



多功能钾盐调控 SnO_2 /钙钛矿埋底界面实现 高效稳定钙钛矿太阳能电池

邱熙杰, 罗文强, 吴华林*
(广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州 510006)

摘要: 目前, 钙钛矿太阳能电池是能源领域中的新兴产业, 其在飞速发展的同时遇到了瓶颈, 如层状三明治结构导致严重的界面问题。因此, 提高界面传输特性是提高钙钛矿太阳能电池稳定性及光电转换效率(PCE)的关键步骤。界面修饰或界面钝化是实现高质量界面电荷传输的一种简单、高效的手段。由于柠檬酸钾(PC)具有多钝化点位, 其作为一种高效、简单的多功能小分子被引入到正置钙钛矿太阳能电池电子传输层二氧化锡(SnO_2)/钙钛矿界面中, 以优化电池中存在的界面问题。PC的引入不仅与电子传输层 SnO_2 表面有害的羟基发生反应以预防水分入侵, 还能与钙钛矿层下表面作为深能级缺陷及非辐射复合中心的游离铅离子配位, 有效减少薄膜的缺陷态密度, 抑制不理想非辐射复合, 提高薄膜结晶质量。迟滞效应与太阳能电池的光电转换性能有关, 其会导致电池在不同光照条件下的性能表现不同。钾离子的引入可大幅降低器件的迟滞效应, 提高电池运行的复现性。基于PC对埋底界面的修饰, 正置钙钛矿太阳能电池的光电转换效率从初始的21.33%提高到了24.29%。除此以外, 相比原始组不足300 h的湿度稳定性, 目标组未封装器件在50%±5%的湿度环境下老化675 h后仍保持81%的初始效率。多功能钾盐调控 SnO_2 /钙钛矿埋底界面, 为高效稳定钙钛矿太阳能电池的开发提供了理论基础。

关键词: 钙钛矿太阳能电池; 缺陷态; 钝化; 柠檬酸钾; 埋底界面; SnO_2 ; 光电转换效率; 湿度稳定性

中图分类号: TB383.2; TM912

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2025)02-0335-06

引文格式: 邱熙杰, 罗文强, 吴华林. 多功能钾盐调控 SnO_2 /钙钛矿埋底界面实现高效稳定钙钛矿太阳能电池[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(2): 335-340.

Qiu Xijie, LUO Wenqiang, WU Hualin. Multifunctional Potassium Salt Regulation of SnO_2 /Perovskite Buried Bottom Interface to Achieve Efficient and Stable Perovskite Solar Cells[J]. Materials Research and Application, 2025, 19(2): 335-340.

0 引言

钙钛矿太阳能电池(PSCs)因优异的光电特性, 开创了太阳能电池研究的新时代。到目前为止, 钙钛矿太阳能电池的光电转换效率(PCE)已经达到了26.1%, 表现出了巨大的商业化潜力及应用前景。然而, PSCs在大气环境下的运行稳定性无法满足商业化的要求。在溶液化制备钙钛矿的高温退火和快速结晶过程中, 薄膜表面以及体内会不可避免地产生大量本征缺陷, 如反位缺陷(MA_{Pb} 、 MA_{I} 、 Pb_{MA} 、 I_{MA} 和 I_{Pb})、间隙缺陷(MA_{i} 、 Pb_{i} 和 I_{i})和空位(V_{MA} 、 V_{Pb} 和 V_{I}), 这些缺陷被认为是造成电池运行不稳定的主要原因之一^[1-3]。钙钛矿是耐缺陷材料, 即使是浅缺陷

