

文章编号: 1000-7032(2018)03-0322-07

采用 MoO₃ 阳极缓冲层的钙钛矿太阳能电池研究

王 俊^{1,2}, 禹 豪^{1,2}, 张继华², 张小文³, 王红航¹, 易子川¹, 刘黎明^{1*}

(1. 电子科技大学中山学院 电子薄膜与集成器件国家重点实验室中山分室, 广东 中山 528402;

2. 电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054;

3. 桂林电子科技大学 广西信息材料重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 采用热蒸发法沉积无毒、稳定、价廉的无机氧化物 MoO₃, 将其作为钙钛矿电池的阳极缓冲层。结果表明, MoO₃ 阳极缓冲层的引入有利于增强光吸收层到阳极的空穴提取效率, 使电池的短路电流密度 (J_{sc}) 和填充因子 (FF) 均有较大幅度提高, 取得了 9.96% 的平均光电转换效率 (PCE)。此外, 实验发现, MoO₃ 阳极缓冲层可以阻挡酸性的 PEDOT:PSS 对 ITO 的腐蚀, 有利于增强电池的稳定性。

关键词: 钙钛矿太阳能电池; 阳极缓冲层; MoO₃; 无机氧化物

中图分类号: O484.3 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20183903.0322

Study on Perovskite Solar Cells with MoO₃ Anode Buffer Layer

WANG Jun^{1,2}, YU Hao^{1,2}, ZHANG Ji-hua², ZHANG Xiao-wen³,WANG Hong-hang¹, YI Zi-chuan¹, LIU Li-ming^{1*}

(1. Zhongshan Branch of State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan Institute, Zhongshan 528402, China;

2. State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

3. Guangxi Key Laboratory of Information Materials, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

* Corresponding Author, E-mail: liulm@126.com

Abstract: The inorganic oxide MoO₃ thin films were prepared by thermal evaporation deposition method, and used as an anode buffer layer for PHJ perovskite solar cells. The results show that the MoO₃ anode buffer layer can enhance the hole extraction efficiency from the light absorption layer to the anode, and benefit the improvement of the short-circuit current (J_{sc}) density and the fill factor (FF) of the solar cells. An average power conversion efficiency (PCE) of 9.96% is achieved finally for the solar cells with a MoO₃ anode buffer layer. In addition, the results also show that the MoO₃ anode buffer layer can hinder the corrosion of ITO by acidic PEDOT:PSS and improve the stability of the solar cells.

Key words: perovskite solar cells; anode interface modification; MoO₃; inorganic oxide

收稿日期: 2017-07-24; 修订日期: 2017-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(61565003, 51362031); 广西信息材料重点实验室开放课题(151003-K); 广东省引进创新创业团队项目(2013C102); 广东省重大科技专项(2015B090913004, 2016B090909000); 广东省科技厅(产学研专项)项目(2016B090918083)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61565003, 51362031); Open Subject of Guangxi Information Material Key Laboratory (151003-K); Introduction of Innovative and Entrepreneurial Team Project of Guangdong Province (2013C102); Major Science and Technology Special of Guangdong Province (2015B090913004, 2016B090909000); Science and Technology Department of Guangdong Province (2016B090918083)

