



# 3,4,5-三羟基苯甲酸对钙钛矿薄膜质量和太阳能电池性能的影响

葛肖瑜, 崔 灿

(浙江理工大学材料科学与工程学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 由于  $\text{MAPbI}_3$  钙钛矿薄膜缺陷较多, 非辐射复合严重, 导致钙钛矿太阳能电池性能较差。通过向前驱体溶液中加入 3,4,5-三羟基苯甲酸(GA)作为添加剂来调控结晶过程, 研究 GA 对钙钛矿薄膜质量和太阳能电池性能的影响。结果表明: GA 中的羧基分散到钙钛矿前驱体溶液中, 羧基中的氧原子与  $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$  形成强氢键, 减缓了钙钛矿的结晶速度, 增大了晶粒尺寸, 减少了晶界, 从而提高了载流子的迁移率, 抑制了非辐射复合损失; 当 GA 与  $\text{PbI}_2$  的摩尔比为 1.0% 时, 钙钛矿太阳能电池的性能最佳, 电池的短路电流为  $22.48 \text{ mA/cm}^2$ , 开路电压为 1.09 V, 得到了 16.84% 的光电转换效率, 且经过 800 h 后, 电池效率仍能保持在初始效率的 87.0% 以上。添加了 GA 后的钙钛矿薄膜具有更高效的光电性能, 有望广泛应用于叠层太阳能电池领域。

**关键词:** 3,4,5-三羟基苯甲酸(GA); 添加剂; 氢键; 钙钛矿太阳能电池; 光电转换效率

**中图分类号:** TM914.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2022) 01-0031-07

## Effect of 3,4,5-trihydroxybenzoic acid on the quality of perovskite film and the performance of solar cells

GE Xiaoyu, CUI Can

(School of Materials Science & Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Due to many defects in  $\text{MAPbI}_3$  perovskite film and serious non-radioactive recombination, the performance of perovskite solar cells is poor. In this paper, the additive 3,4,5-trihydroxybenzoic acid (GA) was added to the precursor solution to regulate the crystallization process, and the effect of GA additive on the quality of perovskite film and the performance of solar cells was studied. The results show that the carboxyl group in GA is dispersed into the perovskite precursor solution, and the oxygen atom in the carboxyl group forms a strong hydrogen bond with  $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$ , which slows down the crystallization of perovskite, enlarges the grain size and reduces the grain boundary, thereby improving the mobility of carrier and inhibiting the loss of non-radioactive recombination. When the molar ratio of GA to  $\text{PbI}_2$  is 1.0%, the perovskite solar cell has the best performance, the short-circuit current of the cell is  $22.48 \text{ mA/cm}^2$ , and the open-circuit voltage is 1.09 V, obtaining a photoelectric conversion efficiency of 16.84%. After 800 h, the cell efficiency remains above 87.0% of the initial efficiency. The perovskite film with GA has more efficient photoelectric properties and is expected to be widely applied in the field of laminated solar cells.

**Key words:** 3,4,5-trihydroxybenzoic acid (GA); additive; hydrogen bond; perovskite solar cell; photoelectric conversion efficiency

收稿日期: 2021-04-08 网络出版日期: 2021-05-18

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY17F040005)

作者简介: 葛肖瑜 (1995—), 男, 浙江金华人, 硕士研究生, 主要从事钙钛矿太阳能电池方面的研究。

通信作者: 崔 灿, E-mail: cuican@zstu.edu.cn

## 0 引言

近些年,环境污染和能源短缺的问题一直困扰着全球,世界各地通过开发利用新能源来缓解这些问题,其中太阳能资源的开发备受关注。理想的太阳能电池可以高效地将光能转换为电能,实现光伏发电。近年来,钙钛矿太阳能电池的相关研究引起了研究者的密切关注。钙钛矿太阳能电池是一种全固态结构的薄膜电池<sup>[1]</sup>,主要采用基本的 n-i-p 结构,其中:n 为  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SnO}_2$  等宽禁带 n 型半导体组成的电子传输层,p 为 Spiro-OMeTAD 等 p 型半导体组成的空穴传输层,i 为以有机金属卤化物半导体  $\text{ABX}_3$  (A 通常为  $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$ , B 为  $\text{Pb}^{2+}$ , X 为卤素离子)组成的光吸收和光电转换材料。钙钛矿材料本身具有许多优异的性能,例如迁移率高<sup>[2]</sup>、载流子扩散长度长<sup>[3]</sup>、光吸收系数高和可调节的带隙<sup>[4]</sup>等。钙钛矿太阳能电池则有制备过程简便、原材料价格便宜、光电转换效率高等优点,促使钙钛矿太阳能电池的光电转换效率从 3.8% 快速提升到了 25.5%<sup>[5-6]</sup>。然而,钙钛矿薄膜晶体质量差、界面有缺陷和长期稳定性弱等缺点却限制了钙钛矿太阳能电池效率进一步地提升和商业化应用。

