

Ag 电极对钙钛矿太阳能电池性能的影响

闫春花 刘志勇 贾福金 车俐佳 谷朝辉 郭艳群 曾琳

白传易 鲁玉明 范峰 蔡传兵

(上海大学物理系,上海 200444)

摘 要 采用两步浸泡法制备了不含有 PbI_2 的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 钙钛矿型光吸收材料。通过真空热蒸镀制备了钙钛矿太阳能电池银背电极并观察分析了热蒸发条件对银电极的影响,进而探讨了银电极对钙钛矿太阳能电池光电性能的影响。研究发现快速沉积银电极会影响其与空穴传输层的接触,增加串联电阻,减小电荷抽取面积。另外通过暗电流曲线与光照条件下的 $J-V$ 曲线对比发现,热蒸镀银电极时较强的辐射对钙钛矿电池的有机层造成了损害。

关键词 钙钛矿层,热蒸发电流,银电极,光电性能

Influence of Ag electrode on the perovskite solar cells

Yan Chunhua Liu Zhiyong Jia Fujin Che Lijia Gu Zhaohui Guo Yanguan

Zeng Lin Bai Chuanyi Lu Yuming Fan Feng Cai Chuanbing

(Physics Department of Shanghai University, Shanghai 200444)

Abstract The perovskite solar cells without PbI_2 in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ film were fabricated by two-step method, and the silver electrodes were deposited by the vacuum thermal evaporation technique. The effect of deposition parameters on silver electrode was analyzed. Furthermore, the influence of silver electrode on the photovoltaic performance of perovskite solar cells was discussed. It was found that the contact between silver electrode and HTM film would be affected by deposition rate of silver electrode, which would change the series resistance and area of charge extraction. Meanwhile, it was obtained that strong radiation during preparation of silver electrode caused damage to organic layers of perovskite solar cells by comparing the $J-V$ curves and dark current.

Key words perovskite film, thermal evaporation electric current, silver electrode, photoelectric property

近几年,有机-无机杂化钙钛矿太阳能电池(PSC)得到科学界的广泛关注,并于2013年被期刊Science评为国际十大科技进展之一^[1]。钙钛矿太阳能电池发展于染料敏化电池(DSSC),但其光电转化效率的增长速率远远超越染料敏化太阳能电池(如图1所示)。

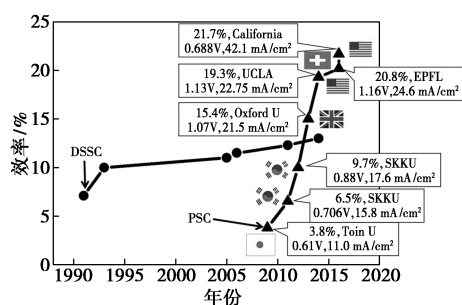


图1 钙钛矿太阳能电池与染料敏化太阳能电池的发展

2009年,Kojima等^[2]首次将有机-无机杂化钙钛矿型甲氨碘化铅($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)材料作为光敏化剂应用于DSSC,并取得了3.8%的光电转换效率。两年后,Im等^[3]基于钙钛矿型材料($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$),通过优化沉积技术制备了光电转换效率高达6.5%的半导体量子点电池。但电池仍然使用液态电解质,存在严重的稳定性问题。为了解决这一问题,2012年,Kim等^[4]用固态有机物Spiro-MeOTAD取代液态电解质作为钙钛矿太阳能电池的空穴传输层(HTM),制备了背电极为金的全固态钙钛矿太阳能电池,且光电转换效率达到9.7%。2013年,Liu等^[5]以 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ 作为光吸收层材料,以银为背电极制备了不含介孔层 $m\text{-TiO}_2$ 或 $m\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的平面结构钙钛矿太阳能电池,光电转换效率达到了15.4%。2014年,Zhou等^[6]通过向电子传输层

基金项目:国家自然科学基金(51572765、11174193);上海市科委专项(16DZ0504300)

