

DOI: 10.11949/0438-1157.

界面工程介导全空气高效无机钙钛矿太阳能电池

王跃霖¹, 张紫涵¹, 田孝彬¹, 于普润¹, 翟阅臣², 祖阁², 王三龙¹

(¹ 东北电力大学, 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室, 电气工程学院, 吉林 132012; ² 东北电力大学 理学院, 吉林 132012)

摘要: 凭借出色的光热稳定性, 无机钙钛矿太阳能电池 (Inorganic perovskite solar cells, IPSCs) 已成为研究焦点, 但界面缺陷富集与载流子不利堆积仍严重掣肘其光伏指标。本研究在钙钛矿吸收层与电子传输层之间插入 1, 3-丙二胺氢碘酸盐 (1, 3-Propanediamine Dihydroiodide, PDADI) 对钙钛矿表面施行界面调控。实验结果显示, PDADI 可显著降低缺陷态密度, 加速界面电子抽取与输运, 进而抑制非辐射复合。最终, 经 PDADI 修饰、全空气环境制备的反式 IPSCs 开路电压平均提高约 120 mV, 光电转换效率 (Power conversion efficiency, *PCE*) 达到 19.50%。

关键词: 无机钙钛矿; 界面缺陷; 界面调控; 开路电压

中图分类号: 472.1

文献标志码: AA

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-08

Interface Engineering-Mediated Efficient Inorganic Perovskite Solar Cells Fabricated in Fully Ambient Air

WANG Yuelin¹, ZHANG Zihan¹, TIAN Xiaobin¹, YU Purun¹, ZHAI Yuechen², ZU Ge², WANG Sanlong¹

(¹ School of Electrical Engineering, Key Laboratory of Modern Power System Simulation Control and New Green Energy Technology of the Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; ² School of Science, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Inorganic perovskite solar cells (IPSCs) have become the focus of research due to their excellent photothermal stability, but the enrichment of interface defects and the unfavorable accumulation of carriers still seriously restrict their photovoltaic performance. In this study, 1,3-Propanediamine Dihydroiodide (PDADI) was inserted between the perovskite absorption layer and the electron transport layer to regulate the interface of the perovskite surface. The experimental results show that PDADI can significantly reduce the density of defect states, accelerate the extraction and transport of interface electrons, and thus inhibit non-radiative recombination. Finally, the open circuit voltage of the IPSCs modified by PDADI and fabricated in fully ambient-air conditions increased by about 120 mV, and the power conversion efficiency (*PCE*) reached to 19.50 %.

Keywords: Inorganic perovskite; Interface defect; Interfacial engineering; Open-circuit voltage

收稿日期: 2026-05-26 修回日期: 2026-07-11

通信作者: 王三龙(1992—),男,博士,副教授,20233209@neepu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62504036)

引用本文: 王跃霖, 张紫涵, 田孝彬, 于普润, 翟阅臣, 祖阁, 王三龙. 界面工程介导全空气高效无机钙钛矿太阳能电池[J]. 化工学报, XXXX, XX (XX): 1–8

Citation: WANG Yuelin, ZHANG Zihan, TIAN Xiaobin, YU Purun, ZHAI Yuechen, ZU Ge, WANG Sanlong. Interface Engineering-Mediated Efficient Inorganic Perovskite Solar Cells Fabricated in Fully Ambient Air[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1–8

引 言

近年间,钙钛矿太阳能电池(Perovskite solar cells, PSCs)在实验室攻关与产业化试制两端同步实现跨越式提升,商业化蓝图更加清晰^[1-3]。目前最先进的单结钙钛矿太阳能电池的功率转换效率(Power conversion efficiency, *PCE*)已突破 27% 关口^[4,5]。有机成分的存在为 HPSCs 的热稳定性埋下隐患^[6,7]。当下,以铯离子(Cs^+)替换有机部分被多数研究者视为增强 PSCs 稳定性的可行路径^[8,9]。无机钙钛矿凭借 1.68 - 1.73 eV 的理想带隙,跻身钙钛矿/晶硅叠层电池顶层单元的备选行列^[10,11]。遗憾的是,表面缺陷富集与界面复合加剧,使无机钙钛矿太阳能电池(Inorganic perovskite solar cells, IPSCs)的 *PCE* 仍显著落后于 HPSCs^[10,12]。