也可以导致非辐射复合, 降低器件性能。对稳定性更致命的是, 缺陷有助于离子迁移, 这意味着缺陷迁移、积累和传播将导致不可逆的降解^[4-5]。

对于高效率的PSCs来说, 电荷传输层是不可或缺。电荷传输层材料或者钙钛矿-电荷传输层界面的任何物理或化学变化, 都会影响PSCs的长期稳定性^[6]。二氧化锡具有快速的电子迁移率、良好的能带排列及低温制备, 被认为是平面PSCs的理想电子传输层材料^[7-9]。然而, 二氧化锡的缺陷密度较高, 一系列的缺陷(如反位缺陷、悬挂锡离子(V_{O})、酸性羟基和碱性羟基等)将导致载流子在钙钛矿/电子传输层的界面发生严重的非辐射复

收稿日期: 2024-03-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52002084); 发光材料与器件国家重点实验室开放课题(2024-skllmd-19)。

作者简介: 邱熙杰, 硕士研究生, 研究方向为钙钛矿太阳能电池性能优化。E-mail: xejor2020@163.com。

通信作者: 吴华林, 博士, 副教授, 研究方向为高效稳定钙钛矿太阳能电池和柔性轻量化钙钛矿光伏电池。

E-mail: hualinwu@gdut.edu.cn。

合^[10-11],从而使器件稳定性脆弱。为了解决上述的问题,研究人员开发出了许多解决方法。Zhao等^[12]通过在二氧化锡胶体溶液中引入碘化铯,以钝化电子传输层中缺陷的同时诱导钙钛矿定向结晶,最终实现23.3%的PCE。Liu等^[13]使用预嵌入混合A位阳离子卤化物策略,将掩埋界面附近的残余不稳定碘化铅转化为更稳定的3D钙钛矿,从而获得了24.26%的PCE,稳定性得到显著提高。但令人遗憾的是,上述策略只解决了ETL层或者钙钛矿埋底界面其中之一的燃眉之急,因此发展一种能够同时钝化电子传输层缺陷以及钙钛矿下表面缺陷的策略,是制备高效率稳定钙钛矿太阳能电池的关键。

本研究以柠檬酸钾(Potassium citrate, PC)作为一种简单且高效的小分子被引入到二氧化锡/钙钛矿表面,以实现同步钝化电子传输层及钙钛矿埋底界面缺陷,提高器件效率及稳定性。由于PC中的羟基可与二氧化锡表面的有害羟基发生酸碱相互作用,而羧基可与埋底界面未配位的铅离子发生作用,从而提高了二氧化锡层对光的透过率及钙钛矿的结晶度。因此,插入PC界面的正置钙钛矿太阳能电池的PCE实现了从21.33%到24.29%的效率增长,而未封装的器件在50%±5%的湿度环境下老化675 h后仍保持81%的初始效率。

1 实验部分

1.1 化学试剂及耗材

实验以FTO玻璃为基板,其厚度为1.6 mm,薄层电阻为 $15\ \Omega\cdot\text{sq}^{-1}$ 。

实验试剂:碘化铅(PbI_2 , 99.99%)、溴化铅(PbBr_2 , 99.9%)、甲基碘化铵(MAI, 99.9%), Spiro-OMeTAD(99.8%)、FK209 Co(III)(99.9%)和4-叔丁基吡啶($t\text{-BuPy}$, 99%),购自辽宁优选新能源科技有限公司;15%的二氧化锡胶体分散体购自Alfa Aesar, 甲脒氢碘酸盐(FAI, 99.5%)购自Greatcell太阳能材料有限公司,碘化铯(CsI , 99.9%)购自Aladdin;氯苯(99.99%, 无水)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF, 大于99.9%, 无水)、二甲基亚砜(DMSO, 大于99.8%, 无水)和乙腈(ACN, 大于99.9%),购自Sigma-Aldrich;锂(三氟甲磺酰基)酰亚胺(Li-TFSI, 大于99%)购自浴日光能,柠檬酸钾(PC, 分子式 $\text{C}_6\text{H}_5\text{K}_3\text{O}_7$)购自Aladdin。

1.2 电池制备

首先,用去离子水、丙酮、乙醇和异丙醇清洁FTO玻璃基板15 min,在转速 $4\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下将去离子水稀释的二氧化锡胶体分散液(质量分数2.67%)已在已清洁的FTO玻璃基板上旋涂30 s,随