目前,在前驱体溶液中使用添加剂成为了获得高质量的钙钛矿薄膜的有效方法。大多数课题组通过向前驱体溶液中添加有机分子<sup>[7-8]</sup>、路易斯酸碱<sup>[9]</sup>、金属离子<sup>[10]</sup>等物质来提高薄膜的质量。不同的添加剂有不同的功能机制,例如提供均匀的成核位点来提高薄膜的均匀性,Wang 等<sup>[11]</sup>将  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  量子点引入到抗溶剂中作为成核中心,诱导  $\text{MAPbI}_3$  薄膜的生长,基于高晶格匹配的成核中心提高了结晶度,减少了晶界,进而延长了载流子寿命和较低的缺陷态密度。此外,添加剂还可以与离子配位,降低结晶速率,从而增大晶粒尺寸。Yan 等<sup>[12]</sup>引入  $\text{PbAc}_2$  作为添加剂,与前驱体溶液反应后形成氢键,使钙钛矿中间相更稳定,稳定的中间相可以延缓结晶过程,从而改善钙钛矿薄膜的形态和增大钙钛矿晶粒尺寸,最终获得了 18.6% 的稳定光电转换效率。Gong 等<sup>[13]</sup>提出将氨基丙烷酸 (APPA) 作为添加剂,通过调节晶体生长过程来减少钙钛矿薄膜的缺陷。Dai 等<sup>[14]</sup>引入一种路易斯基 (乙酰胺) 作为钙钛矿太阳能电池的添加剂,结果表明:乙酰胺中的  $\text{CH}_3\text{-CONH}_2$  基团可以促进晶粒生长,提高钙钛矿晶粒的结晶度,从而改善晶粒尺寸,进而增强光学和电学性能,钙钛矿太阳能电池效率

达到了 19.01%。

本文将 3,4,5-三羟基苯甲酸 (GA) 添加到钙钛矿前驱体溶液中制备高质量钙钛矿薄膜,GA 中的羧基与  $\text{MA}^+$  形成氢键,可以减缓钙钛矿结晶的速度;系统研究 GA 对钙钛矿薄膜质量以及相应器件性能的影响。本文通过添加剂与前驱体溶液相互作用来调控结晶过程,从而提高钙钛矿薄膜的质量,为添加剂工程制备高质量钙钛矿薄膜提供了实例参考。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料与试剂

3,4,5-三羟基苯甲酸 (GA, 99.00%, 阿拉丁试剂有限公司); 二甲基亚砜 (DMSO, 99.00%, Sigma-Aldrich); N, N-二甲基甲酰胺 (DMF, 99.80%, 西安宝莱特科技有限公司); 碘化铅 ( $\text{PbI}_2$ , 99.99%, 西安宝莱特科技有限公司); 甲基碘化铵 (MAI, 99.50%, 西安宝莱特科技有限公司); 氯苯 (CB, 99.80%, Aladdin); 乙腈 (99.80%, Aladdin); 2,2',7,7'-四[N,N-二(4-甲氧基苯基)氨基]-9,9'-螺二苌 (Spiro-OMeTAD, 99.80%, 西安宝莱特科技有限公司); 乙醚 (优级纯, 国药集团化学试剂公司); 钢掺杂氧化锡导电玻璃 (ITO, 辽宁慧特光电科技有限公司); 银 (Ag, 99.99%, 北京有色金属股份有限公司)。

### 1.2 钙钛矿太阳能电池的制备

本文基于 ITO/ $\text{SnO}_2$ /Perovskite/Spiro-OMeTAD/Ag 正型平面钙钛矿太阳能电池的结构来制备钙钛矿太阳能电池。第一步,将刻蚀好的 ITO 导电玻璃基底依次经过去离子水、清洗剂、乙醇、丙酮和异丙醇中超声清洗 10 min,清洗完后在紫外臭氧清洗机中处理 20 min,除去附着的有机物。第二步,在已清洁后的 ITO 基底上以 4000 r/min 的速度旋涂  $\text{SnO}_2$  溶液并保持 30 s,旋涂完后将 ITO 玻璃放置在 150 °C 的加热台上加热 30 min,即可制得  $\text{SnO}_2$  电子传输层。第三步,旋涂钙钛矿前驱体溶液,在旋涂结束前 15 s 时,采用注射器往样品表面滴加 0.7 mL 乙醚作为反溶剂萃取多余的有机溶剂。旋涂结束后在加热台上 100 °C 加热 10 min 后即可得到黑色的钙钛矿薄膜。其中钙钛矿前驱体溶液的制备:将 461.0 mg 的  $\text{PbI}_2$  和 159.0 mg 的 MAI 溶解在 635.0  $\mu\text{L}$  的 DMF 和 71.0  $\mu\text{L}$  的 DMSO 混合液体中即可制得钙钛矿前驱体溶液,然后在前驱体溶液中加入不同量的 GA 粉末,GA 与  $\text{PbI}_2$  量的摩尔比分别为 0、0.5%、1.0%、2.0%。第四步,旋涂空