为抑制 IPSCs 的非辐射复合并抬升光伏指标,学界已动用组分工程^[13-15]、界面工程^[16-19]、添加剂工程^[20-23]、维度调控^[24-26]等多重手段。付阳团队(苏州大学)引入锗(Ge^{2+})作为 B 位掺杂组分,构建 $\text{CsPb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{I}_2\text{Br}$ 无机钙钛矿,利用 Ge^{2+} 部分取代 Pb^{2+} 抑制相变并钝化缺陷,在高湿度(50-60%RH)环境下实现了稳定黑相,最高开路电压 1.34 V,显著提升了器件的环境稳定性^[15]。方俊峰团队(华东师范大学)以 1,4-丁二胺(1,4-Diaminobutane, DAB)对钙钛矿表面实施抛光,一举清除 CsPbI_3 薄膜中非化学计量相,彻底拔除贫铅陷阱;反式结构器件借此收获 19.84% 的 *PCE*^[19]。刘生忠课题组(陕西师范大学)则将微量 1-乙基-3-甲基咪唑硫酸氢(1-Ethyl-3-Methylimidazolium Hydrogen Sulfate, EMIMHSO₄)引入薄膜^[23],借其富电子咪唑环向亲电缺陷输送电子,还令 HSO_4^- 与欠配位 Pb^{2+} 键合,缺陷随之钝化;正式器件效率升至 20.01%。同一团队又采用 Lewis 碱羧基异硫脲氯铵(Carboxyethylisothiuronium chloride, ATP),利用异硫脲与羧基双官能团在表面和晶界处与 Lewis 酸缺陷牢固配位,部分分子更插入三维晶格,构筑 2D/3D 异质结,点缺陷被同步钝化,正式器件 *PCE* 进一步增至 20.91%^[25]。可见,只要精准修剪无机钙钛矿的表面缺陷并重构界面能级排布,光伏性能便可显著跃升。除此以外,现在绝大多数 IPSCs 仍依赖惰性气氛制备,该严苛条件已成为大面积工业化落地的瓶颈,因而亟需一条可在空气中完成器件制备的新路线。

在钙钛矿吸收层与电子传输层交界处,本文引

入 1,3-丙二胺氢碘酸盐(1,3-Propanediamine Dihydroiodide, PDADI)对 CsPbI_3 薄膜实施界面调控。PDADI 作为双氢碘酸盐,其解离出的碘离子(I^-)带有负电荷,这些 I^- 通过静电引力填补了带正电的碘空位。氨基与铅碘八面体 $[\text{PbI}_6]^{4-}$ 的氢键网络进一步加固 PDADI 的吸附,缺陷抑制能力随之增强。同时,该界面层加速电子抽取,抑制了界面载流子堆积^[27,28]。全空气工艺制备的 IPSCs 经 PDADI 修饰后, *PCE* 自 17.09% 跃升至 19.50%。该策略为摆脱惰性气氛、实现高效 IPSCs 开辟了新路径并有望推进 IPSCs 的实用化进程。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验用溶剂(DMF、DMSO、IPA、CB)由 Sigma-Aldrich 公司供应。1,3-丙二胺二氢碘酸盐(PDADI)、碘化铯(CsI)、碘化氢铅(HPbI_3)及氧化镍(NiO_x)四种试剂均采购自西安浴日光能科技有限公司。

1.2 实验方法

ITO 基底经彻底清洗后,置于紫外臭氧灯下辐照 20 min。接着,将浓度为 20 mg/mL 的经过冷水超声 15 min 并以 0.22 μm 水系滤头过滤的 NiO_x (去离子水)以 1800 rpm/min 的转速旋涂至 ITO 表面,持续 30 s,并于 120°C 退火 15 min。无机钙钛矿前驱体溶液的配制步骤为:按 1:1 摩尔比将 CsI 与 HPbI_3 溶于 DMF,浓度 0.65 M。60°C 加热搅拌至完全溶解后,取该前驱体溶液在 NiO_x 层上以 2500 rpm/min 旋涂 30 s;随后于空气氛围中 70°C 加热 1 min,再移至 200°C 热板退火 5 min。实验过程中的空气环境温度为 25±5°C,相对湿度为 20±5%。对照组与实验组的唯一差异在于:是否在钙钛矿薄膜表面以 6000 rpm/min 旋涂 0.3 mg/mL 的 PDADI(IPA)溶液 30 s,并于 100°C 热板退火 3 min。之后依次旋涂 20 mg/mL 的 PC_{61}BM (CB)作电子传输层(旋涂速度为 2000 rpm/min)、0.5 mg/mL 的 BCP(IPA)作空穴阻挡层(旋涂速度为 2000 rpm/min), PC_{61}BM 和 BCP 的旋涂时间都是 30 s 并且不需要额外的退火处理。最后,利用蒸发设备在 BCP 表面沉积 80 nm Ag 作为金属电极,子电池有效面积 0.12 cm^2 。

1.3 测试方法

借助 Hitachi S4800 场发射扫描电子显微镜

(Scanning electron microscope, SEM), 在 1 kV 加速电压与 13 pA 束流条件下, 对钙钛矿薄膜表面形貌实施成像。水接触角数据由 POWEREACH JC-2000C1 型接触角仪采集。器件 $J-V$ 曲线于 AM 1.5G 标准光谱下测得, 光源由太阳光模拟器提供, 强度以 KG-5 滤光片校准的硅参比电池为基准, 测试仪器选用 Keithley 2400 Source meter。外量子效率

(External quantum efficiency, EQE) 曲线靠 PEC-S20 系统记录。稳态光致发光与时间分辨光致发光光谱均在 FLS980 平台上完成, 对比样品为未处理的薄膜与经 PDADI 修饰的薄膜。