后在 $150\ ^\circ\text{C}$ 下退火30 min。然后,在转速 $3\ 000\ \text{r}\cdot\text{s}^{-1}$ 下将柠檬酸钾异丙醇溶液在二氧化锡上旋涂30 s,再在转速 $1\ 000$ 、 $5\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下将钙钛矿前驱体溶液分别旋涂10和30 s,并在旋涂结束前15 s滴加150 μL 的反溶剂氯苯,随即将制备的薄膜在 $150\ ^\circ\text{C}$ 下退火10 min。最后,在转速 $4\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下将40 μL 的Spiro-OMeTAD溶液在相应的钙钛矿薄膜上旋涂30 s。

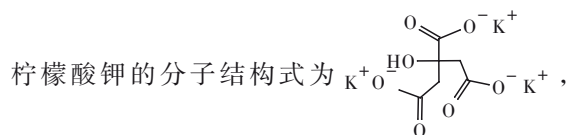
Spiro-OMeTAD溶液的制备,将90 mg的Spiro-OMeTAD溶解在1 mL氯苯中,再加入23 μL 的Li-TFSI(520 mg的Li-TFSI溶于1 mL的ACN中)和39.5 μL 的4-叔丁基吡啶,随后在低压(压强小于 $1\times 10^{-2}\ \text{Pa}$)下通过热蒸发沉积60 nm的金。其中,有效面积为 $0.045\ \text{cm}^2$,由掩模孔径限定。

1.3 材料表征仪器

通过Rigaku SmartLab获得PC界面处理的钙钛矿薄膜的XRD图谱,通过场发射扫描电子显微镜(Thermo scientific Apreo C, USA)获得PC界面处理的钙钛矿薄膜的SEM图像。使用Shimadzu UV-3600 UV-vis-NIR分光光度计,测量PC界面处理的钙钛矿薄膜的透过率。薄膜的 J - V 特性,由Keithley 2450源测量仪在太阳光照(AM 1.5G, $100\ \text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$)下使用太阳能模拟器(Newport LCS-100)测量。薄膜的稳态荧光光谱(PL),通过微拉曼光谱仪(雷尼绍)测定,其中激发激光波长为532 nm。

2 结果与讨论

2.1 浓度筛选

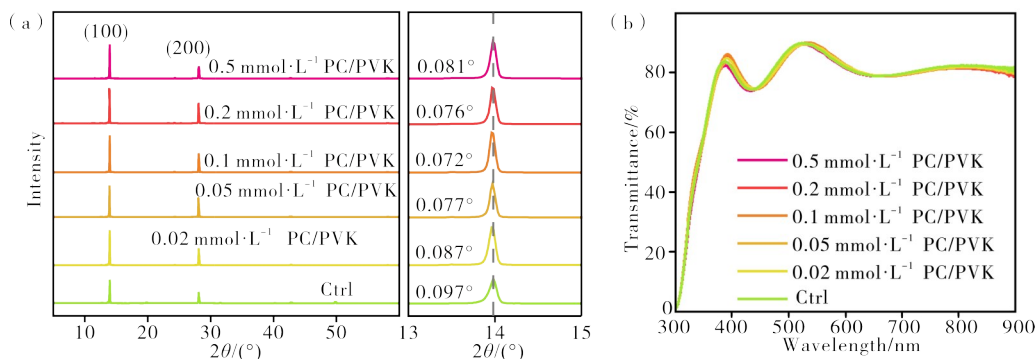


其中包含的官能团有一OH、 $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{C}-\text{O}^-$ 、 K^+ 等。其中, $\text{C}=\text{O}$ 可以与钙钛矿埋底界面的未配位铅离子发生作用^[14],从而钝化深能级缺陷,而一OH可以与电子传输层二氧化锡表面的有害羟基发生酸碱相互作用^[15], $\text{C}-\text{O}^-$ 则与其表面的悬挂 Sn^{4+} (V_O)配位^[16]。因此,柠檬酸钾的引入可大幅减少钙钛矿-电子传输层之间的非辐射复合,从而得到高质量、高效率的PSCs。此外,钾离子还可以减少器件的迟滞效应^[17]。由于柠檬酸钾具备一定的疏水特性,因此有助于提高器件在潮湿环境下的运行稳定性。