作者简介:闫春花(1989-),女,硕士,从事钙钛矿太阳能电池的制备与研究。

材料 $c\text{-TiO}_2$ 中掺杂钇(Y)改善了电子的提取与传输,以金作为电池的背电极,其最高光电转换效率可以达到 19.3%。2015 年, Yang 等^[7] 将 PbI_2 溶于 DMSO,通过分子内部取代法制备钙钛矿型光吸收材料甲醚碘化铅(FAPbI_3),以金为背电极制备的钙钛矿太阳能电池效率达到了 20.2%。

短短几年内虽然钙钛矿太阳能电池在光电转换效率上取得了飞速发展,但随着电池面积的增大,其缺陷也明显增多,所以电池一直在小面积基底上制备。为了解决这一问题,Chen 等^[8] 在 2015 年用无机材料 $\text{Ni}_x\text{Mg}_{1-x}\text{O}$ 作为空穴传输层,以银为背电极制备了面积 $>1\text{cm}^2$ 的平面结构钙钛矿太阳能电池,其效率高于 15%,且电池经过 1000h 持续光照后,光电转换效率仍然保持在最初效率的 90% 以上。2016 年, Bi 等^[9] 用一步法将 FAI 、 PbI_2 、 MABr 和 PbBr_2 一起溶于 DMF 制备了钙钛矿光吸收层,以金为背电极组成钙钛矿太阳能电池,其光电转换效率达到了 20.8%。同年, Ergen 等^[10] 以 MASnI_3 和 $\text{MAPbI}_{3-x}\text{Br}_x$ 作为光吸收材料,以金作为背电极制备了双层钙钛矿太阳能电池,最高光电转换效率达到了 21.7%。

近几年,在科研人员的努力下,钙钛矿太阳能电池的光电转换效率得到了很大的提升,其制备工艺也日趋成熟。实验室常用金或银来作为钙钛矿太阳能电池的背电极。而金的价格十分昂贵,会增加商业化生产成本。为此,寻找价格较低的材料作为钙钛矿太阳能电池的背电极势在必行。2013 年, Ku 等^[11] 率先用碳材料作为钙钛矿太阳能电池的背电极,且电池的光电转化效率达到了 6.64%。2014 年, You 等^[12] 以铝为背电极制备了柔性钙钛矿太阳能电池,其光电转化效率为 11.5%。同年, You 等^[13] 进一步在电荷传输层材料 PCBM 与铝背电极层之间引入了电解质聚合物(PFN),将电池效率提高到了 17.1%。2015 年, 格兰泽尔介观太阳能电池研究中心^[14] 以 $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ 为介孔层材料制备了背电极为碳的钙钛矿太阳能电池,其效率最高达到了 13.14%。同年, Yang 等^[7] 在电荷传输层材料 PCBM 与铝背电极层之间插入 LiF ,将电池效率提升到了 20.2%。2017 年, Zhang 等^[15] 以 $\text{MAPbI}_3(\text{SrCl}_2)_{0.1}$ 作为钙钛矿型光吸收材料,以碳为背电极制备的钙钛矿太阳能电池效率最高达到了 16%。

在选取钙钛矿太阳能电池的背电极材料时除了考虑电极材料的成本外,还要考虑到其与电池材料之间的功函数匹配和材料自身的稳定性。图 2 是钙

钛矿型材料 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 与电极材料的功函数示意图。虽然 Au 的能级与钙钛矿材料更匹配,但是 Au 在可见光范围内的反射率较低,耗散了大部分未完全吸收的入射光。Ag 作为背电极材料虽然制备的钙钛矿电池填充因子较低,但是 Ag 有较高的可见光反射率(92%)。所以,以 Ag 作为背电极制备的 PSCs 可以获得较高的电流密度,在实际应用中可以获得较高的光电转换效率。以铝和碳为背电极的钙钛矿太阳能电池已取得了一定的光电转换效率。综合考虑实验室现有条件及设备,本研究采用银作为钙钛矿太阳能电池的背电极。然而以钙钛矿太阳能电池为基底制备银薄膜电极的条件以及银薄膜形貌对钙钛矿太阳能电池光电性能影响的报道却很少。因此,主要研究了不同热蒸发电流下制备的背电极银薄膜对钙钛矿太阳能电池光电性能的影响。

