

宽带隙钙钛矿太阳能电池预旋涂工艺研究

谭理, 李海进*

(西南石油大学新能源与材料学院, 四川 成都 610500)

摘要: 宽带隙钙钛矿太阳能电池是晶硅-钙钛矿叠层电池的主要组成部分。由于宽带隙钙钛矿材料存在缺陷密度大、相分离严重等问题, 限制了宽带隙钙钛矿太阳能电池的发展。为改善这些问题, 提出了一种预旋涂方法, 即两步法制备钙钛矿薄膜, 在碘化铅层表面均匀涂覆甲胺乙醇溶液 (MES) + 苯乙基碘化铵 (PEAI) 完成预旋涂工艺。通过预旋涂后, 器件最佳效率为 20.81%, 优于未预旋涂器件 (19.7%) 及单一 PEA1 预旋涂处理器件 (20.2%), 同时也表现出优良稳定性。

关键词: 钙钛矿太阳能电池; 宽带隙; 预旋涂; 甲胺乙醇溶液; 缺陷钝化

中图分类号: TM914.42

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)S2-0228-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.041

Study on prespin coating technology of wide-band gap perovskite solar cells

TAN Li, LI Hai-jin*

(School of New Energy and Materials, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Wide band gap perovskite solar cell is the main component of crystalline silicon-perovskite laminated cell. Due to the problems of high defect density and serious phase separation in wide band gap perovskite materials, the development of wide band gap perovskite solar cells is limited. In order to improve these problems, a pre-spin coating method is proposed, that is, a perovskite thin film is prepared by two-step method, and methylamine ethanol solution (MES) and phenylethyl ammonium iodide (PEAI) are evenly coated on the surface of lead iodide layer to complete the pre-spin coating process. After pre-spin coating, the best efficiency of the device is 20.81%, which is better than that of the device without pre-spin coating (19.7%) and the device with single PEA1 pre-spin coating (20.2%), and it also shows excellent stability.

Key words: perovskite solar cells; wide-band gap; prespin coating; methylamine ethanol solution; defect passivation

钙钛矿太阳能电池 (PSCs) 由于具有出色的光电转换效率 (PCE) 而被认为是最有前途的光伏技术之一^[1]。经过数 10 年的发展, PSCs 的 PCE 已经超过 26%^[2], 逼近了传统硅太阳能电池的效率水平。而对于带隙大于 1.65 eV 的 PSCs^[3], 其 PCE 明显低于 S-Q 效率极限 [由斯特凡-鲁曼定律 (Shockley-Queisser limit) 提出, 并在 1961 年被详细描述和计算出来, 这一极限主要考虑了太阳辐射在光伏材料中的能量转换效率上限], 具有很大的发展潜力。此外, 宽带隙 (WBG) 钙钛矿能够吸收波长较短的太阳光, 与窄带隙钙钛矿组合成叠层电池, 能拓宽光吸收范围^[4], 获得更高的 PCE 。

在晶硅-钙钛矿叠层电池中, WBG 钙钛矿的最佳带隙约为 1.68 eV, 晶硅电池的最佳带隙约为 1.1 eV^[5]。Br 的添加可以增大钙钛矿的带隙^[6], 通常, 获得 1.68 eV 左右的带隙是通过将 Br 质量分数增加到 20% 左右来实现; 但随着 Br 质量分数的增加, 由于严重的非辐射复合和相分离, 会限制宽带隙

钙钛矿的效率与稳定性^[7]。因此, 目前宽带隙 (1.67 eV) 的最高效率为 22.28%^[8], 还具有很大提升空间。不仅如此, 为了提高叠层器件效率, 迫切需要具有高性能和稳定性的宽带隙钙钛矿太阳能电池。

