

文章编号: 1000-7032(2026)02-0340-08

二维/三维异质结构协同钝化提升钙钛矿太阳能电池性能与稳定性

周 炫^{1,2*}, 何睿夫², 宋 军², 屈军乐²

(1. 深圳城市职业学院 中德智造学院, 广东 深圳 518057;

2. 深圳大学 生物医学光子学研究中心/物理与光电工程学院, 光电子器件与系统重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: 钙钛矿太阳能电池因其优异的光电性能而受到广泛关注,但其稳定性不足仍制约着实际应用。本文提出一种基于二维/三维(2D/3D)异质结构的协同钝化策略,通过碘代-4-氨基-TEMPO 诱导形成的 2D 钙钛矿表面层与稳定自由基的复合调控,实现了晶界缺陷与自由基诱导降解的双重抑制。结果表明,该策略显著改善了钙钛矿薄膜的结晶质量与表面平整度,AFM 测得表面粗糙度(RMS)由 9.60 nm 降至 6.25 nm;稳态与瞬态光致发光结果显示,载流子寿命由 250 ns 延长至 355 ns,非辐射复合明显抑制。基于 2D/3D 异质结的器件表现出更高的复合电阻(383.7 Ω)与优异的电荷传输特性,获得最高光电转换效率 21.15%。同时,器件在湿热环境下 20 天后仍保留初始效率的 71.5%。该研究为实现高效率与高稳定性兼顾的钙钛矿光伏器件提供了新的设计思路与材料策略。

关键词: 钙钛矿太阳能电池; 二维钝化; 异质结构; 自由基清除; 器件稳定性

中图分类号: TM914.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250233

CSTR: 32170.14.CJL.20250233

Synergistic Passivation via 2D/3D Heterostructures for Enhanced Efficiency and Stability of Perovskite Solar Cells

ZHOU Xuan^{1,2*}, HE Ruifu², SONG Jun², QU Junle²

(1. School of Sino-Germany Intelligent Production, Shenzhen City Polytechnic, Shenzhen 518057, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems, Center for Biomedical Optics and Photonics (CBOP) & College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

* Corresponding Author, E-mail: Zhouxuan@szcp.edu.cn

Abstract: Perovskite solar cells (PSCs) show great promise owing to their remarkable optoelectronic performance, yet their commercial deployment is hindered by intrinsic instability. We introduce a synergistic 2D/3D heterostructure passivation approach, integrating a TAI-derived 2D perovskite capping layer with the TEMPO radical scavenger to concurrently mitigate grain boundary defects and radical-induced degradation. This strategy improves perovskite crystallinity and film uniformity, lowering the surface roughness from 9.60 nm to 6.25 nm. Carrier lifetime extends from 250 ns to 355 ns, as confirmed by steady-state and time-resolved photoluminescence, indicating suppressed non-radiative recombination. The 2D/3D-based devices demonstrate enhanced recombination resistance (383.7 Ω) and superior charge transport, yielding a champion efficiency of 21.15%. The device retained 71.5% of its initial efficiency after 20 days in a damp-heat environment. This study offers a new materials design paradigm toward efficient and operationally stable perovskite photovoltaics.

Keywords: perovskite solar cells; two-dimensional passivation; heterojunction structure; radical scavenging; device stability

收稿日期: 2025-11-05; 修订日期: 2025-11-12

基金项目: 广东省普通高校创新团队项目(2024KCXTD065);深圳技师学院校级科研项目(2411001,2314003)

Supported by the Innovation Team Project in the Universities of Guangdong Province (2024KCXTD065); The School-Level Research Projects of Shenzhen City Polytechnic (2411001,2314003)

1 引言

钙钛矿太阳能电池(PSCs)以其卓越的光吸收能力、长载流子寿命和低成本制备工艺,成为近年来最具潜力的新型光伏技术之一。其光电转换效率(PCE)已突破25%,接近商用晶硅电池^[1]。然而,PSCs的长期稳定性仍然是制约其商业化应用的技术瓶颈。尤其在光照、热应力及偏压等外界作用下,钙钛矿层中易发生离子迁移、相分离及光化学降解,从而导致器件性能快速衰退^[2-6]。

近年来,二维钙钛矿(2D perovskite)凭借优异的结构稳定性和疏水性,被广泛用于三维钙钛矿(3D perovskite)表面的钝化改性。通常,利用长链或大位阻的有机铵盐(如苯乙基碘化铵)对三维钙钛矿表面进行处理,通过原位反应诱导形成二维钙钛矿覆盖层,从而构建形成2D/3D异质结构^[7-8]。该结构可有效抑制界面复合、修复晶界缺陷并阻隔环境侵蚀,从而兼顾高效率与稳定性^[9-10]。然而,光照诱导的自由基反应亦是影响钙钛矿寿命的重要因素,目前鲜有研究实现对其的协同调控^[11-12]。

本研究提出一种二维/三维协同钝化策略,将TAI(碘代-4-氨基-TEMPO)诱导的2D钙钛矿表面层与其自由基功能相结合,构建出兼具结构钝化与化学保护功能的复合体系。该方法在不影响吸收性能的前提下显著改善薄膜形貌与结晶质量,提高了载流子寿命与电学稳定性。通过系统表征与光伏性能分析,本文验证了2D/3D异质结构在

