

钙钛矿敏化太阳电池制备工艺的优化研究*

王楠^{1#}, 梁柱荣^{1,2#}, 王军霞^{1,2}, 徐雪青^{1,2†},
严卓理³, 何燕妙³, 钟杏桃³

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 广州新栋力超声电子设备有限公司, 广州 510640)

摘要:近年来,有机金属卤化物钙钛矿太阳电池因制备条件温和、光吸收强、能耗低、光电转化效率高等优点成为备受瞩目的研究热点。本文采用一步法制备钙钛矿材料甲胺碘化铅($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$),并以廉价的聚(3-己基噻吩)(P3HT)为空洞传输材料在大气环境下制备钙钛矿敏化太阳电池。其中,通过调控 TiO_2 浆料与松油醇、乙基纤维素的配比,分别制备具有250 nm、600 nm和1 000 nm三种不同厚度的 TiO_2 纳米颗粒多孔薄膜光阳极,并系统考察钙钛矿前驱体溶液旋涂量对敏化电极结构形貌及光吸收性能的影响。太阳电池光电特性测试结果表明:当 TiO_2 多孔层厚度为600 nm、钙钛矿前驱体溶液的旋涂量为40 μl 时, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 能够较为完全地覆盖在多孔 TiO_2 的表面,且钙钛矿材料的晶粒尺寸合适, TiO_2 孔道结构未被堵塞,有利于空洞导体的填充以及空洞的转移与传输,优化后的太阳电池光电转化效率达到5.17%。

关键词: $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$; 敏化太阳电池; P3HT; 制备工艺

中图分类号: TK51

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.06.004

Study on the Fabrication of Perovskites Sensitized Solar Cells

WANG Nan^{1#}, LIANG Zhu-rong^{1,2#}, WANG Jun-xia^{1,2}, XU Xue-qing^{1,2},
YAN Zhuo-li³, HE Yan-miao³, ZHONG Xing-tao³

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guangzhou Newpower Ultrasonic Electronic Equipment Co., Ltd., Guangzhou 510650, China)

Abstract: Perovskites sensitized solar cells have attracted great interest owing to the easy fabrication conditions, excellent absorption property, low energy consumption, and high power conversion efficiency (PCE). Herein, we successfully synthesized $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ via one-step method and fabricated perovskite sensitized solar cells by using P3HT as hole-transport material under ambient condition. Mesoporous TiO_2 films with different thickness (i.e. 250 nm, 600 nm, and 1 000 nm) have been obtained by regulating the mole ratios of TiO_2 pastes, terpineol, and ethyl cellulose. Furthermore, the influences of precursor volume on the microstructures and optical properties for the perovskite sensitized films were also systematically investigated. Results showed that when the thickness of the TiO_2 mesoporous layer was ~ 600 nm, and the volume of perovskite precursor solutions was 40 μl , the perovskite layer with desirable grain sizes is covered sufficiently onto the TiO_2 surface, and the pores between TiO_2 nanoparticles were still remained, which favors the effective filling of hole-transport materials and is beneficial to the photo-generated hole transport in device. The optimized perovskite sensitized solar cells exhibited a PCE of 5.17%.

Key words: $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$; solar cell; P3HT; fabrication process

0 引言

目前,有机金属卤化物钙钛矿太阳电池(以下

简称钙钛矿太阳电池)是光伏领域的研究热点^[1-4],其光电转化效率超过20%,是现有商业太阳电池最有力的竞争对手^[5-8]。这种电池所采用的有机-无机

* 收稿日期: 2015-09-07 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(21073193, 21273241); 广东省科技计划协同创新与平台环境建设项目(2014A05050305); 广东省自然科学基金(2015A030310501); 佛山市院市合作项目(2013HK100411); 江苏省能量转换材料与技术重点实验室开放课题基金(MTEC-2015M01)

