科学通报 2025 年 第 70 卷 第 26 期: 4427 ~ 4429
亮点述评
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

钙钛矿光伏组件的蒸汽辅助表面重构

段晨阳, 谭海仁*

南京大学现代工程与应用科学学院, 南京 210023
* 联系人, E-mail: hairentan@nju.edu.cn

Vapor-assisted surface reconstruction of perovskite solar modules

Chenyang Duan & Hairen Tan*

School of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China
* Corresponding author, E-mail: hairentan@nju.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2025-5193

在过去十年中, 钙钛矿太阳能电池(perovskite solar cells, PSCs)的认证功率转换效率(power conversion efficiency, PCE)迅速提升, 最高已达到27%, 接近商用硅基太阳能电池的水平[1]. 同时, 其制造成本预计仅为晶体硅电池的一半, 在光伏领域展现出显著的成本优势. 然而, 其长期运行稳定性仍未能满足商业化要求, 成为制约其大规模应用的关键瓶颈. 这一问题在工业级钙钛矿太阳能组件(perovskite solar modules, PSMs)上尤为突出, 实现可扩展且高效的稳定性仍是当前研究的一大挑战. 值得注意的是, 大多数研究聚焦于实验室尺度的PSCs在恒定室内光照下的老化行为, 而要推动该技术走向实际应用, 必须解决在户外环境下, 特别是在工业规模组件上的稳定性问题[2].

在实际运行过程中, PSCs会经历频繁的光暗循环, 导致性能出现可逆与不可逆的衰减[3,4]. 由于钙钛矿材料具有软离子晶体结构, 其内部离子键较弱, 容易形成离子缺陷, 且离子迁移所需的活化能较低, 使得这些缺陷在工作条件下易于迁移, 从而影响器件寿命. 其中, 不可逆离子迁移是由于离子在多种老化因素作用下从钙钛矿层迁移到电荷传输层或电极中引起的, 可能导致器件性能的永久性退化[5,6]. 为缓解这一问题, 针对钙钛矿小面积电池的主要策略包括钝化表面缺陷以减少可移动离子通道, 以及在界面引入阻挡层以抑制离子迁移. 研究表明, 富集在钙钛矿表面的$[PbI_6]^{4-}$八面体通常比晶体内部更具缺陷性, 因此更容易发生不可逆的卤素离子迁移[7]. 对于大面积组件而言, 控制钙钛矿薄膜内部的离子迁移至关重要. 通过重构钙钛矿表面结构, 隔离缺陷型八面体并减少离子迁移通道, 有望显著提升PSMs在复杂户外环境下的稳定性和实用性. 这为推动高性能、长寿命钙钛矿太阳能组件的产业化提供了重要方向.

近日, 南京航空航天大学郭万林教授和赵晓明教授团队开发了绿色和经济性兼备的气相辅助表面重构技术, 抑制了大面积钙钛矿组件在户外环境下的不可逆退化, 在30 cm × 30 cm钙钛矿组件中首次实现了与商用晶硅太阳能电池相当的户外运行稳定性[8]. 相关成果发表在*Science*. 该团队长期致力于钙钛矿器件的稳定性研究, 在前期工作中曾开发气相氟化技术以实现大面积钙钛矿太阳能电池的长期稳定运行[2]. 在这项工作中, 通过使用气相沉积的多齿配体隔离钙钛矿表面缺陷八面体, 有效地抑制了离子向电荷传输层的迁移, 并减少了表面离子缺陷, 从而调节了光暗循环期间离子迁移的动力学. 具体来说, 研究人员利用气相沉积法将2,2′:6′,2′-三吡啶(Tpy)引入到甲脒铅碘型($FAPbI_3$)钙钛矿薄膜中, 形成了一种0维结构, 在此结构中缺陷富集的表面单元$[PbI_6]^{4-}$八面体被分隔开来, 实现离子不可逆迁移的抑制(图1(a)). 实验结果显示, 经过处理的小面积PSC (0.16 cm^2)和大面积PSM (785 cm^2)分别实现了25.3%和19.6%的效率(图1(b, c)). 更重要的是, 这些太阳能组件的日间稳定性显著提升, 即使在101次光暗循环后仍能保持初始效率的97%以上. 此外, 经过45天的户外运行测试, 该团队制备的PSMs表现出了与商用硅太阳能电池相当的稳定性(图1(d, e)).