1 引 言

自从钙钛矿太阳能电池首次报道以来^[1], 因其优异的光电特性^[2-3] 而受到广泛关注, 取得了突飞猛进的发展, 但器件的稳定性和效率仍有待进一步提高。在平面异质结型 (PHJ) 钙钛矿太阳能电池中, 广泛采用高导电性的 PEDOT: PSS 作为空穴传输层材料 (HTL)^[4-5]。最近, NiO_x^[6-8]、Cu₂O^[9] 等作为空穴传输层材料也被研究报道, 但还很难取得接近 PEDOT: PSS 的性能, 而且其稳定性也是一个很大的挑战。为了进一步阻挡电子空穴的复合, 减少漏电流, 一些研究者在结合 PEDOT: PSS 高导电性的同时, 使用 PolyTPD^[10]、QUPD^[11] 等具有高的最低未占分子轨道 (LUMO) 能级或者稳定性好的材料进行阳极界面修饰, 用以提升电池的性能。无机氧化材料 MoO₃ 具备稳定、无毒且价格低廉等特性, 被作为有机太阳能电池的阳极缓冲层、界面修饰层进行了研究。Sun 等^[12] 在倒置结构的有机太阳能电池上, 将 MoO₃ 作为器件阳极缓冲层, 发现引入 MoO₃ 有助于空穴提取效率, 阻挡电子, 取得了 3.9% 的光电转换效率。Zilberberg 等^[13] 报道了 ITO/(sMoO_x 或 eMoO₃ 或 PEDOT: PSS)/P3HT: PCBM/Ag 结构的有机太阳能电池, 其效率为 3.2%。Wang 等^[14] 将 MoO₃ 纳米晶和 PEDOT: PSS 复合材料作为空穴传输层, 取得了最高 9.8% 的光电转化效率。

本文将热蒸发法沉积的 MoO₃ 作为平面异质结型钙钛矿太阳能电池的阳极界面修饰层, 以增强钙钛矿光吸收层到阳极的空穴提取效率, 并利用 MoO₃ 的稳定性来阻挡酸性的 PEDOT: PSS 对 ITO 电极的腐蚀, 从而提高电池的稳定性。

2 实 验

2.1 材料和制备方法

实验中采用的 ITO 导电玻璃购于中国南玻集团, 方阻为 15 Ω · □⁻¹; 3,4-乙撑二氧噻吩: 聚苯乙烯磺酸盐 (PEDOT: PSS)、富勒烯衍生物 [6,6]-phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester (PCBM) 购于 SCM Industrial Chemical Co, Ltd; 碘化铅 (PbI₂)、N,N-二甲基甲酰胺 (DMF)、氯苯 (CB)、MoO₃ 购于阿拉丁试剂。所有购买的药品和试剂均未经进一步的提纯处理。

CH₃NH₃I 合成方法^[15] 如下: 在洁净的烧杯中加入 100 mL 的无水乙醇, 在冰水混合物氛围下, 搅拌 30 min。再加入 24 mL 甲醇和 10 mL 的 HI, 搅拌 2 h。将得到的产物放在旋转蒸发仪上, 蒸干溶剂后得到黄褐色沉淀, 随后将得到的黄褐色沉淀用乙酸清洗多次, 直到黄褐色的产物变为白色。最后将生成物溶于少量的体积比 1:5 的乙醇和大量的乙醚混合物中, 对产物进行重结晶, 最后将得到的白色晶体放置于真空干燥箱中烘干。

称量 200 mg 的 CH₃NH₃I 和 578 mg 的 PbI₂, 溶解于 1 mL 的 DMF 中, 配置钙钛矿前驱体溶液。将 20 mg 的 PCBM 溶于 1 mL 无水氯苯中, 配置 PCBM 溶液。

图 1 为电池的结构示意图和各功能层的能级排布图。器件的制备过程如下: 将大小为 1.5 cm × 1.5 cm 的 ITO 刻蚀后, 依次用洗洁剂、去离子水、丙酮、异丙醇分别超声洗涤。在 ITO 基底上通过热蒸发沉积一定厚度的 MoO₃ 界面修饰层。接着将 PEDOT: PSS 溶液用匀胶机以 4 000 r/min 的转速旋涂 60 s, 在 120 °C 下加热 20 min。将器件移至手套箱, 以 5 000 r/min 的转速旋涂钙钛矿前驱液, 并在高速旋转阶段快速滴加反溶剂氯苯 (CB), 在加热台上 100 °C 退火 15 min, 得到钙钛