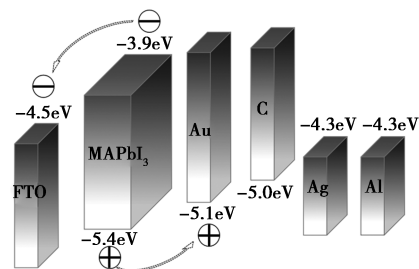


图 2 钙钛矿型 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 材料和不同电极材料的能级图

1 实验部分

钙钛矿太阳能电池以光吸收层的制备方法不同来区分,主要有一步法和两步法。一步法是将 PbI_2 与 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 按比例一起溶于 DMF 或 DMSO 溶液,经一步旋涂而得到钙钛矿光吸收层。两步法是

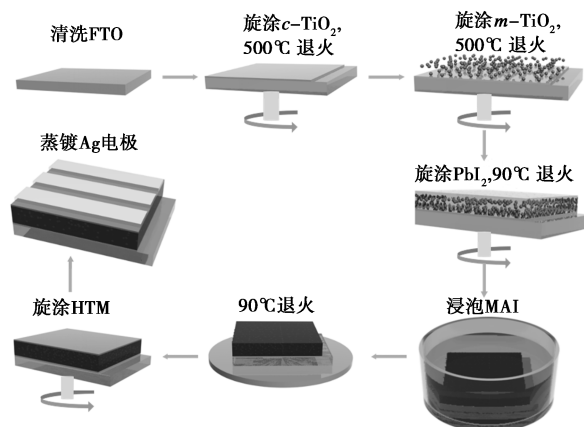


图 3 钙钛矿太阳能电池的两步浸泡法制备过程

先将 PbI_2 溶于 DMF 或 DMSO 溶液并旋涂退火得到 PbI_2 薄膜,之后令其与 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 溶液反应而得到钙钛矿太阳能电池。本研究采用两步浸泡法制备了介孔钙钛矿太阳能电池。实验过程如图 3 所示。

1.1 试剂及设备

银颗粒(纯度 99.999%),阿法埃莎公司; PbI_2 (纯度 99.999%), N,N -二甲基甲酰胺(DMF,纯度 99.8%),Sigma 公司; $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ (纯度 >99%),介孔 TiO_2 浆料(纯度 >99%)、空穴传输材料(Spiro-OMeTAD,纯度 >99.5%),西安宝莱特光电科技有限公司。

手套箱(米开罗那有限公司的 super 系列),可将水、氧含量控制在 0.01mg/L 以下。匀胶旋涂仪(迈可诺技术有限公司的 WS-650MZ-23B 系列),可自动控制滴胶,提高了滴胶的精度和可重复性。 J - V 曲线由 SAN-EI 的 XES-151SX 全光谱太阳光模拟器和 KEITHLEY 4200-SCS 参数分析仪测得。XRD 数据由帕纳科 Empyrean 锐影 X 射线衍射系统测得。SEM 图谱是通过日本 JEOL LTD 公司的 JSM-7500F 仪器扫描得到。

1.2 实验过程

FTO 导电玻璃在 35℃ 清洗剂水溶液中超声 40min,然后用去离子水涮洗两遍,异丙醇中超声 40min,氮气吹干备用。

用参考文献[16]的方法配制致密层 TiO_2 ($c\text{-TiO}_2$)前驱液。分别将钛酸异丙酯和盐酸溶液滴入无水乙醇中,配制成浓度为 0.46mol/L 的钛酸异丙酯溶液和 0.026mol/L 的盐酸溶液。然后将盐酸溶液逐滴加入钛酸异丙酯溶液中混合均匀。取 60 μL 溶液,在 FTO 基底上以 5000r/min 的转速旋涂 40s,平板炉上 500℃ 退火 2h。介孔层胶体配制是将 TiO_2 浆料和松油醇按质量比为 1:3 稀释并超声、搅拌,使浆料与松油醇混合均匀。取 160 μL 以上稀释浆料滴在涂有电子传输层 $c\text{-TiO}_2$ 的基底上以 2500r/min 转速旋涂 40s,在平板炉上 500℃ 退火 2h,制备介孔层 TiO_2 薄膜($m\text{-TiO}_2$)作为支架层。

