

乙腈添加剂对钙钛矿太阳能电池空穴传输界面的改善研究

张 鹏, 蔡静萱, 陈翌庆*

合肥工业大学, 材料科学与工程学院, 安徽 合肥
Email: zhour@mail.hfut.edu.cn, *chenyq1963@126.com

收稿日期: 2021年5月20日; 录用日期: 2021年6月21日; 发布日期: 2021年6月28日

摘 要

钙钛矿太阳能电池凭借其高光电转化效率和易制备、低成本的优势, 在目前已成为最具前途的光伏器件之一。研究表明钙钛矿层的界面修饰可有效减少界面中存在的陷阱态, 并降低载流子输运势垒。本研究介绍了一种改善空穴层和钙钛矿界面的简易有效方法, 即在空穴层前驱液中加入少量乙腈, 少量乙腈可以腐蚀光功能层的表面使其与空穴层形成互扩散结构, 进而改善两者之间的载流子传输界面。这种方法改善了空穴传输界面的点接触, 减少了位错、悬挂键等复合中心, 减少了缺陷能级, 进而减少载流子的传输损耗以提高光电转化效率。最优处理后的电池, 最优光电转化效率可达17.9%, 提高了11.4%。

关键词

MAPbI₃太阳能电池, 乙腈, 空穴传输界面, 界面钝化

Study on the Interfacial Improvement of Hole-Transport Layer in Perovskite Solar Cells via Acetonitrile Additive

Peng Zhang, Jingxuan Cai, Yiqing Chen*

School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui
Email: zhour@mail.hfut.edu.cn, *chenyq1963@126.com

Received: May 20th, 2021; accepted: Jun. 21st, 2021; published: Jun. 28th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 张鹏, 蔡静萱, 陈翌庆. 乙腈添加剂对钙钛矿太阳能电池空穴传输界面的改善研究[J]. 纳米技术, 2021, 11(3): 27-35. DOI: 10.12677/nat.2021.113004

Abstract

Due to the high power conversion efficiency, easy preparation process and lowcost, organometal halide perovskite solar cells have developed into one of the most promising photovoltaic devices. It has been found that it is effective to reduce the defect state located in perovskite film via interfacial modification of the perovskite layer. In this paper, ACN additive with low concentration was introduced into Spiro-OMeTAD precursor to modify the perovskite interfaces. ACN additive can dissolve impurities in the surface of the perovskite layer, leading to the formation of an inter-diffusion structure between perovskite and Spiro-OMeTAD layers. Consequently, the method can improve the electrical contact of hole transport layer and decrease recombination losses originated from dislocation defect or dangling bond. Consequently, the corresponding best performance device generates conversion efficiency of 17.9%, 11.4% higher than that of the pristine device.

Keywords

MAPbI₃ Perovskite Solar Cells, Acetonitrile, Hole Transport Interface, Interfacial Passivation

Copyright © 2021 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

目前, 钙钛矿太阳能电池(PSCs)凭借其优异的光电转化效率和低制备成本, 在光伏领域备受关注, 已经达到了与最先进的铜铟镓二硒化合物(CIGS)太阳能电池相当的性能水平, 接近商用单晶硅太阳能电池, 其光电转化效率(PCE)目前最高可以达到 25.5% [1] [2] [3] [4] [5]。

尽管有十分多的途径可以提升钙钛矿太阳能电池的性能, 但是大多数的研究集中于光吸收层与电子传输层上, 基于空穴传输层(HTL)的研究, 在 n-i-p 型器件中也仅仅是停留在对 Spiro-OMeTAD 的改性上, 通过添加金属盐或 4-叔丁基吡啶来对 Spiro-OMeTAD 进行 p 型掺杂, 进而对其电导性进行改性[6] [7]。然而, 对于从 HTL 入手以减少钙钛矿层与 HTL 之间的界面载流子传输损耗方面的研究却廖若星辰。由于钙钛矿和氧化物电荷传输层之间形成的异质界面的物理和电接触性通常比有机层更差, 所以在界面处通常都会存在大量的非辐射复合中心[8] [9] [10]。鉴于这种机理, 我们的研究目的主要针对于这些不利因素进行钝化。Tao 等人采用类似的方法, 将乙腈(ACN)作为添加剂添加到碳基 PSCs 中的 HTL 中, 钙钛矿/碳界面得到有效改善, 光伏性能随之提高[11]。乙腈(ACN)是一种优良的有机溶剂, 分子式为 C₂H₃N, 通过实验发现 ACN 能够与氯苯(CB)无限互溶, 并且它能够很好地溶解钙钛矿及其表面的有机杂质[12]。所以在钙钛矿层表面覆盖上一定浓度的 ACN, 反应一段时间后, 当钙钛矿表面的有机杂质溶解到 ACN 溶剂中后再进行高速旋涂, 将带有杂质的 ACN 溶剂离心掉。这不仅降低了界面处非辐射复合中心的浓度, 还使钙钛矿与 Spiro-OMeTAD 在界面处形成互扩散结构, 并一定程度上改善了器件在全空气环境中的迟滞效应。