† 通信作者: 徐雪青, E-mail: xuxq@ms.giec.ac.cn

该作者对论文有同等贡献

杂化光吸收材料 ABX_3 (A: $CH_3NH_3^+$; B: Pb^{2+} ; X: Γ , Br^- 或 Cl^-), 是典型的钙钛矿晶体结构^[9]。目前钙钛矿太阳能电池主要有两种结构, 分别是平板结构和多孔敏化结构。与现有太阳能电池技术相比, 钙钛矿材料及钙钛矿太阳能电池具有以下优点: (1) 消光系数高且带隙宽度合适^[10-14]。甲胺碘化铅 ($CH_3NH_3PbI_3$) 的带隙约为 1.5 eV, 与 AM1.5 太阳光照下的最佳带隙值 1.45 eV 非常接近, 具有极高的消光系数。同时, 通过掺杂卤素原子或金属阳离子等手段, 可以进一步调节钙钛矿材料的带隙^[15-17]。(2) 优异的双极性载流子输运性质, 钙钛矿内部的光生电子-空穴对在室温下就能实现界面和体内分离^[18]。(3) 载流子迁移率高。其中电子迁移率约为 $7.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 空穴迁移率约为 $12.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[19]。(4) 扩散长度非常大^[20]。(5) 开路电压较高。目前报道的具有高效率的钙钛矿太阳能电池大部分都是在手套箱内制备, 仅少量报道在大气环境下制备^[21-22], 并且目前大多采用价格昂贵的 Spiro-OMeTAD {2,2',7,7'-四[N,N-二(4-甲氧基苯基)氨基]-9,9'-螺二芴} 作为空穴传输材料^[23-24], 这些都不利于钙钛矿太阳能电池的规模化制备和进一步推广。本文通过合成钙钛矿 $CH_3NH_3PbI_3$, 以廉价的 P3HT 为空穴传导材料, 探索电池优化工艺, 在大气环境下低成本制备钙钛矿敏化太阳能电池。

1 实验部分

1.1 $CH_3NH_3PbI_3$ 及其敏化 TiO_2 电极的制备

1.1.1 $CH_3NH_3PbI_3$ 的合成

将摩尔比为 1:1 的 CH_3NH_2 和 HI 在 0℃ 反应 2 h, 50℃ 下减压蒸馏 30 min, 析出白色晶体。加入乙醚, 多次洗涤后抽滤, 收集结晶粉末。将所得结晶粉末置于 60℃ 下真空干燥 24 h 得到 CH_3NH_3I 粉末。在大气环境下, 将摩尔比为 1:1 的 CH_3NH_3I 粉末与 PbI_2 在丁内酯溶液中于 60℃ 反应 12 h, 冷却后用 0.45 μm 的滤膜过滤该反应液, 装瓶避光备用^[25]。

1.1.2 $CH_3NH_3PbI_3$ 敏化 TiO_2 电极的制备

将 TPP3 纳米 TiO_2 浆料 (平均粒径 20 nm) 分别按照 TiO_2 : 松油醇 = 1:0、1:2.5 和 1:3.5 三种比例稀释, 得到不同浓度的 TiO_2 浆料。采用丝网印刷的方法涂敷在 FTO 导电玻璃上, 于 450℃ 下热处理 30 min, 得到不同厚度的多孔纳米 TiO_2 电极。

取适量上述 $CH_3NH_3PbI_3$ 的丁内酯溶液滴于多孔纳米 TiO_2 电极上, 以转速为 3 000 rpm 旋涂 60 s, 然后放置于加热台上, 40℃ 加热 3 min。最后在 100℃ 下热处理 10 min, 得到 $CH_3NH_3PbI_3$ 膜层, 以上操作均在大气环境 (相对湿度约为 30%) 下进行。

1.2 $CH_3NH_3PbI_3$ 敏化太阳能电池的制备

以上述 $CH_3NH_3PbI_3$ 敏化的 TiO_2 电极为工作电极, P3HT 为空穴传导材料 (15 mg P3HT 溶解于 1 ml 无水氯苯中, 加入 6.8 μl LiTFSI (双三氟甲基磺酰亚胺锂) 的乙腈溶液 (28.3 $\text{mg} \cdot \text{ml}^{-1}$) 和 3.4 μl 4-tBP (四-叔丁基吡啶), Au 电极为对电极, 组装成钙钛矿敏化太阳能电池。电池的组装步骤如图 1 所示。