同时提升效率与稳定性方面的有效性,为钙钛矿光伏器件的长效设计提供了新的实验依据。

2 实验

2.1 样品制备

实验材料品牌Sigma-Aldrich,纯度为分析纯。TAI根据已知方法^[13]合成。其结构式如图1所示。

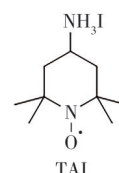


图1 TAI结构式

Fig.1 The chemical structure of TAI

2.2 制备步骤

量比1:1.03的 PbI_2 与MAI溶于体积比4:1的DMF/DMSO中,形成浓度 $1.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。ITO玻璃上首先旋涂PTAA空穴传输层,经 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 退火10 min后开始旋涂钙钛矿前驱液,滴加2-butanol反溶剂诱导结晶。随后采用含不同浓度TAI的2-butanol溶液($0\sim 1.0\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)进行表面修饰,无TAI时为对照组(Control),含TAI时为TAI组。TAI样品经过10 min热处理后,得2D/3D组样品,其SEM形貌如图2所示。再依次旋涂PCBM与Bphen电子传输层,并采用真空蒸镀形成Ag电极,最终得到太阳能电池器件。光伏器件结构为ITO/PTAA/MAPbI₃*/PCBM/Bphen/Ag(MAPbI₃*为对照组、TAI组或2D/3D组钙钛矿薄膜)。

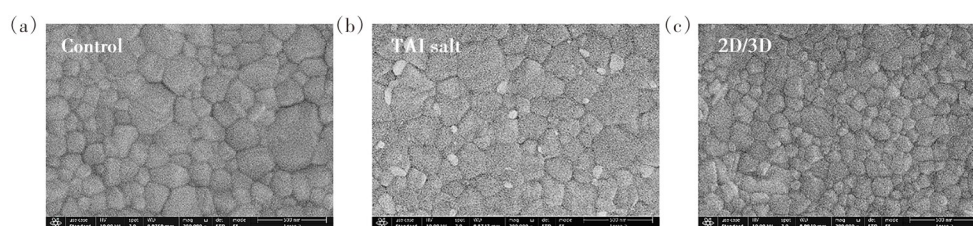


图2 (a)无TAI钙钛矿薄膜(对照组)的SEM俯视图;(b)含TAI盐的钙钛矿薄膜SEM俯视图;(c)形成2D/3D钝化的钙钛矿薄膜SEM俯视图

Fig.2 (a)SEM top view of TAI-free perovskite film (control). (b)SEM top view of perovskite film with TAI. (c)SEM top view of perovskite film with 2D/3D passivation

2.3 样品表征方法

太阳光模拟器(Zolix Sirius-SS)提供测试光源,使用标准硅太阳能电池(ABET technology)进行校准光源强度,使用keithley2400数字源表测量电池器件的 $J-V$ 特性曲线,基于LabVIEW开发的测试软件用来记录和计算电池正反扫的 $J-V$ 特性曲线以及稳态曲线。外量子效率(EQE)曲线

是使用实验室自制的设备。我们使用分光仪(卓立汉光,Omni-λ300)把太阳能光模拟器Zolix Sirius-SS的光源进行分光,得到 $300\sim 850\text{ nm}$ 单色光。先用标准硅电池标定电流值,再将待测电池放置在夹具上测试,数字源表keithley2400用于采集数据。钙钛矿太阳能电池的有效面积为 0.06 cm^2 。薄膜表面形貌采用扫描电子显微镜

(SEM)、原子力显微镜(AFM)分析;其晶体结构与元素组成通过X射线衍射(XRD)/X射线光电子能谱(XPS)研究;钝化效果采用稳态与瞬态荧光发射光谱(PL)测试;器件光伏性能由外部量子效率(EQE)及电流-电压(J - V)曲线评估;电子阻抗谱(EIS)与空间电荷限制电流(SCLC)表征缺陷态与载流子迁移率;稳定性测试于湿度约25%的干燥箱中进行。

3 结果与讨论

3.1 薄膜形貌与结构特性

钙钛矿薄膜的形貌分别由SEM和AFM表征。如图2、图3所示,含TAI与2D/3D钝化层可明显改善MAPbI₃薄膜形貌,导致晶界被有效覆盖,针孔减少。AFM表明RMS粗糙度随着TAI加入而下降,由9.6 nm降至6.25 nm,说明2D/3D策略有效改善了钙钛矿薄膜质量。

