]为阳极的钙钛矿太阳电池中，空穴传输层 P3HT 的使用显著改善了器件性能。最近 P3HT 和石墨烯的混合物也被用作空穴传输层[27]，获得了良好的器件性能。

本文研究了以 P3HT 为空穴传输层的碳基钙钛矿太阳电池。器件结构为 ITO/SnO_2/$MAPbI_3$/P3HT/Carbon。P3HT 空穴传输层使钙钛矿与碳电极之间的能级更加匹配，有利于钙钛矿层中空穴的萃取。P3HT 层的引入有效抑制了其与钙钛矿界面的载流子复合，提高了碳基钙钛矿太阳电池的效率和工作稳定性。

1　实验部分

材料：氧化锡胶体分散液(水溶液质量分数为 15%)购自 Alfa Aesar。PbI_2(纯度：99.99%)和 CH_3NH_3I(MAI，纯度：98%)购自 TCI。P3HT 和碳膏购自上海迈特威新材料科技有限公司。γ-丁内酯(GBL，纯度：99%)、二甲基亚砜(DMSO，纯度：99.8%)、氯苯(纯度：99.8%)均来自 Sigma-Aldrich 公司。SnO_2 前驱体：将质量分数为 15%的 SnO_2 纳米颗粒胶体分散体用去离子水稀释至质量分数为 2.67%，形成 SnO_2 前驱体。$MAPbI_3$ 前驱体：将 PbI_2(1.6 mmol/mL)和 CH_3NH_3I(1.6 mmol/mL)溶解于 GBL∶DMSO(体积比为 1∶1)的混合溶剂中。P3HT 前驱体：将 10 mg P3HT 溶于 1 mL 氯苯中，得到 10 mg/mL 的 P3HT 溶液。

钙钛矿太阳电池的制作：将镀有 ITO 的玻璃基片先后用洗涤剂和去离子水冲洗，再用无水酒精冲洗；吹干后，再在紫外臭氧环境下处理 15 min。接下来，以 3 000 r/m(40 s)的转速旋涂电子传输层氧化锡，随后在 150 ℃空气中退火 10 min。接下来，将 $MAPbI_3$ 膜以 1 000 r/m(15 s)和 3 500 r/m(35 s)的转速流程旋涂在氧化锡薄膜上，并在旋涂过程的最后 10 s 用 350 μL 氯苯冲洗，再在 100 ℃下退火 10 min。接下来，采用 3 000 r/m(30 s)的转速将 P3HT 溶液(70 μL)旋涂到钙钛矿膜上。最后，将石墨碳膏印刷在 P3HT 薄膜上，并在空气中退火(120 ℃)15 min。

测量和表征：采用 Keithley 2635B 源表，在模拟太阳光(CROWNTECH SOLAR BEAM-02-3A)的照射下，记录电流-电压曲线。通过岛津 UV-3101PC 系统记录钙钛矿薄膜的紫外-可见吸收光谱。稳态光致发光用 Horiba Nanolog FL3-2iHR 荧光光谱仪表征，时间分辨光致发光采用 Horiba Delta Flex 超快寿命荧光光谱仪测量。样品的 XRD 测量是在 Bruker D8 先进衍射仪上完成的，使用了铜的 Kα 辐射(λ=0.154 05 nm)。用原子力显微镜 Asylum Research Cypher S 表征薄膜的粗糙度和表面形貌。钙钛矿薄膜的 SEM 图像表征由 ZEISS Gemini SEM300 系统完成，2 万倍的放大是在 15 kV 和 7.5 mm 距离的二次电子模式下进行的。

