

# 高效柔性钙钛矿太阳电池研究

白建明, 于越, 李治学, 彭飞

(华电重工股份有限公司, 北京 100071)

**摘要:** 对柔性钙钛矿太阳电池(FPSCs)成膜工艺进行研究, 针对在柔性基底上沉积薄膜不均匀、较多缺陷、内部应力等问题, 分析其形成原因和影响因素。选择PET/ITO作为柔性基底, SnO<sub>2</sub>作为电子传输层, 加入KCl进行调控, KCl的加入可增加电子传输层与柔性导电基底的亲和性, 从而获得致密且缺陷较少的膜层。通过优选钙钛矿前驱体各组分配比, 加入MAcI作为添加剂调控结晶过程, 并在钙钛矿表面设计PEAI钝化层钝化界面, 获得高质量的钙钛矿结晶和致密表面, 并使电池的柔韧性得到提升。在适宜的环境下, 制备认证效率达到23.14%的柔性钙钛矿太阳电池, 其在弯折10000次后仍能保持80.48%的初始光电转换效率。

**关键词:** 钙钛矿太阳电池; 柔性; 成膜工艺; 制备环境

**中图分类号:** TM914.4

**文献标志码:** A

## 0 引言

随着光伏市场朝着多样化和差异化的方向发展, 出现了许多的光伏应用场景, 其中有代表性的是光伏建筑一体化(building integrated photovoltaic, BIPV)。BIPV通常要求光伏组件具备轻量化、柔性化和可透明的特点, 然而当前主流的晶体硅太阳电池<sup>[1]</sup>显然很难满足要求。近年来, 钙钛矿太阳电池(perovskite solar cells, PSCs)因其出色的光电转换效率提升纪录引起全世界广泛关注<sup>[2]</sup>, 短短十几年内其光电转换效率已从最初的3.8%提升至26%。PSCs为薄膜电池, 根据基材和电极材料选择的不同, 可制备成刚性PSCs、柔性PSCs和透明PSCs, 其制备成本较低, 应用范围广泛<sup>[3-4]</sup>。

对于柔性钙钛矿太阳电池(flexible perovskite solar cells, FPSCs), 其光电转换效率与刚性PSCs仍有较大差距。柔性基底相比刚性玻璃基板表面更为粗糙, 在柔性基底上沉积薄膜相对困难<sup>[5]</sup>, 例如在制备电荷传输层(charge transport layer, CTL)时, 其成膜过程会产生大量不均匀的成核位点, 导致不规则的结晶<sup>[6]</sup>。由于钙钛矿薄膜是一种多晶体, 特别对于FPSCs, 电池所受到的残余应变对光电性能和稳定性均有较大影响, 有研究表明, 应变较大的钙钛矿薄膜会产生一定的离子迁移激活能, 应变的存在加速了离子迁移的过程<sup>[7]</sup>。虽然通过引入小半径阳离子可修饰钙钛矿晶格降低局部微应变, 如掺杂Cd<sup>2+</sup><sup>[8]</sup>, 然而对于外部折弯应变则很难通过上述方法来改善。

本文从基材选择出发, 研究FPSCs电荷传输材料、钙钛矿层、界面层的优化改性, 同时研究制备环境对电池性能的影响。从理论研究到实际验证, 较全面地阐述高效FPSCs的制备工艺和性能提升方法。

## 1 柔性基材的选择

柔性基材是制作FPSCs的关键材料, 常用的柔性基底材料有聚合物基底、金属箔和柔性玻璃<sup>[9]</sup>。对于FPSCs, 通常要求基底材料具有较高的光学透过率、机械耐久性、良好的氧气和水阻隔特性、耐热性等性能。金属箔由于其高柔韧性、良好的耐热性和导电性被认为是一种理想的柔性基材, 然而金属箔的不透明性限制了其在FPSCs中的应用。厚度低于几百微米的玻璃基板具有一定的机械柔性, 通常被称为柔性玻璃, 文献[10]使用柔性玻璃基板制备FPSCs, 实现了高达18.1%的光电转换效率, 表现出较强的机械性能和稳定性。然而该基材存在不易弯曲、生产难度较大、成本较高的问题。聚合物柔性基底通常为聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene glycol terephthalate, PET)或聚萘二甲酸乙二醇酯(polyethylene naphthalate two formic acid glycol ester, PEN)材料, PET/PEN具有理想的弯曲性能, 并具备高透过率、轻量化、高耐腐蚀性等特点, 虽然PET/PEN在耐热温度、水氧阻隔方面存在劣势, 然而由于其低成本且易于生产的特点, 是目前在FPSCs上应用较多的柔性基底材料<sup>[9]</sup>。