2 结果与讨论

2.1 无机钙钛矿薄膜表面性质

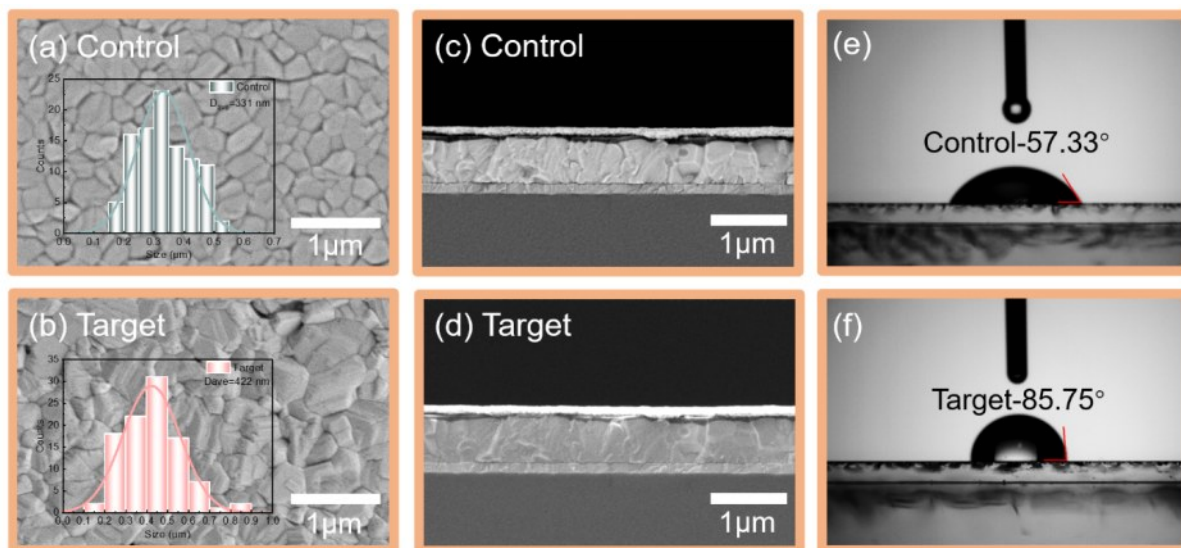


图1 对照组薄膜的SEM图像及晶粒尺寸分布直方图(a), 实验组薄膜的SEM图像及晶粒尺寸分布直方图(b)。对照组薄膜截面的SEM图像(c), 实验组薄膜截面的SEM图像(d)。对照组薄膜水接触角光学照片(e), 实验组薄膜水接触角光学照片(f)

Figure 1 SEM image and grain size distribution histograms of the control film (a), target film (b). Cross-sectional SEM image of the control film (c), target film (d). Optical photos of water contact angle of the control film (e), target film (f)

图1a-b的扫描电子显微镜照片显示, 经PDADI修饰的薄膜晶粒尺寸显著增大, 孔隙与裂缝数量同步减少。这与器件光伏性能提升有着密切联系。横截面SEM表征(图1c-d)表明, 实验组上表面更为平整光滑。此外, 两种样品厚度差异可忽略不计。为评估表面疏水性能, 进一步测定水接触角(图1e-f); 受PDADI调控, 该角度自 57.33° 增至 85.75° , 增大的水接触角证实疏水性增强^[29]。

2.2 PDADI如何左右光伏器件性能

图2a-b显示, PDADI修饰令膜面粗糙度自 22.6 nm 降至 18.3 nm; 更平滑的表面为后续功能层沉积创造有利条件^[30]。图2c的 $J-V$ 曲线表明, 经PDADI处理后, 器件 PCE 由 17.09% 增至 19.50%, 开路电压 (Open-circuit voltage, V_{oc}) 自 1.083 V 升至 1.184 V, 短路电流密度 (Short-circuit current, J_{sc}) 自 19.98 mA/cm^2 提至 20.23 mA/cm^2 , 填充因子 (Filled factor, FF) 亦自 79.01% 增至 81.42%。光伏性能整体上扬可归因于PDADI在上界面加速电子输运并抑制不

利的载流子堆积。图2d的外量子效率 (External quantum efficiency, EQE) 曲线给出积分电流密度: 对照组 19.87 mA/cm^2 , 实验组 19.93 mA/cm^2 。接着对实验器件进行稳态功率输出 (Stable power output, SPO) 测试(图2e); 实验组器件在 1.02 V 偏压下, 经 600 s 的 SPO 测试, 其工作输出可保持稳定 (PCE 仍为 19.33%), 其 PCE 曲线几乎没有任何波动。图2f展示了器件的 PCE 统计分布情况, 实验组器件的 PCE 得到大幅提升。表明了PDADI对器件光伏性能的提升作用效果显著, 同时排除了实验偶然性的影响。