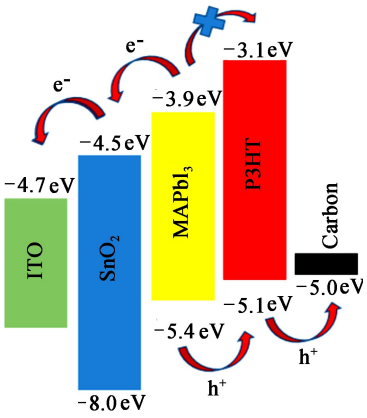
2　结果和讨论

2.1　$MAPbI_3$/P3HT 薄膜的形貌与光电特性

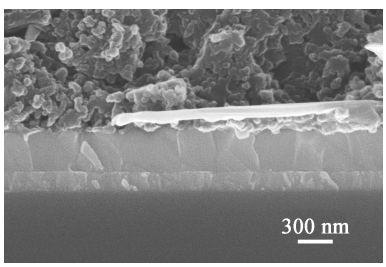
图 1 是结构为 ITO/SnO_2/$MAPbI_3$/P3HT/Carbon 的钙钛矿太阳电池的能级匹配图和横截面扫描电镜图像。$MAPbI_3$ 导带与碳电极之间的能级差达到 0.4 eV，能级不匹配，导致空穴提取受到了阻挡，从而限制了器件的性能。P3HT 的最高已占据分子轨道(HOMO)为−3.1 eV，最低未占据分子轨道(LUMO)为−5.1 eV。因此，引入 P3HT 层可以使 $MAPbI_3$ 与碳电极之间能级更加匹配。

在光照条件下，在钙钛矿中产生光生载流子，通

过 P3HT 从钙钛矿中萃取空穴，并将其传输到碳电极中。由于 P3HT 的 LUMO 为－5.1 eV，介于 $MAPbI_3$ 的－5.4 eV 和碳的－5.0 eV 之间，形成了较好的能级匹配，这有利于提高钙钛矿中空穴的提取和碳电极中空穴的注入。此外，由于 P3HT 价带的能级为－3.1 eV，高于 $MAPbI_3$ 价带的－3.9 eV，形成了钙钛矿与碳之间的能级势垒。这种能级势垒可以阻止光生电子从钙钛矿流向碳电极，从而有效减少 $MAPbI_3$ 与碳界面的电子空穴复合，有利于载流子的输运和提取，提升器件的光电转化效率[28]。



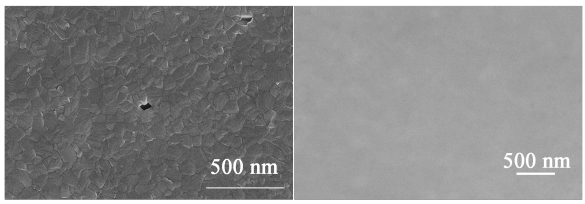
（a） 能级匹配图



（b） 横截面扫描电子显微镜图像

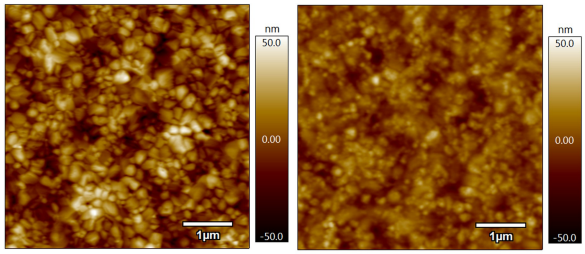
图 1 ITO/SnO_2/$MAPbI_3$/P3HT/Carbon 的钙钛矿太阳电池的能级结构及横截面的 SEM 图像

图 2(a)和图 2(b)所示的扫描电子显微镜(SEM)图像分别显示了在没有 P3HT 层和有 P3HT 层的 $MAPbI_3$ 膜的表面形貌特征。从图 2(a)可以看出，$MAPbI_3$ 膜均匀覆盖在氧化锡表面，但表面存在一些针孔，这容易引起 $MAPbI_3$/Carbon 界面的载流子复合。图 2(b)中，由于钙钛矿薄膜上均匀地覆盖了 P3HT 层，针孔减少。图 3 所示原子力显微镜(AFM)图显示了表面形貌细节。单纯的 $MAPbI_3$ 膜的粗糙度为 13.77 nm。但是从图 3(b)可以看出，在 $MAPbI_3$ 上沉积 P3HT 后，表面粗糙度降低到 8.63 nm，表面更加光滑，这有利于碳电极的粘附，使 $MAPbI_3$/Carbon 之间的接触更加良好，有利于提升钙钛矿太阳电池的性能[23]。