对钙钛矿表/界面进行界面钝化/修饰是改善 PSCs 光伏性能的有效途径之一^[9]。Liu 等^[10] 在钙钛矿/碳界面引入碘化丁铵 (BAI), BAI 与 3D 钙钛矿层发生固相反应, 在钙钛矿/碳界面处形成 2D 钙钛矿层, 获得连续接触的钙钛矿/碳界面和更好的能级排列。由于钙钛矿/碳界面的无缝接触和原位形成的 2D 钙钛矿层作为钝化和电子阻挡层, 大大减少了钙钛矿/碳界面的电荷复合。Song 等^[11] 使用 2D 钙钛矿单晶辅助方法重建了 2D/3D 钙钛矿的原位相, 将 2D Ruddlesden-Popper (RP) 钙钛矿单晶 (DFP)₂PbI₄ 溶液旋涂在 3D 钙钛矿表面, 然后进行热处理, 形成 2D RP 型钙钛矿的梯度相分布, 所得到的薄膜表现出大大降低的陷阱密度、增加的载流

收稿日期: 2024-03-21; 修回日期: 2024-07-11

作者简介: 谭理 (1996-), 男, 硕士生, 研究方向为钙钛矿太阳能电池, 329357020@qq.com; 李海进 (1989-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为钙钛矿太阳能电池, 通讯联系人, haijinli@swpu.edu.cn。

子迁移率和优良的疏水性。Fu等^[12]通过将CsPbI₃钙钛矿表面与铬酸铵(AC)反应,在CsPbI₃钙钛矿表面(AC-CsPbI₃)成功地原位形成了一层紧凑、高稳定性的薄无机铅氧盐PbCrO₄钝化层。铬酸铵与CsPbI₃表面暴露的Pb²⁺形成强离子键,有效地钝化I空位缺陷。PbCrO₄的疏水性保护了CsPbI₃薄膜免受水的侵蚀,因此其器件的PCE从17.96%提高到了19.09%,封装器件在相对湿度(25±5)%的空气中储存500 h后,仍能保持96.03%的初始效率。Jiang等^[13]提出了一种有效的钝化策略,即用有机卤化物盐4-氟苯乙基碘化铵(F-PEAI)直接改性钙钛矿表面,而无需进一步退火。F-PEAI钝化在很大程度上抑制了碘空位的形成,从而大大减少了薄膜缺陷,缩短了电荷捕获过程,有效地抑制界面非辐射复合并降低复合损失,因此,经F-PEAI修饰器件的效率(21%)比对照器件(19.5%)更高。此外,由于疏水性增强和缺陷密度降低,经过F-PEAI处理的器件在空气环境下720 h后仍保持90%的初始效率,具有良好的稳定性。

直接构建2D/3D结构钙钛矿或者缺陷钝化,都会面临钝化不充分的问题^[14]。2D钙钛矿由于其半绝缘性质,通常需要非常薄的厚度来确保与电子传输层之间良好的电荷转移。然而,这种非常薄的厚度常常导致通过溶液法制备的表面2D钙钛矿形成不连续的覆盖层。未被完全覆盖的3D钙钛矿区域仍具有大量的表面缺陷,从而影响器件的性能。另外,这种双层器件退火后会对3D钙钛矿结构造成破坏,降低器件的性能^[15]。因此,提高钙钛矿薄膜的结晶度、降低初始缺陷密度是研究人员需要关注的重要方面。

基于此,笔者提出了一种预旋涂工艺,即在两步法制备钙钛矿薄膜中,在第一步碘化铅层制备完成后,用MES+PEAI完成预旋涂工艺。通过多种表征手段测试了不进行预旋涂处理、单一MES预旋涂处理以及MES+PEAI预旋涂处理对于钙钛矿薄膜质量与PSCs性能和稳定性的影响。

1 材料与仪器

1.1 材料

掺锡氧化铟导电玻璃(ITO),辽宁优选新能源科技有限公司生产;碘化铅(PbI₂)、溴化铅(PbBr₂)、氯化铅(PbCl₂)、碘化铯(CsI)、碘化甲脒(FAI)、溴化甲胺(MABr)、氯化甲胺(MACl)、氢碘二甲胺(DMAI)、苯乙胺碘(PEAI),西安浴日光能科

技有限公司生产;甲胺乙醇溶液(MES,分析纯),阿拉丁生产;无水异丙醇(IPA,99.9%)、二甲基亚砜(DMSO,99.9%)、二甲基甲酰胺(DMF,99.9%)和乙醇(EtOH,99.5%),Sigma-Aldrich生产;SnO₂前驱体溶液,Alfa Aesar生产;所有药品购买后直接使用,无需纯化处理。