在本研究中, 我们介绍了一种简便的方法来改善 MAPbI₃ 钙钛矿层与 HTL 之间的界面, 即在 Spiro-OMeTAD 前驱液中添加少量 ACN。通常, Spiro-OMeTAD 溶液简单旋涂到钙钛矿层上, 只会产生平面接触。为了改善这种界面, 我们将 Spiro-OMeTAD 溶解在具有含不同体积比 ACN 的氯苯(CB)溶剂中, 当 HTL 前驱液滴满钙钛矿层表面上时, 在开始旋涂之前停留一定的时长作为溶解时间。随着时间的

流逝, ACN 溶解了钙钛矿表面, 在旋涂完成后钙钛矿层和 HTL 之间会形成互扩散结构。

2. 实验

2.1. 实验材料

本实验所用的试剂有: 乙腈(C_2H_5N , 99.8%, Macklin)、双(乙酰丙酮基)二异丙基钛酸酯(75 wt%, aladdin)、异丙醇、正丁醇(99.8%, aladdin)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF, anhydrous)、二甲基亚砜(DMSO, anhydrous)、碘化铅(PbI_2 , p-OLED)、甲基碘化胺(MAI, 优选科技)、乙酸乙酯、氯苯(CB, anhydrous)、4-叔丁基吡啶(tBP)、双三氟甲烷磺酰亚胺锂(Li-TFSI)、2,2,7,7-四[N,N-二(4-甲氧基苯基)氨基]-9,9-螺二芴(Spiro-OMeTAD, p-OLED)、FTO (优选科技)、乙醇(EA)、丙酮(Acetone)。所有药品均直接使用, 没有经过预处理。

2.2. 测量与表征

用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM, SU8020)研究了钙钛矿薄膜的表面形貌。用 X 射线衍射仪(D/MAX2500V)分析了钙钛矿薄膜的晶体结构。用单色 Al $K\alpha$ (ESCALAB250Xi, Thermo, USA)X 射线源(1486.6 eV)获得了 X 射线光电子能谱(XPS)。用 Keithley 4200 SMU 仪器和日光模拟器(XES-301S)在 Am 1.5 (100 mW/cm^2)的光照条件下获得了 $J-V$ (电流密度 - 电压)。在 F-4500 荧光分光光度计上用 521 nm 激发激光测量了稳态光致发光光谱(PL)。在电化学工作站(Zahner, Germany)上测量了入射光电流转换效率谱(IPCE)和电化学阻抗谱(EIS), 其频率范围为 500 mHz 到 1 MHz, 扰动电压为 20 mV, 在黑暗条件下进行了偏压为 0~0.7 V 的 EIS 阻抗谱的测量。正向扫描和反向扫描的扫描速率均为 $0.2 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$, 延迟时间均为 100 ms。PL、 $J-V$ 、IPCE 和 EIS 测量均在无任何封装的全空气环境中进行。

2.3. 实验过程

如图 1, 在处理好的 FTO 上旋涂 TiO_2 并 500°C 烧结 30 min, 在将纯相的 $CH_3NH_3PbI_3$ 前驱液旋涂到 c- TiO_2 上, 在 105°C 下退火 10 min, 制得钙钛矿层。将 Spiro-OMeTAD 溶于 CB 中得到 HTL 前驱液, 再在其中加入 CAN, 其中 ACN 在 CB 中的含量分别为: 10%、15% (最优)、20%, 将 HTL 前驱液均匀地涂覆在钙钛矿层表面停留 15 秒后开始旋涂, 旋涂结束后再在样品表面镀上约 100 nm 厚的 Ag 电极, 得到完整的原型器件。