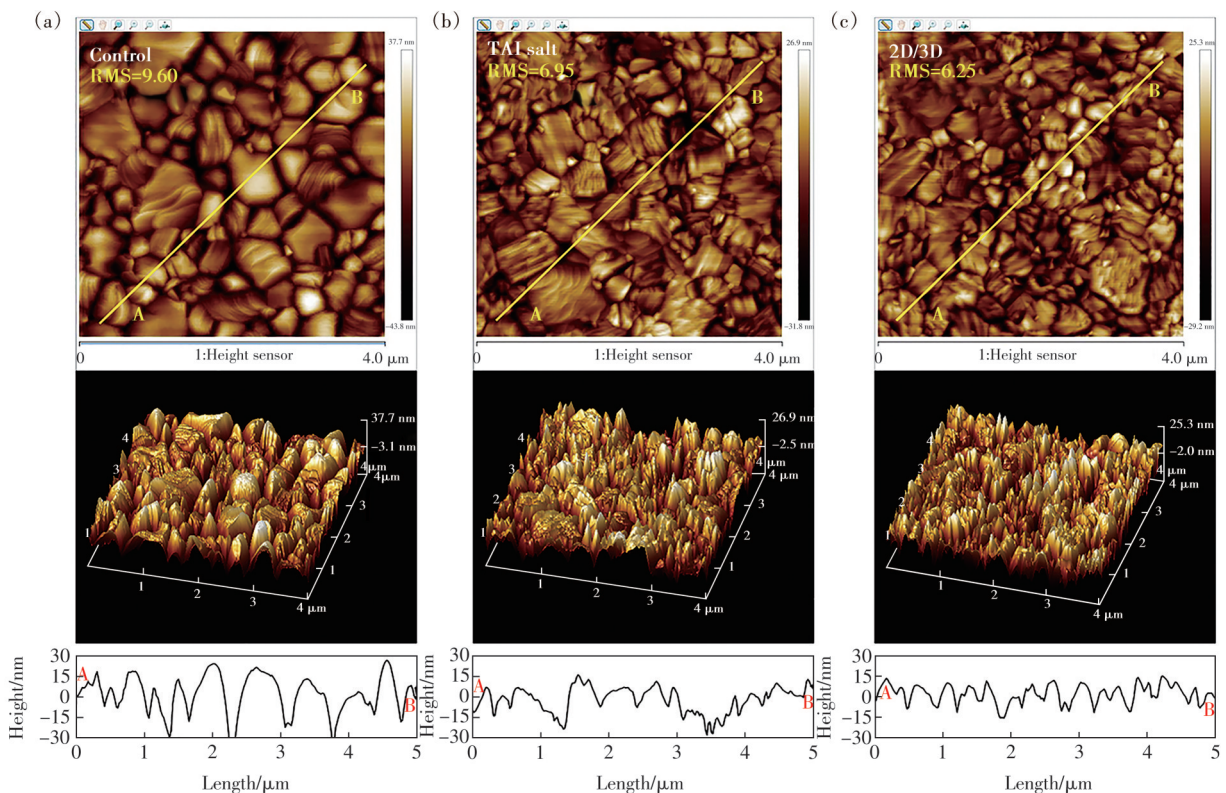


图3 (a)对照组的AFM二维、三维表面形貌和表面高度曲线;(b)TAI组的AFM二维、三维表面形貌和表面高度曲线;(c)2D/3D组的AFM二维、三维表面形貌和表面高度曲线

Fig.3 (a) AFM 2D/3D surface topography and surface height profile of the control group. (b) AFM 2D/3D surface topography and surface height profile of the TAI group. (c) AFM 2D/3D surface topography and surface height profile of the 2D/3D group

为了探究2D/3D异质结的光学特性,我们测试了薄膜的紫外-可见吸收光谱(图4(a))。所有样品均表现出典型的三维钙钛矿吸收特征,吸收峰未见明显改变,与对照组相比,2D/3D样品在可见光区显示出轻微的吸收增强,这可能是由于形成的超薄2D层优化了光管理效应,同时其自身的吸收信号因含量较低而淹没在强烈的3D相吸收背景,这种现象与先前报道观察的2D/3D钙钛矿结构是一致的^[7-8]。XPS分析揭示了从TAI修饰到形成2D/3D异质结的动态界面过程(图4(b)~(d))。与对照组相比,TAI样品的Pb 4f和I 3d结合能分别降低~0.3 eV和~0.2 eV,表明TAI分子初始吸附于表面

并向钙钛矿注入电子。然而,在经过热处理形成2D/3D异质结后,其XPS谱图展现出不同的特征: I 3d结合能恢复至与对照组相当的水平,而Pb 4f结合能则显著升高。这是由于热处理驱动了界面的化学重构,TAI不再仅是物理吸附,其有机铵阳离子与表层钙钛矿发生阳离子交换,形成了晶格应变更大的二维钙钛矿结构。同时,新界面中的N—H...I氢键与配位键产生了强烈的吸电子效应,共同导致Pb 4f结合能上升。这一结合能的‘反转’现象表明了具有强电子耦合的稳定2D/3D异质结的成功构建。XRD图谱(图4(e)~(f))也进一步揭示了薄膜的晶体结构演变。随着TAI的引入,PbI₂残留