穴传输层,空穴传输层的制备:72.3 mg 的 Spiro-OMeTAD 溶于 1.0 mL 的氯苯中、520.0 mg 的锂盐溶于 1.0 mL 乙腈溶液中,取 28.8  $\mu\text{L}$  的 4-丁基吡啶(4-tBp)和 17.5  $\mu\text{L}$  溶于配置好的 1.0 mL 氯苯溶液中。最后在空穴传输层上蒸镀 80.0 nm 的 Ag 作为阳电极。

1.3 测试与表征

用紫外可见分光光度计(U-3900,Hitachi)对钙钛矿薄膜的光吸收性能进行测试;用扫描电子显微镜(S-4800,Hitachi)对钙钛矿薄膜表面形貌进行表征;用 X 射线衍射仪(D8 Discover,Bruker)对薄膜的物性结构进行分析;用 FLS 920 型稳态/瞬态荧光光谱仪(FLS 920,PicoQuant)对钙钛矿薄膜中的载流子复合寿命表征;用电化学工作站(VersaSTAT4,Princeton)对器件电荷传输电阻分析;用太阳光模拟测试系统(94022 A,Newport)对钙钛矿太阳能电池器件的电流密度-电压( $J$ - $V$ )特性进行测试,测试前先用标准硅电池校准。用外量子效率测试系统(QEX10 型,PV Measurement)对太阳能器件的外量子效率(EQE)进行测试。

2 结果与讨论

2.1 GA 添加剂对钙钛矿薄膜性能的影响

使用 XRD、SEM、紫外-可见吸收光谱对钙钛矿薄膜的性能进行测试分析。图 1(a)是 0、0.5%、1.0%和 2.0% GA 摩尔比浓度下制备得到的钙钛矿薄膜的 XRD 衍射图谱,其中无添加 GA 的样品称为 control 样。由图 1(a)可知,所有样品均在 14.24°、28.35°和 31.75°处显示出三个主要衍射峰,分别对应于  $\text{MAPbI}_3$  钙钛矿的 (110)、(220) 和 (310) 三个晶面,没有出现其他杂质峰,并且添加 GA 后也没有改变 XRD 峰位。但添加 GA 的钙钛矿薄膜的(110)晶面的衍射峰强度得到显著的提升,XRD 强度的提升表明了钙钛矿薄膜更好的生成和结晶。钙钛矿薄膜结晶度的提高有利于提升薄膜的成膜均匀性<sup>[15]</sup>。图 1(b)是钙钛矿薄膜(110)衍射峰半高全宽(FWHM),对比添加不同 GA 量的钙钛矿(110)峰的半高全宽,得出掺杂 GA 后薄膜的结晶度均有所提升,其中添加 1.0% GA 时 FWHM 的值最小,其结晶性最优。由此可以得出,掺杂 GA 并不会影响钙钛矿薄膜的晶体结构,而是对钙钛矿的结晶性能有所改善。其原因可能是 GA 溶解在钙钛矿前驱体的 DMF 和 DMSO 溶液中,使得部分羧基在