为进一步分析器件性能提升的原因, 另制备 18 枚独立对照器件与 18 枚实验器件, 统计六项光伏参数, 结果示于图3a-f: 平均 PCE 自 16.43% 升至 18.81%, V_{oc} 均值提高约 120 mV, FF 均值自 78.23% 增至 81.34%, J_{sc} 均值提升约 0.2 mA/cm^2 , 偶然性因素得以排除。器件的等效串联电阻 (R_s) 减少、器件的并联电阻 (R_{sh}) 提高暗示着电荷传输损耗降低, 漏

电流被有效抑制^[31]。对应着较高的 V_{oc} 和 FF 。此外, PCE 、 V_{oc} 、 FF 、 J_{sc} 、 R_s 、 R_{sh} 六项光伏参数的协同提

升表明 PDADI 的改性策略可显著增强器件的光伏性能。

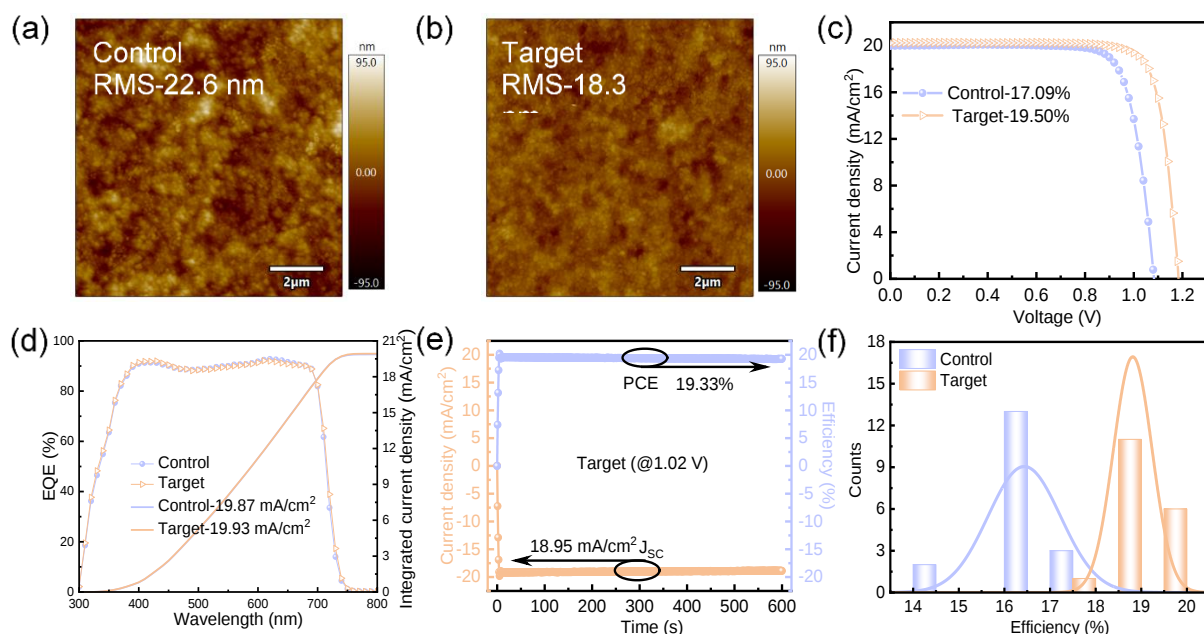


图2 对照组薄膜的AFM图像(a),实验组薄膜的AFM图像(b), J - V 曲线(c),EQE曲线(d),SPO曲线(e),器件 PCE 统计分布条形图(f)

Figure 2 AFM image of the control film (a), target film (b). J - V curves (c), EQE curves (d), SPO curves (e), Histogram of the statistical distribution of devices PCE (f)