两步浸泡法制备钙钛矿材料 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 作为光吸收层。将 PbI_2 溶于 DMF 配制成浓度 1000mol/L 的溶液,并在 70℃ 下加热搅拌 2h。取 60 μL 以上溶液在介孔层上以 4500r/min 转速旋涂 40s,然后 90℃ 退火 30min 制备 PbI_2 薄膜。将 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 溶于异丙醇试剂,配制成浓度为 0.1mg/mL 的溶液,并搅拌 30min。然后将样品浸泡于

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 溶液中,浸泡时间分别为 20s、40s、60s、120s。样品取出后立即用异丙醇试剂冲洗,并旋转干燥放于平板炉,90℃ 退火 30min。

取 0.18g spiro-OMeTA 溶于 2mL 氯苯,取 40 μL TBP 加入以上氯苯溶液中,取 100 μL 浓度为 170mg/mL 的锂盐溶液加入以上溶液,配制成空穴传输材料前驱液。取涂有光吸收层的样品先以 6000r/min 旋涂 40s 氯苯,然后滴 60 μL 的空穴传输材料前驱液并以 5000r/min 的转速旋涂 40s,制备空穴传输层(HTM)。

通过蒸发相同质量的银颗粒制备一定厚度的银薄膜电极。将涂覆 HTM 层的样品放入定制的电极模具中,称取 0.5g 银颗粒放入蒸发舟。待真空度抽至 2.5×10^{-4} Pa 时,打开热蒸发电源,分别调节热蒸发电流至 250A 和 170A,相应的蒸镀时间为 1min 和 50min,银颗粒完全蒸发,制备的银电极厚度约 80nm。

2 结果与讨论

2.1 钙钛矿光吸收层的测试与分析

图 4 是在 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 溶液中浸泡不同时间所制备的钙钛矿光吸收层的 X 射线衍射图谱(XRD)及其光电效率转换 J - V 曲线。如图 4(a)所示,随着浸泡反应时间的延长, PbI_2 峰强逐渐变弱至消失,表明其最终完全反应生成光吸收材料 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 。图 4(b)是不同浸泡反应时间所得电池的光电转换效率曲线,各曲线对应的光电性能参数见表 1。由图 4 和表 1 看出,随着 PbI_2 的减少,钙钛矿太阳能电池的填充因子逐渐提高。

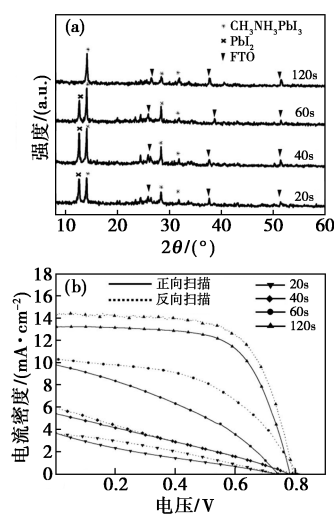


图4 不同浸泡时长下制备的钙钛矿光吸收层 XRD 谱图(a)及其光电效率转换 J - V 曲线图(b)

表 1 不同浸泡反应时长电池正、反扫描 J - V 曲线
对应电池性能参数

浸泡 时长/s	扫描方向	电压/ V	电流密度/ ($\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)	填充 因子	转换 效率/%
20	正向扫描	0.74	3.67	0.21	0.57
	反向扫描	0.74	3.61	0.31	0.82
40	正向扫描	0.78	5.41	0.28	1.16
	反向扫描	0.79	5.92	0.25	1.16
60	正向扫描	0.74	9.80	0.36	2.58
	反向扫描	0.81	10.32	0.50	4.14
120	正向扫描	0.78	13.30	0.66	6.87
	反向扫描	0.79	14.40	0.66	7.50