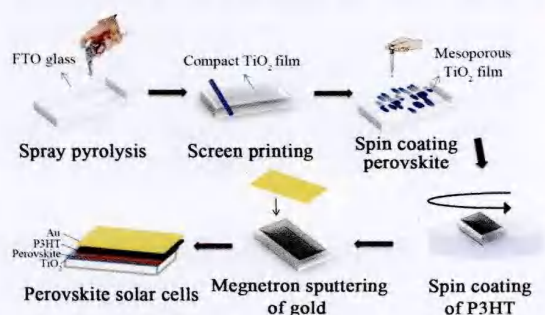


图 1 钙钛矿太阳能电池的组装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the fabrication process for $CH_3NH_3PbI_3$ sensitized solar cells

1.3 光电化学测试

光电流-电压曲线、载流子寿命曲线的测试均在 Autolab PGSTAT-30 电化学工作站上进行, 均直接以钙钛矿太阳能电池为样品。光照下的电化学测试均采用 1 000 W 的氙灯为光源, 光强采用 NREL 标准硅电池校准至 $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

2 结果与讨论

2.1 $CH_3NH_3PbI_3$ 结构分析

图 2a 为制备的 CH_3NH_3I 和 $CH_3NH_3PbI_3$ 的 XRD 图。如图所示, 制备的 CH_3NH_3I 峰位与 JCPDS 00-101-0737 一致, 表明自制的 CH_3NH_3I 纯度较高。继续将上述 CH_3NH_3I 粉末与 PbI_2 在丁内酯溶液中反应, 90℃ 烘干。将得到的 $CH_3NH_3PbI_3$ 粉末进行 XRD 及 Raman 分析。结合图 2 谱图分析, 可知所制得的钙钛矿晶体与标准谱图吻合, 且得到的晶体较纯, 不含 PbI_2 。

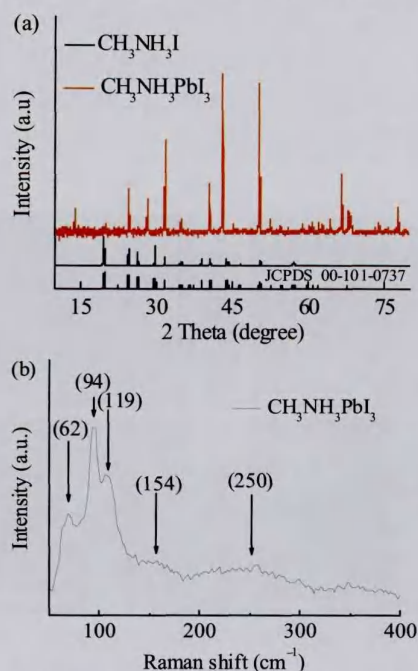


图 2 (a) $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 和 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 的 XRD 图; (b) $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 的 Raman 图
Fig. 2 (a) XRD patterns of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ and $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$; (b) Raman spectra of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

2.2 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 热行为测试

根据太阳能电池的测试条件, 要求光敏化剂在较高的温度下具有良好的稳定性, 因此考察钙钛矿材料的使用温度范围, 即热稳定性, 是其性能分析的重要方面。我们对制备所得的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 粉末进行热行为测试分析。如图 3 所示, 在升温的初始阶段 ($30^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$), 钙钛矿材料的质量基本不变, 损失

在 1wt% 以下, 这一阶段的损失主要是因为残留在粉末中的少量溶剂 (丁内酯) 随着温度的升高而持续挥发。在 $300^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ 区间, 钙钛矿材料的质量缓慢减小, 这是由于 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 逐渐分解成 PbI_2 和 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 。在 $450^\circ\text{C} \sim 550^\circ\text{C}$ 区间, 钙钛矿材料的质量明显减小, 这是由于有机物中 C-N 键的断裂, 表明 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 的分解温度为 320°C 左右。

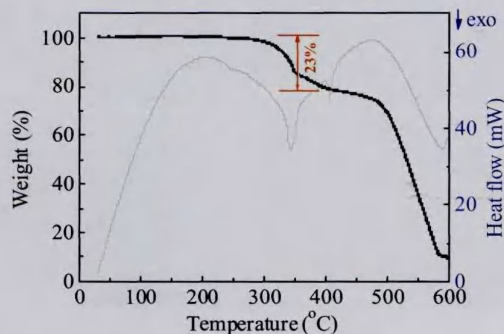


图 3 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 的热重图
Fig. 3 TGA spectra of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