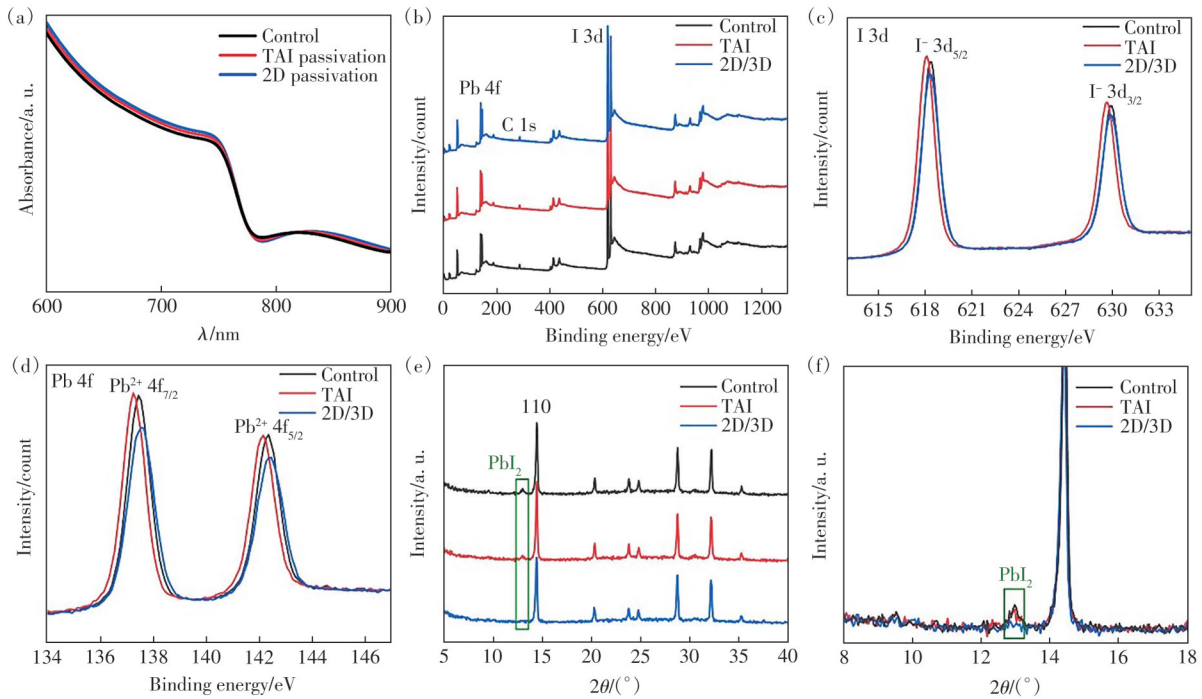


图4 (a)钙钛矿薄膜的紫外-可见吸收光谱;(b)~(d)钙钛矿薄膜的XPS表征;(e)~(f)钙钛矿薄膜的XRD表征与 PbI_2 残留峰对比

Fig.4 (a)UV-Vis absorption spectra of perovskite films. (b)~(d)XPS characterization of perovskite films. (e)~(f)XRD characterization of the three perovskite films and their corresponding residual PbI_2 peaks

衍射峰强度逐渐减弱,而 MAPbI_3 (110)晶面衍射峰则相应增强。其中,2D/3D样品表现出最弱的 PbI_2 峰与最强的 MAPbI_3 (110)峰,说明超薄2D修饰策略有效促进了钙钛矿相的结晶完善与纯度提升。

3.2 光学特性与载流子复合行为

稳态PL如图5所示,与对照组相比,TAI及2D/3D复合钝化样品发光强度增强并伴随轻微蓝移,说明非辐射复合被有效抑制。TRPL结果如图6所示,对照组的载流子寿命为278 ns,TAI与2D/3D组延长至340 ns和355 ns,进一步证明钝化

层显著降低了缺陷密度。

3.3 器件性能分析

不同TAI浓度下光伏器件的形貌、 J - V 曲线及性能参数如图7、图8(a)和表1所示。其中,TAI为0的是对照组,TAI为 $0.2\sim 1.0\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 为TAI添加组器件。结果表明,TAI浓度为 $0.5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时器件性能最佳: $V_{\text{oc}}=1.09\text{ V}$, $J_{\text{sc}}=23.88\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $\text{FF}=0.782$, $\text{PCE}=20.42\%$ 。

因此,0.5浓度的样品被用于进一步构建2D/3D协同钝化器件(表2),其PCE高达21.15%。值得注意的是,与对照组相比,TAI器件的迟滞效应更为明显,但2D/3D器件的迟滞效应减弱(图8(b))。这是由于在初始修饰阶段,TAI分子尚未形成均匀连续的二维覆盖层,导致界面缺陷态增加并局部限制了离子迁移,从而加剧了迟滞效应。而经过热处理形成稳定的2D/3D异质结后,界面得到充分优化,迟滞效应随之显著减弱。正如 $\text{Ji}^{[14]}$ 与 $\text{De Holanda}^{[15]}$ 研究指出,一个完整且高质量的2D覆盖层对于实现高效的界面电荷传输与高效器件至关重要,本工作的迟滞效应变化也说明了这一点。此外,稳态输出曲线与EQE(图9)均表明器件光电流匹配性优异。

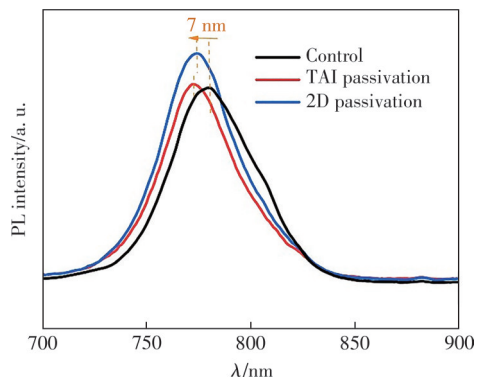


图5 对照组、TAI组和2D/3D异质结的钙钛矿薄膜稳态PL光谱

Fig.5 Steady-state PL spectra of perovskite films from the control group, TAI group, and 2D/3D heterojunction group