制备中掺入到钙钛矿层中<sup>[16]</sup>,减缓了钙钛矿晶粒的生长,进而使晶粒尺寸增大。

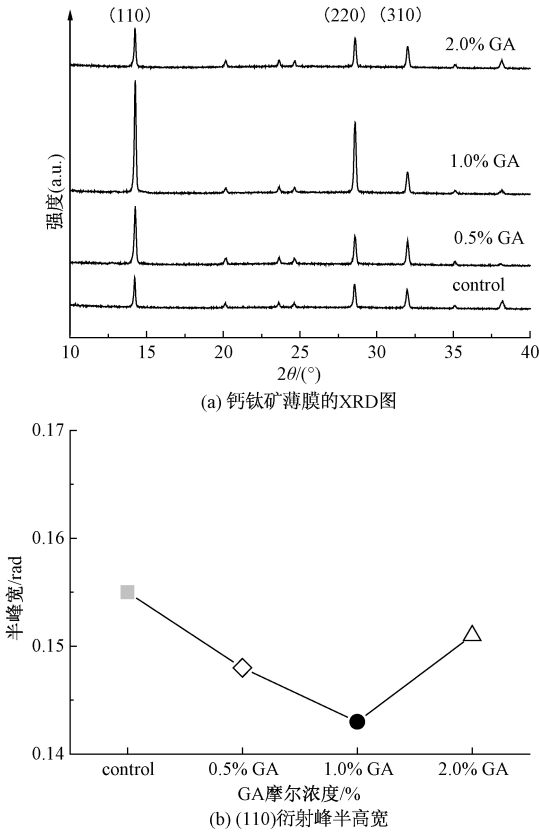


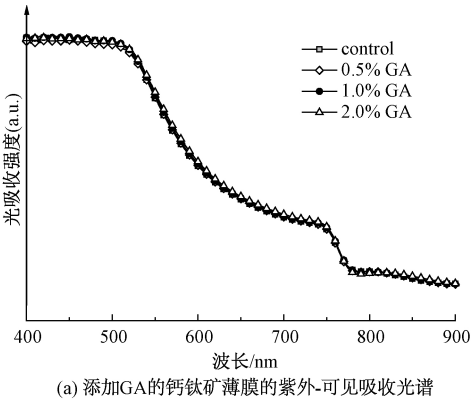
图 1 钙钛矿薄膜的 XRD 图和(110)晶面衍射峰半高全宽

图 2(a)是使用不同量 GA 处理后钙钛矿薄膜的紫外-可见吸收光谱图。在 400~900 nm 范围内,所有钙钛矿薄膜吸收曲线基本一致。各种样品的带隙宽度  $E_{\text{energy}}$  可用公式计算:

$$E_{\text{energy}} = 1240/\lambda$$

其中: $\lambda$  为钙钛矿薄膜的吸收边的波长。

图 2(b)为不同量 GA 添加后钙钛矿薄膜的带隙对比图,可以得出,吸收阈值为 779 nm,说明了添加不同量 GA 后钙钛矿薄膜的带隙均为 1.59 eV,表明添加 GA 后并不会改变钙钛矿的带隙宽度。



(a) 添加GA的钙钛矿薄膜的紫外-可见吸收光谱

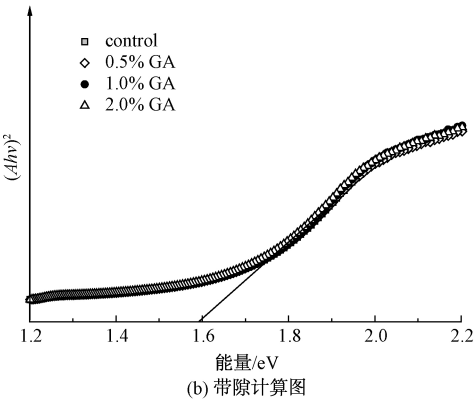


图2 不同量GA修饰制备的钙钛矿薄膜的紫外-可见吸收光谱及带隙计算图

图3是钙钛矿薄膜的SEM照片。从图3中可知,随着GA添加量的增加,钙钛矿薄膜的晶粒尺寸逐渐增大,当GA添加量为2.0%时,晶粒尺寸不再增大,反而减小。逐渐增大的原因是含有羧基的GA分散到了钙钛矿前驱体中,羧基中的O原子与MA<sup>+</sup>形成强氢键,减缓了钙钛矿的结晶速度,辅助了钙钛矿晶粒的生长<sup>[16]</sup>。晶粒不再增大是因为过量的GA添加剂会产生大量的分离的形核中心<sup>[17]</sup>。从添加不同量GA时制备的MAPbI<sub>3</sub>薄膜的晶粒尺寸统计分布图中(见图4)可以看出,在GA添加量为1.0%时钙钛矿薄膜的晶粒尺寸最大,平均晶粒尺寸约为305.0 nm,远远优于未添加GA的control样品的晶粒尺寸(188.0 nm)。

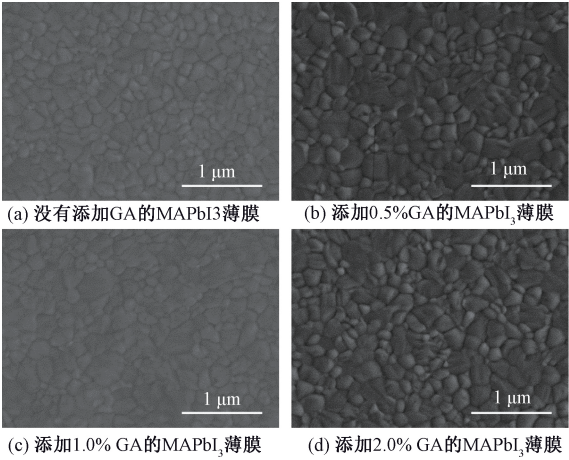


图3 添加不同量GA制备所得钙钛矿薄膜的SEM照片

2.2 太阳能电池的光电性能分析

图5(a)是添加不同量GA的钙钛矿太阳能电池的J-V曲线,光伏性能参数总结如表1。由图5(a)可知,随着GA添加量的增大,器件的光电转换效率(PCE)逐渐增大。其中添加1.0%GA的钙钛矿太阳能电池的PCE达到了最高的16.84%,电流