图1(a)为不同浓度的PC界面处理的钙钛矿薄膜的X-射线衍射图谱(XRD)及半峰宽分析结果。从图1(a)可见,在PC的处理下,钙钛矿薄膜的

(100)晶面强度随着浓度的上升而增强,并且在浓度 0.1 mmol·L⁻¹时达到最大值,此时半峰宽(FWHM)最小。结果表明,PC界面处理后的钙钛矿薄膜结晶性增强^[18]。随后,通过透过率来研究PC处理对二

氧化锡电子层的影响,结果如图1(b)所示。从图1(b)可见,在经浓度 0.1 mmol·mL⁻¹的PC处理后,二氧化锡薄膜的透过率有显著提高。因此,后续的表征以 0.1 mmol·mL⁻¹的为最佳浓度进行。



(a)—钙钛矿薄膜XRD及对应半峰宽;(b)—Target薄膜透光率。

(a)—XRD patterns and corresponding full width at half maximum;(b)—transmission spectra of the PC-treated SnO₂ films.

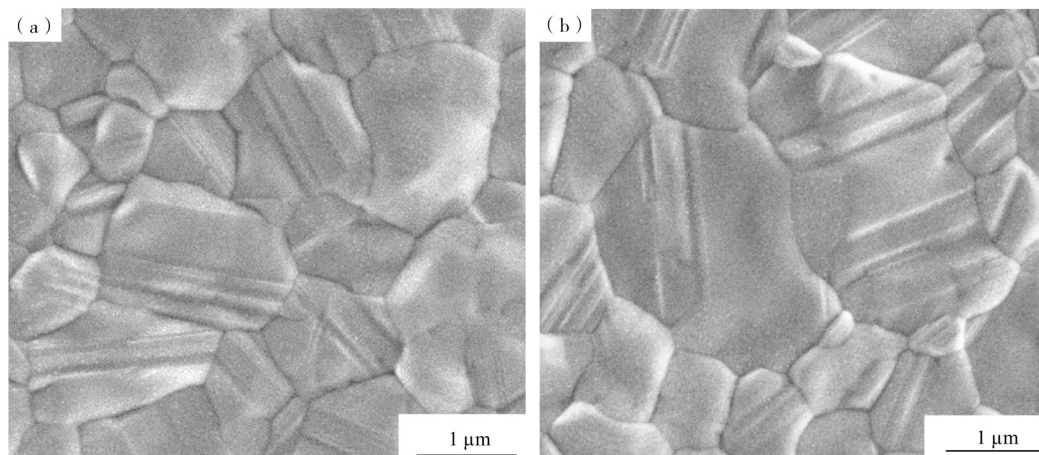
图1 不同浓度PC界面的钙钛矿薄膜XRD图谱和相应(100)晶面半峰宽及二氧化锡透过率

Figure 1 XRD patterns of perovskite films and transmission spectra of SnO₂ films treated with different concentrations PC