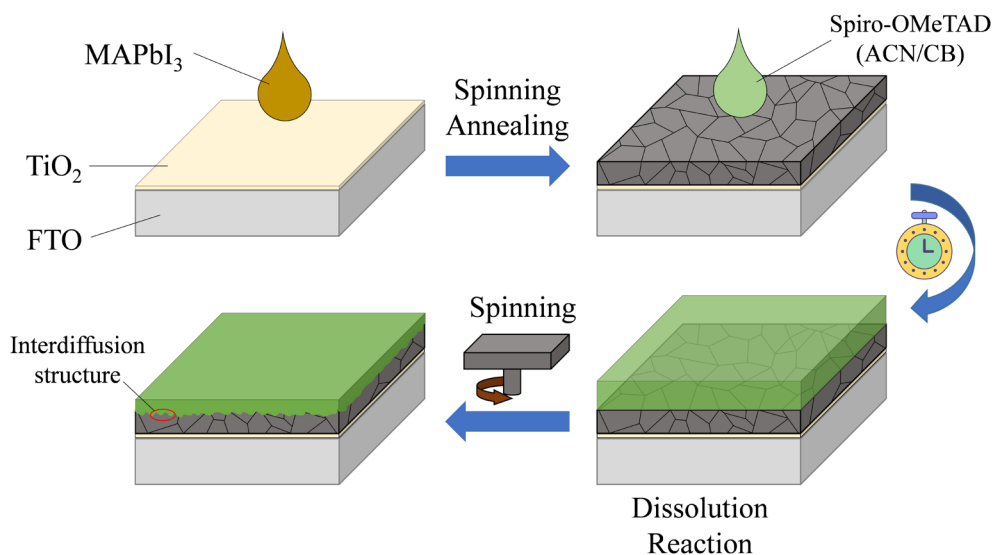


Figure 1. Experiment flow chart
图 1. 实验流程图

3. 结果与讨论

3.1. MAPbI₃ 薄膜的结构表征

在改进的方法中,用扫描电镜(SEM)分析了 ACN 对钙钛矿/HTL 界面形貌的影响,如图 2(a),对照组器件(无 ACN 添加剂)的横截面图像显示了钙钛矿层与 HTL 的接触是平面接触。对于改性的钙钛矿/HTL 界面,当 ACN 在 CB 中的浓度为 10%时,形貌没有发生明显的变化(图 2(b))。当 ACN 的浓度提高到 15%时,图 2(c)显示空穴层与钙钛矿层之间形成互扩散结构。随着 ACN 浓度的进一步增加,在达到 20%后,图 2(d)显示钙钛矿层的厚度减小,同时 HTL 的厚度增加。因为钙钛矿在 ACN 中具有一定的溶解度,故施加适当的反应时间会适当溶解掉钙钛矿的表面, Spiro-OMeTAD 会填充到粗糙的钙钛矿表面并与其互相扩散,最终形成钙钛矿/HTL 的互扩散界面。但是,随着 ACN 含量的增加,溶解程度加剧,钙钛矿薄膜的体材料部分被溶解掉甚至出现钙钛矿薄膜被贯穿的现象,可能会导致光吸收能力的降低,进而导致器件 PCE 的降低。通过实验探索,发现在 ACN 于 CB 中的含量为 15%的浓度条件下获得的钙钛矿层与 HTL 的互扩散界面最为理想。

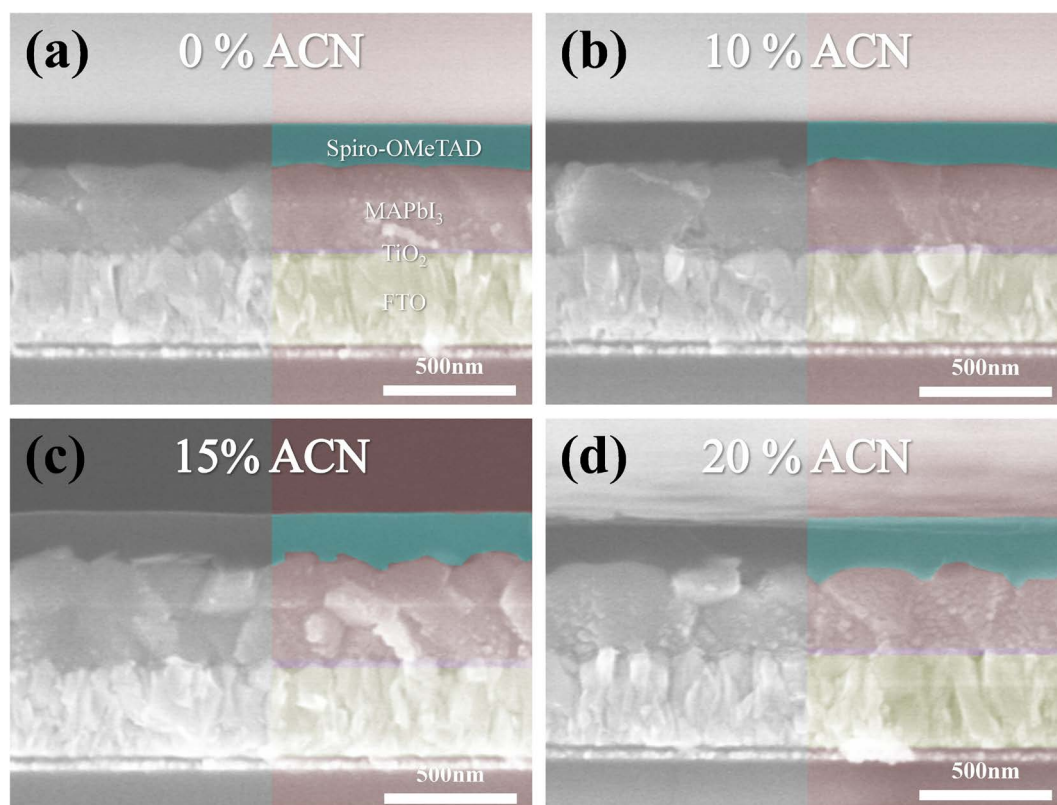


Figure 2. Cross-sectional SEM images of the corresponding device with n-i-p structure. The HTL was added with (a) 0%, (b) 10%, (c) 15%, (d) 20% CAN additive, respectively.