1.2 仪器

超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司生产;紫外-臭氧设备,Novascan Technologies, Lnc生产;电子天平,赛多利斯科学仪器有限公司生产;旋涂仪,美国Laurell有限公司生产;加热台,广州艾卡仪器设备有限公司生产;手套箱,上海米开罗那有限公司生产;恒温干燥箱,北京中兴伟业仪器有限公司生产;真空蒸镀设备,中国科学院沈阳科学仪器有限公司生产。

2 实验部分

2.1 器件制备

用玻璃清洗剂、去离子水、乙醇对ITO玻璃基板进行超声波清洗30 min,然后在乙醇中保存。将二氧化锡纳米颗粒(SnO₂)前驱体用去离子水稀释至4%,超声分散30 min,取70 μL溶液滴加在预处理后的导电玻璃上,旋涂速度为4 000 r/s,加速度为2 000 r/s²,旋涂30 s,最后在180℃条件下退火20 min,得到电子传输层。将2 mg PEAI、一定量的MES与1 mL IPA混合制备预旋涂剂。第1步:将553.2 mg PbI₂、110.1 mg PbBr₂、77.943 mg CsI、10.42 mg PbCl₂、2.6 mg DMAI溶于1 mL DMF、DMSO溶剂中($V_{\text{DMF}}:V_{\text{DMSO}}=9:1$),取45 μL溶液至电子传输层上旋涂30 s,旋涂速度为2 500 r/s,加速度为2 500 r/s²;最后在70℃条件下退火30 s得到PbI₂层;随后取70 μL预旋涂剂至PbI₂层旋涂30 s,旋涂速度为5 000 r/s,加速度为5 000 r/s²,旋涂结束,得到预旋涂层。第2步:将90 mg FAI、9 mg MABr、9 mg MACl溶于1 mL异丙醇;取70 μL溶液至PbI₂层旋涂30 s,旋涂速度为2 700 r/s,加速度为2 700 r/s²;最后在150℃条件下退火15 min,得到钙钛矿层。将72.3 mg Spiro-OMeTAD、28.8 μL叔丁基吡啶(TBP)和28.8 μL Li-TFSI溶液混合溶解于1 mL氯苯中。取45 μL溶液旋涂于缺陷钝化层30 s,旋涂速度为3 000 r/s,加速度为3 000 r/s²,旋涂结束,得到空穴传输层。用真空蒸镀设备沉积200 nm厚度的金属银,完成器件的制备。制备示意图如图1所示。

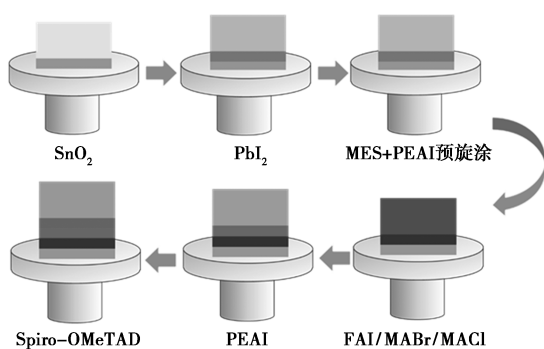


图 1 宽带隙钙钛矿太阳能电池制备流程图

2.2 结构表征及性能测试

利用 FEI INSPECT F50 型场发射扫描电镜 (FESEM) 测试样品的表面形貌。利用 PANalytical B. V. 公司 X'Pert Pro MPDX 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析钙钛矿薄膜的晶体性质。利用 Shimadzu UV-3600 Plus 型紫外-可见光分光光度计测试样品的吸光特性,扫描波长为 300~900 nm。利用 Edinburgh FLS 980 型时间分辨光致发光仪研究钙钛矿薄膜的载流子迁移动力学。采用 Keithley 2400 光源计和 Enli Tech SS-F5-3A 型太阳模拟器在标准 AM 1.5G 照度 ($100 \text{ mW}/\text{cm}^2$) 下测量光电流密度电压 ($J-V$) 曲线。利用 BENTHAM TMC300 EQE 系统测量 300~900 nm 波长范围内的外量子效率 (IPCE) 谱和积分电流密度。电化学工作站测量 EIS、Mott-Schottky、SCLC 和暗电流密度。