2.2 处理效果

图2为原始组钙钛矿薄膜及PC处理的钙钛矿薄膜的表面形貌。从图2可见,与原始组钙钛矿薄

膜相比,PC处理后的钙钛矿晶粒大小均匀,且晶粒尺寸显著增大。表明,PC处理后钙钛矿结晶性显著增强,这也与上述的XRD结果分析相吻合。



(a)—Ctrl薄膜;(b)—Target薄膜。

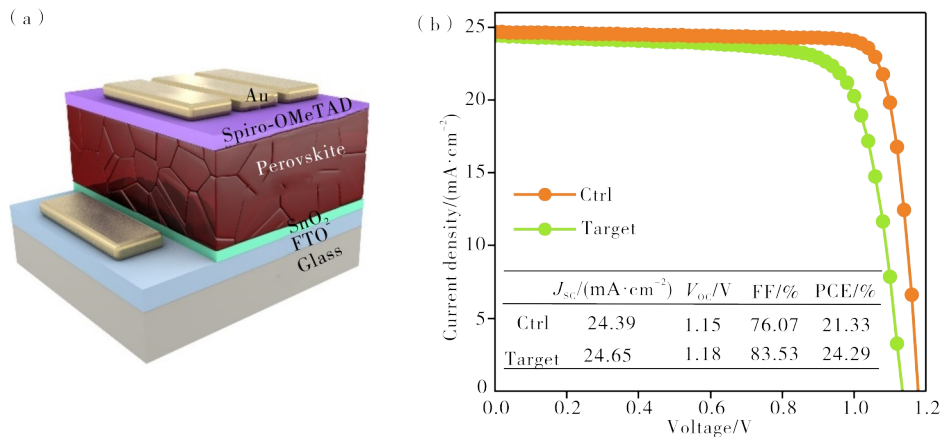
(a)— Ctrl perovskite film;(b)—Target perovskite film.

图2 Ctrl和PC处理的钙钛矿薄膜表面形貌SEM照片

Figure 2 SEM image for Ctrl and Target perovskite films

在PC处理的最佳浓度条件下,构建了正置钙钛矿太阳能电池(见图3(a))。图3(b)为电池的J-V特性曲线。从图3(b)可见,在引入PC界面后,器件的PCE从原始的21.33%提高到24.29%,短路电流 J_{sc} 由24.39 mA·cm⁻²提高至24.65 mA·cm⁻²,开路电压 V_{oc} 由1.15 V提高至1.18 V,填充因子FF由76.07%提高至83.53%。短路电流的提高,归因于二氧化锡层透过率的提高所带来的光利用率提

高。开路电压的提高,归因于PC界面的引入钝化了二氧化锡层及钙钛矿埋底界面的部分缺陷,提高了薄膜结晶质量,大幅降低了器件的非辐射复合。填充因子的提高,归因于更加紧密的界面接触,以及PC界面带来的更匹配能级排列。除此以外,钾离子的引入使器件的迟滞指数从初始的0.047降低到0.016(见表1)。



(a)钙钛矿太阳能电池器件结构示意图;(b) J - V 特性曲线。
(a)—schematic diagram of structure;(b)— J - V characteristic curve of the device.

图3 钙钛矿太阳能电池器件结构示意图以及器件 J - V 特性曲线

Figure 3 Schematic diagram of structure and J - V characteristic curve of the device

