

KF界面修饰实现高性能的全无机CsPbI₂Br钙钛矿太阳能电池

王志, 陈穗, 曹锦奕, 周依帆, 胡延强*

南通大学化学化工学院, 江苏 南通

收稿日期: 2023年8月23日; 录用日期: 2023年11月10日; 发布日期: 2023年11月20日

摘要

基于SnO₂电子传输层的全无机CsPbI₂Br钙钛矿太阳能电池由于其简单的器件结构、廉价的制备工艺和优异的热稳定性而被认为是极具潜力的新一代光伏器件。然而, SnO₂电子传输层表面存在的大量氧空位缺陷严重损害了CsPbI₂Br器件的光电转换效率和长期稳定性。本文通过在SnO₂/CsPbI₂Br钙钛矿埋底界面处引入KF修饰层, 成功实现了高性能的全无机CsPbI₂Br电池。研究表明, KF界面修饰不仅有利于钝化SnO₂薄膜表面的氧空位缺陷, 改善界面载流子传输性能, 而且还能显著改善上层CsPbI₂Br的成膜质量和结构稳定性。最终, 基于KF界面修饰CsPbI₂Br器件的效率由初始的12.75%提升到了16.10%, 同时表现出了优异的储存稳定性和热稳定性。

关键词

钙钛矿太阳能电池, CsPbI₂Br, SnO₂电子传输层, KF, 界面钝化

High-Performance All-Inorganic CsPbI₂Br Perovskite Solar Cells via KF Interface Modification

Zhi Wang, Sui Chen, Jinyi Cao, Yifan Zhou, Yanqiang Hu*

College of Chemistry and Chemical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu

Received: Aug. 23rd, 2023; accepted: Nov. 10th, 2023; published: Nov. 20th, 2023

Abstract

All-inorganic CsPbI₂Br perovskite solar cells (PSCs) based on SnO₂ electron transport layers (ETLs)
*通讯作者。

文章引用: 王志, 陈穗, 曹锦奕, 周依帆, 胡延强. KF 界面修饰实现高性能的全无机 CsPbI₂Br 钙钛矿太阳能电池[J]. 物理化学进展, 2023, 12(4): 332-340. DOI: 10.12677/japc.2023.124033

are considered a promising new generation of photovoltaic devices due to their simple device structure, inexpensive preparation process, and excellent thermal stability. However, the large number of oxygen vacancy defects on the surface of the SnO_2 ETL seriously damages the power conversion efficiency (PCE) and long-term stability of CsPbI_2Br -based devices. In this paper, a high-performance all-inorganic CsPbI_2Br PSC was successfully realized by introducing a KF modification layer at the buried interface of $\text{SnO}_2/\text{CsPbI}_2\text{Br}$. The results show that the KF interfacial modification not only facilitates the passivation of the oxygen vacancy defects on the surface of SnO_2 film and improves the interfacial carrier transport performance, but also significantly improves the film-forming quality and structural stability of the upper CsPbI_2Br film. Ultimately, the efficiency of CsPbI_2Br PSCs based on the KF-modified SnO_2 ETL was enhanced from the initial 12.75% to 16.10%, along with excellent storage stability and thermal stability.

Keywords

Perovskite Solar Cells, CsPbI_2Br , SnO_2 Electron Transport Layer, KF, Interface Passivation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

有机-无机杂化铅卤钙钛矿材料凭借自身优异的光电性能和低廉的溶液化制备工艺,在光伏领域引起极大的研究热潮[1] [2] [3]。经过十多年的发展,钙钛矿太阳能电池(PSC)的光电转换效率(PCE)已从最初的 3.8% 飙升至最新认证的 26.1%,效率上与多晶硅(p-Si)、碲化镉(CdTe)等市场化的光伏器件相当[4]。然而,PSC 在产业道路上仍然存在许多障碍,其中之一就是有机成分在潮湿、高温和光照下的稳定性问题[5] [6]。在提升 PSCs 稳定性的各种策略中,使用全无机的铯铅卤化物钙钛矿(CsPbX_3 , $X = \text{I}, \text{Br}$ 中的一种或两种混合)替代有机-无机杂化钙钛矿材料作为 PSC 中的光吸收层薄膜被认为是可行且有效的解决方法之一[7]。例如,带隙为 1.73 eV 的立方相 α - CsPbI_3 材料凭借其高电荷载流子迁移率,同样也被认为是理想的光吸收层材料。然而,亚稳结构的 α - CsPbI_3 在室温下会自发转换为带隙为 2.82 eV 的光惰性 δ - CsPbI_3 ,从而导致器件光伏性能的快速恶化[8]。相反, CsPbBr_3 材料虽然在室温下具有优异的稳定性,但其带隙为 2.30 eV,因此不能单独用于制备高效率的光伏器件[9]。相比之下,具有 1.91 eV 带隙的混合卤素 CsPbI_2Br 材料则凭借其优异的热稳定性和光稳定性引起了科研人员的广泛关注[10] [11]。