郭万林和赵晓明团队还利用Arrhenius温度依赖模型研究了户外运行时PCE衰减的机制. 他们将不同温度下的降解速率与温度倒数的关系绘制成图, 并将其拟合到Arrhenius温度依赖模型中. 在整个温度范围内, 降解速率可以很好地用

引用格式: 段晨阳, 谭海仁. 钙钛矿光伏组件的蒸汽辅助表面重构. 科学通报, 2025, 70: 4427–4429
Duan C, Tan H. Vapor-assisted surface reconstruction of perovskite solar modules (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 4427–4429, doi: 10.1360/CSB-2025-5193

© 2025《中国科学》杂志社

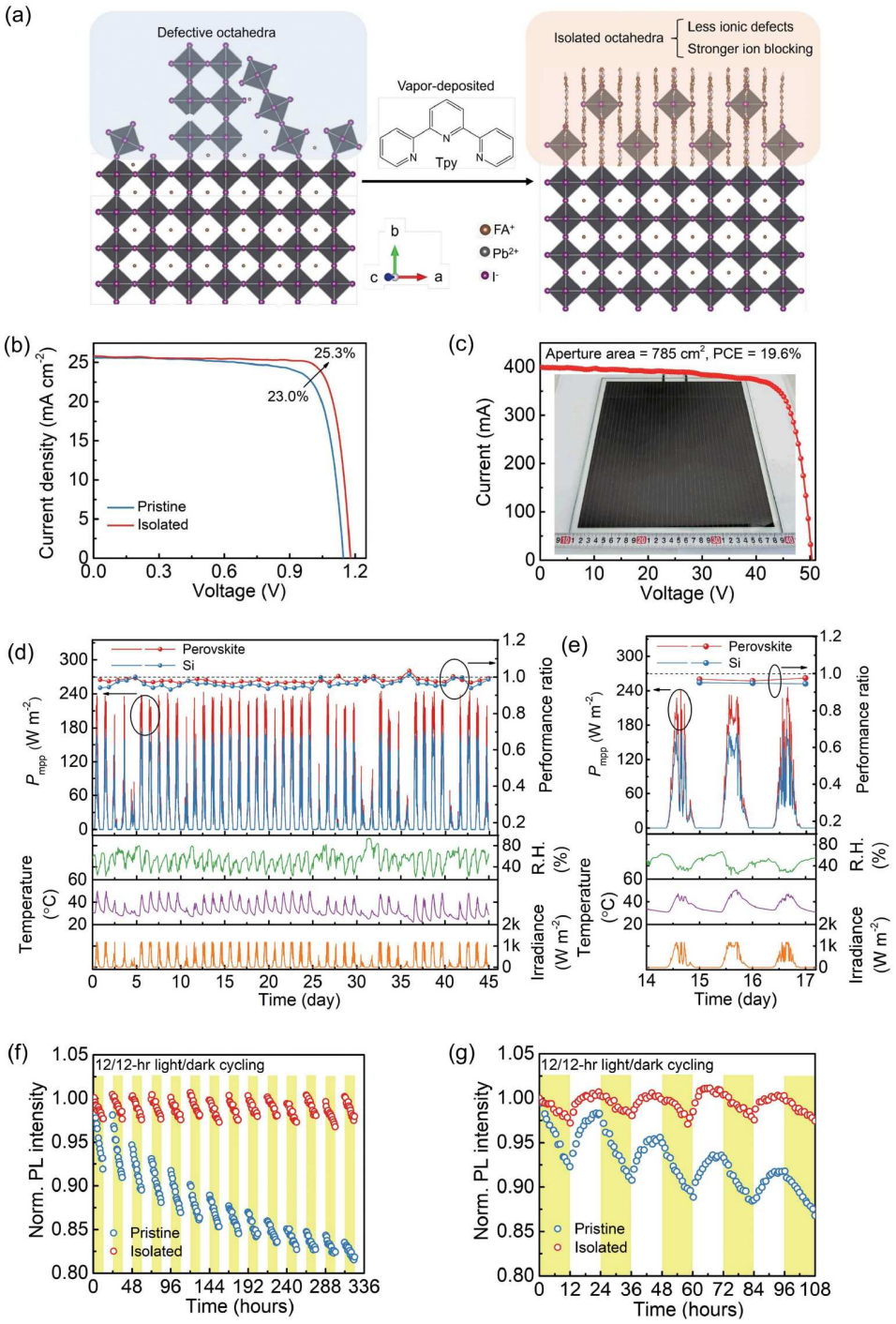


图 1 (网络版彩色)基于表面重构的钙钛矿器件和组件性能及其户外稳定性[8]. (a) 钙钛矿表面八面体重构的示意图; (b) 0.16 cm^{2}太阳能电池的电流密度-电压(*J-V*)特性曲线; (c) 785 cm^{2}有效面积的最佳光伏组件的电流-电压(*I-V*)特性曲线; (d) 封装后的钙钛矿光伏组件和硅电池在真实户外条件下的功率输出(ISOS-O-2标准); (e) 从(d)中选取的连续三天的数据; (f) 不同条件的钙钛矿薄膜随时间变化的归一化PL强度; (g) 钙钛矿薄膜在四个循环周期过程中的PL降解与恢复动力学. Copyright © 2025, The American Association for the Advancement of Science