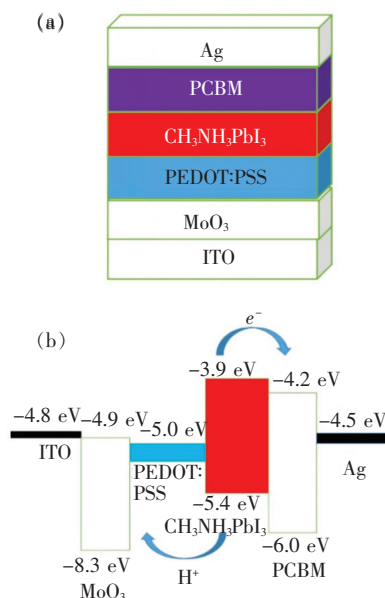


图 1 (a) 钙钛矿电池的结构示意图; (b) 钙钛矿电池的能级排布图。

Fig. 1 (a) Structure diagram of perovskite solar cells. (b) Energy levels of perovskite solar cells.

矿薄膜。PCBM 溶液均匀涂在钙钛矿吸光层上,以 1 800 r/min 的转速旋涂 30 s。最后在真空度 $< 1.0 \times 10^{-4}$ Pa 的蒸镀腔体内,蒸镀厚度约为 100 nm 的 Ag 电极,完成电池的制作,器件的有效面积约为 0.1 cm^2 。

2.2 测试方法

器件伏安特性 J - V 曲线测试在一个太阳光强下采用 Keithley 2400 数字表进行测量。测试用的电池均未经过进一步的封装,测试均在空气中进行。薄膜表面形貌的 SEM 测试采用荷兰 FEI 公司 Inspect F 系统,原子力显微镜 (AFM) 测试采用 Bruker Dimension Edge 系统 (轻敲模式),薄膜光 UV-Vis 吸收光谱测试采用 Shimadzu 3600 光谱仪。

3 结果与分析

3.1 器件的光电性能

为了研究不同厚度的 MoO_3 对电池性能的影响,在 ITO 基底上用热蒸发法沉积不同厚度的 MoO_3 薄膜作为阳极界面修饰层,实验研究了 1, 2, 5, 10 nm 这几个不同的厚度。图 2 为采用不同厚度 MoO_3 器件的平均 J - V 曲线,每条曲线均由 8 个器件平均得到。表 1 给出了器件具体性能参数。从表 1 中可以看出,当蒸镀的 MoO_3 厚度为 1 nm 时,器件的平均性能最佳, J_{sc} 为 17.96 mA/cm^2 , V_{oc} 为 0.78 V,FF 高达 0.7,器件的平均光电转换效率 (PCE) 为 9.96%。而蒸镀 2 nm 厚度的 MoO_3 相比 1 nm 的厚度,两者制备的器件的 FF 和 V_{oc} 基本接近一致,但是 J_{sc} 由 17.96 mA/cm^2 减小为 14.43 mA/cm^2 ,所得器件平均 PCE 为 7.68%,与标准 PEDOT:PSS 对照器件取得的效率 (7.38%)

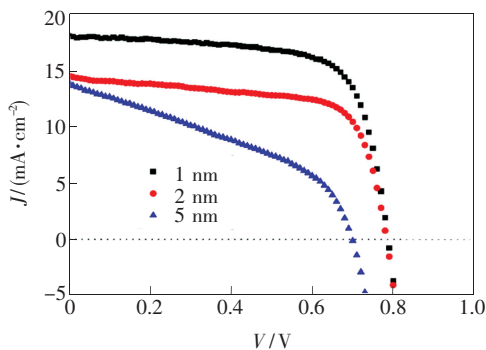


图 2 采用不同厚度 MoO_3 的太阳能电池的 J - V 曲线
Fig. 2 J - V curves of the solar cells with different MoO_3 thickness

接近。当 MoO_3 薄膜的厚度增大到 5 nm 时,器件的 FF 减小为 0.38。 MoO_3 的厚度继续增大为 10 nm,电池各方面性能参数急剧下降,制备的电池光电转换效率已经趋近为 0。随着 MoO_3 的厚度的增加,FF 和 J_{sc} 下降,表明器件的电荷传输效率下降,电子与空穴复合加剧。实验表明将 MoO_3 作为钙钛矿太阳能电池的阳极界面修饰层时,器件性能对 MoO_3 薄膜的厚度较为敏感。