通过在PET和PEN基底上沉积氧化铟锡(ITO)制备成

收稿日期: 2023-12-04

基金项目: 华电重工科技项目(HH1-KJ-2022-01)

通信作者: 白建明(1970—), 男, 学士、正高级工程师, 主要从事氢能、储能和太阳能等新能源方面的研究。baijm@chec.com.cn

PET/ITO 或 PEN/ITO, 用作 FPSCs 的透明导电电极。关于这两种材质的相关热稳定性、透过率、机械性能已有较为系统的研究分析<sup>[11]</sup>, 其主要区别在于 PEN/ITO 相较于 PET/ITO 在高温下热稳定性更强, PET/ITO 的使用温度不能高于 150 °C, PEN/ITO 的使用温度可达到 235 °C; 而 PET/ITO 相较于 PEN/ITO 的光透过率更高, 并具备更好的抗紫外降解性能<sup>[11]</sup>。目前采用 PEN/ITO 的基底制备的单结 FPSCs 最高效率已达到 23.6%<sup>[5]</sup>, 采用 PET/ITO 基底制备的单结 FPSCs 最高效率已达到 23.8%<sup>[12]</sup>。

## 2 柔性钙钛矿太阳能电池制备研究

### 2.1 电荷传输层的制备研究

电荷传输层在 FPSCs 中被用于提取电子和空穴, 具有电子提取能力的是电子传输层 (electron transport layer, ETL), 具有空穴提取能力的是空穴传输层 (hole transport layer, HTL)。常用的 ETL 材料有 SnO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、富勒烯 (C60) 等, 常用的 HTL 材料种类有 Spiro-OMeTAD、PTAA、P3HT 等<sup>[13]</sup>。如图 1 所示, 无论是正式结构钙钛矿太阳能电池, 还是反式结构钙钛矿太阳能电池<sup>[14]</sup>, 电荷传输层作为一种重要的界面功能层, 其结构形貌的质量均会对钙钛矿层薄膜的生长结晶造成较大影响。

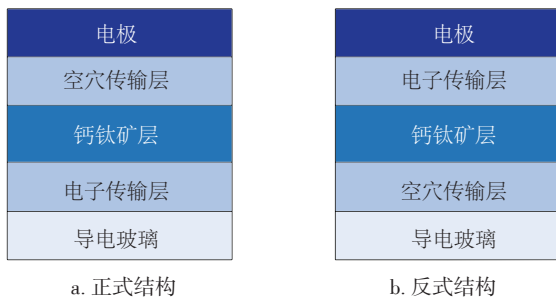


图1 钙钛矿太阳能电池典型结构形式

Fig. 1 Typical structural forms of perovskite solar cells

选择 SnO<sub>2</sub> 作为 FPSCs 的 ETL。SnO<sub>2</sub> 拥有金红石相, 是第 IV A 族氧化物中独特的半导体, 它拥有独特的带状结构和缺陷化学, 表现出一定的导电性和较高的可见光透过率。SnO<sub>2</sub> 通常以其完整的化学成分存在, 然而却可通过掺杂被调整到不同电导率水平, 同时由于 SnO<sub>2</sub> 的低温可加工性使其在 FPSCs 中应用前景广阔, 李志浩等<sup>[15]</sup> 采用无退火工艺制备的柔性 SnO<sub>2</sub> ETL 获得了 19.80% 的光电转换效率, 其在 3000 次弯曲循环后仍保留 94.5% 的初始效率, 表现出较好的柔韧性和稳定性。

在 PET/ITO 基底上制备 SnO<sub>2</sub> ETL, 首先使用 SnO<sub>2</sub> 胶体溶液 (市售 15% SnO<sub>2</sub> 胶体分散液) 在柔性 PET/ITO 上制备 ETL。具体方法如图 2 所示, 将 PET/ITO (23 mm×23 mm) 贴附于钠钙玻璃 (25 mm×25 mm) 上, 将 SnO<sub>2</sub> 与高纯水按照 1:5 的体积比进行混合稀释, 然后将其以 3000 r/min 的速度均匀旋涂在 PET/ITO 上, 并在 120 °C 下退火 40 min 得到 SnO<sub>2</sub> ETL。