图 2. HTL 前驱液添加了(a) 0%、(b) 10%、(c) 15%、(d) 20%的 ACN 的 n-i-p 型器件的横截面 SEM 图

为了研究 ACN 对钙钛矿晶体学性质和元素结合能的影响,采用不同浓度的 ACN/CB 的混合溶剂代替 HTL 前驱液对钙钛矿表面进行处理。如图 3(a),经优化溶剂处理和经纯 CB 处理的钙钛矿表面的 X 射线衍射(XRD)峰的位置未观察到显著的差异,表明钙钛矿的结晶度未受到影响[13]。但是,当 ACN 的浓度为 20%时,其衍射峰的强度相对于对照组略有下降,这可能是由于钙钛矿薄膜变薄且结晶性变差,但是并没有改变材料的晶体结构。此外,我们还对这些样品进行了 X 射线光电子能谱分析(XPS),

如图 3(b)~图 3(d)所示, 通过比较 0% 和 15% 实验组的 C 1s、N 1s 的结合能, 发现它们之间峰的位置和强度并无明显差异, 整体的光电子能谱也基本一致, 表明 ACN/CB 溶剂处理后钙钛矿表面的原子结合能没有变化。

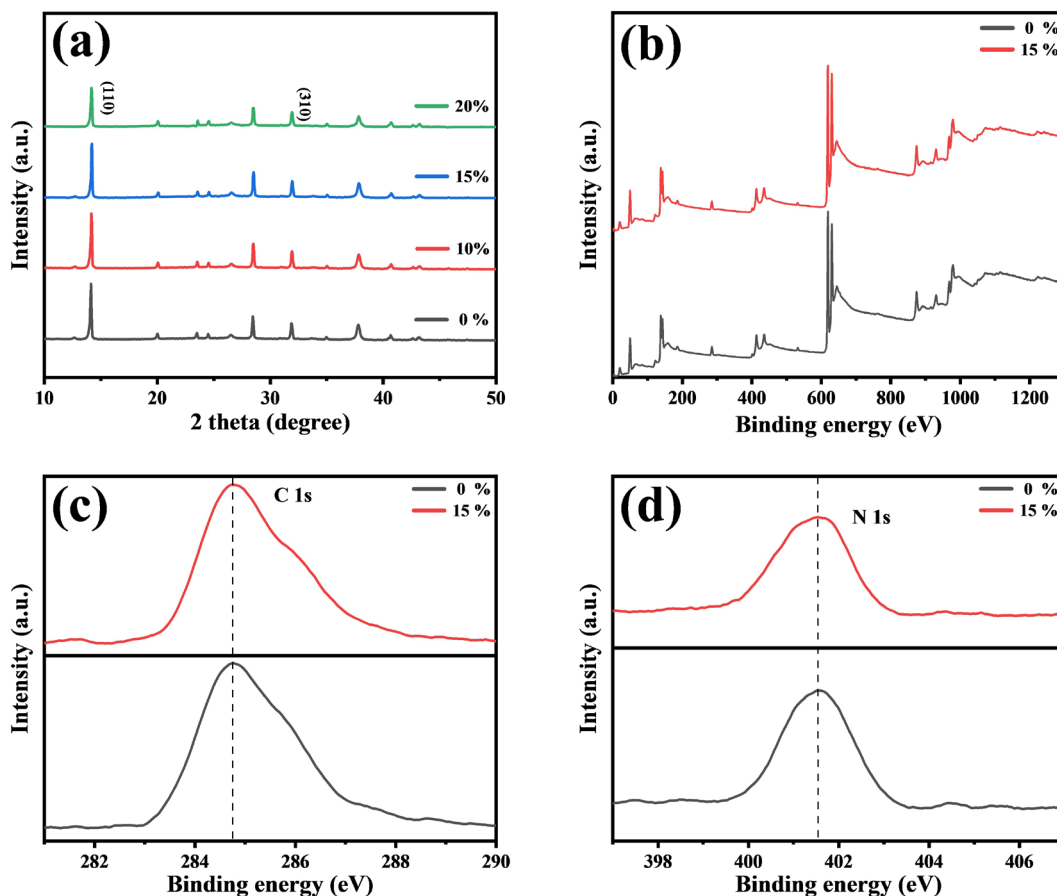


Figure 3. (a) XRD spectra of perovskite films with varied amounts of ACN agent; XPS spectra of perovskite films: (b) survey, (c) C 1s, (d) N 1s

图 3. (a) 不同 ACN 添加量的钙钛矿薄膜的 XRD 图谱; ACN 添加量为 0% 和 15% 的钙钛矿薄膜的 XPS 光谱: (b) 全扫描谱、(c) C 1s、(d) N 1s

3.2. 器件的性能

为了研究 ACN 对器件光伏性能的影响, 我们制备了 FTO/c-TiO₂/MAPbI₃/Spiro-OMeTAD/Ag 的 n-i-p 结构器件, 并测量了光电转化效率(PCE)、短路电流密度(J_{sc})、开路电压(V_{oc})和填充因子(FF)等光伏参数。对比表 1 中的各项参数, 这些光伏参数都遵循相同的趋势, 即 ACN 浓度为 15% 时各项性能参数皆达到最优。并且可以看出改进方法制备出的器件, 其 PCE 的提高主要归功于其 FF 和 V_{oc} 的提高, 而这两个参数与器件的界面损耗有关, 其中 V_{oc} 高度依赖于载流子的非辐射复合损耗, 非辐射复合损耗也对器件的 FF 有着限制作用。当 ACN 的浓度为 20% 时, 由于器件的 J_{sc} 和 FF 的降低而表现出较低的 PCE, 这是由于钙钛矿光吸收层的厚度变薄, 导致产生的光生载流子的密度降低, 从而引起 J_{sc} 的降低, 并且 HTL 相对厚度增加, 由此产生的串联电阻增加。因此, 最优组器件性能的提高是因为空穴传输界面载流子的非辐射复合率的降低, 因此在 HTL 前驱液中掺入少量的 ACN 可以钝化空穴传输界面的缺陷, 并且在 ACN 浓度为 15% 的实验条件下的钝化效果最佳。