3 结果与分析

将未进行预旋涂处理的钙钛矿薄膜作为对照组 (Control), 单独使用 PEAI 预旋涂处理的钙钛矿薄膜命名为 PEAI-2, 经体积分数为 7.5、15、25 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 的 MES+PEAI 预旋涂处理的钙钛矿薄膜分别命名为 MES-7.5、MES-15、MES-25。

3.1 器件性能分析

为了探究 MES+PEAI 预旋涂对器件光伏性能的影响, 制备了具有 ITO/电子传输层/钙钛矿层/钝化层/空穴传输层/银电极结构的钙钛矿器件。

对照组及经 PEAI、PEAI + MES - 7.5、PEAI + MES-15、PEAI+MES-25 预旋涂的 PSCs 的性能如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 对照组及经 PEAI、PEAI+MES-7.5、PEAI+MES-15、PEAI+MES-25 预旋涂的 PSCs 的平均 PCE 分别为 19.74%、19.82%、20.22%、20.51% 和 20.33%, 平均开路电压 (V_{oc}) 的变化趋势相同, 而且短路电流 (J_{sc})、填充因子 (FF) 在预旋涂后均有一定提升。总之, 在相同的薄膜和

器件制造条件下, 当使用预旋涂工艺后, 电池性能得到明显改善, 并且在使用 PEAI+MES-15 预旋涂时电池性能最佳。详细性能参数如表 2 所示。表明预旋涂 PEAI 或 PEAI+MES 可以改善钙钛矿与电极之间的界面特性, 减少电荷的损失和复合, 提高光电转换效率, 并且 PEAI+MES 效果比单独使用 PEAI 更好。未经过预旋涂处理的器件存在界面缺陷、表面不均匀性等问题, 导致载流子传输和收集的效率低下, 从而降低器件性能。结果表明, 经过预旋涂处理的器件表现出更出色的光电转换能力, 即有效钝化了界面处的缺陷, 提高了载流子的迁移率, 从而增加了短路电流。

表 1 对照组、PEAI-2 与 MES-7.5~25 的详细光伏参数

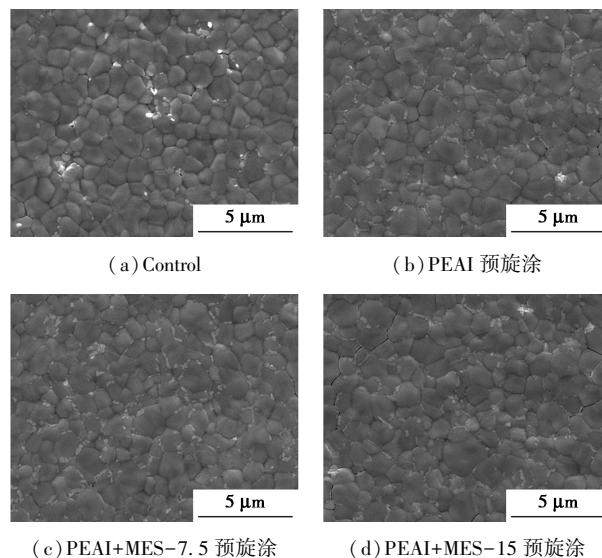
器件	平均 $V_{oc}/$ V	平均 $J_{sc}/$ ($\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)	平均 $FF/$ %	平均 $PCE/$ %
对照组	1.128	21.93	77.90	19.74
PEAI-2	1.132	21.91	78.02	19.82
MES-7.5	1.137	22.25	78.45	20.22
MES-15	1.148	22.14	78.86	20.51
MES-25	1.126	21.67	77.31	20.33

表 2 对照组、PEAI-2 与 MES-15 的详细光伏参数

器件	V_{oc}/V	$J_{sc}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	$FF/\%$	$PCE/\%$
对照组	1.13	22.50	77.14	19.70
PEAI-2	1.14	22.41	78.73	20.22
MES-15	1.15	22.47	80.61	20.81