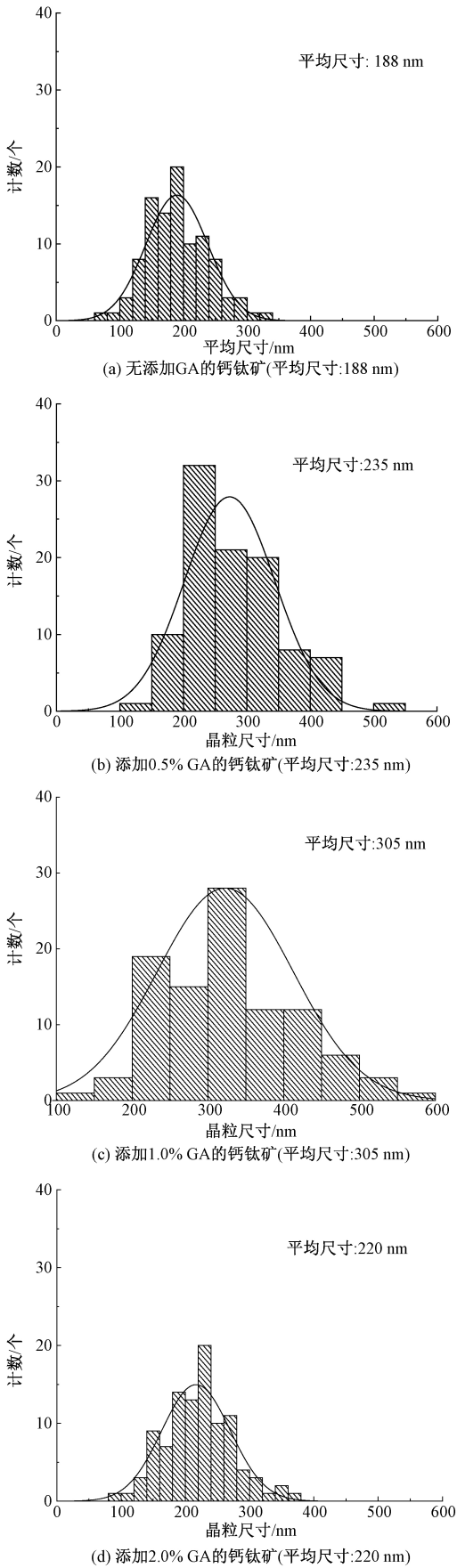


图4 添加不同量GA制备所得MAPbI<sub>3</sub>钙钛矿薄膜的晶粒尺寸统计分布图



密度  $J_{sc}$  为  $22.48\text{ mA/cm}^2$ , 开路电压  $V_{oc}$  为  $1.09\text{ V}$ , 填充因子  $FF$  为  $68.43\%$ 。当 GA 添加量进一步增大至  $2.0\%$  时, 太阳能电池的光 PCE 大幅度下降, 这可能是过量的 GA 未完全溶解, 导致了缺陷的存在和晶体质量的下降, 使填充因子降低, 同时过量 GA 也阻碍了载流子的传输, 导致电流密度的下降, 最终导致钙钛矿太阳能电池的 PCE 的下降。图 5 (b) 是添加了  $1.0\%$  GA 的电池和没有添加 GA 的参比电池的正反扫  $J-V$  曲线, 从图中可以得出, 添加了 GA 后, 电池的迟滞明显减小, 原因是 GA 促进了钙钛矿晶体的结晶, 减少了体缺陷。