Table 1. Photovoltaic parameters of perovskite solar cells with varied adding level of ACN agent
表 1. 不同 ACN 添加量的钙钛矿太阳能电池的光伏参数

ACN 添加量(%)	—	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
0	Average	1.025 ± 0.025	21.26 ± 1.21	71.24 ± 1.95	14.51 ± 0.41
	Best	1.003	22.19	72.38	16.06
10	Average	1.045 ± 0.026	21.33 ± 1.11	72.32 ± 2.05	15.64 ± 0.52
	Best	1.049	22.40	74.49	17.26
15	Average	1.063 ± 0.019	21.59 ± 0.95	75.13 ± 1.58	16.77 ± 0.50
	Best	1.069	22.20	78.87	17.89
20	Average	1.017 ± 0.28	20.87 ± 1.14	70.73 ± 2.08	13.98 ± 0.64
	Best	1.003	21.45	72.55	15.88

各实验组最优的电流密度 - 电压(J - V)曲线如图 4(a)所示, 它们的光伏参数的平均值和标准差如表 1 所示, 最优浓度组的 PCE 为 17.89%, 与对照组相比 PCE 提高了 11.4%。总所周知, 当界面不完善时, 正向扫描和反向扫描的复合损耗不同, 由此会导致器件中经常会出现迟滞的现象, 迟滞是影响载流子提取和复合的各种因素的综合结果。为了量化迟滞程度, 引入了迟滞指数(HI) [14] [15]:

$$HI = \frac{PCE_{reverse} - PCE_{forward}}{PCE_{reverse}} \quad (1)$$

其中, $PCE_{reverse}$ 为反向扫描的平均效率, $PCE_{forward}$ 为正向扫描的平均效率。如图 4(c)所示, 与对照组器件相比, 改进后的太阳能电池的迟滞得到了有效的改善。如表 2 所示, 对照组的迟滞指数为 0.37, 而改性后的器件的迟滞指数仅为 0.18, 迟滞现象得到大大改善。

Table 2. J - V parameters and hysteresis index (HI) of pristine and 15% ACN-added devices under reverse and forward voltage scanning

表 2. 原始和添加 15% ACN 器件的反扫和正扫 J - V 参数和迟滞指数(HI)

ACN 添加量(%)	—	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)	HI
0	Reverse	1.025 ± 0.025	21.26 ± 1.21	71.24 ± 1.95	14.51 ± 0.41	0.37 ± 0.06
	Forward	0.943 ± 0.027	21.02 ± 1.05	46.83 ± 2.14	9.17 ± 0.56	
15	Reverse	1.063 ± 0.019	21.19 ± 0.95	75.13 ± 1.58	16.77 ± 0.50	0.18 ± 0.07
	Forward	1.021 ± 0.023	21.12 ± 0.13	59.64 ± 2.55	13.76 ± 0.71	

通常, 为了研究器件吸收光照进而产生载流子的能力, 会进行 IPCE 光谱和相应的积分电流的研究。如图 4(b)所示, 所有器件在 390 到 780 nm 的可见光波长范围内都具备优良的光子 - 电子转换能力。在 15 s 的反应时间下利用 IPCE 对添加不同浓度 CAN (0%, 10%, 15%, 20%)的器件积分的 J_{sc} 分别为 21.54、21.73、21.78 和 20.99 mA/cm², 这与从 J - V 测量中提取的 J_{sc} 非常一致。

3.3. 载流子的传输机理

为了解光伏参数改善的原因, 我们对以下两种结构的样品进行了光致发光(PL)表征: 1) 如图 5(a)插图, 普通玻璃/钙钛矿层/HTL(添加不同浓度的 ACN); 2) 如图 5(b)插图, 普通玻璃/钙钛矿层(用不同浓度 ACN/CB 处理)。如图 5(b), 器件在 782 nm 处显示出强烈的 PL 峰, 且除 ACN 浓度为 20%实验组的器件以外, 其他组没有明显的区别。在没有载流子传输层的器件中, 钙钛矿薄膜所产生的激子无法被 HTL 所分离, 光致发光强度主要是器件中的激子复合所决定的, 所以各组的钙钛矿薄膜的激子产生能力也无明显区别。如图 5(a), 在钙钛矿层表面引入 Spiro-OMeTAD 空穴层后, 由于各组器件中的激子被 HTL 分

离, 光致发光强度主要是由于缺陷复合的激烈程度决定的, 所以 PL 峰的强度越低说明缺陷的浓度越低。通过对比不同添加浓度器件的 PL 峰, 15% ACN 实验组的 PL 峰强度最低说明钝化效果最佳。同时表明, ACN 的浓度超过 15% 并不能进一步钝化缺陷和改善空穴的提取。