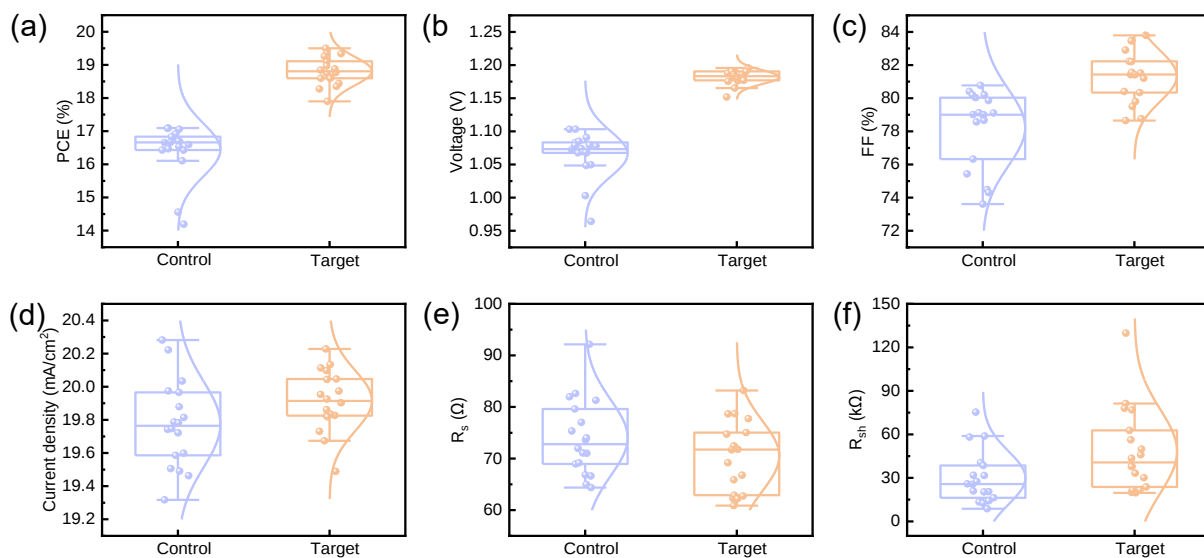


图3 六个光伏性能参数的箱式统计图 PCE (a)、 V_{oc} (b)、 FF (c)、 J_{sc} (d)、 R_s (e)、 R_{sh} (f)

Figure 3 Box-type statistical charts of six photovoltaic performance parameters PCE (a), V_{oc} (b), FF (c), J_{sc} (d), R_s (e), R_{sh} (f)

2.3 PDADI 强化光伏性能之机制解析及其对器件稳定性的作用

为阐明 PDADI 如何提升器件光伏性能,系统开展了光学与电学表征。图 4a 所示的紫外吸收曲线

显示,两种钙钛矿薄膜的带隙同为 1.69 eV。借助 PL 与 TRPL 谱(图 4b-c)追踪光学行为及载流子动力学,PDADI 修饰后,薄膜 PL 强度升高;本研究对 TRPL 曲线进行了双指数衰减拟合(图 4c),具体的

动力学拟合参数如图4c内嵌表所示。对照组薄膜的快速衰减寿命(τ_1)和慢速衰减寿命(τ_2)分别为12.97 ns和140.64 ns。经PDADI修饰后,目标组薄膜的 τ_2 延长至226.73 ns,且其占比从70.75%提高到79.55%,薄膜的平均载流子寿命(τ_{ave})从103.16 ns提升到181.83 ns。上述结果表明PDADI能够有效钝化钙钛矿薄膜缺陷,从而大幅抑制非辐射复合通道^[32],这是器件光伏性能提升的关键原因之一。借助空间电荷限制电流(Space charge limited current, SCLC)测试(图4d-e)进一步给出缺陷密度变化:经PDADI处理,器件的陷阱填充电压(V_{TFL})由1.44 V降低至1.22 V,缺陷态密度由 $2.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 降至 $1.9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,缺陷态密度的降低表明非辐射复合受到抑制,与PL/TRPL结论一致。图4f的暗态 J - V 曲线表明,PDADI的引入使漏电流减小;漏电流降低意味着界面电子输运得以优化,载流子复合过程此时被削弱^[30]。此外,降低的漏电流也暗示了器件 V_{oc} 的提升。

借助UPS测试对PDADI修饰前后薄膜的能带位置变化情况进行表征。UPS测试结果如图5a-d所示,PDADI修饰后CsPbI₃薄膜价带顶由-5.88 eV

下移至-5.96 eV,导带底由-4.19 eV下移至-4.27 eV,费米能级由-4.76 eV位移至-4.81 eV(图5e)。这表明PDADI诱导钙钛矿表面发生了强n型掺杂转变。这种表面n型化在与PC₆₁BM接触时,会在界面处形成一个有利电子跃迁的局域自建电场。该自建电场作为强有力的动力学驱动源,能够加速光生电子向电子传输层的抽取与注入。同时这一变化优化了钙钛矿层与电子传输层的能级匹配,降低了电子传输势垒,有利于减少界面复合^[33,34]。为了验证PDADI与CsPbI₃之间的相互作用,我们通过XPS测试对两种薄膜进行了表征(图5f)。PDADI处理后,经过PDADI处理薄膜的Pb 4f图谱向低结合能方向位移,这是由于PDADI分子中含有富含孤对电子的配位基团,可与CsPbI₃薄膜表面未配位的Pb²⁺形成强配位作用^[35,36]。

图4 Tauc图谱(a), PL图谱(b), TRPL图谱(c), 对照组的SCLC曲线(d), 实验组的SCLC曲线(e), 暗态 J - V 曲线(f)

Figure 4 Tauc plots (a), PL spectra (b), TRPL spectra (c). SCLC curves of the control film (d), target film (e). Dark J - V curves (f)