表 1 器件迟滞指数

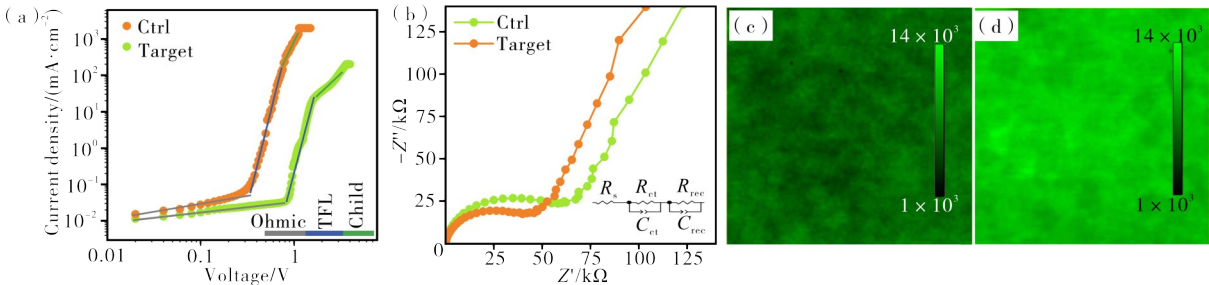
Table 1 devices hysteresis index

器件	正扫效率/%	反扫效率/%	迟滞指数
Ctrl	20.37	21.33	0.047
Target	24.29	23.91	0.016

2.3 机理研究

为了探究PC处理后器件性能提升的潜在机理,分别通过空间电荷限制电流(SCLC)、电化学阻抗谱测试和PL Mapping实验对器件缺陷态密度进行了量化研究,结果如图4所示。其中,空间电荷限制电流所构筑的器件结构为FTO/SnO₂/PC/Perovskite/PCBM/Ag。从图4(a)可见,原始组的缺陷填充电压 V_{TFL} 为0.81 V,而目标组器件的 V_{TFL} 大幅降低至0.34 V,原始组及目标组器件的缺陷态密度 N_t 分别为 1.16×10^{16} 和 $4.90\times10^{15}\text{ cm}^{-3}$ 。 N_t 大幅降低,证实了PC界面的有效缺陷钝化^[19]。在黑暗的情况下,使用电化学阻抗谱来评估钙钛矿器件

的界面电荷复合行为,结果如图4(b)所示。钙钛矿器件的电化学阻抗谱包含两个半圆,其中高频区的半圆代表载流子传输电阻,而低频区半圆代表载流子复合电阻^[20]。从图4(b)可见,目标组具有更小的载流子传输电阻,以及更大的载流子复合电阻。表明,目标组器件拥有更少的界面非辐射复合,以及更匹配的能带排列。这也为目标组器件提高的填充因子做出解释。从图4(c)和(d)的光致发光光谱映射可见,原始组在较大范围内的稳态荧光光谱表现出较差的发光强度,而经PC界面处理后的薄膜展示出整体较高的荧光强度。这意味着原始组薄膜中存在大量的缺陷,其作为复合位点与光生载流子发生非辐射复合,阻碍了载流子传输。



(a)—空间电荷限制电流;(b)—电化学阻抗谱;(c)—光致发光光谱映射 (Ctrl);(d)—光致发光光谱映射 (Target)。
(a)—SCLC characteristic curve of electron-only devices;(b)—EIS of Ctrl and Target perovskite films and PL Mapping of Ctrl;(d)—PL mapping of Target.

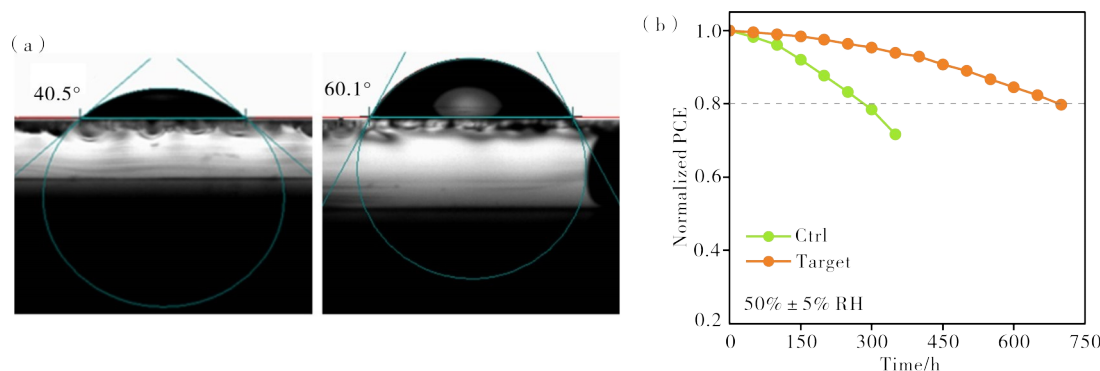
图4 空间电荷限制电流、电化学阻抗谱及原始组和目标组的PL Mapping

Figure 4 SCLC characteristic curve of electron-only devices, EIS of Ctrl and Target perovskite films and PL Mapping of Ctrl and Target devices