表 1 采用不同厚度 MoO_3 的太阳能电池的性能参数

Tab. 1 Performance parameters of the solar cells with different MoO_3 thickness

Thickness/ nm	$J_{sc}/$ ($\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$V_{oc}/$ V	FF/ %	PCE/ %
1	17.96	0.78	0.7	9.96
2	14.43	0.78	0.68	7.68
5	13.81	0.69	0.38	3.71
10	2.02	0.02	0.23	~0

对引入 1 nm 厚度 MoO_3 阳极界面修饰层前后的钙钛矿太阳能电池性能变化进行研究,图 3 为不同器件的 J - V 曲线。从表 2 中可以看出基于 1 nm 厚度 MoO_3 阳极界面修饰层的钙钛矿太阳能电池最高 PCE 为 10.6%, J_{sc} 高达 18.67 mA/cm^2 , V_{oc} 为 0.81 V,FF 高达 70%,平均值 PCE 为 9.96%。而单一空穴传输层 PEDOT:PSS 的器件,最高 PCE 为 8.35%,平均值为 7.38%。基于 1 nm 厚度 MoO_3 阳极界面修饰层的器件相比对照器件,电池的短路电流密度 (J_{sc}) 和填充因子 (FF) 均有较大幅度提高,FF 由 0.58 提升为 0.7,提高了 22.8%;而 J_{sc} 由 15.2 mA/cm^2 提升为 17.96 mA/cm^2 ,提高了 18.1%;器件的 PCE 提高了 34.9%。通过实验对比可以看出,蒸镀 1 nm 厚度的 MoO_3 界面修

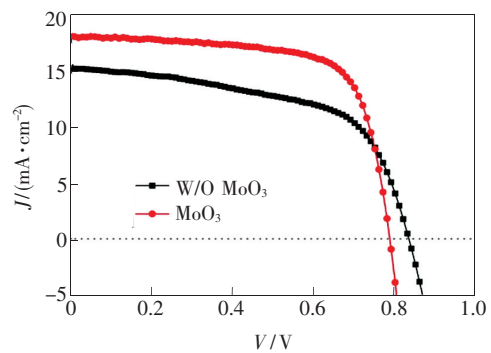


图 3 引入 MoO_3 前后电池的 J - V 曲线
Fig. 3 J - V curves of the solar cells with/without MoO_3

表 2 引入 MoO₃ 前后电池的性能参数

Tab.2 Performance parameters of the solar cells with/without MoO₃

Devices	$J_{sc}/$ (mA · cm ⁻²)	$V_{oc}/$ V	FF/ %	PCE/ %
W/O MoO ₃	15.2	0.83	0.58	7.38 (max. 8.35)
MoO ₃	17.96	0.78	0.7	9.96 (max. 10.6)

饰层后,器件性能得到了明显的提升,说明对阳极界面成功进行了优化,这可以归功于 MoO₃ 薄膜的引入提高了空穴的提取效率。

3.2 微结构分析

钙钛矿薄膜的质量和厚度是影响器件性能的关键因素^[16-17]。实验通过一步溶液旋涂法制取了表面致密、基底覆盖率高的 CH₃NH₃PbI₃ 薄膜。图 4(a) 为钙钛矿薄膜表面形貌的 SEM 图,从测试结果可以看出薄膜晶粒尺寸较为均一、致密,大晶粒尺寸在 400 ~ 500 nm 左右。钙钛矿薄膜的厚度直接影响器件的光吸收能力,对制取的钙钛矿薄膜厚度进行测试,图 4(b) 为器件的钙钛矿薄膜 SEM 截面图。测试表明制备的 CH₃NH₃PbI₃ 薄膜的厚度为 350 nm 左右,与广泛报道的结果相近^[3,5],为较为合适的光吸收厚度。