除了光吸收层材料的固有特性外,载流子传输层及其与钙钛矿间的接触界面同样对器件的光伏性能发挥着至关重要的作用[12] [13] [14] [15]。例如,在具有高成本效益的 SnO_2 电子传输层平面 PSC 中,通过常规溶液法制备的低温 SnO_2 电子传输层表面常常存在大量的氧空位缺陷。研究发现,这些表面氧空位不仅会成为界面载流子非辐射复合位点而造成额外的能量损耗,更为重要的是,还会捕捉空气中的水氧,从而加速上层钙钛矿结构的降解,损害器件的效率和长期稳定性[12]。此外,作为钙钛矿结晶和生长过程中重要的接触界面, SnO_2 薄膜的表面特性也会直接影响到上层钙钛矿晶体的结晶质量和表面形貌[16] [17]。因此,采取适当的电子传输层处理策略来改善 SnO_2 薄膜表面属性对改善 PSC 的性能尤为重要。

本文通过简易的 KF 界面修饰策略,成功制备出了高效稳定的全无机 CsPbI_2Br 钙钛矿太阳能电池。通过系统的表征分析发现,KF 中的 F 离子可以与 SnO_2 表面的 Sn 悬挂键形成稳定的相互作用,从而有效钝化表面氧空位缺陷,改善界面载流子传输层性能; K^+ 离子则有利于优化上层 CsPbI_2Br 薄膜的结晶质

量和结构稳定性, 从而获得光电性能优异的高质量 CsPbI₂Br 光吸收层薄膜。最终, 经由 KF 修饰 SnO₂ 电子传输层的器件获得了 16.10% 的最高效率, 远高于未处理的器件(12.75%)。与此同时, 优化器件的储存稳定性和热稳定性也得到了显著改善。

2. 实验

2.1. 实验材料及试剂

FTO 导电玻璃衬底(15 Ω·m⁻²)、乙醇、丙酮、异丙醇、乙腈(CAN, 99.8%)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF, 分析纯)、碘化铯(CsI, 99.99%)、溴化铅(PbBr₂, 99.99%)、碘化铅(PbI₂, 99.99%)、氟化钾(KF, 99%)、双三氟甲磺酰亚胺锂(Li-TFSI, 99.5%)、4-叔丁基吡啶(TPB, 96%)、2,2',7,7'-四(N,N-二对甲氧基苯胺)-9,9'-螺二芴(Spiro-OMeTAD, 99.8%)、商用氧化锡(IV)水溶液(15%胶体分散液)、金颗粒(99.999%)。

2.2. 钙钛矿太阳能电池的制备

2.2.1. 衬底清洁

使用去离子水、乙醇、丙酮和异丙醇依次超声清洗 FTO 导电玻璃衬底 30 分钟, 用氮气枪吹干备用。

2.2.2. 电子传输层的制备

将商用氧化锡(IV)水溶液用去离子水按照体积比稀释至 2.5% 得到 SnO₂ 前驱液。KF 水溶液分别由 0.5 mg、1.0 mg 以及 1.5 mg 质量的 KF 粉末溶解在 1 mL 去离子水中制得。首先, 将清洁干净的 FTO 导电衬底紫外臭氧处理 60 min。用移液枪吸取 100 μL 的 SnO₂ 前驱液滴加在 FTO 衬底表面, 以旋涂速度 3000 r/min、旋涂加速度 1500 r/(min·s) 旋涂 20 s。然后, 将 FTO 衬底置于 150℃ 的加热板上退火处理 30 min 即可得到 SnO₂ 电子传输层。对于 KF 界面修饰的 SnO₂ 电子传输层, 即在制备的 SnO₂ 电子传输层上继续滴加不同浓度的 75 μL KF 水溶液, 以旋涂速度 2000 r/min、旋涂加速度 1000 r/(min·s) 旋涂 20 s。最后, 将衬底置于 100℃ 的加热板上退火处理 5 min 即可。

2.2.3. 钙钛矿光吸收层的制备

将 PbBr₂、PbI₂ 和 CsI 以 1:1:2 的摩尔比溶解在 1 mL 的 DMF 中配制 0.8 M 的 CsPbI₂Br 前驱液。然后, 用移液枪吸取 100 μL 的 CsPbI₂Br 前驱液滴加在上述 SnO₂ 电子传输层表面, 以旋涂速度 3000 r/min、旋涂加速度 1500 r/(min·s) 旋涂 30 s。随后, 将 CsPbI₂Br 前驱体湿膜在空气中放置 5 min, 最后转移至 180℃ 的加热板上退火 2 min 即得到 CsPbI₂Br 钙钛矿薄膜。