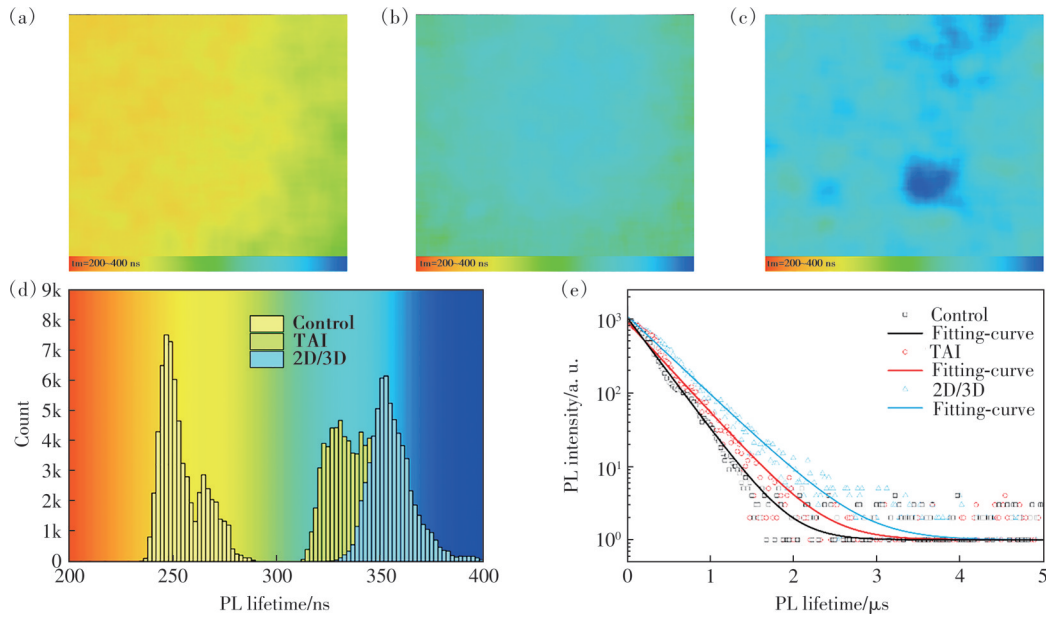


图 6 (a)对照组薄膜的FLIM图像;(b)TAI组的FLIM图像;(c)2D/3D组的FLIM图像;(d)三种钙钛矿薄膜荧光寿命统计直方图;(e)三种钙钛矿薄膜单个像素点时间分辨荧光衰减曲线

Fig.6 (a) FLIM image of the control group film. (b) FLIM image of the TAI group film. (c) FLIM image of the 2D/3D group film. (d) Statistical histogram of fluorescence lifetime for the three types of perovskite films. (e) Time-resolved fluorescence decay curves of single pixel points for the three types of perovskite films

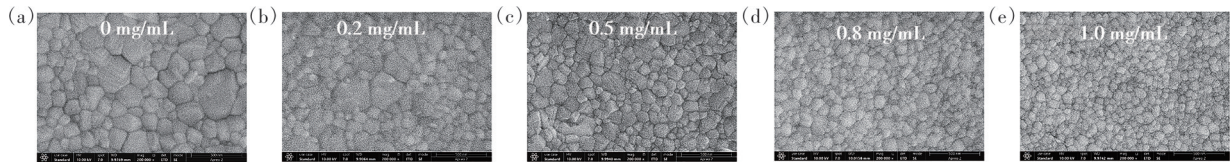


图 7 不同浓度的TAI形成的2D/3D异质结的钙钛矿薄膜SEM俯视图。(a)对照组;(b)0.2 mg/mL;(c)0.5 mg/mL;(d)0.8 mg/mL;(e)1.0 mg/mL

Fig.7 SEM top views of perovskite films with 2D/3D heterojunctions formed using different TAI concentrations. (a) Control group. (b) 0.2 mg/mL. (c) 0.5 mg/mL. (d) 0.8 mg/mL. (e) 1.0 mg/mL

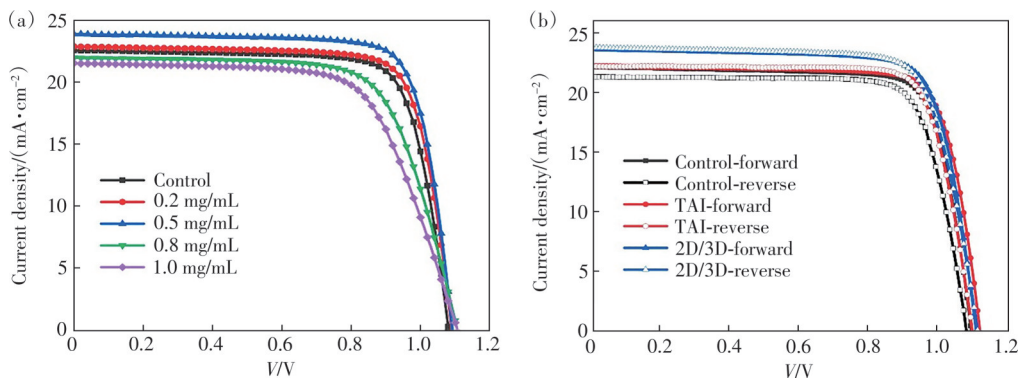


图 8 (a)不同TAI浓度下光伏器件的 J - V 曲线;(b)最优的对照组、TAI和2D/3D异质结器件的正向反向扫描 J - V 曲线

Fig.8 (a) The J - V curves of photovoltaic devices with different TAI concentrations. (b) Forward and reverse scan J - V curves of the optimal control, TAI, and 2D/3D heterojunction devices

3.4 缺陷钝化与载流子动力学

样品的电化学阻抗谱(EIS)测试如图 10 所示。其中,图 10(a)~(c)是不同偏压下的奈奎斯特曲线,显示出TAI组与2D/3D组样品的复合电阻相比对照组得到明显改善;图 10(d)是三组样

品在 1.1 V 偏压下的奈奎斯特曲线。相比对照组,TAI组与2D/3D组钝化后复合电阻(R_{rec})由 153.9 Ω 分别增至 227.0 Ω 和 383.7 Ω 。这些结果表明钝化界面的电荷复合显著减少,2D/3D组样品的电荷复合得到了最大抑制。样品的光强依赖