在钙钛矿太阳能电池中,薄膜的形貌控制是一个研究热点,提高 PEDOT: PSS 薄膜在基底 ITO

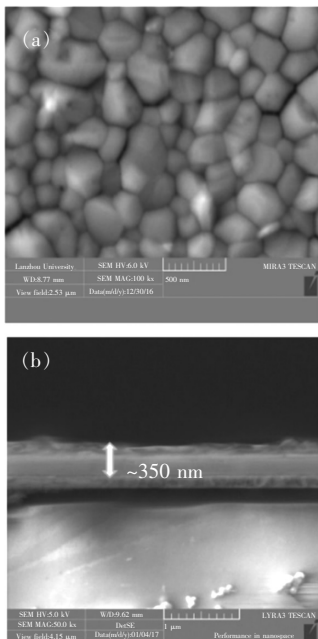


图 4 钙钛矿薄膜的 SEM 图像。(a) 表面图;(b) 截面图。
Fig.4 SEM images of CH₃NH₃PbI₃ perovskite films. (a) Top surface. (b) Cross section.

表面覆盖率和均匀性,将有助于提高空穴的提取效率^[18]。我们对引入 MoO₃ 阳极界面修饰层前后空穴传输层 PEDOT: PSS 薄膜的形貌进行了研究。图 5 为修饰前后 PEDOT: PSS 薄膜 SEM 表面图,可以明显观察到,在 ITO 玻璃和空穴传输层

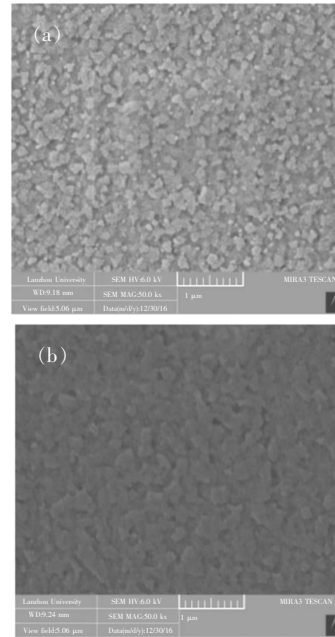


图 5 PEDOT: PSS 薄膜表面的 SEM 像。(a) 未引入 MoO₃; (b) 引入 MoO₃。
Fig.5 Typical top-surface SEM images of PEDOT: PSS films. (a) Without MoO₃. (b) With MoO₃.

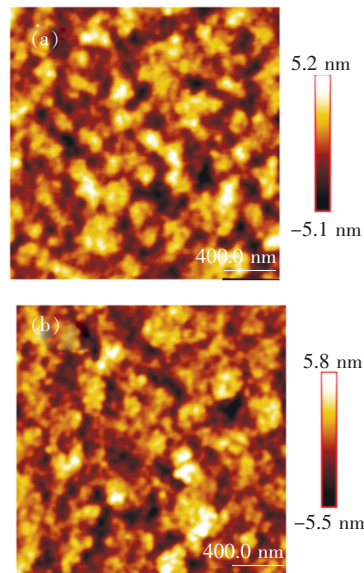


图 6 PEDOT: PSS 薄膜表面的 AFM 像。(a) 未引入 MoO₃; (b) 引入 h MoO₃。
Fig.6 Typical top-surface AFM images of PEDOT: PSS films. (a) Without MoO₃. (b) With MoO₃.

PEDOT: PSS 之间蒸镀 MoO_3 阳极界面修饰层后,大幅度提高了 PEDOT: PSS 薄膜在基底 ITO 上的表面覆盖率,降低了钙钛矿薄膜与 ITO 底电极的直接接触概率。