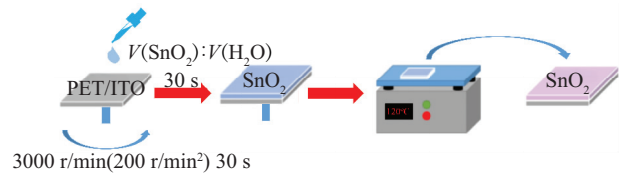


图2 SnO<sub>2</sub> 电子传输层制备方法

Fig. 2 Preparation method of SnO<sub>2</sub> electron transport layer

从图 3 可知, 未改性的 SnO<sub>2</sub> 薄膜存在大量孔洞, 由于 SnO<sub>2</sub> 作为电子传输层与钙钛矿活性层密切接触, 如果界面处存在缺陷会导致两层薄膜贴合不紧密, 载流子传输到缺陷处时发生载流子的吸收和复合, 造成非辐射复合现象, 降低了载流子密度, 同时电池的效率也会随之降低。此外, 通过传统溶液旋涂法所制备的 SnO<sub>2</sub> 薄膜中存在大量氧空位缺陷, 这会导致 SnO<sub>2</sub> 带隙降低, 光吸收减弱。传输层中缺陷密度的大小会影响传输材料的能级, 从而影响传输层与钙钛矿层之间的能级匹配。

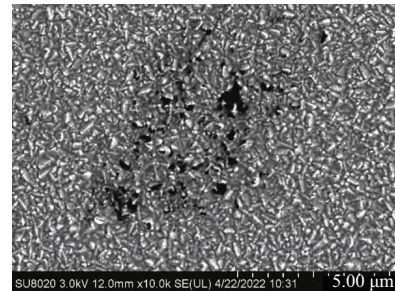


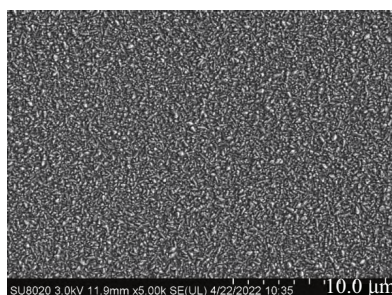
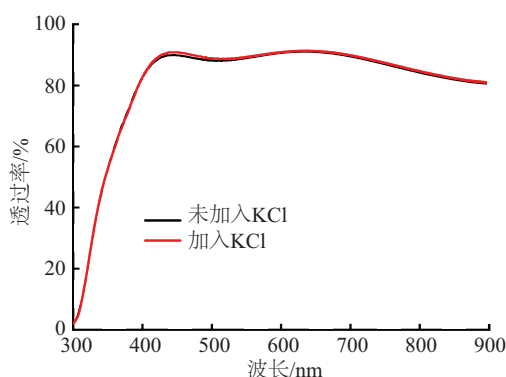
图3 未改性的 SnO<sub>2</sub> 薄膜 SEM 图

Fig. 3 SEM image of unmodified SnO<sub>2</sub> thin film

为了解决上述问题, 从电荷平衡调节的角度出发, 通过加入 KCl 来调节 SnO<sub>2</sub> ETL, 首先在前文所述稀释后的 SnO<sub>2</sub> 水溶液中取两份 1 mL 溶液移入试管, 形成不同 KCl 浓度的 SnO<sub>2</sub> 水溶液待用, 然后将低 KCl 浓度的 SnO<sub>2</sub> 水溶液滴在 PET/ITO 基底上, 启动匀胶机, 在旋涂过程中滴入高 KCl 浓度 SnO<sub>2</sub> 水溶液。基于上述实验结果, 调整退火时间, 将加热台上 120 °C 退火时间缩短为 20 min, 然后冷却至室温制得电子传输层, 制备方法如图 2 所示。由图 4 可看出, 通过此方法制备的电子传输层表面较为致密, 没有孔洞, 这将优化钙钛矿和电子传输层之间的界面接触。此外还对比了加入 KCl 和未加入 KCl 的电子传输层的紫外可见 (UV-V-Vis) 透射光谱测试实验, 如图 5 所示, 发现 KCl 的加入并未影响电子传输层对光的透过。