2.3 钙钛矿敏化电极的结构与形貌

首先, 我们对 TiO_2 光阳极的厚度进行了优化。将 TPP3 原浆料添加不同体积的无水乙醇和乙基纤维素进行稀释, 并通过丝网印刷在导电玻璃上刮涂一层多孔 TiO_2 薄膜。通过截面 SEM 图观察其形貌与厚度 (如图 4 所示)。结果表明: TiO_2 的颗粒尺寸为 20 nm 左右, 且当 TiO_2 与松油醇质量体积比分别为 1:3.5、1:2.5 和 1:0 时, 所得多孔 TiO_2 薄膜的厚度分别为 250 nm, 600 nm 和 1 000 nm。

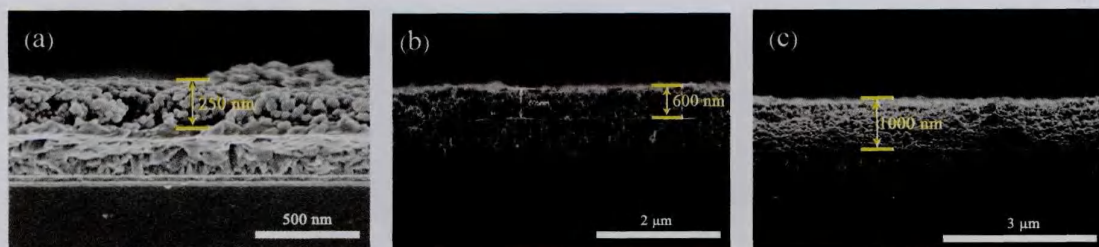


图 4 不同浓度 TiO_2 浆料制备所得的 TiO_2 薄膜的 SEM 图
Fig. 4 SEM images of the TiO_2 films prepared using TiO_2 paste with different concentrations

以 600 nm 厚的 TiO_2 薄膜为研究对象, 探讨了钙钛矿前驱体溶液旋涂量对敏化电极结构形貌的影响。图 5 为不同钙钛矿前驱体溶液旋涂量制备所得 $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜的截面和表面 SEM 图。由表面 SEM 图可以看出: 当钙钛矿前驱体溶液的旋

涂量为 $20 \mu\text{l}$ 时, TiO_2 薄膜表面几乎没有 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 覆盖; 这样容易导致空穴传导材料与光阳极 TiO_2 直接接触, 引起严重的电子复合; 当旋涂量为 $30 \mu\text{l}$ 时, TiO_2 表面有部分 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 覆盖, 其颗粒较小; 当旋涂量为 $40 \mu\text{l}$ 时, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 全部覆盖在

TiO₂ 表面, 其晶粒尺寸较大; 当旋涂量为 50 μL 时, TiO₂ 表面全部被 CH₃NH₃PbI₃ 覆盖, 其晶粒尺寸更大, 粒径约为 300 nm; 由其截面图可知, 随着钙钛矿前驱体溶液旋涂量的增加, CH₃NH₃PbI₃ 逐渐填充多孔 TiO₂ 的孔道; 当旋涂量为 50 μL 时, CH₃NH₃PbI₃

晶体尺寸过大, 团聚形成块状, 导致 TiO₂ 孔道堵塞, 不利于空穴导体的渗透与填充。因此, 当钙钛矿前驱体溶液旋涂量为 40 μL 时, 制备所得的钙钛矿薄膜具有适中的晶粒尺寸, TiO₂ 的孔道没有被堵塞。