2.4 稳定性研究

为了研究器件经 PC 处理后的稳定性效果,通过接触角表征初步评估薄膜的疏水性能,结果如图 5 所示。从图 5(a)可见,PC 界面处理的钙钛矿薄膜接触角从初始 40.5° 提高到 60.1°。说明,薄膜的抗湿度侵扰能力得到提升。因此,研究了器件在 50%

±5% 环境湿度下的运行稳定性,结果如图 5(b)所示。从图 5(b)可见:原始组器件在老化不到 300 h 的湿度稳定性为初始效率的 80%,而目标组器件在相同环境下老化 675 h 的湿度稳定性仍保留 81% 的初始效率。说明,目标组器件的湿度稳定性得到显著提升。



(a)—Ctrl与 Target 钙钛矿薄膜的水接触角;(b)—器件湿度稳定性。

(a)—contact angle for Ctrl and Target perovskite film ;(b)humidity stability for Ctrl and Target devices.

图 5 接触角及器件稳定性

Figure 5 Contact angel and devices stability

3 结论

PC 的引入,不仅可钝化电子传输层和钙钛矿埋底界面的大量缺陷,得到高质量的钙钛矿薄膜,减少有害的非辐射复合,还可以提高钙钛矿的抗水分侵扰能力,得到稳定运行的钙钛矿器件。制备的正置钙钛矿太阳能电池实现了 24.29% 的最佳效率,并且未封装的器件在 50%±5% 的环境湿度下可稳定运行 675 h。本研究为钙钛矿太阳能电池的界面工程提供了一定的参考依据。

参考文献:

- [1] WEN H X, ZHANG Z, GUO Y X, et al. Synergistic full-scale defect passivation enables high-efficiency and stable perovskite solar cells [J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(44): 2301813.
- [2] LIU L D, ZHENG C, XU Z, et al. Manipulating electron density distribution of nicotinamide derivatives toward defect passivation in perovskite solar cells [J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(30): 2300610.
- [3] DOHYUN K, HYUNTAE C, WOOTEAK J, et al. Phase transition engineering for effective defect passivation to achieve highly efficient and stable perovskite solar cells [J]. *Energy & Environmental Science*, 2023, 5(16), 2045-2055.
- [4] ZHANG J K, NIU X Q, PENG C, et al. Inhibiting ion migration through chemical polymerization and chemical chelation toward stable perovskite solar cells [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2023, 62(50): e202314106.

- [5] WANG H N, ZHENG Y F, ZHANG G D, et al. In situ dual-interface passivation strategy enables the efficiency of formamidinium perovskite solar cells over 25% [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(6): 2307855.
- [6] ZHU H W, SAM T, MUHAMMAD N L, et al. Long-term operating stability in perovskite photovoltaics [J]. *Nature Reviews Materials*, 2023(8): 569-586.
- [7] LOU Q, HAN Y F, LIU C, et al. π -conjugated small molecules modified SnO₂ layer for perovskite solar cells with over 23% efficiency [J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(39): 2101416.
- [8] ZHANG Y, KONG T F, XIE H B, et al. Molecularly tailored SnO₂/Perovskite interface enabling efficient and stable FAPbI₃ solar cells [J]. *ACS Energy Letters*, 2022, 7(3): 929-938.
- [9] ZHANG S C, SI H N, FAN W Q, et al. Graphdiyne: Bridging SnO₂ and perovskite in planar solar cells [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2020, 59(28): 11573-11582.
- [10] YAO D, SHEN W J, DONG W, et al. Chlorobenzenesulfonic potassium salts as the efficient multifunctional passivator for the buried interface in regular perovskite solar cells [J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 12(20): 2200417.
- [11] SO Y P, ZHU K. Advances in SnO₂ for efficient and stable n-i-p perovskite solar cells [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(27): 2110438.
- [12] XU H, MIAO Y F, WEI N, et al. CsI enhanced buried interface for efficient and UV-robust perovskite solar cells [J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 12

