

全湿法工艺下的可印刷介观钙钛矿太阳能电池新突破

马永铭¹, 刘佳乐¹, 陈夏岩², 梅安意^{1*}, 韩宏伟^{1*}

1. 华中科技大学武汉光电国家研究中心, 格兰泽尔介观太阳能电池研究中心, 武汉 430074

2. 武汉万度光能研究院, 武汉 430074

* 联系人, E-mail: anyimei@hust.edu.cn; hongwei.han@mail.hust.edu.cn

New breakthrough in printable mesoscopic perovskite solar cells with fully wet process

Yongming Ma¹, Jiale Liu¹, Xiayan Chen², Anyi Mei^{1*} & Hongwei Han^{1*}

¹ Michael Grätzel Center for Mesoscopic Solar Cells, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

² WonderSolar Institute, Wuhan 430074, China

* Corresponding authors, E-mail: anyimei@hust.edu.cn; hongwei.han@mail.hust.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2025-5499

钙钛矿太阳能电池指的是以金属卤化物钙钛矿做吸光材料的光伏技术。得益于卤化物钙钛矿可简单湿法加工的特性, 近年来, 钙钛矿太阳能电池以其惊人的发展速度和巨大的应用潜力吸引了全球科学家的目光^[1,2]。与传统的硅基太阳能电池等相比, 钙钛矿材料不仅制造成本更低, 还具备可柔性制备、弱光发电能力强等独特优势^[3]。其中, 一种由三层介孔膜结构组成、被称为“可印刷介观钙钛矿太阳能电池”(简称p-MPSCs)的独特技术尤为引人注目^[4,5]。p-MPSCs由廉价的工业原材料构成, 可以通过简单的印刷技术在大气环境中大规模生产, 就像印刷报纸一样, 完全避免了其他光伏制造所需的高真空、高温等复杂耗能环节, 有利于光伏组件的低成本制造^[6-9]。

尽管p-MPSCs在成本和制备工艺上具有明显优势, 但其性能与传统结构的薄膜型钙钛矿电池仍然有一定差距。问题的根源恰好也与其独特的多孔结构有关: 钙钛矿材料填充在由二氧化钛、氧化锆和碳电极组成的三层多孔骨架中, 这种结构虽然有利于大规模制备, 却导致钙钛矿晶体在生长过程中产生了大量的晶界等缺陷^[10-12]。这些缺陷处往往堆积着过量的有机组分或欠配位的铅离子, 形成能量无序区, 不仅可能捕获电荷, 还会对电荷的传输造成散射, 严重影响了电池的性能表现。这就像是在一条本应畅通的道路上出现了很多

坑洼, 使得车辆无法快速通行。特别是空穴在向碳电极传输的过程中, 需要穿越长达3 μm 以上的路径, 途中要经过多个晶界和界面障碍, 其传输受到的影响更为显著^[13,14]。

面对这一挑战, 本课题组独辟蹊径, 开发出一种简单而高效的“亲电反应后处理”策略^[15]。通过使用“六亚甲基二异氰酸酯”(HDI)的化合物作为处理剂, 对已经制备好的p-MPSCs进行后处理, 就像是给电池进行了一次精密的“抛光护理”。HDI分子含有两个高活性的异氰酸酯基团, 这些基团就像是一双灵巧的“分子手”, 能够精准地找到钙钛矿晶界处过量的有机组分并与之发生反应。通过亲电反应, HDI“修剪”掉晶界处多余的组织, 生成稳定的酰胺产物。与此同时, 这些产物中的特定基团又能与钙钛矿组分发生良性相互作用, 钝化晶界缺陷, 进一步提升了“抛光”的效果。

为了评估这一过程对钙钛矿性能的影响, 进行了多方位表征。Kelvin 探针力显微镜显示, 经过HDI处理后, 钙钛矿薄膜表面的电势分布变得更加均匀, 波动从0.3 V显著降低到0.1 V。结果表明后处理技术重构了钙钛矿晶界, 减少了能量无序区。导电原子力显微镜进一步表明, 处理后的晶界导电性大幅提升, 已经与晶体内部区域相当。与此同时, 钙钛矿中的空穴迁移能力也提升了4倍, 有利于空穴向碳电极的传输。这些结果清楚地表明, HDI处理确实实现了对电池内部的一

引用格式: 马永铭, 刘佳乐, 陈夏岩, 等. 全湿法工艺下的可印刷介观钙钛矿太阳能电池新突破. 科学通报, 2026, 71: 1081–1083

Ma Y, Liu J, Chen X, et al. New breakthrough in printable mesoscopic perovskite solar cells with fully wet process (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 1081–1083, doi: 10.1360/CSB-2025-5499

次精细抛光, 减少了电荷传输道路上的障碍. 另一方面, 后处理也有效钝化了钙钛矿中的缺陷, 抑制了非辐射复合.