表 1 不同 TAI 浓度的钙钛矿钝化器件的光伏性能参数

Tab. 1 Photovoltaic performance parameters of perovskite devices passivated by different TAI concentrations

| TAI/(mg·mL ⁻¹) | 扫描方向 | V _{oc} /V | J _{sc} /(mA·cm ⁻²) | FF | PCE/% |
|----------------------------|------|--------------------|---|------|-------|
| 0 | 正向 | 1.08 | 22.58 | 0.77 | 18.82 |
| 0.2 | 正向 | 1.09 | 22.90 | 0.78 | 19.40 |
| 0.5 | 正向 | 1.09 | 23.88 | 0.78 | 20.42 |
| 0.8 | 正向 | 1.10 | 21.97 | 0.70 | 17.01 |
| 1.0 | 正向 | 1.10 | 21.52 | 0.67 | 15.88 |

表 2 最优器件的性能参数

Tab. 2 Performance parameters of the optimal devices

| 器件 | 扫描方向 | V _{oc} /V | J _{sc} /(mA·cm ⁻²) | FF | PCE/% |
|-------|------|--------------------|---|------|-------|
| 对照组 | 正向 | 1.08 | 22.14 | 0.78 | 18.95 |
| | 反向 | 1.07 | 21.30 | 0.77 | 17.76 |
| TAI | 正向 | 1.09 | 23.88 | 0.78 | 20.42 |
| | 反向 | 1.08 | 22.18 | 0.78 | 18.87 |
| 2D/3D | 正向 | 1.11 | 24.02 | 0.79 | 21.15 |
| | 反向 | 1.11 | 23.76 | 0.79 | 20.91 |

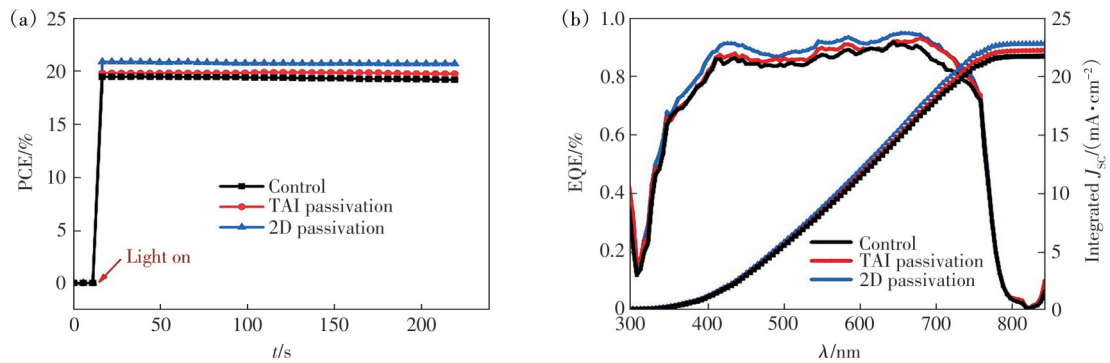


图 9 (a)最大功率点稳态输出;(b)EQE曲线和积分电流曲线

Fig.9 (a)Steady-state output at the maximum power point. (b)EQE curve and integrated current curve

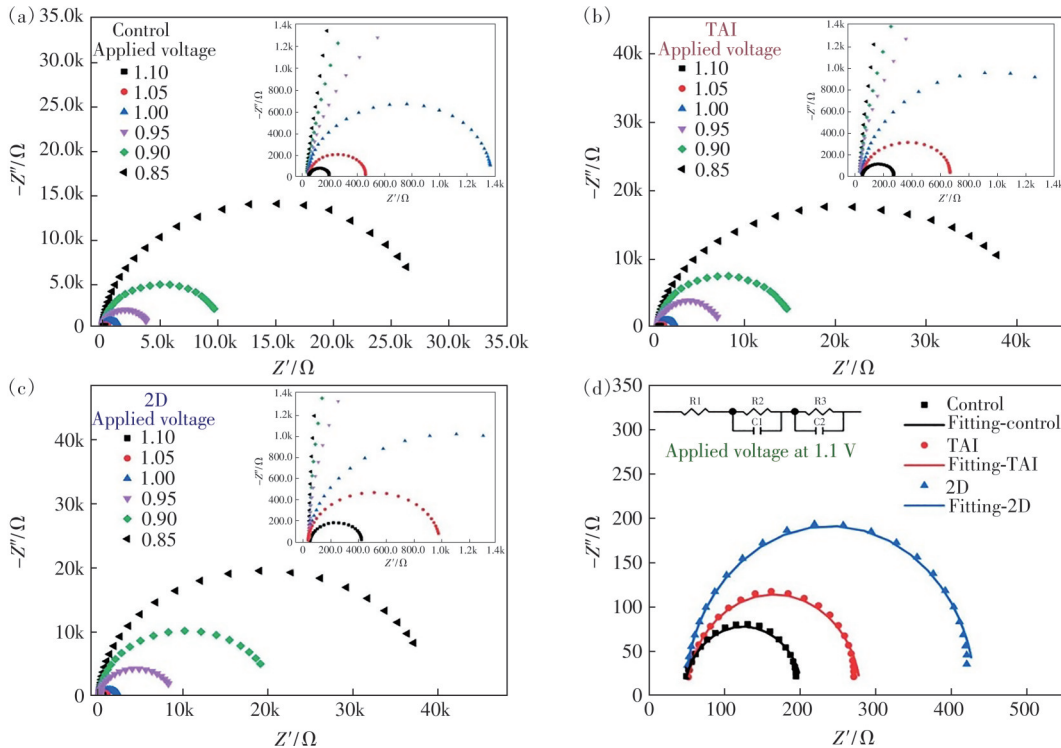


图 10 异质结器件在不同偏压下的奈斯奎特曲线:(a)对照组、(b)TAI和(c)2D/3D;(d)在 1.1 V 偏压下根据等效电路的拟合曲线
Fig.10 Nyquist plots of heterojunction devices under different bias voltages: (a)control group, (b)TAI, and (c) 2D/3D. (d) Fitting curves based on the equivalent circuit at 1.1 V bias