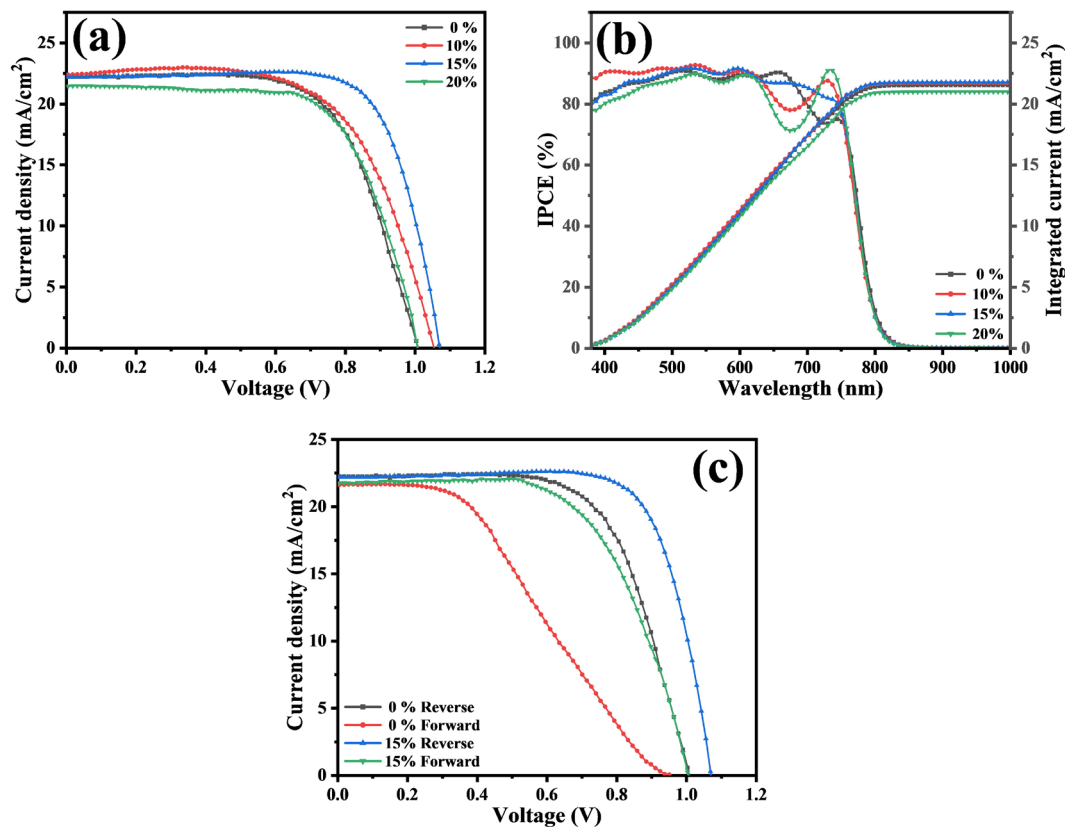


Figure 4. (a) Typical J - V curves (in the reverse scan mode) of the champion devices under AM 1.5 illumination; (b) IPCE spectra and the calculated integrated current density of the champion devices with different adding levels of ACN agent; (c) J - V curves of reverse and forward scans of pristine and 15% ACN-added cells

图 4. (a)各浓度最优器件在 AM 1.5 光照条件下的反扫 J - V 曲线; (b)不同 ACN 添加量下的最优器件的 IPCE 谱和相应的积分电流密度; (c)原始和添加了 15% ACN 的器件的正、反扫描 J - V 曲线

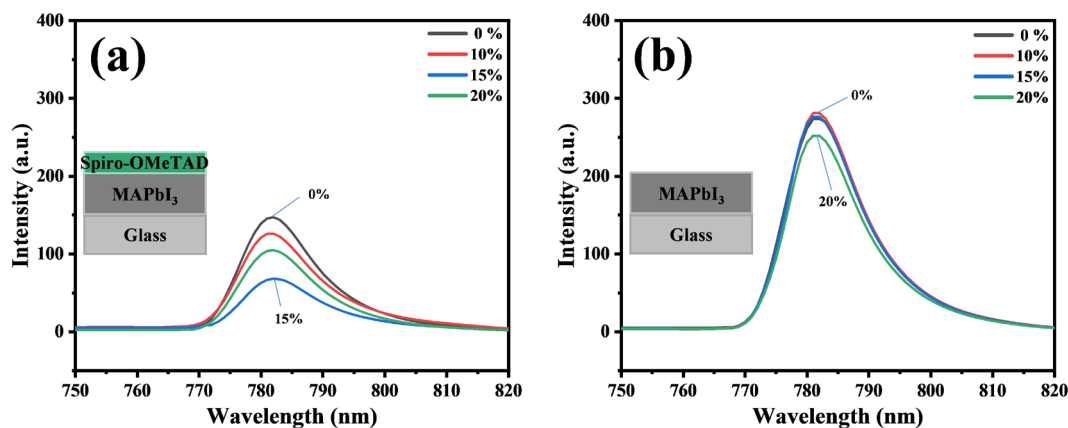


Figure 5. Steady state PL spectrum of perovskite films incorporated with varied amounts of ACN agent (a) with and (b) without HTL