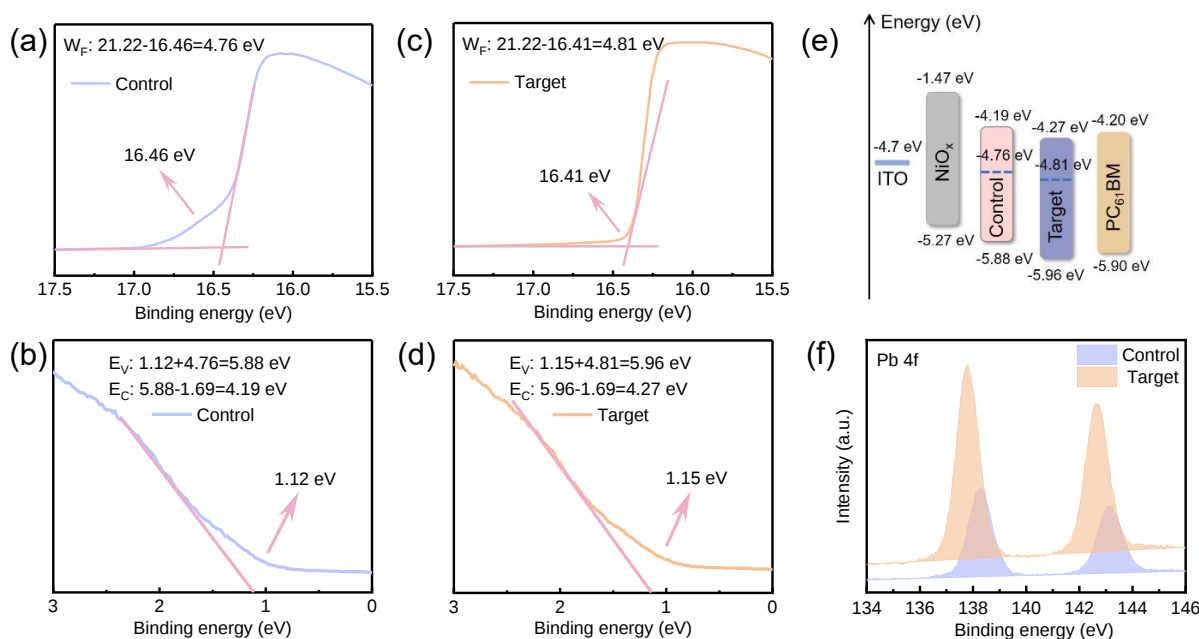


图5 UPS图谱(a-d)、器件的能级结构图(e)、XPS图谱(f)

Figure 5 UPS spectrum (a-d), energy level structure diagram (e), XPS spectrum (f)

除高光电转换效率外,优异的长期稳定性也是衡量器件性能优劣的关键指标。以下所有进行稳定性测试的器件均未进行封装。在25℃氮气氛围

中,对两组器件持续施加2000小时的稳定性追踪,以评估其氮气稳定性(图6a)。对照器件的PCE仅余69.61%,而实验器件同期仅损失5.05%。随后,将

环境温度升至 65 °C 并维持氮气氛围,继续监测 500 小时,考察热稳定性差异(图 6b)。实验组仍保有 85.27% 的初始 *PCE*,对照组则滑落至 63.54%。尽管氮气环境下器件展现出优异的长期稳定性,但无水无氧的惰性环境无法反映其在空气环境下的抗湿能力。所以,于 ~20–30% 相对湿度、25 °C 空气环境中记录湿度稳定性(图 6c)。500 小时后对照器件对其初始 *PCE* 的保留率仅 65.22%,显著低于实验器件的 87.64%。这与水接触角测试结果相互印证。最

后,在 ~20% 相对湿度、25 °C 空气环境下,采用光强 100 mW/cm² 的模拟太阳光持续照射 500 小时,同时实时监测两种器件的最大功率点(图 6d)。500 小时后,实验器件可实现对其初始 *PCE* 约 66.35% 的保留率,远远超过对照器件的 32.28%。稳定性测试结果进一步证实了 PDADI 对器件稳定性的提升效果。PDADI 对上界面缺陷的钝化及载流子输运优化,为实验组装置稳定性全面提升提供了关键支撑。

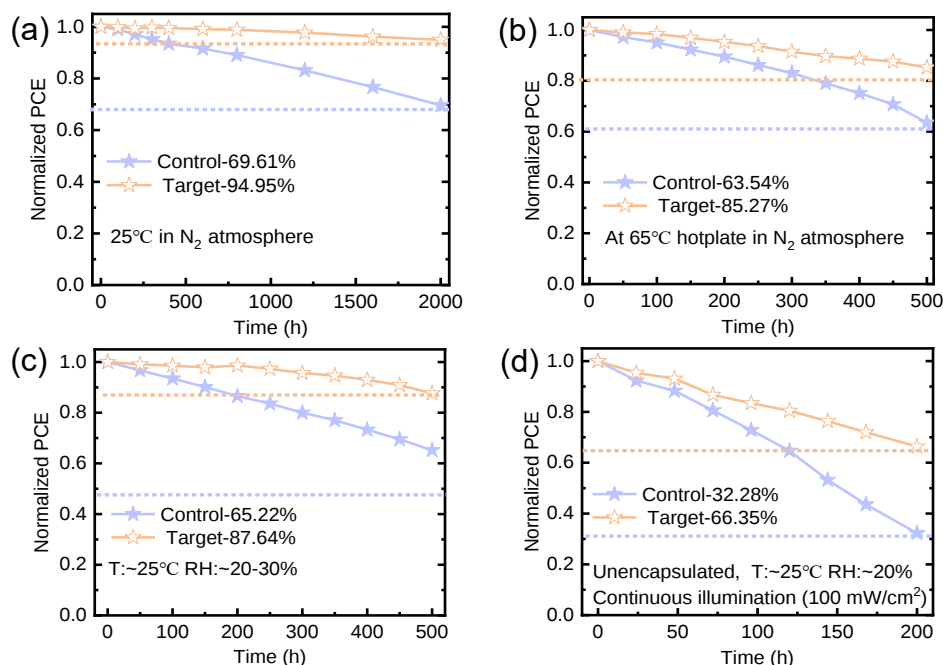


图6 氮气稳定性测试曲线(a),热稳定性测试曲线(b),湿度稳定性测试曲线(c),连续光照(100 mW/cm²)稳定性测试曲线(d)