3.2 SEM 分析

使用不同预旋涂剂的钙钛矿薄膜 SEM 图如图 2 所示。

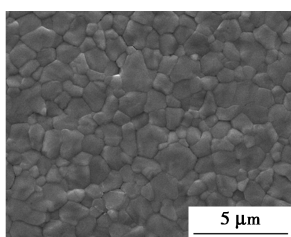


(a) Control

(b) PEAI 预旋涂

(c) PEAI+MES-7.5 预旋涂

(d) PEAI+MES-15 预旋涂



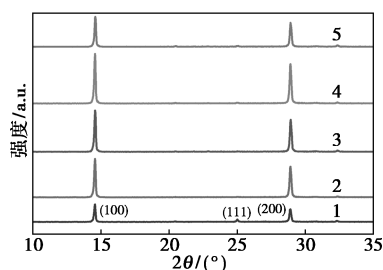
(e) PEAI+MES-25 预旋涂

图 2 钙钛矿薄膜 SEM 图

从图 2 中可以看出,当使用 PEAI 预旋涂后,相比于对照薄膜,钙钛矿薄膜晶界处出现更多、更均匀分布的白色块状物质,推测这是残留的少量 PbI_2 。对照组图像中 PbI_2 呈现更大更聚集的分布,当使用 PEAI 预旋涂后,大块碘化铅明显减少,而出现更小更均匀的分布;但当 MES 体积分数达到 $25 \mu\text{L}/\text{mL}$ 时,薄膜中残余的 PbI_2 明显被抑制。在钙钛矿薄膜中,若大块碘化铅分布在钙钛矿晶界处且逐渐细化,可带来多重好处。首先,这有助于提升钙钛矿薄膜的结晶度,从而改善载流子迁移率,减少电荷复合,进而提高光电器件的性能;其次,碘化铅作为掺杂剂,可以优化钙钛矿薄膜的光电性能,提高光电转换效率。此外,这一过程还可能增强钙钛矿薄膜的稳定性,并减少晶格和晶界缺陷密度,有利于提高器件的长期稳定性与光电性能表现。

3.3 XRD 分析

为了研究预旋涂对 WBG 钙钛矿晶体的影响,制备了 PEAI 与 3 种不同体积分数的 MES+PEAI 预旋涂薄膜,并对其进行 XRD 测试分析,结果如图 3 所示。



1—Control; 2—PEAI-2; 3—MES-7.5; 4—MES-15; 5—MES-25

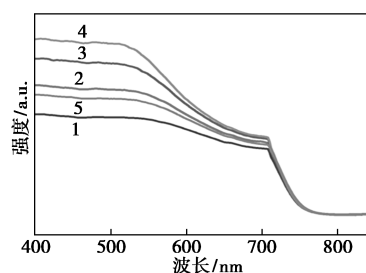
图 3 使用不同预旋涂剂的钙钛矿薄膜的 XRD 图谱

从图 3 中可以看出,所有样品均没有其他杂峰,并且都是钙钛矿的特征峰,分别为 14.5° 的 (100) 晶面、 25.0° 的 (111) 晶面、 28.9° 的 (200) 晶面。经预旋涂处理后样品的结晶度均有提升,并且能够抑制钙钛矿 (111) 相的生成。尽管钙钛矿 (111) 晶面在

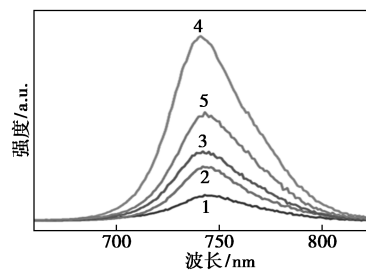
某些方面具有重要的作用,但其存在一些缺点和挑战,这些缺点在特定的应用环境中会产生不利影响。(111) 晶面容易出现表面缺陷,如错配、位错等,这些缺陷可能导致电荷复合或载流子的非辐射复合,从而影响光电性能和器件效率^[16]。钙钛矿材料在环境中容易受到湿度、氧气、光照等因素的影响,(111) 晶面更容易受到这些环境因素的攻击,导致材料的退化和不稳定性^[17]。相比于仅使用 PEAI 预旋涂,添加 MES 溶液后其结晶度更好,结晶度好的钙钛矿薄膜通常具有更高的载流子迁移率和更长的电荷寿命,这有助于提高太阳能电池的光电转换效率。高结晶度的钙钛矿薄膜能够有效地减少电子和空穴的复合损失,从而提高器件的光电性能。