### 2.2 钙钛矿层结晶制备研究

钙钛矿层的质量是决定 FPSCs 光电转换效率的关键, 如何在柔性基材上形成具有大晶粒尺寸、低缺陷密度、高覆盖率和高的结晶度的钙钛矿薄膜是目前的主要挑战<sup>[16]</sup>。对于 FPSCs 钙钛矿层成膜过程工艺, 通常使用溶液法沉积技术, 研究较多的是一步法反溶剂辅助沉积技术, 即在恰当的工艺窗

图4 加入KCl的SnO<sub>2</sub>薄膜SEM图Fig. 4 SEM image of SnO<sub>2</sub> thin film after adding KCl图5 加入KCl的SnO<sub>2</sub>薄膜光透过图Fig. 5 Light transmission diagram of SnO<sub>2</sub> thin film with added KCl

口期滴加反溶剂获得致密且高度结晶的钙钛矿薄膜<sup>[17]</sup>。与在刚性玻璃基底上沉积钙钛矿薄膜不同,由于柔性基底的表面能低、润湿性较差以及表面粗糙度较高,同等条件下制备的钙钛矿膜层,采用柔性基底制备的薄膜质量往往较差。在溶液法制备 FPSCs 中,需要调控适应于柔性基底的钙钛矿前驱体溶液,毕成等<sup>[18]</sup>通过优化钙钛矿前驱体溶液中 FAI 和 MABr 的组成比例,获得了致密的无针孔膜,表现出较低的陷阱态密度和较长的复合寿命,制备的反式结构柔性钙钛矿太阳能电池光电转换效率高达 18.1%。除此之外,通过在钙钛矿前驱体溶液中加入添加剂也是一种有效的解决办法。任宇玉等<sup>[19]</sup>在前驱体溶液中通过添加少量醋酸镉(CdAc<sub>2</sub>),产生纳米孔阵列薄膜,这有助于改善有机盐在 PbI<sub>2</sub> 中的扩散并促进有利的晶体取向,制备的 FPSCs 光电转换效率达到 22.78%。

采用一步溶液法制备钙钛矿层,通过调节不同组分配比,以  $V(\text{DMF}) : V(\text{DMSO}) = 4 : 1$  作为溶剂,设计分子式为  $(\text{FAPbI}_3)_{0.95} (\text{MAPbBr}_3)_{0.05} (\text{CsPbI}_3)_{0.02}$  的优选配比,并计算出各组分 PbI<sub>2</sub>、FAI、MABr、PbBr<sub>2</sub> 和 CsI 的用量,称取后混合。考虑到 PbI<sub>2</sub> 在溶液转移过程中的损耗及其起到的骨架层作用,设计 PbI<sub>2</sub> 组分按过量 5% 的物质的量进行称取。最终配制浓度为 1.6 mol/L 的前驱体溶液。通过吸取在玻璃基底上制备高效电池的经验,在钙钛矿前驱体溶液中加入一定量的 MAcl 作为添加剂来改善退火过程中的结晶质量。钙钛矿膜

层制备过程如图 6 所示,通过控制旋涂速度、滴加氯苯的时机和用量,调控退火温度及时间,在 120 °C 平板加热台上退火 20 min 获得结晶质量相对较优的钙钛矿膜层,如图 7 所示。