Figure 1 (Color online) Performance and outdoor stability of perovskite devices and modules based on surface reconstruction[8]. (a) Schematic illustration of surface octahedra isolation; (b) *J-V* characteristics of 0.16-cm^2 pristine and isolated solar cells; (c) *I-V* characteristics of the champion solar modules with an aperture area of 785 cm^2; (d) outdoor power output of the encapsulated PSMs and the Si reference cell under real-world conditions (ISOS-O-2); (e) selected data over 3 consecutive days; (f) normalized PL intensity of pristine and isolated perovskite films with time; (g) PL degradation and recovery dynamics of four cycles for pristine and isolated perovskite films. Copyright© 2025, The American Association for the Advancement of Science

一个Arrhenius函数描述，表明在这一温度范围内存在一致的降解机制，这是可靠加速老化测试的一个前提条件[9]. 进一步地，团队提取出在标准温度25°C下工作的表面重构后PSMs的效率衰减至初始效率的80%所需时间(T_{80})，并估算出在25°C、12小时光照和12小时暗态交替循环(12/12小时光暗循环)条件下，表面重构的PSMs的本征T_{80}为2478个循环(相当于6.7年).

此外，郭万林和赵晓明团队还研究了钙钛矿长期运行时的离子迁移机制. 通过对比原始和表面重构的钙钛矿薄膜在12/12小时光暗循环下的光致发光(photoluminescence，PL)演变(图1(f, g))，发现原始样品在光照下出现快速PL衰减，并在多次循环后表现出不可逆性能下降，这是由于碘离子向钙钛矿表面的持续迁移及其引起的非辐射复合；而表面重构样品则显示出极小的PL退化，且在暗态恢复后几乎完全恢复，表明表面重构技术有效抑制了不可逆离子迁移. 进一步通过二次飞行离子质谱分析发现，碘离子从钙钛矿迁移到电子传输层(electron transport layer，ETL)后可能与材料反应生成金属碘化物，造成不可逆损伤；扫描透射电子显微镜结合能谱和扫描电子显微镜照片结果也显示，原始样品老化后ETL中存在大量碘信号并出现裂纹和不均匀结构，而表面重构的样品ETL表面几乎无碘积累，形貌仍保持均匀致密. 所以，表面重构技术导致的表面缺陷八面体隔离能够显著抑制碘离子迁移，减少ETL腐蚀和结构破坏，从而大幅提升器件在复杂环境条件下的稳定性和使用寿命.

综上所述，郭万林和赵晓明团队的这篇文章介绍了一种通过表面缺陷八面体隔离技术提升钙钛矿太阳能组件稳定性的方法. 研究发现，使用气相沉积的多齿配体处理钙钛矿表面，可以有效抑制碘离子迁移，减少表面离子缺陷，并增强器件在明暗循环下的稳定性. 实验结果显示，经过处理的钙钛矿小面积电池和大面积组件分别实现了25.3%和19.6%的光电转换效率，并且在标准测试条件下，预测T_{80}超过6.7年. 此外，在户外条件下连续运行45天后，该组件表现出与商用硅太阳能电池相当的稳定性，展示了其在实际应用中的巨大潜力. 该研究不仅加深了对移动离子缺陷导致不可逆器件退化的机制理解，还促进了能够满足实际应用需求的钙钛矿器件的发展.

参考文献

1 Green M A, Dunlop E D, Yoshita M, et al. Solar cell efficiency tables (Version 64). Prog Photovoltaics, 2024, 32: 425–441
2 Zhao X, Zhang P, Liu T, et al. Operationally stable perovskite solar modules enabled by vapor-phase fluoride treatment. Science, 2024, 385: 433–438
3 Zhang Y, Song Q, Liu G, et al. Improved fatigue behaviour of perovskite solar cells with an interfacial starch–polyiodide buffer layer. Nat Photon, 2023, 17: 1066–1073
4 Huang F, Jiang L, Pascoe A R, et al. Fatigue behavior of planar $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite solar cells revealed by light on/off diurnal cycling. Nano Energy, 2016, 27: 509–514
5 Wang Y, Wu T, Barbaud J, et al. Stabilizing heterostructures of soft perovskite semiconductors. Science, 2019, 365: 687–691
6 Besleaga C, Abramiuc L E, Stancu V, et al. Iodine migration and degradation of perovskite solar cells enhanced by metallic electrodes. J Phys Chem Lett, 2016, 7: 5168–5175
7 Chen C, Song Z, Xiao C, et al. Arylammonium-assisted reduction of the open-circuit voltage deficit in wide-bandgap perovskite solar cells: the role of suppressed ion migration. ACS Energy Lett, 2020, 5: 2560–2568
8 Sun X, Shi W, Liu T, et al. Vapor-assisted surface reconstruction enables outdoor-stable perovskite solar modules. Science, 2025, 388: 957–963
9 Haillant O, Dumbleton D, Zielnik A. An Arrhenius approach to estimating organic photovoltaic module weathering acceleration factors. Sol Energy Mater Sol Cells, 2011, 95: 1889–1895