Figure 6 nitrogen stability test curves (a), thermal stability test curves (b), humidity stability test curves (c), stability test curves for continuous illumination (100 mW/cm²) (d)

3 结论

针对全空气条件下 IPSCs 的光伏性能较为低下的问题。引入 PDADI 以修饰 CsPbI₃ 薄膜表面,其功能在于调控缺陷密度、加速界面电子提取与传输,并削弱不利的载流子堆积,从而抑制非辐射复合。经 PDADI 处理后,全空气工艺器件的平均 *V*_{oc} 提高约 120 mV, *PCE* 自 17.09% 增至 19.50%。器件也展现出卓越的稳定性。该策略为 IPSCs 从实验室迈向商业化进程提供了新的科学路径。

参考文献

[1] Yang J X, Wang Z L, Zhao X J, et al. Guiding vertical growth and

improving buried interface of Pb-Sn perovskite film by 2D perovskite seeds for efficient narrow bandgap perovskite solar cells and tandems[J]. Energy & Environmental Science, 2025, **18** (6):2883–2894.

[2] Liao X F, Jia X F, Li W S, et al. Methylammonium-free, high-efficiency, and stable all-perovskite tandem solar cells enabled by multifunctional rubidium acetate[J]. Nature Communications, 2025, **16**: 1164.

[3] Li X, Ying Z Q, Li S, et al. Top-down dual-interface carrier management for highly efficient and stable perovskite/silicon tandem solar cells[J]. Nano-Micro Letters, 2025, **17**(1): 141.

[4] Zheng J H, Wang G L, Duan L P, et al. Tailoring nanoscale interfaces for perovskite - perovskite - silicon triple-junction solar cells[J]. Nature Nanotechnology, 2025, **20**(11): 1648–1655.

[5] Zhou Q S, Huang G Y, Wang J N, et al. Aromatic interaction-driven out-of-plane orientation for inverted perovskite solar cells with improved efficiency[J]. Nature Energy, 2025, **10**(11): 1371–