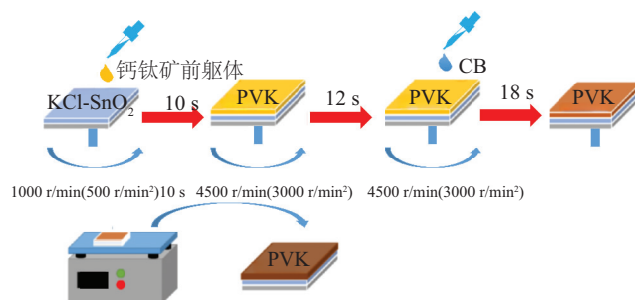


图6 钙钛矿膜层制备流程

Fig. 6 Preparation process of perovskite film layer

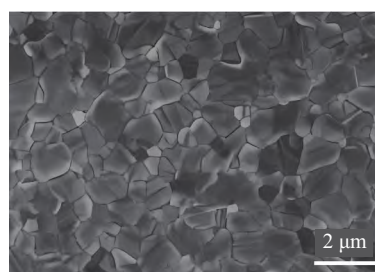


图7 钙钛矿结晶表面SEM图

Fig. 7 SEM image of crystalline surface of perovskite

### 2.3 界面钝化层的制备研究

由于钙钛矿层形成一种多晶态薄膜,在其表面不可避免地会形成晶界和电荷陷阱,例如欠配位的  $\text{Pb}^{2+}/\text{I}^-$  离子、MA/I 空位,偶尔还有 Pb-I 反位取代,这些缺陷的存在将导致电荷在该区域发生复合。相较于刚性玻璃基板,目前的 PET、PEN 柔性基材无法完全防止氧气和水分的透过,水氧的侵蚀会沿着钙钛矿膜层表面的晶界和缺陷区域扩散,进而导致整个钙钛矿层的降解。同时,钙钛矿薄膜的碘化物空位吸附氧分子并捕获光生电子以及高反应性超氧化物  $\text{O}^{2-}$  形成与阳离子反应,这些都会造成电池性能的下降<sup>[20]</sup>。

通过钝化缺陷来降低非辐射复合损失和抑制界面退化是目前提升光电性能和稳定性的主要策略,刘畅等<sup>[21]</sup>引入一种新型多功能有机盐(盐酸二甲双胍),这种有机盐可钝化钙钛矿表面的阳离子和阴离子缺陷,制备的 FPSCs 光电转换效率达到 22.04%。Lucarelli 等<sup>[22]</sup>报道了溶液法在钙钛矿表面制备的苯乙基碘化铵(PEAI)钝化层,钝化层的加入使电池的开路电压和填充因子显著提升,与非钝化电池相比,光电转换效率相对高出 22%。

目前使用 PEAi 作为钙钛矿钝化层已成为一种公认有效的方法,在高效 FPSCs 的制备过程中也采用 PEAi 对钙钛矿表面进行钝化处理。将 2.5 mg PEAi 溶于 1 mL 的异丙醇(IPA)中,将得到的溶液以 4500 r/min 转速旋涂在已退火并冷



却后的钙钛矿膜层表面,然后移入 100 °C 的退火台中,加热 5 min,得到经钝化后的钙钛矿薄膜。

通过图 8 可看到原始钙钛矿膜中有两个分别位于 136.8 和 141.7 eV 的  $Pb^0$  小峰。金属 Pb 的存在证实了在原始钙钛矿晶格中存在欠配位的  $Pb^{2+}$  离子,在薄膜中充当非辐射复合中心,降低了电池性能。清除  $Pb^0$  是实现无缺陷钙钛矿膜的必要条件。从  $Pb^0$  峰强度的变化来看,PEAI 的处理明显降低了  $Pb^0$  峰强度,表明  $Pb^0$  团簇已经钝化。通过图 9 可看出随着 KCl 和 PEA I 的引入,钙钛矿薄膜的杨氏模量有明显变小的趋势,杨氏模量的提升说明薄膜的柔韧性有所改善,因此薄膜的抗弯折能力也相应有所加强。