（a） 无 P3HT 层 （b） 有 P3HT 层

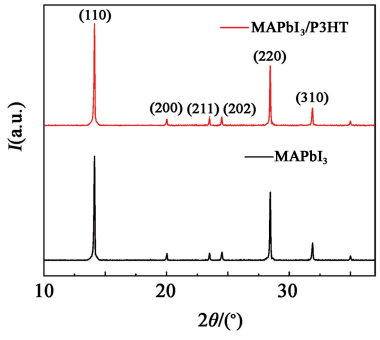
图 2 有无 P3HT 层 $MAPbI_3$ 的 SEM 图像



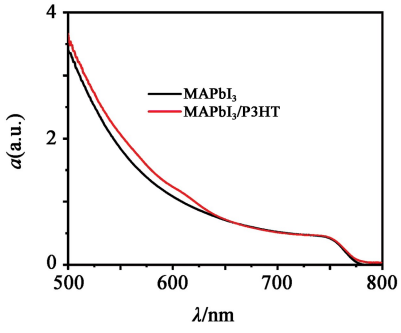
（c） 无 P3HT 层 （d） 有 P3HT 层

图 3 有无 P3HT 层 $MAPbI_3$ 的 AFM 图像

图 4(a)显示了 $MAPbI_3$ 和 $MAPbI_3$/P3HT 样品的 X 射线衍射图谱。$MAPbI_3$ 样品分别在 14.1°，20°，23.5°，24.5°，28.5°和 31.9°出现了 6 个衍射峰，分别对应立方 $MAPbI_3$ 钙钛矿的(110)，(200)，(211)，(202)，(220)和(310)晶面的衍射峰。$MAPbI_3$/P3HT 的 X 射线衍射图显示了相同的六个衍射峰，表明 P3HT 在 $MAPbI_3$ 薄膜上的沉积并



（a） X 射线衍射图谱

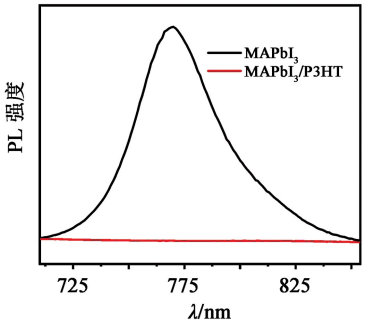


（b） 紫外-可见吸收光谱

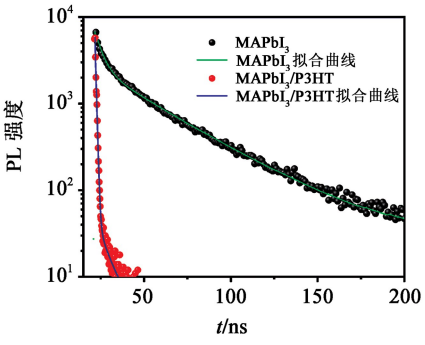
图 4 两种样品的 X 射线衍射图谱和紫外-可见吸收光谱

没有改变 $MAPbI_3$ 的晶体结构[29]。图 4(b)为加入和不加入 P3HT 的钙钛矿薄膜的紫外-可见吸收光谱。$MAPbI_3$/P3HT 样品相比于单纯的 $MAPbI_3$ 样品，在 350～640 nm 的波长范围内吸收增强，这来源于 P3HT 的吸收。除此之外，两个薄膜的吸收特性基本相似，说明 P3HT 的加入对钙钛矿膜的吸收没有负面影响。

为了进一步探讨空穴传输层 P3HT 在 $MAPbI_3$ 膜上的电荷转移特性，分别对 $MAPbI_3$ 和 $MAPbI_3$/P3HT 薄膜进行了稳态光致发光(PL)和时间分辨光致发光(TRPL)的表征。ITO/$MAPbI_3$ 和 ITO/$MAPbI_3$/P3HT 的归一化稳态光致发光光谱如图 5(a)所示。结果显示当 P3HT 覆盖在钙钛矿表面时，钙钛矿发光急剧猝灭。说明加入空穴传输层(P3HT)提高了从 $MAPbI_3$ 中萃取空穴的能力。$MAPbI_3$ 和 $MAPbI_3$/P3HT 的时间分辨光致发光衰减曲线如图 5(b)所示。时间分辨光致发光光谱符合双指数衰减公式：$I = A_0 + A_1\exp(-t/\tau_1) + A_2\exp(-t/\tau_2)$，其中，$\tau_1$ 表示快速衰减时间常数，τ_2 表示较慢衰减时间常数[30]，τ_{avg} 表示平均时间常数，A_0，A_1，A_2 为拟合常数，其拟合结果如表 1 所示。$MAPbI_3$ 薄膜的 τ_{avg} 远小于的 $MAPbI_3$/P3HT 薄膜的数值，说明 P3HT 层的加入有效促进了空穴萃取。该空穴传输层促进了从 $MAPbI_3$ 到碳电极的空穴传输，这可以归因于引入 P3HT 后更好的能级匹配。