2.2.4. 空穴传输层的制备

空穴传输层前驱液则是将 0.167 g Spiro OMeTAD 溶解在 1 mL 的氯苯中, 同时添加 0.0298 g 的 TBP、0.0103 g 的 Li-TFSI 作为添加剂得到。然后, 用移液枪吸取 50 μL 的前驱液滴加在 CsPbI₂Br 钙钛矿薄膜表面, 以旋涂速度 3000 r/min、旋涂加速度 1500 r/(min·s) 旋涂 30 s 即可。

2.2.5. 金电极的制备

将上述衬底放入真空镀膜机中, 在(3 × 10⁻⁴) Pa 的真空度下, 以 1.5 Å/s 的速度在衬底顶部沉积 100 nm 厚度的金, 作为对电极。

2.3. 表征测试

用 Bruker D8 衍射仪的 Cu Kα 辐射(λ = 1.5406 Å)测试钙钛矿薄膜的 X 射线衍射(XRD)图谱。使用 Bruker Vertex 80v 傅立叶变换红外光谱仪测量 FTIR 光谱。通过场发射扫描电子显微镜(FE-SEM; Quanta 250FEG)表征钙钛矿薄膜的表面形貌。用 UV-vis-NIR 分光光度计(UV-3600, 岛津)测量钙钛矿薄膜的吸收

光谱。使用 PHI5000VERSA PROBE II 仪器进行紫外线光电子能谱(UPS)测试。在标准 AM 1.5 阳光(100 mW/cm², WXS-90L2, Wacom)下测量所制备的电池器件电流密度 - 电压特性曲线。

3. 结果与讨论

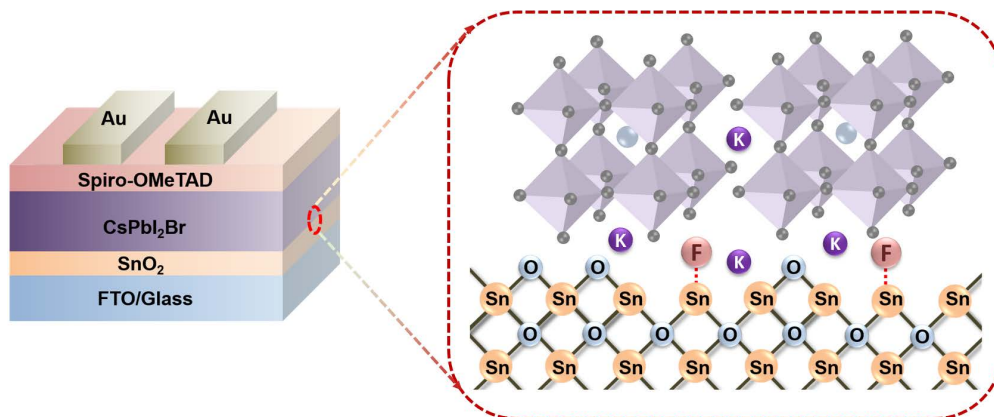


Figure 1. Schematic diagram of CsPbI₂Br PSCs and KF interface passivation mechanism

图 1. CsPbI₂Br 钙钛矿太阳能电池结构及 KF 界面钝化的机理示意图

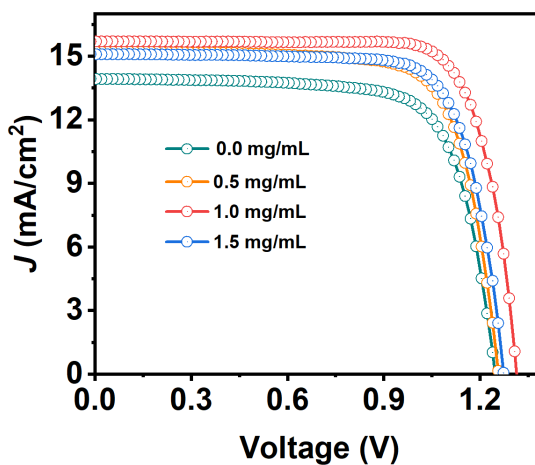


Figure 2. *I-V* curves of PSCs prepared by modifying SnO₂ with different concentrations of KF

图 2. 不同浓度 KF 修饰 SnO₂ 制备电池的 *I-V* 曲线

Table 1. Photovoltaic performance parameters of SnO₂ modified with different concentrations of KF

表 1. 不同浓度 KF 修饰 SnO₂ 制备电池的光伏性能参数

KF 浓度	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
0.0 mg/mL	1.24	13.93	73.81	12.75
0.5 mg/mL	1.26	15.22	74.67	14.32
1.0 mg/mL	1.31	15.69	78.33	16.10
1.5 mg/mL	1.28	15.10	75.53	14.60