- (2): 2103151.
- [13] GAO Y, REN F M, SUN D R, et al. Elimination of unstable residual lead iodide near the buried interface for the stability improvement of perovskite solar cells [J]. *Energy & Environmental Science*, 2023, 5(16): 2295-2303.
- [14] WANG R, XUE J J, MENG L, et al. Caffeine improves the performance and thermal stability of perovskite solar cells [J]. *Joule*, 2019, 3(6): 1464-1477.
- [15] ZHANG J J, FU J F, CHEN Q Y, et al. 3, 5-difluorophenylboronic acid-modified SnO_2 as ETLs for perovskite solar cells: $\text{PCE} > 22.3\%$, $\text{T82} > 3\,000\text{ h}$ [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433(3): 133744.
- [16] ZHANG Y, KONG T F, XIE H B, et al. Molecularly tailored SnO_2 /perovskite interface enabling efficient and stable fapbi3 solar cells [J]. *ACS Energy Letters*, 2022, 7(3): 929-938.
- [17] ZHANG B, ZHENG X, VOZNY O, et al. Multifunctional organic potassium salt additives as the efficient defect passivator for high-efficiency and stable perovskite solar cells [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(25): 2300932.
- [18] HSINHAN T, NIE W Y, BLANCON J C, et al. High-efficiency two-dimensional Ruddlesden-Popper perovskite solar cells [J]. *Nature*, 2016, 536: 312-316.
- [19] ZHU Z J 1, MAO K T, ZHANG K, et al. Correlating the perovskite/polymer multi-mode reactions with deep-level traps in perovskite solar cells [J]. *Joule*, 2022, 6(12): 2849-2868.
- [20] ZHANG C Y, SHEN X Q, CHEN M J, et al. Constructing a stable and efficient buried heterojunction via halogen bonding for inverted perovskite solar cells [J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 13(2): 2203250.

Multifunctional Potassium Salt Regulation of SnO_2 /Perovskite Buried Bottom Interface to Achieve Efficient and Stable Perovskite Solar Cells

Qiu Xijie, LUO Wenqiang, WU Hualin*

(School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Perovskite solar cells are an emerging industry in today's energy development, but they have also encountered bottlenecks in their rapid development. The layered sandwich structure of solar cells inevitably brings serious interface problems. Therefore, improving the interface transmission characteristics is a key step in improving the stability and photoelectric conversion efficiency (PCE) of perovskite solar cells. Interface modification or passivation is a simple and efficient means of achieving high-quality interface charge transfer. Here, potassium citrate (PC), due to its multiple passivation sites, is introduced as an efficient and simple multifunctional small molecule into the interface of tin dioxide (SnO_2)/perovskite in the electron transport layer of upright perovskite solar cells to optimize the interface problems in the solar cell. Firstly, the introduction of PC not only reacts with harmful hydroxyl groups on the surface of SnO_2 in the electron transport layer, but also prevents water intrusion; It also coordinates with free lead ions on the lower surface of the perovskite layer as deep level defects and non-radiative recombination centers, effectively reducing the defect state density of the thin film, suppressing unsatisfactory non radiative recombination, and thus improving the crystallization quality of the thin film; Secondly, the hysteresis effect is also related to the photovoltaic conversion performance of solar cells, which can lead to performance variations under different lighting conditions. The introduction of potassium ions significantly reduces device hysteresis and improves the reproducibility of battery operation. Based on the modification of the buried interface by PC, the photoelectric conversion efficiency of the upright perovskite solar cell increased from the initial 21.33% to 24.29%. In addition, compared to the humidity stability of the control group for less than 300 h, the unpackaged devices in the target group maintained an initial efficiency of 81% after aging for 675 h in a humidity environment of $50\% \pm 5\%$. This work provides a theoretical basis for the development of efficient and stable perovskite solar cells.

Keywords: perovskite solar cells; defect state; passivation; potassium citrate; buried interface; SnO_2 ; efficiency of photoelectric conversion; humidity stability

(学术编辑:常成)