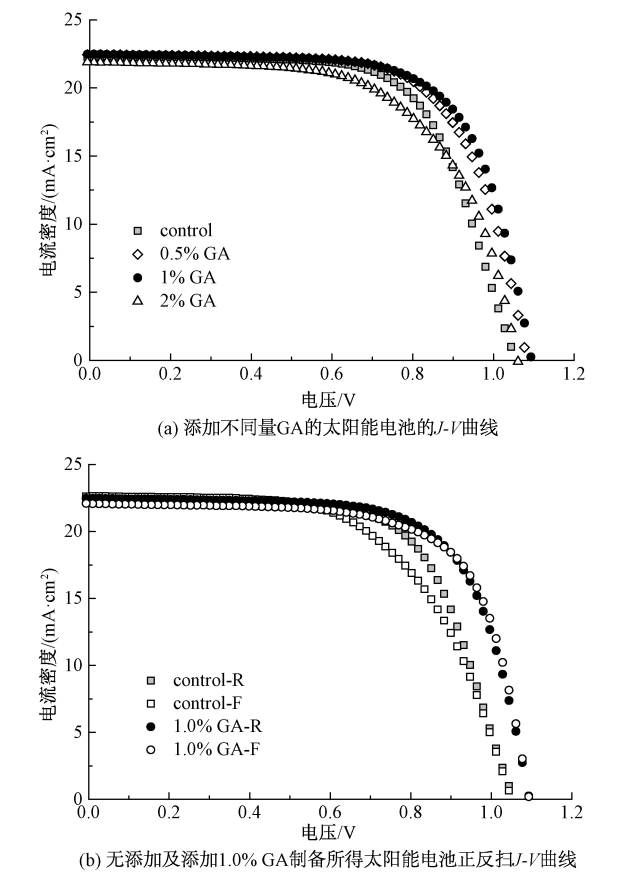


图 5 GA 修饰的太阳能电池的  $J-V$  曲线及有无添加  $1.0\%$  GA 的电池正反扫  $J-V$  曲线

表 1 GA 修饰的钙钛矿太阳能电池的光伏性能参数				
GA 浓度/ $\%$	开路电压 $V_{oc}/\text{V}$	短路电流密度 $J_{sc}/(\text{mA}/\text{cm}^2)$	填充因子 $FF/\%$	光电转换效率 $PCE/\%$
control	1.05	21.91	65.77	15.13
0.5	1.08	22.44	67.67	16.45
1.0	1.09	22.48	68.43	16.84
2.0	1.06	21.90	61.58	14.30

图 6 是在相对湿度为  $25\%$  的空气环境下, 对无添加及添加  $1.0\%$  GA 制备得到的器件进行稳定性测试, 实验表明, 添加了  $1.0\%$  GA 的太阳能电池

表 2 无添加及添加 1.0% GA 的太阳能电池的正反扫条件下测量的光伏参数				
扫描方向	开路电压 $V_{oc}/\text{V}$	短路电流密度 $J_{sc}/(\text{mA}/\text{cm}^2)$	填充因子 $FF/\%$	光电转换效率 $PCE/\%$
control-R	1.05	21.91	65.77	15.13
control-F	1.05	22.63	58.47	13.91
1.0% GA-R	1.09	22.48	68.43	16.84
1.0% GA-F	1.09	22.08	68.80	16.63

PCE 衰减比没有添加 GA 的电池要小很多, 在存放 800 h 后, 添加了  $1.0\%$  GA 的太阳能电池的 PCE 依旧保持在  $87.0\%$  以上。这是因为 GA 作为疏水族团的芳香族环可以防止钙钛矿被水分子分解, 从而提高了钙钛矿电池的稳定性。

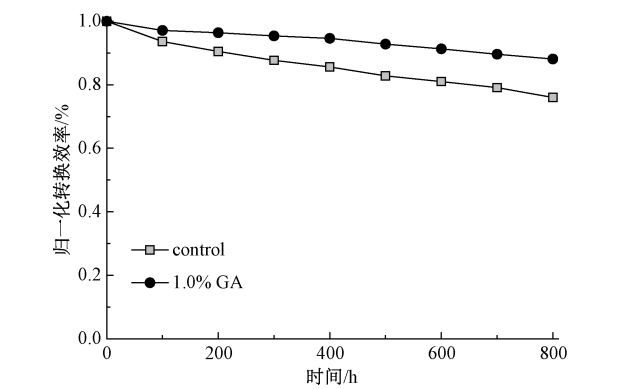


图 6 无添加及添加  $1.0\%$  GA 制备所得钙钛矿太阳能电池的稳定性测试曲线

2.3 GA 添加剂对太阳能电池作用的机理分析

由以上讨论可知, 添加  $1.0\%$  GA 的太阳能电池性能最佳。以下通过对比添加  $1.0\%$  GA 的样品与没有添加 GA 的样品的光电性质来分析 GA 影响太阳能电池光伏性能的机理。

图 7(a) 显示了钙钛矿太阳能电池的外量子效率 (EQE)。可以看出, 添加  $1.0\%$  GA 的电池在  $400\sim 600\text{ nm}$  范围内的光谱响应略有提升, 与表 1 的  $J-V$  测试结果中  $J_{sc}$  提升相吻合。一方面是因为钙钛矿薄膜质量的提高, 缺陷减少, 另一方面可能是通过羧基形成降低水分敏感性的复合物, 促进锂盐的溶解, 并改善孔输送层的膜形态<sup>[18]</sup>。通过电化学阻抗测试 (Electrochemical impedance spectroscopy, EIS) 来研究 GA 修饰对钙钛矿薄膜电化学性能的影响。EIS 是黑暗环境下, 施加  $1.0\text{ V}$  的偏压下进行测试。图 7(b) 为奈奎斯特 (Nyquist) 图及拟合的等效电路图, 其中半圆的半径即电荷传输电阻 ( $R_1$ ), 电化学阻抗谱的结果表明, 添加剂工程确实有效地提高了钙钛矿太阳能电池的电荷传输能力。结合表 3 结果, 可

以看出未作处理的器件电荷传输电阻为 7258 Ω,添加 1.0% GA 后传输电阻明显下降,约为 3875 Ω。说明了添加 GA 后,器件的性能得到改善。具体的数值参数见表 3。