采用 AFM 可以进一步分析蒸镀 MoO_3 薄膜对上层空穴传输层 PEDOT: PSS 薄膜形貌的影响。图 6 为蒸镀 MoO_3 前后 PEDOT: PSS 薄膜表面的 AFM 图。测试得出在基底 ITO 上直接沉积的 PEDOT: PSS 表面的均方根粗糙度 (RMS) 为 1.69 nm,而在 ITO 上蒸镀一层 MoO_3 后, PEDOT: PSS 薄膜的 RMS 降低为 1.56 nm,可见引入 MoO_3 后 PEDOT: PSS 表面粗糙度略微降低,薄膜更加光滑。综合 SEM 和 AFM 测试结果,可见在器件中插入 MoO_3 阳极界面修饰层后提高了 PEDOT: PSS 薄膜的覆盖率和平整度,这也有利于接下来的上层 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜生长。

3.3 MoO_3 对器件吸光能力的影响

薄膜对光的吸收能力也是影响器件性能的一个重要因素。为了研究 MoO_3 薄膜作为阳极界面修饰层引入器件后对光吸收带来的影响,对器件插入 MoO_3 前后的 PEDOT: PSS 薄膜的透射光谱进行研究,由于 MoO_3 在可见区域 300 ~ 800 nm 无吸收,从图 7 可以看到空穴传输层 PEDOT: PSS 沉积在 ITO 和 MoO_3 上的透射光谱曲线基本趋于

一致,差别很小。说明在 ITO 和空穴传输层 PEDOT: PSS 之间蒸镀上一层 1 ~ 2 nm 的超薄 MoO_3 阳极界面修饰层,对钙钛矿太阳能电池的光吸收影响很小。

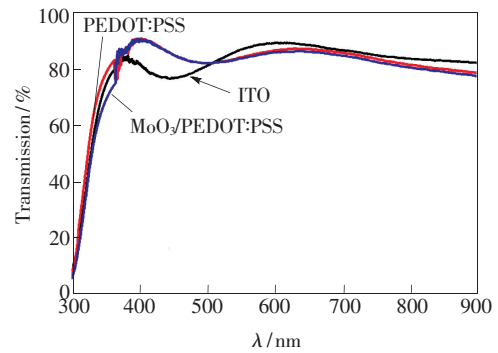


图 7 引入 MoO_3 前后 PEDOT: PSS 薄膜的透射光谱
Fig. 7 Transmission spectra of PEDOT: PSS films with or without MoO_3

3.4 器件稳定性测试

目前对钙钛矿电池的研究除了进一步提升其效率外,稳定性研究也是十分重要的课题。我们对制备的钙钛矿太阳能电池进行稳定性测试,测试的器件未经过进一步封装,将其置于湿度为 20% 的恒湿箱中,室温条件下进行时间为 15 天的稳定性测试。图 8 给出了 PCE、 J_{sc} 、FF、 V_{oc} 4 个电池性能指标随放置时间的变化结果。加入 MoO_3