分析如图 11 所示,可得对照组、TAI与 2D/3D 组的短路电流的光强依赖系数(α)分别为 0.95, 0.96, 0.99,开路电压的光强依赖系数(理想因子)分别为 1.47, 1.33, 1.28。由此可见,在加入 TAI和 2D/

3D 钝化后, α 和理想因子逐步趋近 1,表明它们钝化后的器件中双分子复合与陷阱辅助复合均得到了抑制。这些测试结果与三者的器件 PCE 性能一致。

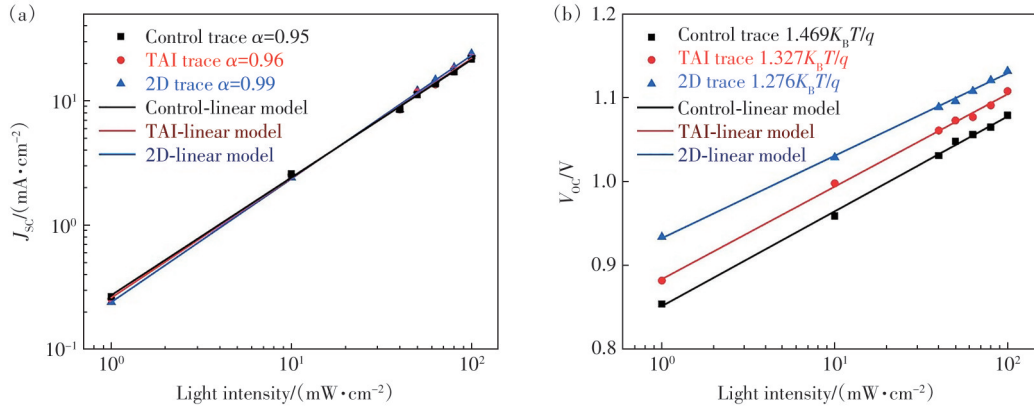


图 11 异质结钝化器件在不同光照强度下的光强与 J_{sc} 关系曲线(a)和光强与 V_{oc} 关系曲线(b)

Fig.11 Relationship curves between light intensity and J_{sc} (a), and light intensity and V_{oc} (b) for heterojunction-passivated devices under different illumination intensities

对照组、TAI 组与 2D/3D 组的 SCLC 曲线如图 12 所示,2D/3D 器件的陷阱密度由 $3.29 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 降至 $1.22 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,电子迁移率由 $0.021 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

提高至 $0.037 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,说明 2D/3D 器件载流子传输更为平衡,进一步支持了其更优异的光伏性能。

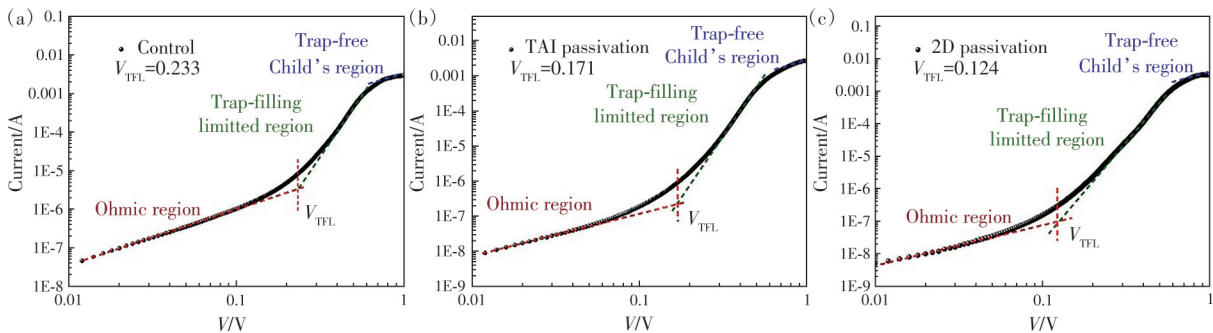


图 12 单电子器件在暗态下测得的 J - V 曲线:(a)对照组、(b)TAI 组和(c)2D/3D 组

Fig.12 J - V curves of single-electron devices measured under dark conditions: (a)control group, (b)TAI group, (c)2D/3D group