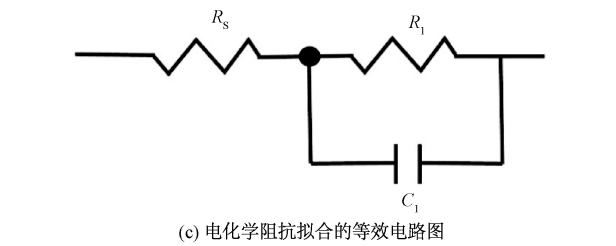
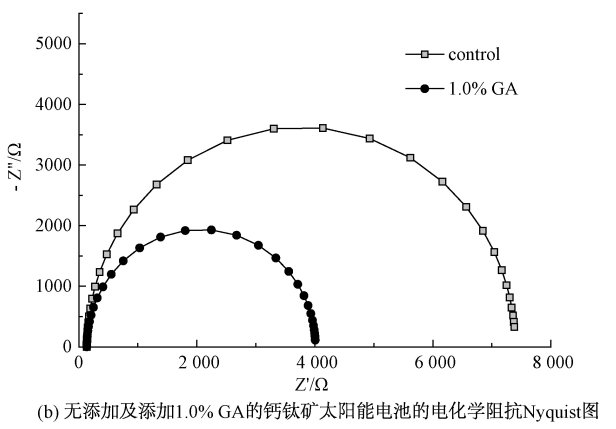
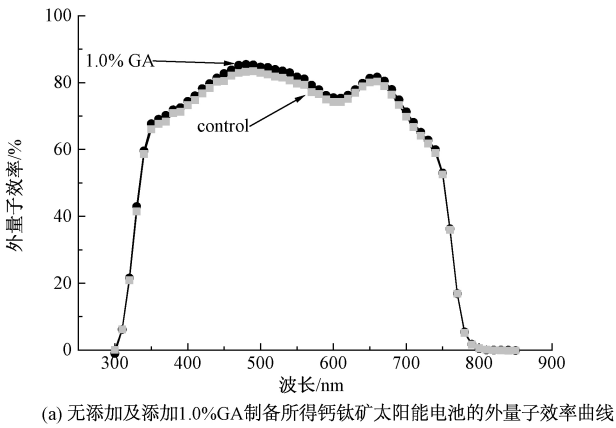


图 7 无添加及添加 1.0% GA 制备所得钙钛矿太阳能电池的电学性能

表 3 钙钛矿太阳能电池的电化学阻抗参数			Ω
样品	$R_s$	$R_1$	
control	33.6	7258.0	
1.0% GA	33.4	3875.0	

图 8(a)显示了添加 GA 的钙钛矿薄膜的光致发光(PL)测试结果。添加 1.0% GA 的钙钛矿薄膜的 PL 峰的位置没有发生变化,说明添加 GA 的钙钛矿薄膜本身的带隙不变,这与之前的实验结果相吻合。但是添加 1.0% GA 的样品的 PL 峰强度高于没有添加 GA 的参比样品,同时 PL 半峰宽变窄,进一步表明在前驱体溶液中添加 1.0% GA 使钙钛

矿薄膜的缺陷态减少,一定程度抑制了非辐射载流子复合。分析认为是 GA 中羧基的氧原子与钙钛矿中的  $MA^+$  形成强氢键,减缓了钙钛矿结晶速度,提升了钙钛矿薄膜的质量。图 8(b)是添加 1.0% GA 的钙钛矿薄膜的瞬态荧光衰减(PL Decay)图。相应的载流子寿命可通过单指数衰减模型拟合公式计算:

$$I(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + y_0$$

其中: $I(t)$ 为载流子寿命, $A$  为衰变振幅, $\tau$  为钙钛矿薄膜中载流子衰减寿命, $y_0$  为抵消基线位移的常数。由拟合结果可以得出,钙钛矿薄膜的寿命在未添加 GA 时仅为 80.4 ns,而添加 1.0% GA 后,寿命提高至 92.0 ns,进一步证明了 GA 可以减少钙钛矿薄膜的缺陷态密度。

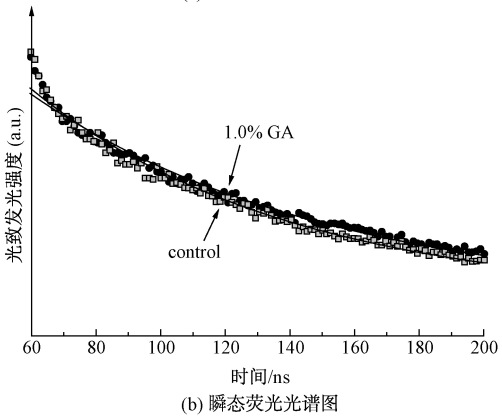
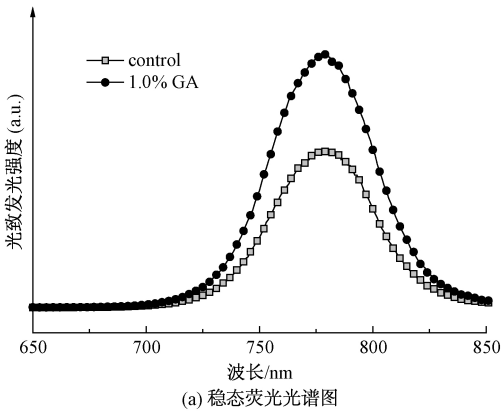