(a)　稳态光致发光曲线



(b)　时间分辨光致发光衰减曲线

图 5　ITO/$MAPbI_3$ 和 ITO/$MAPbI_3$/P3HT 的稳态光致发光及时间分辨光致发光衰减曲线

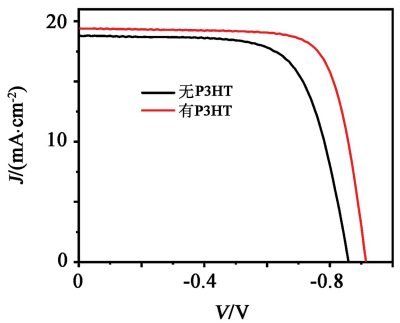
表 1 为采用双指数法对钙钛矿薄膜的时间分辨光致发光光谱进行拟合得到的衰减时间常数。

表 1　拟合得到的衰减时间常数

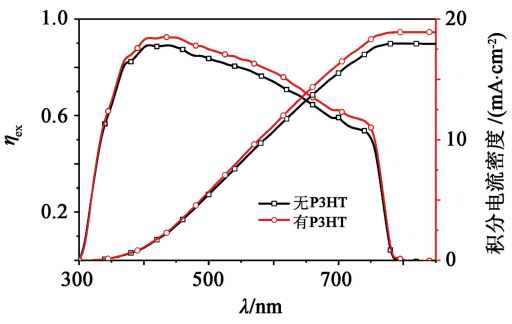
P3HT	τ_1/ns	A_1/%	τ_2/ns	A_2/%	τ_{avg}/ns
无	4.16	65.7	35.31	34.3	14.86
有	0.59	99	6.67	1	0.64

2.2　以 P3HT 为空穴传输层的碳基太阳电池的性能

为了进一步探索 ITO/SnO_2/$MAPbI_3$/P3HT/Carbon 器件的性能，测量了器件的电流密度-电压(J-V)曲线。从图 6(a)可以看出，无 P3HT 空穴传输层时器件开路电压(V_{oc})为 0.86 V，短路电流密度(J_{sc})为 18.82 mA/cm^2，填充因子(F_F)为 68.92%，光电转化效率(η)为 11.16%。加入 P3HT 空穴传输层后，器件的各项参数均得到了改善。V_{oc} 达到 0.92 V，J_{sc} 达到 19.42 mA/cm^2，F_F 达到 74.83%，η 达到 13.37%，整体效率比加入 P3HT 前提高了 20%。因此，进一步证实了引入 P3HT 作为空穴传输层后，从钙钛矿中提取空穴并传输到碳电极上更为有效。我们测量了光伏器件的外量子效率(η_{ex})。从图 6(b)可以看出，在 400～750 nm 范围内，η_{ex} 有



(a)　电流密度-电压曲线



(b)　外量子效率

图 6　有/无 P3HT 层时钙钛矿器件的电流密度-电压曲线和外量子效率

明显的改善，这得益于加入空穴传输层之后对载流子更好的收集。同时，引入 P3HT 后，对于电子有一个能级势垒，钙钛矿和碳界面的电子空穴对复合损失也有所减少。这些因素最终导致光电转化效率的提升。

图 7 为有/无 P3HT 条件下碳基钙钛矿太阳电池的电化学阻抗谱图，图中各点为实测数据，实线为等效电路拟合曲线。测量在暗光条件下进行，频率范围为 10^{-1}～10^{7} Hz，偏压为 0.92 V。无 P3HT 时器件转移电阻 R_1＝1 171 Ω，加入 P3HT 之后 R_1＝874 Ω。可见加入 P3HT 作为空穴传输层之后转移电阻显著减少，这表明原来的 Carbon/$MAPbI_3$ 接触不佳，加入 P3HT 后，$MAPbI_3$ 与碳的接触更加光滑和牢固，从而导致电荷转移电阻降低，更有利于载流子的传输，进而提升了器件整体的光电转化性能。