经过这种有效的后处理, p-MPSCs性能得到了显著提升. 实验室小面积p-MPSCs的效率从21.1%提高到23.2%, 尤其是开路电压从1045 mV提升到1108 mV, 填充因子从80%提高到

83%. 这些提升直接反映了电池内部缺陷的减少和电荷传输的改善. 与此同时, 本工作制备了由21个子电池串联而成的57.3 cm²的微型模组, 经过HDI处理后效率达到19.4%, 显示了该技术良好的放大潜力. 稳定性是太阳能电池产业化的关键指标. 将封装后的p-MPSCs在55±5 °C条件下连续运行

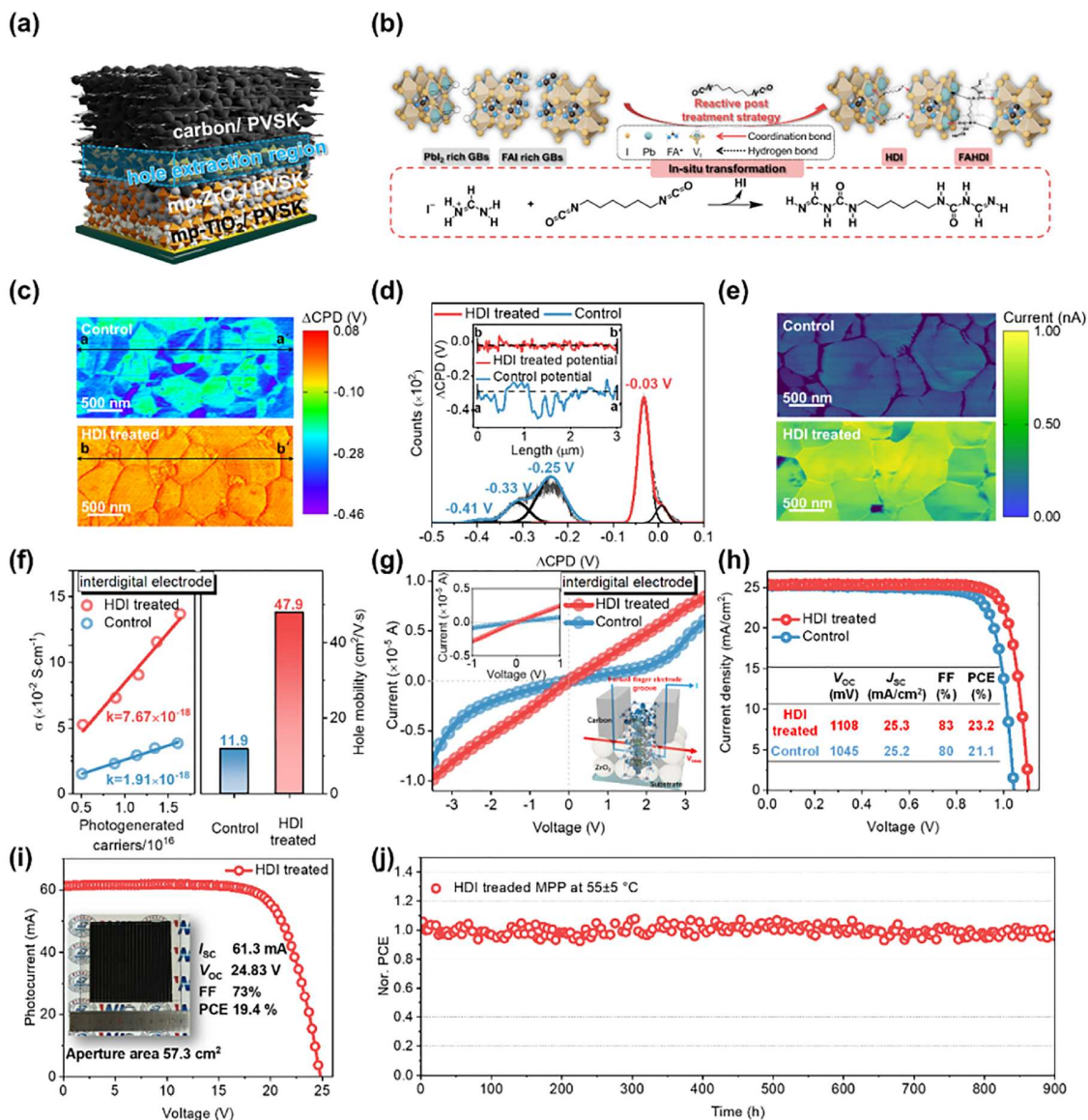


图 1 (网络版彩色)器件结构、后处理机制及性能表征. (a) p-MPSCs结构示意图. (b) HDI后处理作用机制示意图. (c) 对照组与HDI钙钛矿薄膜表面电位分布图. (d) 对照组与HDI钙钛矿薄膜表面电位分布统计图. (e) 对照组与HDI钙钛矿薄膜的导电AFM图像. (f) 基于叉指电极的电导率-光生载流子数及相应空穴迁移率. (g) 基于叉指电极的对照组与HDI钙钛矿薄膜的 I - V 曲线. (h) 对照组与HDI处理的p-MPSC的 J - V 曲线. (i) p-MPSC微型模组的 I - V 曲线及其照片. (j) HDI处理的p-MPSC的工作稳定性