图 8 无添加及添加 1.0%GA 制备所得钙钛矿薄膜的稳态和瞬态荧光光谱图

综上所述,适量添加 GA 延长了钙钛矿膜薄结晶时间,增大了晶粒的尺寸,减少了缺陷态密度,提高载流子的寿命。这些性能的改善提高了钙钛矿太阳能电池的短路电流密度、开路电压和填充因子,最终提高了太阳能电池的光电转换效率。

3 结 论

本文通过在钙钛矿前驱体溶液中添加 GA 添加

剂成功制备大晶粒、高质量钙钛矿薄。所得主要研究结论如下:

a) 适量的 GA 添加可以延长钙钛矿薄膜的结晶时间,增大了晶粒尺寸,减少了缺陷态密度,当添加 GA 量达到 1.0%时,钙钛矿薄膜晶粒尺寸达到了最大。

b) 由于钙钛矿薄膜质量的提升,制备的器件获得了 16.84%的 PCE,比没有添加 GA 的太阳能电池光电转换效率提升了 1.3%。太阳能电池的稳定性也有了显著的提升,在 25% 相对湿度的空气环境下存放 800 h 后,PCE 依旧保持在初始效率的 87.0%。

c) 在添加适量 GA 后,有效地提高了钙钛矿太阳能电池的电荷传输能力,同时在一定程度上减少了缺陷态密度,抑制了非辐射复合,进而提高了载流子寿命。

## 参考文献:

- [1] 杨晓占. 新能源与可持续发展概论[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2019: 1-10.
- [2] Hartono N, Sun S, Gelvez R, et al. The effect of structural dimensionality on carrier mobility in lead-halide perovskites[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(41): 23949-23957.
- [3] Zhang L M, Sun L, Guan Z X, et al. Quantifying and elucidating thermally enhanced minority carrier diffusion length using radius-controlled rutile nanowires[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(9): 5264-5272.
- [4] Correa B, Abate A, Saliba M, et al. The rapid evolution of highly efficient perovskite solar cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10(3): 710-727.
- [5] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131(17): 6050-6051.
- [6] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Best Research-cell Efficiency Chart [EB/OL]. [2020-12-01]. <http://www.nrel.gov/ncpv/>.
- [7] Fan J D, Ma Y P, Zhang C L, et al. Thermodynamically self-healing 1D-3D hybrid perovskite solar cells[J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(16): 1703421.
- [8] Liang P W, Liao C Y, Chueh C, et al. Additive enhanced crystallization of solution-processed perovskite

for highly efficient planar-heterojunction solar cells[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(22): 3748-3754.

- [9] Zhu L F, Xu Y Z, Zhang P P, et al. Investigation on the role of Lewis bases in the ripening process of perovskite films for highly efficient perovskite solar cells[J]. *Journal Materials Chemical A*, 2017, 5(39): 20874-20881.
- [10] Tang M X, He B L, Dou D W, et al. Toward efficient and air-stable carbon-based all-inorganic perovskite solar cells through substituting CsPbBr<sub>3</sub> films with transition metal ions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 375: 121930.
- [11] Wang P, Xie J S, Xiao K, et al. CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> quantum dot-induced nucleation for high performance perovskite light-emitting solar cells[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(26): 22320-22328.
- [12] Yan Y F, Xiao C X, Wang C L, et al. Employing lead thiocyanate additive to reduce the hysteresis and boost the fill factor of planar perovskite solar cells[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(26): 5214-5221.
- [13] Gong X, Zheng L Y, Zhang X T, et al. Efficient perovskite solar cells through suppressed nonradiative charge carrier recombination by a processing additive [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(43): 40163-40171.
- [14] Dai S Y, Zhu L Z, Hu L H, et al. Promoting perovskite crystal growth to achieve highly efficient and stable solar cells by introducing acetamide as an additive[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(21): 9930-9937.
- [15] Chen H, Liu T, Zhou P, et al. Efficient bifacial passivation with crosslinked thioctic acid for high-performance methylammonium lead iodide perovskite solar cells [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(6): 1905661.
- [16] Li X, Chen C C, Cai M L, et al. Efficient passivation of hybrid perovskite solar cells using organic dyes with COOH functional group [J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(20): 1800715.
- [17] Tsai H, Nie W Y, Cheruku P, et al. Optimizing composition and morphology for large-grain perovskite solar cells via chemical control [J]. *Chemistry of Materials*, 2015, 27(16): 5570-5576.
- [18] Xie J S, Yan K Y, Zhu H Y, et al. Identifying the functional groups effect on passivating perovskite solar cells[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(20): 1726-1734.

(责任编辑:刘国金)