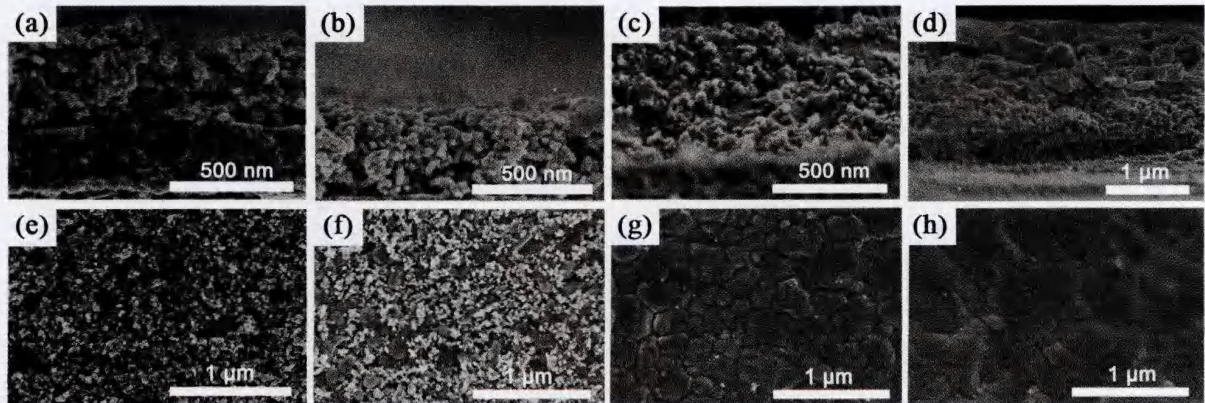


图 5 不同前驱体溶液旋涂量所得 CH₃NH₃PbI₃ 敏化 TiO₂ 薄膜的 SEM 截面形貌图: (a) 20 μL ; (b) 30 μL ; (c) 40 μL ; (d) 50 μL ; 与表面形貌图: (e) 20 μL ; (f) 30 μL ; (g) 40 μL ; (h) 50 μL

Fig. 5 Cross section SEM images of the CH₃NH₃PbI₃ films obtained with a perovskite precursor solution of (a) 20 μL , (b) 30 μL , (c) 40 μL , (d) 50 μL ; and the surface SEM images respectively: (e) 20 μL , (f) 30 μL , (g) 40 μL , (h) 50 μL

2.4 钙钛矿敏化电极的光学性能分析

图 6 是钙钛矿前驱体溶液旋涂量分别为 20 μL , 30 μL , 40 μL 和 50 μL 时的 UV-Vis 吸收光谱。由图可知: CH₃NH₃PbI₃ 敏化电极具有宽而强的光谱吸收。随着前驱体旋涂量的增加, 钙钛矿晶体长大, 吸收强度逐渐增大。

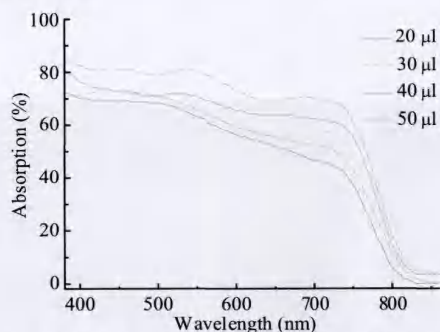


图 6 不同钙钛矿前驱体溶液旋涂量制备所得的 CH₃NH₃PbI₃ 薄膜的 UV 吸收光谱

Fig. 6 UV-Vis absorption spectra of the CH₃NH₃PbI₃ films obtained with different volume

2.5 钙钛矿敏化电池的光电性能分析

以不同厚度的多孔 TiO₂ 薄膜为光阳极, 在大气环境下组装成太阳能电池, 电池的光电流-电压 ($J-V$) 曲线如图 7 所示, 性能参数如表 1 所示。从图 7a 和

表 1 可以看出: 随着多孔 TiO₂ 厚度的增加, 电池的开路电压 (V_{oc}) 与短路电流密度 (J_{sc}) 先增加后减小; 当多孔 TiO₂ 厚度为 600 nm 时, 电池具有最高效率, 为 5.17% ($J_{sc} = 16.36 \text{ m}\cdot\text{cm}^{-2}$, $V_{oc} = 0.56 \text{ V}$, $FF = 0.56$)。这主要是因为随着光阳极厚度的增加, 光捕获性能增强, 使器件的光电流与光电压增强; 进一步联系电池的载流子寿命曲线 (图 7b) 可以看出, TiO₂ 厚度为 600 nm 样品的电子寿命最长, 膜厚增加至 1 000 nm 时, 电子寿命降低, 这是由于当光阳极厚度大于电子扩散长度时, 不利于电荷的传输, 从而导致电子寿命的缩短, 造成开路电压与短路电流的降低, 电池性能下降。由于钙钛矿材料对湿度特别敏感且稳定性差, 因此该电池效率与目前报道的在手套箱内组装的太阳能电池相比有较大差距。此外, 空穴传输层的配方仍待进一步优化。