Figure 1 (Color online) Device configuration, post-treatment mechanism and performance characterization. (a) Schematic diagram of p-MPSCs. (b) Working mechanism of post treatment via HDI. (c) Surface potential of the control and HDI-treated planar perovskite films. (d) Statistical surface potential distribution of the control and HDI-treated planar perovskite films. (e) Conductive AFM microscopy images for the control and the HDI-treated planar perovskite films. (f) Plots for the conductivity-photogenerated carrier numbers and calculated hole mobilities for the perovskite filled inside the interdigital electrodes without and with HDI treatment. (g) I - V curves of the control and the HDI-treated perovskite filled in interdigital carbon electrodes. (h) J - V curves of the champion control and HDI-treated p-MPSCs. (i) I - V curves of the p-MPSC mini-module, the inset is its photo. (j) Operational stability of the HDI-treated p-MPSCs

900 h后, p-MPSCs仍然保持95%的初始效率, 表现出了良好的工作稳定性。

这项研究的意义不仅在于实现了一种提升p-MPSCs性能的有效策略, 更重要的是提供了一条通向产业化的可行路径。HDI后处理方法完全兼容现有的印刷工艺, 不需要复杂昂贵的设备, 为钙钛矿光伏的大规模生产提供了强有力的技术支持。随着全球能源转型加速, 太阳能发电占比逐年提升, 开发低成本、高效率、高稳定性的光伏技术对实现可持续发展

目标具有重要意义。p-MPSCs以其独特的结构和制备工艺, 有望改变人们对光伏产业复杂且耗能的传统认知, 推动光伏技术的进一步普及。或许在不久的将来, 我们就能看到基于p-MPSCs技术的太阳能电池广泛应用于光伏电站、建筑一体化光伏、车载光伏等领域, 为我们的生活带来更多清洁能源。

研究人员将继续推进该研究方向, 实现器件中更有效的空穴输运, 推动器件性能的进一步突破, 为该低成本光伏技术的产业化发展提供更多技术支撑。

致谢 感谢国家自然科学基金(2243900, 91733301, 52172198, 51902117)资助。

推荐阅读文献

- 1 Kim J Y, Lee J W, Jung H S, et al. High-efficiency perovskite solar cells. *Chem Rev*, 2020, 120: 7867–7918
- 2 NREL. Best Research-Cell Efficiencies, 2025, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- 3 Metcalf I, Sidhik S, Zhang H, et al. Synergy of 3D and 2D perovskites for durable, efficient solar cells and beyond. *Chem Rev*, 2023, 123: 9565–9652
- 4 Mei A, Li X, Liu L, et al. A hole-conductor-free, fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability. *Science*, 2014, 345: 295–298
- 5 Liu J, Chen X, Chen K, et al. Electron injection and defect passivation for high-efficiency mesoporous perovskite solar cells. *Science*, 2024, 383: 1198–1204
- 6 Wang J, Wang D, Zhang Y, et al. Manipulation of $\text{Cs}_{0.1}\text{FA}_{0.9}\text{PbI}_3$ crystallization behavior towards efficient carbon-based printable mesoscopic perovskite solar cells. *J Mater Chem A*, 2024, 12: 17203–17212
- 7 Fu Y, Shao W, Deng Z, et al. Enabling high-efficiency ambient-air printable carbon-based large-area perovskite solar cells via effective anionic passivation. *Chem Eng J*, 2025, 503: 158282
- 8 Potts S, Bolton R, Dunlop T, et al. Enhancing the performance of the mesoporous TiO_2 film in printed perovskite photovoltaics through high-speed imaging and ink rheology techniques. *Adv Funct Mater*, 2024, 34: 2401959
- 9 Worsley C, Raptis D, Meroni S, et al. γ -Valerolactone: a nontoxic green solvent for highly stable printed mesoporous perovskite solar cells. *Energy Tech*, 2021, 9: 2100312
- 10 Perrin L, Planes E, Shioki T, et al. How ammonium valeric acid iodide additive can lead to more efficient and stable carbon-based perovskite solar cells: role of microstructure and interfaces? *Sol RRL*, 2024, 8: 2400393
- 11 Wang J, Wang D, Xu D, et al. Defect management and crystallization regulation for high-efficiency carbon-based printable mesoscopic perovskite solar cells *via* a single organic small molecule. *J Mater Chem A*, 2024, 12: 33595–33605
- 12 Hao M, Yang J, Yu W, et al. Nanoscopic cross-grain cation homogenization in perovskite solar cells. *Nat Nanotechnol*, 2025, 20: 630–638
- 13 Bogachuk D, Girard J, Tilala S, et al. Nanoarchitectonics in fully printed perovskite solar cells with carbon-based electrodes. *Nanoscale*, 2023, 15: 3130–3134
- 14 Wagner L, Qiu C, Unmüssig M, et al. A 2D model for interfacial recombination in mesoscopic perovskite solar cells with printed back contact. *Sol RRL*, 2021, 5: 2000595
- 15 Ma Y, Liu J, Chen X, et al. Enhancing hole-conductor-free, printable mesoscopic perovskite solar cells through post-fabrication treatment via electrophilic reaction. *Nat Energy*, 2025, 10: 1084–1094