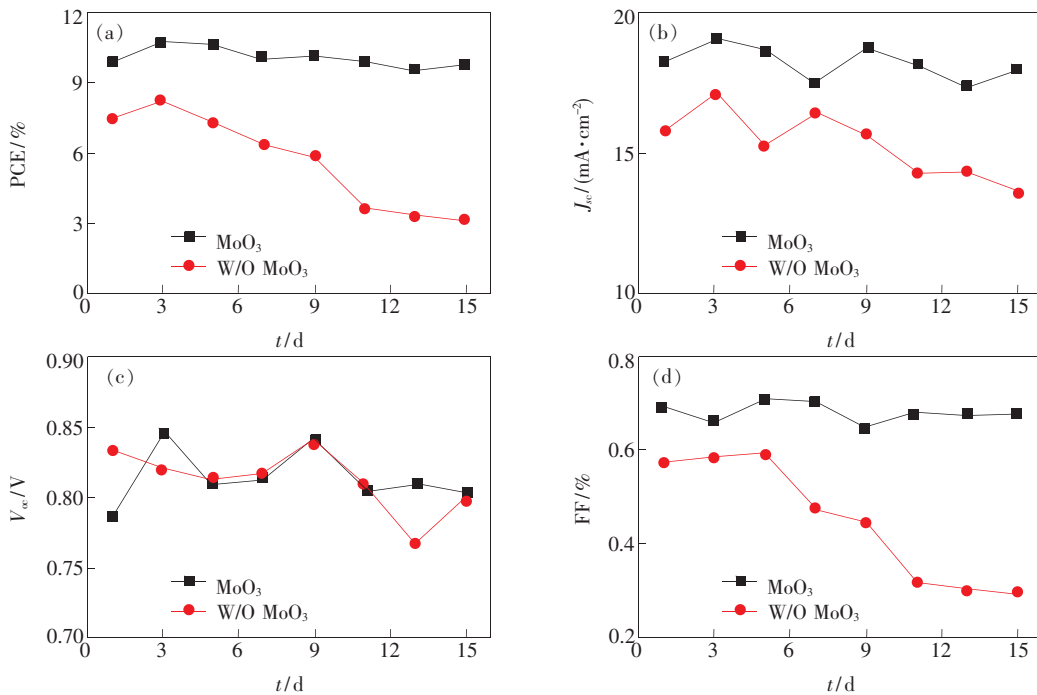


图 8 引入 MoO_3 前后太阳能电池的性能稳定性。(a) PCE; (b) J_{sc} ; (c) V_{oc} ; (d) FF。

Fig. 8 Performance stability of the solar cells with or without MoO_3 . (a) PCE. (b) J_{sc} . (c) V_{oc} . (d) FF.

界面修饰层的器件,刚开始性能有略微的提升,接下来各方面性能指标趋于稳定,而从第5天开始,PEDOT:PSS 参考器件的各方面性能指标开始大幅度衰减。经过15天放置于20%湿度环境的器件,加入 MoO₃ 阳极界面修饰层的器件还具有原始效率的91.8%,而 PEDOT:PSS 参考器件仅有原始效率的38%。分析认为,PEDOT:PSS 具备高导电性的同时也会由于其内在的酸性而腐蚀 ITO,MoO₃ 的引入可以有效阻挡 PEDOT:PSS 对 ITO 的腐蚀,从而提高器件的稳定性。

4 结 论

采用蒸镀法制备了超薄 MoO₃,用于平面异质结型钙钛矿太阳能电池中 ITO 和空穴传输层 PEDOT:PSS 之间的阳极界面修饰层。当 MoO₃ 厚度

为1 nm时,器件取得了10.6%的最高光电转化效率,平均效率为9.96%。无 MoO₃ 阳极界面修饰层的对照器件的最高光电转化效率为8.35%,平均效率为7.38%。相比而言,引入 MoO₃ 阳极界面修饰层后器件性能得到了较大幅度提升。将器件放置于20%湿度环境下,进行15天的跟踪测试,发现引入 MoO₃ 阳极界面修饰层的器件,其效率为初始效率的91.8%,而 MoO₃ 阳极界面修饰层的对照器件仅有初始效率的38%。分析表明,引入 MoO₃ 阳极界面修饰层可以提高 PEDOT:PSS 在 ITO 基底上的表面覆盖率和平整度,同时可以阻挡酸性的 PEDOT:PSS 对 ITO 基底的腐蚀。对电池而言,带来的好处一方面是提高空穴提取效率,减少电子空穴复合概率,提升器件性能;另一方面也有利于提高器件稳定性。

参 考 文 献:

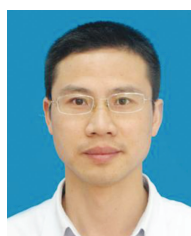
- [1] KOJIMA A, TESHIMA K, SHIRAI Y, *et al.*. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2009, 131(17):6050-6051.
- [2] HODES G. Perovskite-based solar cells [J]. *Science*, 2013, 342(6156):317-318.
- [3] JENG J Y, CHIANG Y F, LEE M H, *et al.*. CH₃NH₃PbI₃ perovskite/fullerene planar-heterojunction hybrid solar cells [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25(27):3727-3732.
- [4] 刘大超,崔运超,李光,等. 阳极界面修饰对钙钛矿太阳能电池性能的影响 [J]. *光子学报*, 2017, 46(2):0223003.
LIU D C, CUI Y C, LI G, *et al.*. Influence of anode interface modification on the performance of perovskite solar cells [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2017, 46(2):0223003. (in Chinese)
- [5] YOU J, HONG Z, YANG Y M, *et al.*. Low-temperature solution-processed perovskite solar cells with high efficiency and flexibility [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(2):1674-1680.
- [6] LI Y, YE S, SUN W, *et al.*. Hole-conductor-free planar perovskite solar cells with 16.0% efficiency [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2015, 3(36):18389-18394.
- [7] HU L, PENG J, WANG W, *et al.*. Sequential deposition of CH₃NH₃PbI₃ on planar NiO film for efficient planar perovskite solar cells [J]. *ACS Photon.*, 2014, 1(7):547-553.
- [8] WANG K C, JENG J Y, SHEN P S, *et al.*. p-type mesoscopic nickel oxide/organometallic perovskite heterojunction solar cells [J]. *Sci. Rep.*, 2014, 6(23):4756-4759.
- [9] ZUO C, DING L. Solution-processed Cu₂O and CuO as hole transport materials for efficient perovskite solar cells [J]. *Small*, 2015, 11(41):5528-5532.
- [10] MALINKIEWICZ O, YELLA A, GRÄTZEL M, *et al.*. Perovskite solar cells employing organic charge-transport layers [J]. *Nat. Photon.*, 2013, 8(2):128-132.
- [11] HONG J J, YEH P, LIAO S H, *et al.*. Inverted perovskite solar cells with inserted cross-linked electron-blocking interlayers for performance enhancement [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2015, 3(17):9291-9297.
- [12] KYAW A K K, SUN X W, JIANG C Y, *et al.*. An inverted organic solar cell employing a sol-gel derived ZnO electron selective layer and thermal evaporated MoO₃ hole selective layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93(22):221107.
- [13] GIROTTO C, VOROSHAZI E, CHEYNS D, *et al.*. Solution-processed MoO₃ thin films as a hole-injection layer for organic solar cells [J]. *ACS Appl. Mater. Interf.*, 2011, 3(9):3244-3247.

- [14] WANG Y, LUO Q, WU N, *et al.*. Solution-processed MoO₃: PEDOT: PSS hybrid hole transporting layer for inverted polymer solar cells [J]. *ACS Appl. Mater. Interf.*, 2015, 7(13):7170-7179.
- [15] ETGAR L, GAO, XUE Z, *et al.*. Mesoscopic CH₃NH₃PbI₃/TiO₂ heterojunction solar cells [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134(42):17396-17399.
- [16] 郭秀斌, 于威, 李婧, 等. 钙钛矿薄膜的微结构和光电特性优化 [J]. *光子学报*, 2017, 46(3):0331004.
GUO X B, YU W, LI J, *et al.*. Optimization of microstructure and photoelectric properties of perovskite thin films [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2017, 46(3):0331004. (in Chinese)
- [17] 薛启帆, 叶轩立, 曹镛, 等. 钙钛矿太阳电池研究进展: 薄膜形貌控制与界面工程 [J]. *化学学报*, 2015, 73(3):179-192.
XUE Q F, YE X L, CAO Y, *et al.*. Recent advances in perovskite solar cells: morphology control and interfacial engineering [J]. *Acta Chim. Sinica*, 2015, 73(3):179-192. (in Chinese)
- [18] CHEN L, WANG P, LI F, *et al.*. Efficient bulk heterojunction polymer solar cells using PEDOT/PSS doped with solution-processed MoO₃ as anode buffer layer [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2012, 102:66-70.



王俊(1990 -),男,湖北荆州人,硕士,2017年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事石墨烯及钙钛矿太阳能电池的研究。

E-mail: 18682552813@163.com



刘黎明(1974 -),男,湖南永州人,博士,高级工程师,2011年于中国兵器科学研究院获得博士学位,主要从事新型光电材料与器件的研究。

E-mail: liulmxps@126.com