图 5. 添加了不同浓度 ACN 的钙钛矿薄膜的稳态 PL 光谱: (a)有空穴传输层和(b)无空穴传输层

通过 EIS 可以深入了解载流子传输过程。图 6 显示了对照组和优化组太阳能电池的 Nyquist 曲线图, 这些曲线是在暗态中并施加偏置电压为 0 V 到 0.7 V 的条件下, 在 1 MHz 到 500 mHz 的频率范围内测量的。高频区的 R_s 与串联电阻有关并取决于触点和外部导线组成的电阻, 其大小可以通过在 x 轴上的截距来得出。中频区内 R_{ct} 是 ETL/钙钛矿或钙钛矿/HTL 界面的复合电阻(R_{ct}), 其取决于界面处发生的载流子非辐射复合, 其大小可以通过 Nyquist 曲线半圆的直径来得出[16] [17]。

由于 ETL/钙钛矿界面在这两种情况下是相同的, 故在本研究中 R_{ct} 的变化取决于钙钛矿层/HTL 界面。从图 6 中可知, 在有外加偏压的条件下, 与对照组器件相比, 优化组器件的 R_{ct} 皆有所提高。 R_{ct} 越大, 说明改性后的太阳能电池能更有效地抑制载流子的复合, 从而提高 V_{oc} 。因此, ACN 添加剂的加入可以提高复合电阻改善分流阻抗。

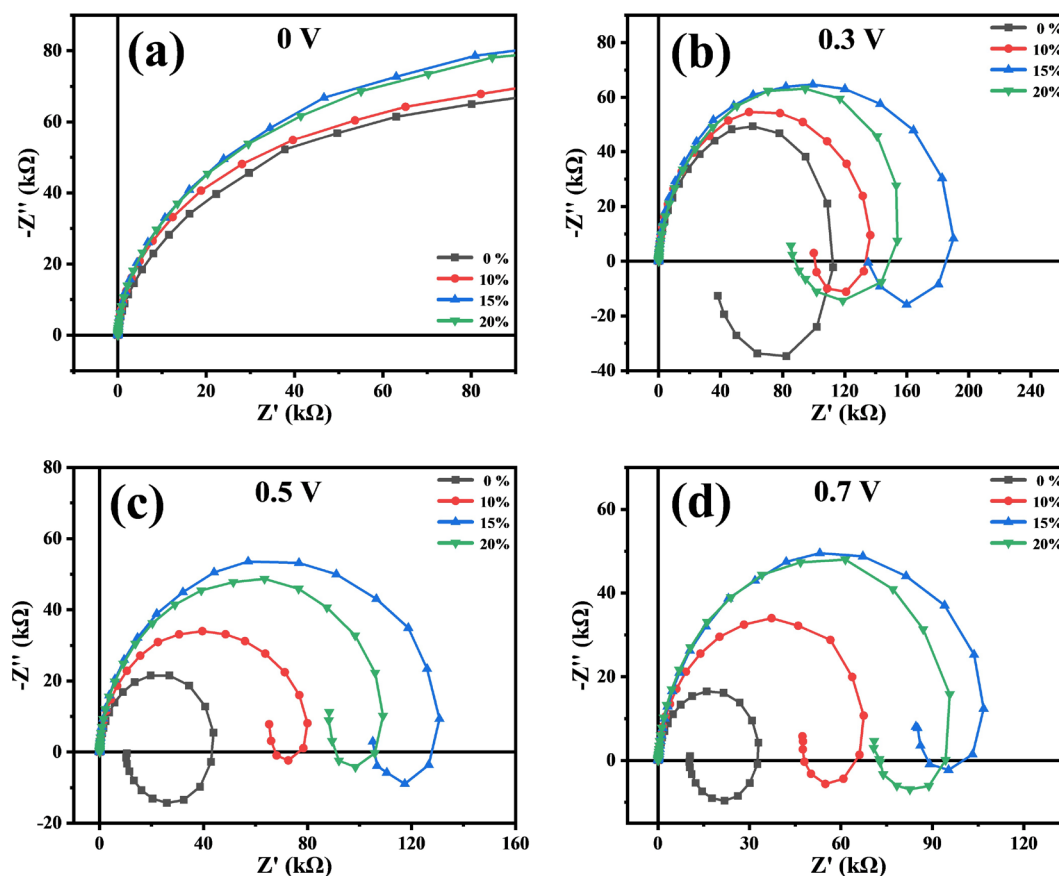


Figure 6. EIS spectra of PSCs with varied concentration of PCL additive at different applied bias (a) 0.0 V; (b) 0.3 V; (c) 0.5 V; (d) 0.7 V in the dark

图 6. 不同偏压下(a) 0.0 V、(b) 0.3 V、(c) 0.5 V、(d) 0.7 V 不同 ACN 添加浓度的 PSCs 的 EIS 光谱

4. 结论

总之, 本研究介绍了一种改善钙钛矿和 HTL 界面的简便方法。即通过在 Spiro-OMeTAD 基 HTL 前驱液中加入适量的 ACN, 改善了空穴传输界面的电接触, 增加了空穴收集, 降低了界面复合损耗。最佳的 ACN 添加浓度为 15%, 由此制备的器件的最优 PCE 为 17.89%, 比原始器件提高了 11.39%, 并且优化后的迟滞指数为 0.18, 相对于原始器件的 0.37, 优化后迟滞指数降低了 51.35%。值得注意的是, 全部的器件制备流程均在全空气环境中, 因此, 这个这一新策略有望为今后高效 PSCs 的发展提供有益的借鉴,