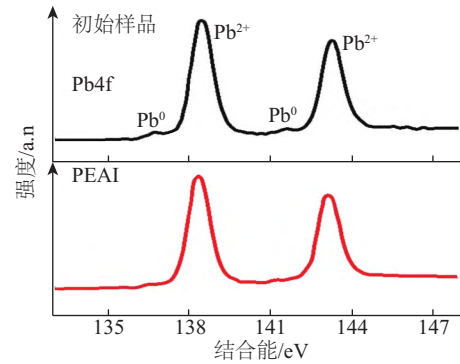


图 8 Pb4f核能级谱的XPS

Fig. 8 XPS of Pb4f nuclear energy level spectrum

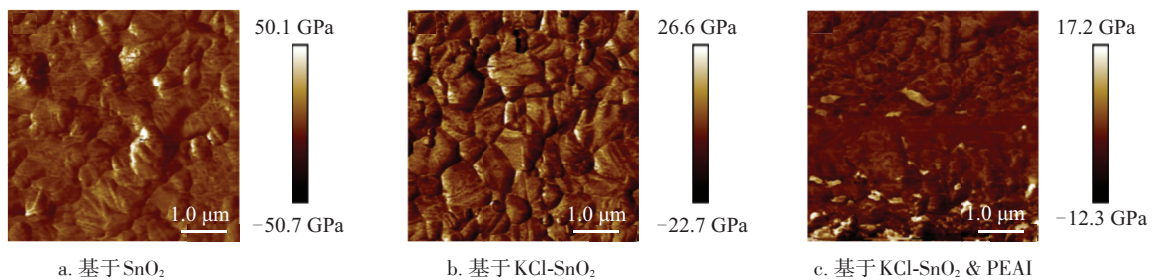


图 9 钙钛矿薄膜杨氏模量分布

Fig. 9 Yang's modulus distribution diagram of perovskite thin films

## 2.4 制备环境对电池性能的影响

上述相关理论及实验结论表明,通过制备工艺的调控能有效改善薄膜质量,提升电池性能。但在研究过程中发现,环境因素对钙钛矿薄膜质量也有较大影响,例如夏天高温天气通常会出现钙钛矿薄膜的开裂现象,表面出现较多裂纹,在制备空穴传输层时会沿裂缝深入钙钛矿层内部,造成严重的载流子复合,使得电池的电流和填充因子降低。可通过设置加热器和冷却剂的方式来调节制作钙钛矿太阳能电池手套箱内的温度,当控制湿度不变时,研究不同环境温度对钙钛矿太阳能电池性能的影响规律。研究发现,在环境温度超过 27 °C 时,钙钛矿膜有开裂的可能,尤其 32 °C 以上时,极易出现大面积的开裂,如图 10 所示。

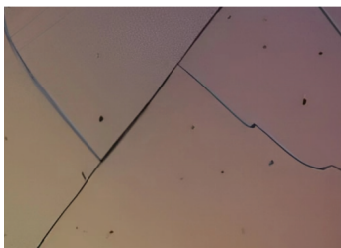


图 10 温度 32 °C 时钙钛矿薄膜表面偏光显微镜图

Fig. 10 Polarized microscope image of surface of perovskite thin film at a temperature of 32 °C

研究发现,当环境温度降至 18 °C 以下时,薄膜开裂能够得到有效抑制,电池性能大幅提升。如表 1 所示,当环境温

度为 32 °C 时,电池的光电转换效率(PCE)为 17.5%,其中开路电压( $V_{oc}$ )为 1.08 V,短路电流( $J_{sc}$ )为 21.93 mA/cm<sup>2</sup>,当温度降至 27 °C 时,电流和填充因子(FF)明显提高,电池光电转换效率随之大幅提升。

表 1 不同环境温度下钙钛矿太阳能电池性能

Table 1 Performance of perovskite cells at different ambient temperatures

温度/°C	$V_{oc}/V$	$J_{sc}/(mA/cm^2)$	FF/%	PCE/%
18	1.16	24.912	80.06	23.14
27	1.08	24.160	75.14	19.61
32	1.08	21.930	73.90	17.50

除此以外,钙钛矿层的制备厚度也是电池性能的主要影响因素之一。较薄的钙钛矿层会导致吸光量的减少,较厚又会造成电荷复合的增加。在实验过程中,通过控制前驱体溶液浓度、反溶剂滴加时间和溶剂极性等因素,得到不同厚度的钙钛矿膜层,并发现当钙钛矿层的厚度在约 600 nm 时性能更佳。

## 3 高效 FPSCs 及抗弯折性能

基于前文所述制备工艺的研究,制备电池构成为 PET/ITO/KCl-SnO<sub>2</sub>/Perovskite/PEAI/Spiro/Au 的 FPSCs,通过持续优化工艺参数,最终获得光电转换效率为 23.32% 的高效 FPSCs,经中国科学院电工研究所认证效率达到 23.14%。同时,与未经 KCl 改性的 SnO<sub>2</sub> 和 PEA I 钝化的 FPSCs 效率进行

对比(如图 11 所示),优化后的电池开路电压和填充因子明显提升,由此带来电池光电转换效率的明显提高。同时可看到电池的迟滞效应也得到改善,说明优化后电池的电子和空穴传输效率更匹配。

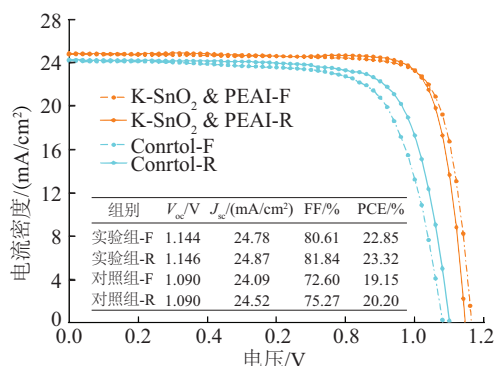


图 11 基于 K-SnO<sub>2</sub> & PEAI 和对照组 FPSCs 的 J-V 曲线

Fig. 11 J-V curves based on K-SnO<sub>2</sub> & PEAI and control group FPSCs devices