表 1 具有不同多孔 TiO₂ 薄膜厚度电池的电池性能参数表
Table 1 Photovoltaic parameters of CH₃NH₃PbI₃ sensitized solar cell with different thickness of TiO₂ films

TiO ₂ layer thickness	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	H (%)
250 nm	9.78	0.54	0.56	2.95
600 nm	16.36	0.56	0.56	5.17
1 000 nm	10.23	0.49	0.48	2.42

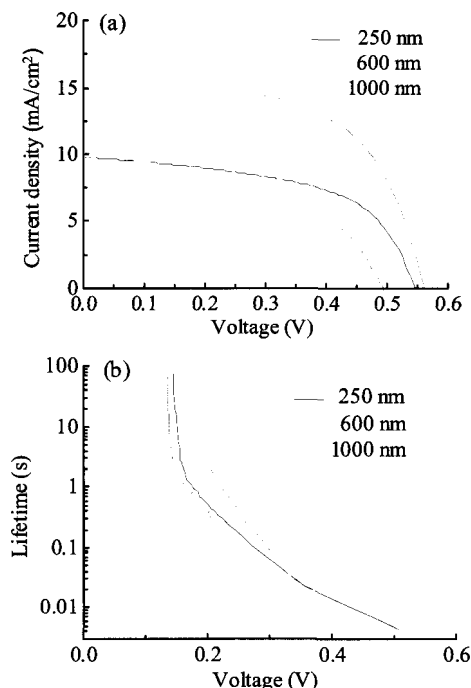


图 7 具有不同多孔 TiO₂ 厚度的钙钛矿电池的亮态 J - V 曲线 (a) 和载流子寿命曲线 (b)

Fig. 7 (a) J - V characteristics measured under AM1.5G solar irradiance, and (b) electron lifetime as a function of open-circuit voltage for devices fabricated with TiO₂ films with different thickness

3 结 论

本文采用一步法制备钙钛矿材料 CH₃NH₃PbI₃, 以廉价的 P3HT 为空穴传输材料, 在大气环境下制备钙钛矿敏化太阳电池, 系统探讨了钙钛矿前驱体溶液旋涂量及多孔 TiO₂ 膜厚对太阳电池光电性能的影响。电池结构优化实验表明: 当 TiO₂ 多孔层厚度为 600 nm、钙钛矿前驱体溶液的旋涂量为 40 μl 时, 电池的光电转化效率最优, 达到 5.17%。空穴传输层的配方和太阳电池的性能有待进一步提高。

参考文献:

[1] LI J Z, KONG F T, WU G H, et al. TiO₂/dye/electrolyte interface modification for dye-sensitized solar cells[J]. Acta Phys.-Chim. Sin., 2013, 29(9): 1851-1864.
 [2] SHI J, DONG J, LV S, et al. Hole-conductor-free perovskite organic lead iodide heterojunction thin-film solar cells: high efficiency and junction property[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(6): 063901.
 [3] JEON N J, NOH J H, KIM Y C, et al. Solvent engineering for high-performance inorganic-organic hybrid perovskite solar cells[J]. Nature Materials, 2014, 13(9): 897-903.
 [4] XIAO M, HUANG F, HUANG W, et al. A fast deposition-crystallization procedure for highly efficient lead iodide perovskite thin-film solar cells[J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2014, 53(37):