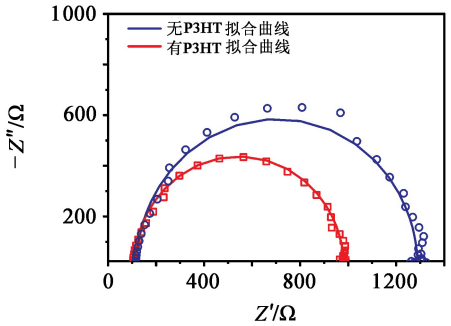


图 7 ITO/SnO_2/$MAPbI_3$/Carbon 和 ITO/SnO_2/$MAPbI_3$/P3HT/Carbon 器件的电化学阻抗谱

对于钙钛矿太阳电池的商业化，器件在连续光照下的稳定性至关重要。为此对其进行了长期的稳定性测试（图 8），包括开路电压、短路电流、填充因子以及光电转化效率的变化情况。未封装的 ITO/SnO_2/ $MAPbI_3$/ P3HT/ Carbon 和 ITO/SnO_2/ $MAPbI_3$/Carbon 在氮气环境中被连续光照。加入 P3HT 之前，器件的光电转化效率在 500 h 后下降了 40%；但加入 P3HT 这一空穴传输层之后，器件的稳定性明显提高，开路电压持续上升，最终达到稳定值，而填充因子和短路电流则随时间略有下降。因此在光照 1 000 h 后，P3HT 器件的光电转化效率仍然保持在初始值的 87%。同时，发现金电极与碳电极的稳定性有很大差异。ITO/SnO_2/$MAPbI_3$/P3HT/Au 的金电极器件的光电转化效率在光照 40 h 后迅速下降到初始值的 50%。这些结果表明碳电极对于提高钙钛矿太阳电池的工作稳定性具有潜在优势。

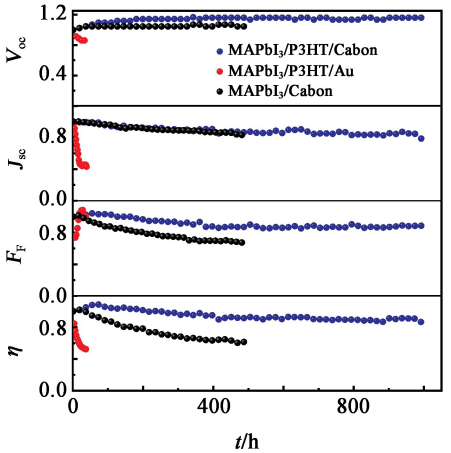


图 8 器件长期稳定性测试

3 总结

在本文中，聚合物 P3HT 被用作碳基钙钛矿太阳电池的空穴传输层。P3HT 使钙钛矿与碳电极之间的能级更匹配，更有利于从钙钛矿层中萃取空穴。引入电子能级势垒可以抑制钙钛矿与碳电极界面的电子-空穴对的复合，降低载流子损耗。随着 P3HT 的引入，光电转化效率增加了 20%。在连续光照 500 h 后，没有 P3HT 的碳基钙钛矿太阳电池的光电转化效率已下降至初始值的 60%。而加入 P3HT 后，在连续光照 1 000 h 后仍能够保持初始值的 87%，器件的稳定性得到显著提升。该器件结构和制备工艺简单，无需真空工艺，电极材料便宜，有利于钙钛矿太阳电池的商业化。

参考文献：

[1] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells [J]. J. of the American Chemical Society, 2009, 131(17): 6050-6051.

[2] Hu M, Bi C, Yuan Y, et al. Stabilized wide bandgap $MAPbBr_xI_{3-x}$ perovskite by enhanced grain size and improved crystallinity[J]. Advanced Science, 2016, 3(6): 1500301.

[3] Dong Q, Fang Y, Shao Y, et al. Electron-hole diffusion lengths ＞ 175 μm in solution-grown CH_3NH_3 PbI_3 single crystals[J]. Science, 2015, 347: 967.

[4] Aharon S, Gamliel S, Cohen B E, et al. Depletion region effect of highly efficient hole conductor free $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite solar cells [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2014, 16(22): 10512-10518.

[5] Kim H S, Lee C R, Im J H, et al. Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9% [J]. Scientific Reports, 2012, 2: 591.

[6] Liu M, Johnston M B, Snaith H J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition[J]. Nature, 2013, 501(7467): 395-398.

[7] 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.

[8] Wu Y, Xie F, Chen H, et al. Thermally stable $MAPbI_3$ perovskite solar cells with efficiency of 19.19% and area over 1 cm^2 achieved by additive engineering [J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1701073.

[9] Sahli F, Werner J, Kamino B A, et al. Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency[J]. Nature Materials, 2018, 17(9): 820-826.

[10] Best research-cell efficiencies[EB/OL]. https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20191106.pdf, 2019.

[11] Ku Z, Rong Y, Xu M, et al. Full printable processed mesoscopic $CH_3NH_3PbI_3/TiO_2$ heterojunction solar cells with carbon counter electrode[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 3132.