为高效光功能层添加剂突破 PCE 瓶颈提供新的解决方案, 并为 PSCs 空气环境中大规模商业化制备提供可能性。

致 谢

师者传道授业解惑也, 素为天下景仰, 有为之学者必有良师。自入吾师陈翌庆门下, 益慕科研之道, 陈师学高德尊, 从教酸辛苦辣以为浮沉云烟。备此文, 每执文叩问, 余虽才疏学浅, 陈师未尝稍降辞色, 非师提点指导, 亦不能成此文。陈师之教导, 虽无痴仿悬梁刺股, 亦必刻苦认真研习。故余虽愚, 卒有所获, 陈师之殊遇亦师亦父, 不甚感激。

参考文献

- [1] Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., *et al.* (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] Chang, J.A., Im, S.H., Lee, Y.H., *et al.* (2012) Panchromatic Photon-Harvesting by Hole-Conducting Materials in Inorganic-Organic Heterojunction Sensitized-Solar Cell through the Formation of Nanostructured Electron Channels. *Nano Letters*, **12**, 1863-1867. <https://doi.org/10.1021/nl204224v>
- [3] Yang, W.S., Noh, J.H., Jeon, N.J., *et al.* (2015) High-Performance Photovoltaic Perovskite Layers Fabricated through Intramolecular Exchange. *Science*, **348**, 1234-1237. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9272>
- [4] Kim, M., Kim, G.H., Lee, T.K., *et al.* (2019) Methylammonium Chloride Induces Intermediate Phase Stabilization for Efficient Perovskite Solar Cells. *Joule*, **3**, 2179-2192. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.06.014>
- [5] National Renewable Energy Laboratory (2020) Best Research-Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [6] Ding, C., Huang, R., Ahläng, C., *et al.* (2021) Synergetic Effects of Electrochemical Oxidation of Spiro-OMeTAD and Li⁺ Ion Migration for Improving the Performance of n-i-p Type Perovskite Solar Cells. *Journal of Materials Chemistry A*, **9**, 7575-7585. <https://doi.org/10.1039/D0TA12458C>
- [7] Agarwala, P. and Kabra, D. (2017) A Review on Triphenylamine (TPA) Based Organic Hole Transport Materials (HTMs) for Dye Sensitized Solar Cells (DSSCs) and Perovskite Solar Cells (PSCs): Evolution and Molecular Engineering. *Journal of Materials Chemistry A*, **5**, 1348-1373. <https://doi.org/10.1039/C6TA08449D>
- [8] Ball, J.M., Lee, M.M., Hey, A., *et al.* (2013) Low-Temperature Processed Meso-Superstructured to Thin-Film Perovskite Solar Cells. *Energy & Environmental Science*, **6**, 1739-1743. <https://doi.org/10.1039/c3ee40810h>
- [9] Xing, G., Mathews, N., Lim, S.S., *et al.* (2014) Low-Temperature Solution-Processed Wavelength-Tunable Perovskites for Lasing. *Nature Materials*, **13**, 476-480. <https://doi.org/10.1038/nmat3911>
- [10] Fang, Y., Dong, Q., Shao, Y., *et al.* (2015) Highly Narrowband Perovskite Single-Crystal Photodetectors Enabled by Surface-Charge Recombination. *Nature Photonics*, **9**, 679-686. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.156>
- [11] Tao, H., Li, Y., Zhang, C., *et al.* (2018) Efficiency Enhancement of Perovskite Solar Cells by Forming a Tighter Interface Contact of C/CH₃NH₃PbI₃. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **123**, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2018.07.005>
- [12] Wang, S., Li, X., Tong, T., *et al.* (2018) Sequential Processing: Spontaneous Improvements in Film Quality and Interfacial Engineering for Efficient Perovskite Solar Cells. *Solar RRL*, **2**, Article ID: 1800027. <https://doi.org/10.1002/solr.201800027>
- [13] Saliba, M., Matsui, T., Seo, J.Y., *et al.* (2016) Cesium-Containing Triple Cation Perovskite Solar Cells: Improved Stability, Reproducibility and High Efficiency. *Energy & Environmental Science: EES*, **9**, 1989-1997. <https://doi.org/10.1039/C5EE03874J>
- [14] Jeon, N.J., Noh, J.H., Kim, Y.C., *et al.* (2014) Solvent Engineering for High-Performance Inorganic-Organic Hybrid Perovskite Solar Cell. *Nature Materials*, **13**, 897-903. <https://doi.org/10.1038/nmat4014>
- [15] Wang, L., Liu, F., Liu, T., *et al.* (2017) Low-Temperature Processed Compact Layer for Perovskite Solar Cells with Negligible Hysteresis. *Electrochimica Acta*, **235**, 640-645. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.03.145>
- [16] Zheng, D., Zhu, T. and Pauporté, T. (2020) Using Monovalent- to Trivalent-Cation Hybrid Perovskites for Producing High-Efficiency Solar Cells: Electrical Response, Impedance, and Stability. *ACS Applied Energy Materials*, **3**, 10349-10361. <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c00884>
- [17] Liu, Y., Bag, M., Renna, L.A., *et al.* (2016) Understanding Interface Engineering for High-Performance Fullerene/Perovskite Planar Heterojunction Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, **6**, Article ID: 1501606. <https://doi.org/10.1002/aenm.201501606>