本研究中所制备的 CsPbI₂Br 钙钛矿太阳能电池结构如图 1 所示。以往的研究表明, 强电负性的 F⁻ 离子可以与 SnO₂ 表面未配位的 Sn 原子形成稳定相互作用, 进而有效钝化 SnO₂ 电子传输层表面的氧空位

缺陷[18]。此外, K^+ 离子还可以通过扩散的方式进入上层 $CsPbI_2Br$ 前驱体薄膜, 从而改善光吸收层的成膜质量和结构稳定性[19]。因此, 通过使用 KF 作为 $SnO_2/CsPbI_2Br$ 界面修饰剂, 预期可以同时发挥这两种阴阳离子的协同作用, 进而实现高性能的 $CsPbI_2Br$ 钙钛矿太阳能电池。为了研究 KF 界面修饰策略对器件光伏性能的影响, 我们首先测试了不同浓度 KF 界面修饰 $CsPbI_2Br$ 器件的电流密度 - 电压(I - V)曲线, 如图 2 所示。表 1 则进一步列出了不同电池器件的具体光伏性能参数。可以看到, 当 KF 的浓度为 1.0 mg/mL 时, 器件的性能最优, 相应电池的光电转换效率达到了 16.10% , 开路电压 V_{oc} 为 1.31 V , 短路电流密度 J_{sc} 为 15.69 mA/cm^2 , 填充因子 FF 为 78.33% , 显著高于未处理器件 12.75% 的转换效率(开路电压 V_{oc} 为 1.24 V 、短路电流密度 J_{sc} 为 13.93 mA/cm^2 、填充因子 FF 为 73.81%)。而随着 KF 浓度进一步提升到 1.5 mg/mL 时, 器件的各项光伏参数均发生下降。这可能是由于界面处较大浓度的 KF 导致钙钛矿晶体的随机取向加剧, 进而阻碍了界面载流子的传输效率[20]。

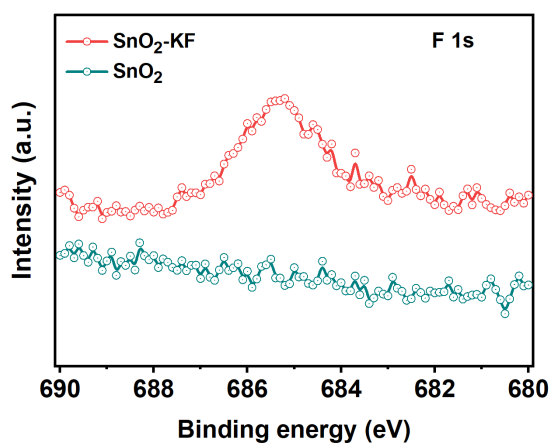


Figure 3. F 1s XPS spectra of different SnO_2 substrates

图 3. 不同 SnO_2 基底 F 1s 的 XPS 光谱

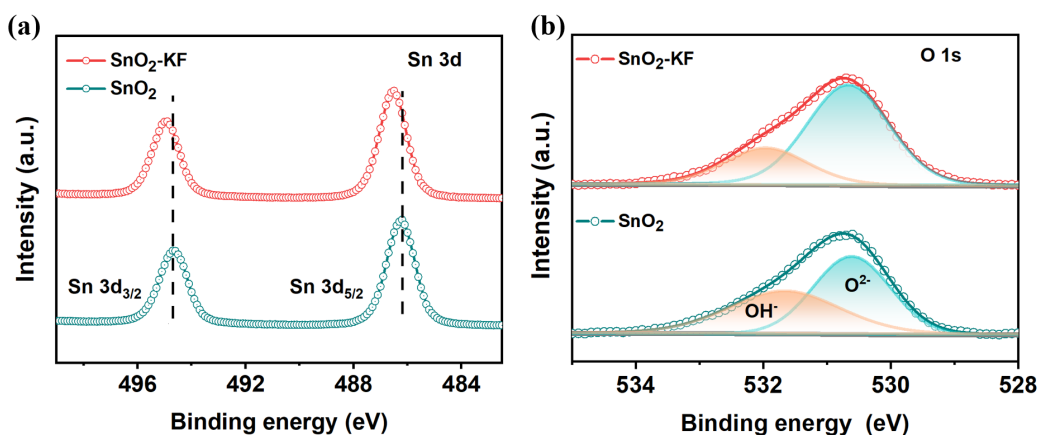


Figure 4. (a) Sn 3d and (b) O 1s XPS spectra of different SnO_2 substrate

图 4. 不同 SnO_2 基底(a) Sn 3d 和(b) O 1s 的 XPS 光谱

为了阐明 KF 对器件性能提升的内在机制, 我们利用 XPS 测试了 KF 修饰前后 SnO_2 表面化学状态的变化。通过图 3 所展示 F 1s XPS 光谱, 可以证实经由 KF 修饰的 SnO_2 薄膜表面的确存在 F 原子。此外, 由 KF 修饰 SnO_2 薄膜中 Sn 3d 的主峰也由初始的 494.68 eV 、 486.26 eV 向高结合能方向分别移动到了 494.98 eV 和 486.56 eV (图 4(a)), 这表明 Sn 原子周围的电子云密度发生了变化。这是由于强电负性的 F