同时,本文还研究了应力作用下所制作的柔性钙钛矿太阳能电池性能的变化规律,在图 12 所示的自动弯折机上开展抗弯折实验,设置曲率半径为 5 mm。发现基于 KCl-SnO<sub>2</sub> 电子传输层和 PEAI 钝化层制得的 FPSCs 有较强的抗弯折性能,如图 13 所示,电池在弯折 10000 次以后仍能保持 80.48% 的初始光电转换效率。



图 12 柔性电池自动弯折装置

Fig. 12 Flexible cell automatic bending device

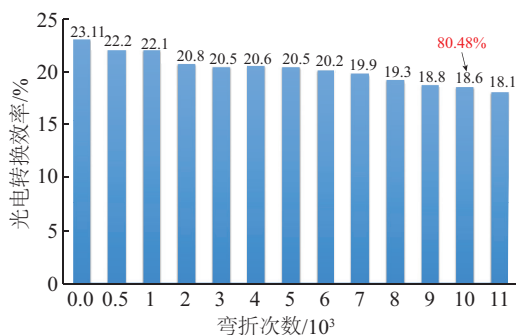


图 13 基于 K-SnO<sub>2</sub> & PEAI 的 FPSCs 弯折实验

Fig. 13 Bending experiment of FPSCs devices based on K-SnO<sub>2</sub> & PEAI

## 4 结 论

本文从基底材料出发,提供了一套完整的高效 FPSCs 的设计和制备工艺。对于基底材料,选择 PET/ITO 基材作为柔性基底,并对电荷传输层、钙钛矿层进行优化设计,揭示了由于采用柔性基底所造成的不利影响原因,并给出一种通过加入 KCl 进行调节的方法,实验发现 KCl 的加入减少了 ETL 缺陷的产生。通过调整钙钛矿前驱体溶液不同组分分配比及加入 MACl 添加剂的方法获得了高质量的钙钛矿结晶,制备过程中还加入钝化剂获得了致密的钙钛矿表面,同时发现电池的柔韧性也有所加强。

通过这项研究,获得了认证效率达到 23.14% 的柔性钙钛矿太阳能电池,并且电池在弯折 10000 次以后仍能保持 80.48% 的初始转换效率,所总结出的理论和研究方法可为后续继续开展更高效 FPSCs 设计及生产工艺提供借鉴。

### [参考文献]

- [1] 张云龙, 陈新亮, 周忠信, 等. 晶体硅太阳能电池研究进展[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 49-60.  
ZHANG Y L, CHEN X L, ZHOU Z X, et al. Research progress of crystalline silicon solar cells [J]. Acta energiae solaris sinica, 2021, 42(10): 49-60.
- [2] HASNAIN S M. Examining the advances, obstacles, and achievements of tin-based perovskite solar cells: a review [J]. Solar energy, 2023, 262: 111825.
- [3] 蒋瑞轩, 柯秉灿, 朱泽伟, 等. 钙钛矿光伏的先进印刷技术研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(9): 2287-2305.  
JIANG R X, KE B C, ZHU Z W, et al. Recent advances on printing technology for perovskite photovoltaics [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(9): 2287-2305.
- [4] ZHANG F, FAN J Y, YANG Y J, et al. Tungsten doped indium oxide (IWO) transparent electrode used in air-annealed perovskite solar cells [J]. Journal of alloys and compounds, 2023, 946: 169394.
- [5] LI M H, ZHOU J J, TAN L G, et al. Multifunctional succinate additive for flexible perovskite solar cells with more than 23% power-conversion efficiency [J]. The innovation, 2022, 3(6): 100310.
- [6] WU Y Y, XU G Y, XI J C, et al. In situ crosslinking-assisted perovskite grain growth for mechanically robust flexible perovskite solar cells with 23.4% efficiency [J]. Joule, 2023, 7(2): 398-415.
- [7] ZHAO J J, DENG Y H, WEI H T, et al. Strained hybrid perovskite thin films and their impact on the intrinsic stability of perovskite solar cells [J]. Science advances, 2017, 3(11): eaao5616.
- [8] SAIDAMINOV M I, KIM J, JAIN A, et al. Suppression of