9898-9903.
 [5] YANG W S, NOH J H, JEON N J, et al. High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange[J]. Science, 2015, 348(6240): 1234-1237.
 [6] CHEN Q, ZHOU H, HONG Z, et al. Planar heterojunction perovskite solar cells via vapor-assisted solution process[J]. Journal of the American Chemical Society, 2014, 136(2): 622-625.
 [7] XIE F, CHOY W C, WANG C, et al. Low-temperature solution-processed hydrogen molybdenum and vanadium bronzes for an efficient hole-transport layer in organic electronics[J]. Advance Materials, 2013, 25(14): 2051-2055.
 [8] CHEN L, XIE C, CHEN Y. Optimization of the power conversion efficiency of room temperature-fabricated polymer solar cells utilizing solution processed tungsten oxide and conjugated polyelectrolyte as electrode interlayer[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(25): 3986-3995.
 [9] KIM J, KIM G, KIM T K, et al. Efficient planar-heterojunction perovskite solar cells achieved via interfacial modification of a sol-gel ZnO electron collection layer[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(41): 17291-17296.
 [10] LI W, DONG H, WANG L, et al. Montmorillonite as bifunctional buffer layer material for hybrid perovskite solar cells with protection from corrosion and retarding recombination[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(33): 13587-13592.
 [11] KIM H S, MORA-SERO I, Gonzalez-Pedro V, et al. Mechanism of carrier accumulation in perovskite thin-absorber solar cells[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2242.
 [12] SUAREZ B, GONZALEZ-PEDRO V, RIPOLES T S, et al. Recombination study of combined halides (Cl, Br, I) perovskite solar cells[J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2014, 5(10): 1628-1635.
 [13] JUAREZ-PEREZ E J, WUSSLER M, FABREGAT-SANTIAGO F, et al. Role of the selective contacts in the performance of lead halide perovskite solar cells[J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2014, 5(4): 680-685.
 [14] DUALEH A, MOEHL T, TETREULT N, et al. Impedance spectroscopic analysis of lead iodide perovskite-sensitized solid-state solar cells[J]. ACS Nano, 2014, 8(1): 362-373.
 [15] ZHAO Y, ZHU K. Charge transport and recombination in perovskite (CH₃NH₃)PbI₃ sensitized TiO₂ solar cells[J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2013, 4(17): 2880-2884.
 [16] LEIJTENS T, LAUBER B, EPERON G E, et al. The importance of perovskite pore filling in organometal mixed halide sensitized TiO₂-based solar cells[J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2014, 5(7): 1096-1102.
 [17] BI D, YANG L, BOSCHLOO G, et al. Effect of different hole transport materials on recombination in CH₃NH₃PbI₃ perovskite-sensitized mesoscopic solar cells[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2013, 4(9): 1532-1536.
 [18] LIU M, JOHNSTON M B, SNAITH H J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition[J]. Nature, 2013, 501(7467): 395-398.
 [19] JEON N J, NOH J H, KIM Y C, et al. Solvent

- engineering for high-performance inorganic-organic hybrid perovskite solar cells[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(9): 897-903.
- [20] GIROTTO C, VOROSHAZI E, CHEYNS D, et al. Solution-processed MoO₃ thin films as a hole-injection layer for organic solar cells[J]. *ACS Applied Material and Interfaces*, 2011, 3(9): 3244-3247.
- [21] YANG Z B, CHUEH C C, ZUO F, et al. High-performance fully printable perovskite solar cells via blade-coating technique under the ambient condition[J]. *Advanced Energy Materials*, 2015, 5(13): 1500328.
- [22] LIANG Z R, ZHANG S H, Xu X Q, et al. A large grain size perovskite thin film with a dense structure for planar heterojunction solar cells via spray deposition under ambient conditions[J]. *RSC Advances*, 2015, 5, 60562-60569.
- [23] BURSCHKA J, PELLET N, MOON S J, et al. Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells[J]. *Nature*, 2013, 499: 316-319.
- [24] NIU G D, GUO X D, WANG L D. Review of recent progress in chemical stability of perovskite solar cells[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3: 8970-8980.
- [25] GONZALEZ-PEDRO V, JUAREZ-PEREZ E J, ARSYAD W S, et al. General working principles of CH₃NH₃PbX₃ perovskite solar cells[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(2): 888-893.

作者简介:

王楠(1990-),女,硕士研究生,主要从事纳米材料与太阳电池的研究。

梁柱荣(1990-),男,硕士研究生,主要从事纳米材料与太阳电池的研究。

徐雪青(1969-),女,博士,研究员,博士生导师,中国科学院广州能源研究所太阳能材料实验室研究主任,广东省材料研究会理事,长期从事太阳能材料与太阳电池研究。