离子与表面 Sn 悬挂键形成稳定的化学作用, 从而导致 Sn 3d 轨道电子的结合能升高[18]。图 4(b)通过展示了不同 SnO₂ 薄膜的 O 1s XPS 光谱以研究 KF 修饰对 SnO₂ 表面氧空位的影响。根据之前的报告, SnO₂ 薄膜中的 O 1s 可以进一步解析为晶格氧(O²⁻)和由氧空位造成的化学吸附羟基(OH⁻)中的氧, 并且可通过对应的峰位面积来定性反映不同化学状态氧的含量比例[21]。可以看到, 经由 KF 修饰 SnO₂ 薄膜中的羟基氧比例显著降低, 即 KF 可以有效降低 SnO₂ 表面的氧空位缺陷, 从而改善 SnO₂/钙钛矿界面处的载流子输运性能, 进而提升器件的光伏性能。

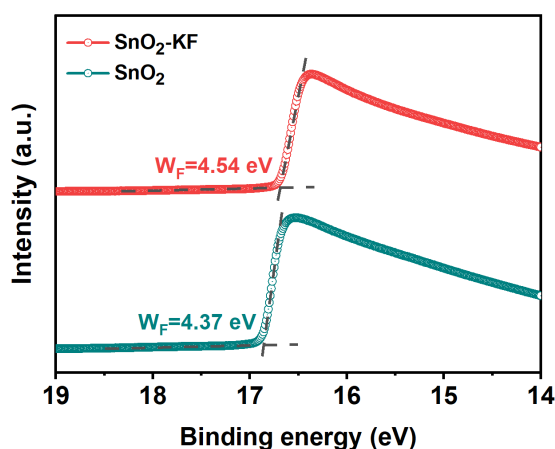


Figure 5. UPS spectra of different SnO₂ substrate
图 5. 不同 SnO₂ 基底的 UPS 能谱

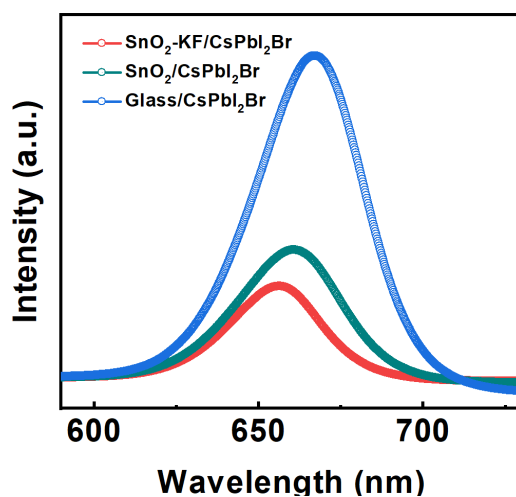


Figure 6. PL spectrum of CsPbI₂Br deposited on different substrates

图 6. 沉积在不同基底上 CsPbI₂Br 的 PL 光谱

为了进一步研究 KF 界面修饰对载流子输运性能的影响, 我们通过紫外电子光谱(UPS)研究了不同 SnO₂ 薄膜的表面功函数(W_F), 如图 5 所示。由于 F 离子的掺杂效应[16], 经由 KF 修饰 SnO₂ 电子传输层的 W_F 由初始的 4.37 eV 上升到了 4.54 eV。电子传输层表面功函数的提升有利于界面载流子获得更大的传输驱动力, 从而提升界面载流子的传输效率[18]。另一方面, 根据图 6 所展示的沉积在不同基底上 CsPbI₂Br 的 PL 光谱也可以看出, 相对于未处理的 SnO₂, 沉积在 KF-SnO₂ 衬底 CsPbI₂Br 的 PL 强度下降, 这表明此时 CsPbI₂Br 与下层电子传输层间具有更高的载流子传输效率[22]。