3.4 薄膜光学性能分析

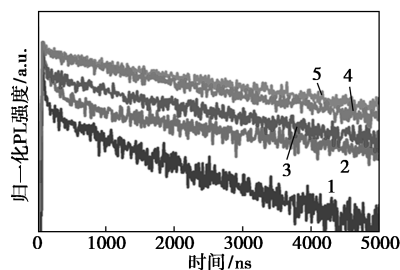
对照组与使用不同预旋涂剂的薄膜紫外-可见光吸收光谱、PL 图谱和 TRPL 图谱如图 4 所示。



(a) 紫外-可见光吸收光谱



(b) PL 图谱



(c) TRPL 图谱

1—Control; 2—PEAI-2; 3—MES-7.5; 4—MES-15; 5—MES-25

图 4 对照组与使用不同预旋涂剂的薄膜紫外-可见光吸收光谱、PL 图谱和 TRPL 图谱

从图 4(a) 中可以看出,经预旋涂处理后的钙钛矿薄膜吸光度均有一定提高,其中 MES-7.5 组的

吸光度最大,但其带隙并没有明显变化。经预旋涂后吸光度增大是由于预旋涂形成了一层较为均匀且致密的涂层,改善了表面的平整度和粗糙度,从而减少了光的散射和反射,并提高了光的吸收效率。这种涂层可以有效地增加钙钛矿薄膜与光的相互作用,提高光电转换效率,进而导致吸光度的增大^[18]。

从图 4(b)中可以看出,未预旋涂的薄膜 PL 强度明显低于经预旋涂工艺处理的钙钛矿薄膜,说明预旋涂工艺能够有效抑制非辐射复合。而且在加入 MES 与 PEAI 一起作为预旋涂后,PL 强度也有明显提升,说明 PEAI+MES 的预旋涂协同作用效果比仅使用 PEAI 的效果更好。从图 4(c)中可以看出,通过公式 $\tau_{ave} = (A_1\tau_1^2 + A_2\tau_2^2) / (A_1\tau_1 + A_2\tau_2)$ 对曲线的拟合^[19],可以分别得到经不同预旋涂剂处理的钙钛矿薄膜的载流子寿命,对照组的平均寿命 $\tau_{ave} = 1\ 160$ ns,仅使用 PEAI 预旋涂剂的平均寿命 $\tau_{ave} = 1\ 192$ ns,而使用 PEAI+MES-15 的平均寿命 $\tau_{ave} = 3\ 393$ ns,进一步表明预旋涂工艺能够有效抑制钙钛矿薄膜的非辐射复合。

3.5 电子传输性能分析

为了探究经 PEAI-MES-15 预旋涂的 PSCs 器件内载流子的传输和复合过程,根据 Mott-Schottky 模型^[20],测量 PEAI+MES-15 预旋涂和未预旋涂器件的 $C^{-2}-V$ 曲线,以计算器件的内置电势 (V_{bi}),结果如图 5 所示。

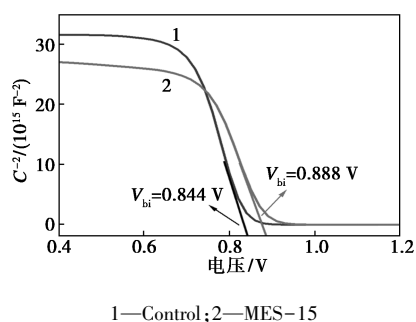


图 5 Mott-Schottky 图

从图 5 中可以看出,经 PEAI+MES-15 预旋涂器件的 V_{bi} 为 0.888 V,与对照样品 (0.844 V) 相比, V_{bi} 的增加表明电荷输运更容易,有利于提高 J_{sc} ,这与上述光伏参数结果一致。

3.6 稳定性测试

在空气环境 (RH 分别为 10%~40%) 中对非封装器件的稳定性进行测试,结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,900 h 后,预旋涂器件仍保持其初