- 1381.
- [6] Guan Z, Wei Z J, Sun X Y, et al. Self-consistent cation - anion integration eliminates passivation crosstalk for inverted perovskite solar cells[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, **64** (46): e202509782.
- [7] Hou F H, Ren X Q, Guo H K, et al. Monolithic perovskite/silicon tandem solar cells: a review of the present status and solutions toward commercial application[J]. *Nano Energy*, 2024, **124**: 109476.
- [8] Jiang Y, Xu T F, Du H Q, et al. Organic-inorganic hybrid nature enables efficient and stable CsPbI₃-based perovskite solar cells [J]. *Joule*, 2023, **7**(12): 2905-2922.
- [9] Xu T F, Li N, Wang Z Z, et al. Synergistic dual-defect passivation *via* iodoethoxyethane for high-efficiency inverted inorganic perovskite solar cells[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, **36** (5): e15665.
- [10] Luo M, Wang S L, Zhu Z, et al. Novel cathode buffer layer enabling over 21.6%/20.9% efficiency in wide bandgap/inorganic perovskite solar cells[J]. *Nano Energy*, 2024, **121**: 109162.
- [11] Wang S L, Wang P Y, Chen B B, et al. Suppressed recombination for monolithic inorganic perovskite/silicon tandem solar cells with an approximate efficiency of 23%[J]. *eScience*, 2022, **2**(3): 339-346.
- [12] Wang S L, Sun H R, Wang P Y, et al. Two-pronged maneuver of inner regulation and surface repair for stable inorganic perovskite solar cells with ultralow open-circuit voltage deficit[J]. *Solar RRL*, 2024, **8**(5): 2300739.
- [13] Hu Y Q, Bai F, Liu X B, et al. Bismuth incorporation stabilized α -CsPbI₃ for fully inorganic perovskite solar cells[J]. *ACS Energy Letters*, 2017, **2**(10): 2219-2227.
- [14] Jena A K, Kulkarni A, Sanehira Y, et al. Stabilization of α -CsPbI₃ in ambient room temperature conditions by incorporating Eu into CsPbI₃[J]. *Chemistry of Materials*, 2018, **30**(19):6668-6674.
- [15] Yang F, Hirotani D, Kapil G, et al. All-inorganic CsPb_{1-x}Ge_xI₃Br perovskite with enhanced phase stability and photovoltaic performance[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, **57**(39): 12745-12749.
- [16] Xu C Z, Zhang S C, Fan W Q, et al. Pushing the limit of open-circuit voltage deficit *via* modifying buried interface in CsPbI₃ perovskite solar cells[J]. *Advanced Materials*, 2023, **35**(7): e2207172.
- [17] Liu T R, Zhao X M, Zhong X J, et al. Improved absorber phase stability, performance, and lifetime in inorganic perovskite solar cells with alkyltrimethoxysilane strain-release layers at the perovskite/TiO₂ interface[J]. *ACS Energy Letters*, 2022, **7**(10): 3531-3538.
- [18] Xu D F, Wang J G, Duan Y W, et al. Highly-stable CsPbI₃ perovskite solar cells with an efficiency of 21.11% *via* fluorinated 4-amino-benzoate cesium bifacial passivation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, **33**(44): 2304237.
- [19] Fu S, Le J B, Guo X M, et al. Polishing the lead-poor surface for efficient inverted CsPbI₃ perovskite solar cells[J]. *Advanced Materials*, 2022, **34**(38): 2205066.
- [20] Wang J G, Che Y H, Duan Y W, et al. 21.15%-efficiency and stable γ -CsPbI₃ perovskite solar cells enabled by an acyloin ligand[J]. *Advanced Materials*, 2023, **35**(12): 2210223.
- [21] Xu T F, Xiang W C, Kubicki D J, et al. Simultaneous lattice engineering and defect control via cadmium incorporation for high-performance inorganic perovskite solar cells[J]. *Advanced Science*, 2022, **9**(36): 2204486.
- [22] Yuan J F, Zhang D, Deng B B, et al. High efficiency inorganic perovskite solar cells based on low trap density and high carrier mobility CsPbI₃ films[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, **32** (47): 2209070.
- [23] Du Y C, Tian Q W, Chang X M, et al. Ionic liquid treatment for highest-efficiency ambient printed stable all-inorganic CsPbI₃ perovskite solar cells[J]. *Advanced Materials*, 2022, **34**(10): 2106750.
- [24] Zhang S A, Zhang L, Tian Q W, et al. Spontaneous construction of multidimensional heterostructure enables enhanced hole extraction for inorganic perovskite solar cells to exceed 20% efficiency[J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, **12**: 2103007.
- [25] Huang J, Wang H, Chen C Y, et al. Ionic bilateral passivator carboxyethylisothiuronium chloride for CsPbI_{3-x}Br_x perovskite solar cells with *PCE* 20.9% and superior stability[J]. *Materials Today*, 2023, **67**: 46-56.
- [26] Tan S, Yu B C, Cui Y Q, et al. Temperature-reliable low-dimensional perovskites passivated black-phase CsPbI₃ toward stable and efficient photovoltaics[J]. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 2022, **61**(23): e202201300.
- [27] Lan Z R, Wang Y D, Shao J Y, et al. Surface passivation with diaminopropane dihydriodide for p-i-n perovskite solar cells with over 25% efficiency[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, **34**(12): 2312426.
- [28] Peter Amalathas A, Sunthareswaran S, Neykova N, et al. Stabilizing halide distribution in mixed halide perovskites through diammonium-based passivation[J]. *ACS Omega*, 2026, **11**(12): 19903-19913.
- [29] Lu C Y, Li X D, Guo X M, et al. Efficient inverted CsPbI₃ perovskite solar cells fabricated in common air[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, **452**: 139495.
- [30] Wang S L, Qi S S, Sun H R, et al. Nanoscale local contacts enable inverted inorganic perovskite solar cells with 20.8 % efficiency[J]. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 2024, **63**(19): e202400018.
- [31] Wang Z Z, Xu T F, Li N, et al. Interfacial engineering with trivalent cations for efficient and stable inverted inorganic perovskite solar cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2024, **17**(19): 7271-7280.
- [32] Yang S M, Wu M Z, Lei X R, et al. Ultra-high 1.27 V *V*_{oc} of pure CsPbI₃ perovskite solar cells with an efficiency of 21.8%[J]. *ACS Energy Letters*, 2024, **9**(10):4817-4826.
- [33] Lu C Y, Li X D, Yuan H B, et al. Introducing back-surface field for efficient inverted CsPbI₃ perovskite solar cells[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **480**: 147267.
- [34] Wang S, Li M H, Zhang Y Y, et al. Surface n-type band bending for stable inverted CsPbI₃ perovskite solar cells with over 20% efficiency[J]. *Energy & Environmental Science*, 2023, **16**(6): 2572-2578.
- [35] Sun H R, Wang S L, Qi S S, et al. Surface defects management by in situ etching with methanol for efficient inverted inorganic perovskite solar cells[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, **33** (23): 2213913.
- [36] Wang Z T, Chen Q Y, Xie H D, et al. Light-driven dynamic

defect-passivation for efficient inorganic perovskite solar cells[J].

Advanced Functional Materials, 2025, **35**(9): 2416118.