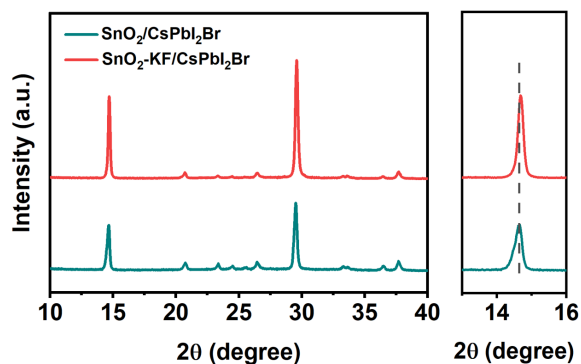


Figure 7. XRD patterns of CsPbI₂Br deposited on different SnO₂ substrates

图 7. 沉积在不同 SnO₂ 基底上 CsPbI₂Br 的 XRD 图谱

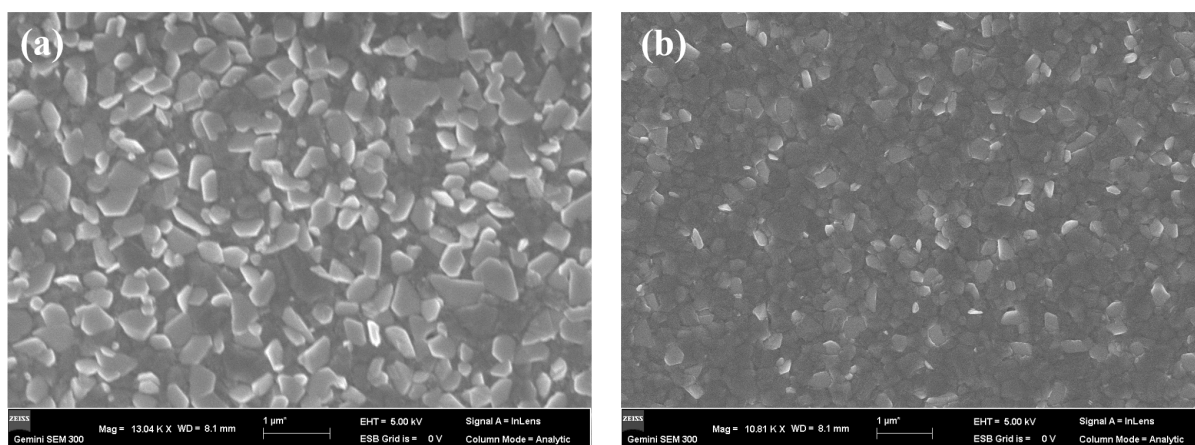


Figure 8. Surface SEM images of CsPbI₂Br deposited on different SnO₂ substrates

图 8. 沉积在不同 SnO₂ 基底上 CsPbI₂Br 的表面 SEM 图像

通过上述系列表征及分析结果,我们证实了 KF 界面修饰对 SnO₂ 电子传输层表面化学状态及载流子传输性能的积极影响。为了进一步研究其对上层钙钛矿光吸收层晶相结构和表面形貌的影响,我们分别测试了在不同基底上所制备钙钛矿薄膜的 X 射线衍射(XRD)图谱和扫描电子显微镜(SEM)图像。图 7 展示了不同钙钛矿薄膜的 XRD 图谱。可以看到不同基底上沉积的 CsPbI₂Br 薄膜都出现了相同的衍射峰,这表明 KF 不会影响上层钙钛矿薄膜的晶体结构。通过仔细对比 XRD 结果后发现,沉积在 KF 修饰 SnO₂ 衬底上的 CsPbI₂Br 薄膜具有更高峰度的特征衍射峰,这表明所制备的 CsPbI₂Br 薄膜具有更高的结晶质量。此外,略微蓝移的特征峰位也证实了 K⁺离子进入 CsPbI₂Br 所导致的晶格参数变化。已有研究表明, K⁺离子的掺杂有利于提升 CsPbI₂Br 薄膜在室温环境下的结构稳定性,从而显著改善相应电池器件的长期稳定性[19] [22]。图 8 进一步展示了不同钙钛矿薄膜的表面形貌 SEM 图像。沉积在 KF 修饰 SnO₂ 衬底的 CsPbI₂Br 薄膜具有更加平整致密的表面形貌,因而有利于提升钙钛矿与上层空穴传输层间的载流子传输性能。

除了器件的效率外,稳定性也是决定钙钛矿太阳能电池能否产业应用的关键因素。为了研究 KF 对器件稳定性的影响,我们将器件储存于室温、黑暗、相对湿度为 20%~25%的氮气氛围中监测其效率随时间的变化(图 9)。可以看到,经由 KF 修饰的器件在储存 1000 小时后仍能维持 90%以上的初始效率,而未处理器件的效率则显著降低。此外,我们也测试了不同器件在 45 摄氏度持续加热下的稳定性。如图 10 所示,经由 KF 修饰的器件同样表现出了显著提升的热稳定性。基于上述系列的测试表征结果,我们认为 KF 界面修饰对 CsPbI₂Br 器件稳定性的显著提升主要来源于 F⁻离子对 SnO₂ 表面氧空位缺陷的有

效钝化、K⁺离子掺杂对 CsPbI₂Br 成膜质量的改善和结构稳定性的提升。因此，KF 界面修饰是一种实现高性能全无机 CsPbI₂Br 钙钛矿太阳能电池的简便且有效策略。