始 PCE 的 80.8% 以上,而对照器件在相同存储后仅保持其初始 PCE 的 65.9%。结果表明,预旋涂工艺能够有效提升 PSCs 器件的稳定性。

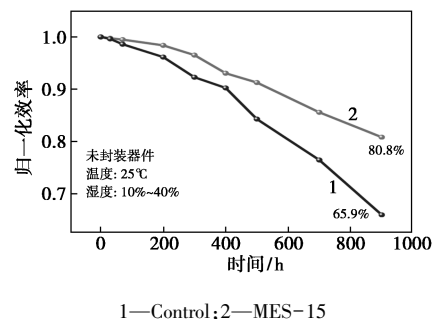


图 6 湿度稳定性

4 结论

将 PEAI 与 MES 共同作为预旋涂剂制备了 WBG PSCs。研究了 PEAI 与不同体积分数 MES 作为预旋涂剂对钙钛矿薄膜微观形貌、晶体质量、器件性能、光学性能与稳定性的影响,经预旋涂后,钙钛矿薄膜结晶度明显提高,当 MES 体积分数为 15 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 时,钙钛矿薄膜质量最佳。钙钛矿薄膜表面缺陷态减少,载流子界面处的非辐射复合得到有效抑制,载流子迁移率提高,预旋涂后的 PSCs 器件的最佳 PCE 达到 20.81%。在空气环境 (RH 为 10%~40%) 中 900 h 后,经 PEAI+MES 预旋涂器件仍能保持初始效率的 80.8%,稳定性比未预旋涂器件更好,表明预旋涂工艺能够有效地提高钙钛矿太阳能电池的稳定性。

参考文献

- [1] 张红梅,尹云华.太阳能电池的研究现状与发展趋势[J].水电能源学,2008,26(6):193-197.
- [2] 李超,宋宏伟,陈聪.单晶钙钛矿太阳能电池研究进展[J].发光学报,2024,45(5):711-726.
- [3] Guangyao, Xue Z, Yu Z, et al. Reduced open-circuit voltage deficit in wide-bandgap perovskite solar cells enabled by thiazolidine-based interfacial engineering [J]. J Mater Chem C, 2023, 11: 10259-10265.
- [4] Huang Y, Tzeng T, Lin T, et al. A self-powered CMOS reconfigurable multi-sensor SoC for biomedical applications [J]. J Solid-State Circuits, 2014, 49(4): 851-866.
- [5] Laipan Z, Longfei W, Caofeng P, et al. Enhancing the efficiency of silicon-based solar cells by the piezo-phototronic effect [J]. ACS Nano, 2017, 11(2): 1894-1900.
- [6] Okil M, Salem M S, Abdolkader T M, et al. From Crystalline to low-cost silicon-based solar cells: A review [J]. Silicon, 2022, 14(5): 1895-1911.

- [7] Sunet A K, Prashant D, Samajdar D P. Design methodologies of InP nanopyramid array based low cost hybrid solar cells[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 58(P2): 677–681.
- [8] Khaled S M, Kumar B M, Jaker H. Simulation approach to reach the SQ limit in CIGS-based dual-heterojunction solar cell [J]. *Optik*, 2022, 249: 168278.
- [9] Shah D K, Yang O B, Akhtar M S, *et al.* A computational study of carrier lifetime, doping concentration, and thickness of window layer for GaAs solar cell based on Al₂O₃ antireflection layer [J]. *Solar Energy*, 2022, 234: 330–337.
- [10] Liu C, Shen X, Liao J, *et al.* Contact engineering and in situ formation of 2D perovskite via solid-phase growth for efficient hole-transport-layer-free perovskite solar cells [J]. *Solar RRL*, 2023, 7(11): 2300020.
- [11] Song Z L, Gao Y P, Zou Y, *et al.* Single-crystal-assisted in situ phase reconstruction enables efficient and stable 2D/3D perovskite solar cells [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, 146(2): 1657–1666.
- [12] Fu Y, Huifang H, Huijing L, *et al.* In situ formation of an inorganic lead oxysalt surface passivation layer for highly efficient and stable CsPbI₃ perovskite solar cells [J]. *J Mater Chem A*, 2024, 12: 2877–2886.
- [13] Jiang X, Chen S, Li Y, *et al.* Direct surface passivation of perovskite film by 4-fluorophenethylammonium iodide toward stable and efficient perovskite solar Cells [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(2): 2558–2565.
- [14] Weihai S, Jinjun Z, Xiaobing W, *et al.* Enhanced photovoltage and stability of perovskite photovoltaics enabled by a cyclohexylmethylammonium iodide-based 2D perovskite passivation layer [J]. *Nanoscale*, 2021, 13(35): 14915–14924.
- [15] Li W, Rothmann M U, Zhu Y, *et al.* The critical role of composition-dependent intragrain planar defects in the performance of MA_{1-x}FA_xPbI₃ perovskite solar cells [J]. *Nature Energy*, 2021, 6: 624–632.
- [16] Xianjin W, Zhengyuan H, Feng G, *et al.* Facet orientation and intermediate phase regulation via a green antisolvent for high-performance perovskite solar cells [J]. *Solar RRL*, 2022, 6(4): 2100973.
- [17] Guang Y, Zhenyi N, J Z Y, *et al.* Defect engineering in wide-bandgap perovskites for efficient perovskite-silicon tandem solar cells [J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(8): 588–594.
- [18] Jiabang C, Deng W, Shi C, *et al.* Dually modified wide-bandgap perovskites by phenylethylammonium acetate toward highly efficient solar cells with low photovoltage loss [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14(38): 43246–43256.
- [19] Liga M, Walsh A, Scanlon D, *et al.* Mixed-cation vacancy-ordered perovskites (Cs₂Ti_{1-x}Sn_xX₆; X = I or Br): low-temperature miscibility, additivity, and tunable stability [J]. *J Phys Chem C*, 2023, 127,(43): 21399–21409.
- [20] Sa R, Zhang Q, Luo B, *et al.* Exploring the electronic and optical properties of vacancy-ordered double perovskites Cs₂PtX₆ (X = Cl, Br, I) [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2021, 304: 122602. ■