- atomic vacancies via incorporation of isovalent small ions to increase the stability of halide perovskite solar cells in ambient air[J]. *Nature energy*, 2018, 3: 648-654.
- [9] TANG G Q, YAN F. Recent progress of flexible perovskite solar cells[J]. *Nano today*, 2021, 39: 101155.
- [10] DOU B J, MILLER E M, CHRISTIANS J A, et al. High-performance flexible perovskite solar cells on ultrathin glass: implications of the TCO[J]. *The journal of physical chemistry letters*, 2017, 8(19): 4960-4966.
- [11] ZARDETTO V, BROWN T M, REALE A, et al. Substrates for flexible electronics: a practical investigation on the electrical, film flexibility, optical, temperature, and solvent resistance properties [J]. *Journal of polymer science part B: polymer physics*, 2011, 49(9): 638-648.
- [12] CHEN Z Y, CHENG Q R, CHEN H Y, et al. Perovskite grain-boundary manipulation using room-temperature dynamic self-healing “ligaments” for developing highly stable flexible perovskite solar cells with 23.8% efficiency [J]. *Advanced materials*, 2023, 35(18): 2300513.
- [13] GAO Y J, HUANG K Q, LONG C Y, et al. Flexible perovskite solar cells: from materials and device architectures to applications[J]. *ACS energy letters*, 2022, 7(4): 1412-1445.
- [14] 李铃薇. 反式结构钙钛矿太阳能电池的制备及其改性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- LI L W. Preparation and modification of inverted structured perovskite solar cell devices[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [15] LI Z H, WANG Z H, JIA C M, et al. Annealing free tin oxide electron transport layers for flexible perovskite solar cells[J]. *Nano energy*, 2022, 94: 106919.
- [16] JUNG H S, HAN G S, PARK N G, et al. Flexible perovskite solar cells[J]. *Joule*, 2019, 3(8): 1850-1880.
- [17] CHEN C, JIANG Y, FENG Y C, et al. Understanding the effect of antisolvent on processing window and efficiency for large-area flexible perovskite solar cells [J]. *Materials today physics*, 2021, 21: 100565.
- [18] BI C, CHEN B, WEI H T, et al. Efficient flexible solar cell based on composition-tailored hybrid perovskite [J]. *Advanced materials*, 2017, 29(30): 1605900.
- [19] REN N Y, WANG P Y, JIANG J K, et al. Multifunctional additive CdAc<sub>2</sub> for efficient perovskite-based solar cells [J]. *Advanced materials*, 2023, 35(32): 2211806.
- [20] DOU J, CHEN Q. Interfacial engineering for improved stability of flexible perovskite solar cells [J]. *Energy material advances*, 2022, 2022: 0002.
- [21] LIU C, HUANG K, HU B, et al. Concurrent top and buried surface optimization for flexible perovskite solar cells with high efficiency and stability [J]. *Advanced functional materials*, 2023, 33(22): 2212698.
- [22] LUCARELLI G, DE R F, TAHERI B, et al. Phenethylammonium iodide passivation layers for flexible planar perovskite solar cells [J]. *Energy technology*, 2022, 10(11): 2200314.

## RESEARCH ON EFFICIENT AND FLEXIBLE PEROVSKITE SOLAR CELLS

Bai Jianming, Yu Yue, Li Zhixue, Peng Fei

(Huadian Heavy Industries Co., Ltd., Beijing 100071, China)

**Abstract:** This article studies the film-forming process of flexible perovskite solar cells (FPSCs), and analyzes the reasons and influencing factors for the uneven deposition of thin films, numerous defects, and internal stress on flexible substrates. PET/ITO is selected as the flexible substrate, SnO<sub>2</sub> as the electron transport layer, and KCl is introduced for regulation. The introduction of KCl increases the affinity between the electron transport layer and the flexible conductive substrate, resulting in a dense and defect free film layer. By optimizing the distribution ratio of perovskite precursors, introducing MAcl as an additive to regulate the crystallization process, and designing a PEAI passivation layer passivation interface on the surface of perovskite, high-quality perovskite crystals and dense surfaces are obtained, and the flexibility performance of the device is improved. In a suitable environment, a flexible perovskite cell with a certified efficiency of 23.14% was prepared, and the initial conversion efficiency of 80.48% can still be maintained after 10000 time bends.

**Keywords:** perovskite solar cells; flexibility; film forming process; preparation environment