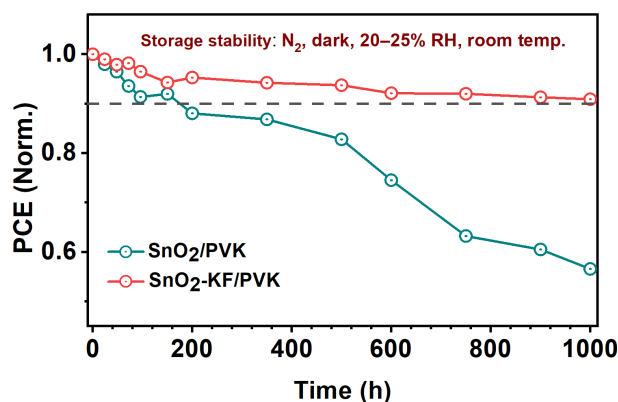


Figure 9. Storage stability testing of unencapsulated devices
图 9. 未封装电池器件的储存稳定性测试

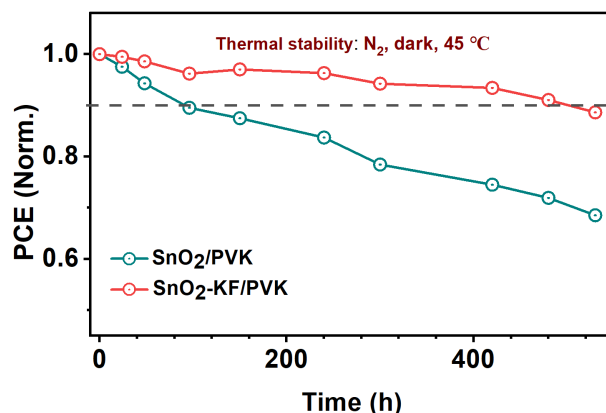


Figure 10. Thermal stability testing of unencapsulated devices
图 10. 未封装电池器件的热稳定性测试

4. 结论

本文通过在 SnO₂/钙钛矿埋底界面处引入 KF 修饰层，不仅可以钝化 SnO₂ 表面氧空位缺陷以提升界面载流子传输，而且还能有效改善上层钙钛矿薄膜的结晶质量和结构稳定性，从而实现高效稳定的全无机 CsPbI₂Br 钙钛矿太阳能电池。最终，基于 KF 修饰的全无机 CsPbI₂Br 钙钛矿太阳能电池获得了 16.10% 的最佳效率，同时也表现出了更加优异的储存稳定性和热稳定性。

基金项目

国家自然科学基金项目(No. 22075152)。

参考文献

- [1] Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y. and Miyasaka, T. (2009) Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. *Journal of the American Chemical Society*, **131**, 6050-6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>
- [2] Park, N.G. and Zhu, K. (2020) Scalable Fabrication and Coating Methods for Perovskite Solar Cells and Solar Modules. *Nature Reviews Materials*, **5**, 333-350. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0176-2>