3.5 器件稳定性

如图 13 所示,三种器件在 $(25 \pm 5)\%$ 湿度环境下储存 20 天后,对照组的 PCE 保持率仅 54.3%,而

TAI与 2D/3D 钝化器件分别保持 65.0%和 71.5%。这表明,2D/3D 与稳定自由基协同钝化显著提升了器件的抗湿热稳定性与电荷输运稳定性。

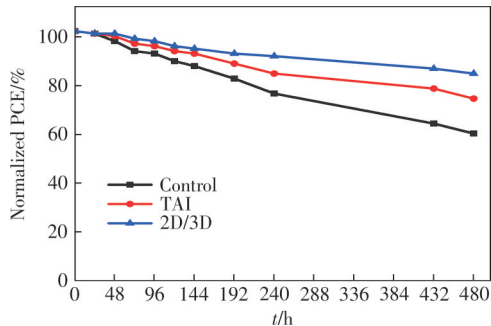


图 13 异质结钝化的器件 20 天稳定性

Fig.13 Stability of heterojunction-passivated devices over 20 days

4 结 论

通过在 3D 钙钛矿薄膜表面引入 2D 层与稳定自由基的协同钝化策略,本研究验证了协同钝化机制的有效性。具体而言,薄膜形貌显著优化,粗糙度由约 9.6 nm 降至 6.2 nm,晶界缺陷减少;载流子寿命显著延长,复合电阻 R_{rec} 显著提升,陷阱密度显著降低。基于该策略的器件最高光电转换效率达到了 21.15%,同时在湿热环境下 20 天后仍保留初始效率的 71.5%。这些结果表明,通过 2D/3D

异质结构钝化与稳定自由基组合,可同时提升器件效率与长期稳定性。本研究为稳定、高效的钙钛矿太阳能电池实现提供了一条可行的路径。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250233>

参 考 文 献:

- [1] National Renewable Energy Laboratory. Best research-cell efficiency chart [R]. Golden: NREL, 2024.
- [2] MAZUMDAR S, ZHAO Y, ZHANG X. Stability of perovskite solar cells: degradation mechanisms and remedies [J]. *Front. Electron.*, 2021, 2: 712785.
- [3] 何睿夫,周非凡,屈军乐,等. 金属有机框架材料在有机钙钛矿太阳能电池中的应用进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42(11): 1722-1738.
HE R F, ZHOU F F, QU J L, *et al.* Research progress of metal-organic frameworks in organic perovskite solar cells [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(11): 1722-1738. (in Chinese)
- [4] 汪海俊,王进,吕俊,等. 真空热蒸发 LiF 钝化策略制备高效稳定的钙钛矿太阳能电池 [J]. *发光学报*, 2025, 46(11): 2055-2062.
WANG H J, WANG J, LYU J, *et al.* Fabrication of highly efficient and stable perovskite solar cells by vacuum thermal evaporation of LiF passivating interface [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(11): 2055-2062. (in Chinese)
- [5] 文超,陈茜羽,卢颖婕,等. 双分子钝化埋底界面制备高效钙钛矿太阳能电池 [J]. *发光学报*, 2025, 46(4): 721-729.
WEN C, CHEN Q Y, LU Y J, *et al.* Bimolecularly passivated buried interface for highly efficient perovskite solar cells [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(4): 721-729. (in Chinese)
- [6] 刘晓庆,陆帅,夏梦玲. 钙钛矿材料的高能辐照稳定性及损伤机制研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(4): 642-657.
LIU X Q, LU S, XIA M L. Advances in high-energy irradiation stability and damage mechanisms of perovskite materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(4): 642-657. (in Chinese)
- [7] LIU Z, MENG K, WANG X, *et al.* In situ observation of vapor-assisted 2D-3D heterostructure formation for stable and efficient perovskite solar cells [J]. *Nano Lett.*, 2020, 20(2): 1296-1304.
- [8] SAHANI R, KUMAR N, PERINI C A R, *et al.* 2D/3D heterostructure halide perovskite thin films through an innovative spray-deposition of bulky organic cation-containing ammonium salts [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2025, 12(9): 2400823.
- [9] CHAKKAMALAYATH J, HIOTT N, KAMAT P V. How stable is the 2D/3D interface of metal halide perovskite under light and heat? [J]. *ACS Energy Lett.*, 2023, 8(1): 169-171.
- [10] KHAWAJA K A, VIJAYARAGHAVAN S N, PENUKULA S, *et al.* Optimizing 2D passivation for enhancing performance of fully air-processed carbon electrode-based perovskite solar cells [J]. *EES Sol.*, 2025, 1(4): 620-631.
- [11] REN X F, WANG S Q, LYU W Y, *et al.* Enhancing the stability and efficiency of tin-based perovskite solar cells via bifunctional additive-engineered defect passivation [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2025, 17(21): 31051-31063.
- [12] YANG Z C, WEI J, LIU Y, *et al.* Radical p-doping spiro-OMeTAD for efficient, stable and self-healing flexible perovskite solar cells [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37: 2417404.
- [13] ZHANG M, LYU M Q, YU H, *et al.* Stable and low-cost mesoscopic CH₃NH₃PbI₂Br perovskite solar cells by using a thin poly(3-hexylthiophene) layer as a hole transporter [J]. *Chem. -Eur. J.*, 2015, 21(1): 434-439.
- [14] JI C, LIANG C J, SONG Q, *et al.* Interface engineering of 2D/3D perovskite heterojunction improves photovoltaic efficiency and stability [J]. *Sol. RRL*, 2021, 5(5): 2100072.
- [15] DE HOLANDA M S, SZOSTAK R, MARCHEZI P E, *et al.* In situ 2D perovskite formation and the impact of the 2D/3D structures on performance and stability of perovskite solar cells [J]. *Sol. RRL*, 2019, 3(9): 1900199.



周炫(1983-),男,湖南永州人,博士,讲师,2018年于中国香港浸会大学获得博士学位,主要从事新能源材料与器件、显微视觉检测与控制的研究。

E-mail: xzhou@aliyun.com