(上接第 227 页)

- [8] Zhang Y, Wang H, Qian P, *et al.* Sulfonated poly(ether ether ketone)/amine-functionalized graphene oxide hybrid membrane with various chain lengths for vanadium redox flow battery: A comparative study [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 610: 118232.
- [9] Wang W, Luo Q, Li B, *et al.* Recent progress in redox flow battery research and development [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(8): 970–986.
- [10] Winardi S, Raghu S C, Oo M O, *et al.* Sulfonated poly(ether ether ketone)-based proton exchange membranes for vanadium redox battery applications [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 450: 313–322.
- [11] Wei W, Zhang H, Li X, *et al.* Poly(tetrafluoroethylene) reinforced sulfonated poly(ether ether ketone) membranes for vanadium redox flow battery application [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 208: 421–425.
- [12] Liu G, Tsen W C, Jang S C, *et al.* Mechanically robust and highly methanol-resistant sulfonated poly(ether ether ketone)/poly(vinylidene fluoride) nanofiber composite membranes for direct methanol fuel cells [J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 591: 117321.
- [13] Xi J, Li Z, Yu L, *et al.* Effect of degree of sulfonation and casting solvent on sulfonated poly(ether ether ketone) membrane for vanadium redox flow battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 285: 195–204.
- [14] Yin B, Yu L, Jiang B, *et al.* Nano oxides incorporated sulfonated poly(ether ether ketone) membranes with improved selectivity and stability for vanadium redox flow battery [J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2016, 20: 1271–1283.
- [15] Xi J, Dai W, Yu L. Polydopamine coated SPEEK membrane for a vanadium redox flow battery [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(42): 33400–33406.
- [16] Yu L, Lin F, Xiao W, *et al.* CNT@ polydopamine embedded mixed matrix membranes for high-rate and long-life vanadium flow batteries [J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 549: 411–419.
- [17] Zhang Y, Wang H, Yu W, *et al.* Sulfonated poly(ether ether ketone)-based hybrid membranes containing polydopamine-decorated multiwalled carbon nanotubes with acid-base pairs for all vanadium redox flow battery [J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 564: 916–925.
- [18] Zhang Y, Wang H, Qian P, *et al.* Hybrid proton exchange membrane of sulfonated poly(ether ether ketone) containing polydopamine-coated carbon nanotubes loaded phosphotungstic acid for vanadium redox flow battery [J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 625: 119159.
- [19] He Y, Wang J, Zhang H, *et al.* Polydopamine-modified graphene oxide nanocomposite membrane for proton exchange membrane fuel cell under anhydrous conditions [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2(25): 9548–9558. ■