- [3] Li, C., Wang, X., Bi, E., Jiang, F., Park, S. M., Li, Y., Chen, L., Wang, Z., Zeng, L. and Chen, H. (2023) Rational Design of Lewis Base Molecules for Stable and Efficient Inverted Perovskite Solar Cells. *Science*, **379**, 690-694. <https://doi.org/10.1126/science.ade3970>
- [4] National Renewable Energy Laboratory (2023) Best Research-Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [5] Boyd, C.C., Cheacharoen, R., Leijtens, T. and McGehee, M.D. (2018) Understanding Degradation Mechanisms and Improving Stability of Perovskite Photovoltaics. *Chemical Reviews*, **119**, 3418-3451. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00336>
- [6] Wang, R., Mujahid, M., Duan, Y., Wang, Z.K., Xue, J. and Yang, Y. (2019) A Review of Perovskites Solar Cell Stability. *Advanced Functional Materials*, **29**, Article ID: 1808843. <https://doi.org/10.1002/adfm.201808843>
- [7] Yang, S., Duan, Y., Liu, Z. and Liu, S. (2022) Recent Advances in CsPbX₃ Perovskite Solar Cells: Focus on Crystallization Characteristics and Controlling Strategies. *Advanced Energy Materials*, **13**, Article ID: 2201733. <https://doi.org/10.1002/aenm.202201733>
- [8] Liu, D., Shao, Z., Li, C., Pang, S., Yan, Y. and Cui, G. (2021) Structural Properties and Stability of Inorganic CsPbI₃ Perovskites. *Small Structures*, **2**, Article ID: 2000089. <https://doi.org/10.1002/ssstr.202000089>
- [9] Zhou, Q., Duan, J., Du, J., Guo, Q., Zhang, Q., Yang, X., Duan, Y. and Tang, Q. (2021) Tailored Lattice "Tape" to Confine Tensile Interface for 11.08%-Efficiency All-Inorganic CsPbBr₃ Perovskite Solar Cell with an Ultrahigh Voltage of 1.702 V. *Advanced Science*, **8**, Article ID: 2101418. <https://doi.org/10.1002/advs.202101418>
- [10] Song, J., Xie, H., Lim, E.L., Hagfeldt, A. and Bi, D. (2022) Progress and Perspective on Inorganic CsPbI₂Br Perovskite Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, **12**, Article ID: 2201854. <https://doi.org/10.1002/aenm.202201854>
- [11] Ding, Y., Guo, Q., Geng, Y., Dai, Z., Wang, Z., Chen, Z., Guo, Q., Zheng, Z., Li, Y. and Zhou, E. (2022) A Low-Cost Hole Transport Layer Enables CsPbI₂Br Single-Junction and Tandem Perovskite Solar Cells with Record Efficiencies of 17.8% and 21.4%. *Nano Today*, **46**, Article ID: 101586. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2022.101586>
- [12] 汪志鹏, 李瑞, 张梅, 郭敏, SnO₂ 基钙钛矿太阳能电池界面调控与性能优化[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(2): 263-277.
- [13] Chen, S., Dai, X., Xu, S., Jiao, H., Zhao, L. and Huang, J. (2021) Stabilizing Perovskite-Substrate Interfaces for High-Performance Perovskite Modules. *Science*, **373**, 902-907. <https://doi.org/10.1126/science.abi6323>
- [14] Min, H., Lee, D.Y., Kim, J., Kim, G., Lee, K.S., Kim, J., Paik, M.J., Kim, Y.K., Kim, K.S. and Kim, M.G. (2021) Perovskite Solar Cells with Atomically Coherent Interlayers on SnO₂ Electrodes. *Nature*, **598**, 444-450. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03964-8>
- [15] Hu, Y., Xu, Z., Wang, Z., Zhou, Y., Song, W., Gao, Y., Sun, G., Sun, T., Zhang, S. and Tang, Y. (2023) Multifunctional Anthraquinone-Sulfonic Potassium Salts Passivate the Buried Interface for Efficient and Stable Planar Perovskite Solar Cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **25**, 8403-8411. <https://doi.org/10.1039/D3CP00514C>
- [16] Yang, D., Yang, R., Wang, K., Wu, C., Zhu, X., Feng, J., Ren, X., Fang, G., Priya, S. and Liu, S. (2018) High Efficiency Planar-Type Perovskite Solar Cells with Negligible Hysteresis Using EDTA-Complexed SnO₂. *Nature Communications*, **9**, Article 3239. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05760-x>
- [17] Wang, P., Chen, B., Li, R., Wang, S., Ren, N., Li, Y., Mazumdar, S., Shi, B., Zhao, Y. and Zhang, X. (2021) Cobalt Chloride Hexahydrate Assisted in Reducing Energy Loss in Perovskite Solar Cells with Record Open-Circuit Voltage of 1.20 V. *ACS Energy Letters*, **6**, 2121-2128. <https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.1c00443>
- [18] Jung, E.H., Chen, B., Bertens, K., Vafaie, M., Teale, S., Proppe, A., Hou, Y., Zhu, T., Zheng, C. and Sargent, E.H. (2020) Bifunctional Surface Engineering on SnO₂ Reduces Energy Loss in Perovskite Solar Cells. *ACS Energy Letters*, **5**, 2796-2801. <https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.0c01566>
- [19] Nam, J.K., Chai, S.U., Cha, W., Choi, Y.J., Kim, W., Jung, M.S., Kwon, J., Kim, D. and Park, J.H. (2017) Potassium Incorporation for Enhanced Performance and Stability of Fully Inorganic Cesium Lead Halide Perovskite Solar Cells. *Nano Letters*, **17**, 2028-2033. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00050>
- [20] Zhao, X., Liu, T., Kaplan, A.B., Yao, C. and Loo, Y.L. (2020) Accessing Highly Oriented Two-Dimensional Perovskite Films via Solvent-Vapor Annealing for Efficient and Stable Solar Cells. *Nano Letters*, **20**, 8880-8889. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c03914>
- [21] Boehm, H. (1971) Acidic and Basic Properties of Hydroxylated Metal Oxide Surfaces. *Discussions of the Faraday Society*, **52**, 264-275. <https://doi.org/10.1039/d1f9715200264>
- [22] Hu, Y., Cai, L., Xu, Z., Wang, Z., Zhou, Y., Sun, G., Sun, T., Qi, Y., Zhang, S. and Tang, Y. (2023) High-Efficiency CsPbI₂Br Perovskite Solar Cells with over 83% Fill Factor by Synergistic Effects of a Multifunctional Additive. *Inorganic Chemistry*, **62**, 5408-5414. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c04316>