[12] Li H, Cao K, Cui J, et al. 14.7% efficient mesoscopic perovskite solar cells using single walled carbon nanotubes/carbon composite counter electrodes[J]. Nanoscale, 2016, 8: 6379-6385.

[13] Hwang I, Jeong I, Lee J, et al. Enhancing stability of perovskite solar cells to moisture by the facile hydrophobic passivation[J]. ACS Appl. Mater. & Interfaces, 2015, 7: 17330-17336.

[14] Tai Q, You P, Sang H, et al. Efficient and stable perovskite solar cells prepared in ambient air irrespective of the humidity [J]. Nature Communications, 2016, 7: 11105.

[15] Rong Y, Hu Y, Mei A, et al. Challenges for commercializing perovskite solar cells[J]. Science, 2018, 361: eaat8235.

[16] Mei A, Li X, Liu L, et al. A hole-conductor-free, fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability [J]. Science, 2014, 345: 295.

[17] Wu Z, Liu Z, Hu Z, et al. Highly efficient and stable perovskite solar cells via modification of energy levels at the perovskite/carbon electrode interface [J]. Advanced Materials, 2019, 31: 1804284.

[18] Kim Y C, Jeon N J, Noh J H, et al. Beneficial effects of PbI_2 incorporated in organo-lead halide perovskite solar cells [J]. Advanced Energy Materials, 2016, 6: 1502104.

[19] Ahn N, Jeon I, Yoon J, et al. Carbon-sandwiched perovskite solar cell[J]. J. of Materials Chemistry A, 2018, 6: 1382-1389.

[20] Chu L, Liu W, Qin Z, et al. Boosting efficiency of hole conductor-free perovskite solar cells by incorporating p-type NiO nanoparticles into carbon electrodes[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 178: 164-169.

[21] Cai C, Zhou K, Guo H, et al. Enhanced hole extraction by NiO nanoparticles in carbon-based perovskite solar cells[J]. Electrochimica Acta, 2019, 312: 100-108.

[22] Zhang F, Yang X, Cheng M, et al. Boosting the efficiency and the stability of low cost perovskite solar cells by using CuPc nanorods as hole transport material and carbon as counter electrode[J]. Nano Energy, 2016, 20: 108-116.

[23] Wu X, Xie L, Lin K, et al. Efficient and stable carbon-based perovskite solar cells enabled by the inorganic interface of CuSCN and carbon nanotubes[J]. J. of Materials Chemistry A, 2019, 7: 12236-12243.

[24] Jiang X, Yu Z, Li H B, et al. A solution-processable copper (Ⅱ) phthalocyanine derivative as a dopant-free hole-transporting material for efficient and stable carbon counter electrode-based perovskite solar cells[J]. J. of Materials Chemistry A, 2017, 5: 17862-17866.

[25] Jiang X, Yu Z, Lai J, et al. Interfacial engineering of perovskite solar cells by employing a hydrophobic copper phthalocyanine derivative as hole-transporting material with improved performance and stability [J]. ChemSusChem, 2017, 10: 1838-1845.

[26] Jung E H, Jeon N J, Park E Y, et al. Efficient, stable and scalable perovskite solar cells using poly(3-hexylthiophene) [J]. Nature, 2019, 567: 511-515.

[27] Chu Q Q, Ding B, Peng J, et al. Highly stable carbon-based perovskite solar cell with a record efficiency of over 18% via hole transport engineering[J]. J. of Materials Science & Technol., 2019, 35: 987-993.

[28] Wang G, Dong W, Gurung A, et al. Improving photovoltaic performance of carbon-based $CsPbBr_3$ perovskite solar cells by interfacial engineering using P3HT interlayer[J]. J. of Power Sources, 2019, 432: 48-54.

[29] Halder A, Chulliyil R, Subbiah A S, et al. Pseudohalide (SCN^-)-doped $MAPbI_3$ perovskites: A few surprises[J]. The J. of Physical Chemistry Letters, 2015, 6: 3483-3489.

[30] Sun M, Liang C, Zhang H, et al. Tailoring a dynamic crystalline process during the conversion of lead-halide perovskite layer to achieve high performance solar cells[J]. J. of Materials Chemistry A, 2018, 6: 24793-24804.

作者简介：

万雪健(1994—)，男，硕士，主要研究方向为钙钛矿太阳电池。