对基于不同浸泡反应时间制备的钙钛矿太阳能电池光电性能参数进行了统计,见图 5。图 5(a)—图 5(d)分别为转换效率、短路电流、开路电压和填充因子统计结果。这 4 个参数的对应关系如式(1)所示:

$$PCE = J_{sc} \times V_{oc} \times FF \quad (1)$$

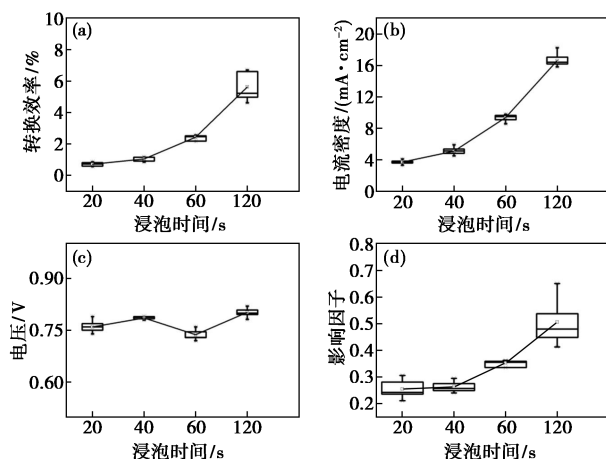


图 5 基于不同浸泡反应时间制备的钙钛矿太阳能电池的性能参数统计图

[(a)转换效率(PCE);(b)短路电流(J_{sc});
(c)开路电压(V_{oc});(d)填充因子(FF)]

从钙钛矿电池的光电性能统计结果可以看出,随着反应时间的延长,电池的转换效率逐渐提高,但是电池的开路电压并没有显著提高,所以电池转换效率的提升主要源于短路电流的大小和填充因子的提升。电流的提升依赖 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 产生的光生电流。填充因子(FF)的增高表明电池性能随着光吸收材 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 的增多而得到了提升,同时表明过多未反应的 PbI_2 会影响钙钛矿太阳能电池的光电性能。在完全生成 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 的基础上,改变真空热蒸发电流蒸镀银电极薄膜,制备了一系列

的钙钛矿太阳能电池,分析了热蒸发电流为 170A 和 250A 条件下制备的银电极薄膜对电池性能参数的影响。

2.2 钙钛矿太阳能电池银电极

2.2.1 SEM 分析

真空热蒸发制备金属薄膜时,可以调控蒸发源的温度和样品基底温度。在真空热蒸发制备钙钛矿太阳能电池银电极时,基底保持室温。因此,只需考量蒸发源温度对附着在 HTM 层上的银薄膜质量的影响。蒸发源温度影响了蒸发物质表面的蒸发速率,进而影响了蒸发物的平衡蒸气压。物质平衡蒸气压 P 与温度关系可近似表达为式(2)^[17]:

$$P \approx B \exp(-\Delta H_e/RT) \quad (2)$$

式中, B 为一个相应的系数; ΔH_e 为物质在某一温度时的汽化热, J/g ; T 为热力学温度, K ; R 为气体常数。

银在衬底上首先形成原子团,又称之为岛。小岛接受新的原子或原子团逐渐长大,直至孤立的小岛连成一片形成银薄膜。由式(2)可以得出银的平衡蒸气压与温度成正相关。在蒸发源温度较高,即蒸发电流较大时,大量的蒸汽原子在到达基底前由于原子间的引力作用容易团聚成较大的原子团沉积在基底上形成粗大的、几乎不能运动的岛状组织。所以在热蒸发电流为 250A 时沉积的银薄膜呈块状大颗粒,如图 6(a)中的虚线标记处,且薄膜表面出现了孔洞缺陷,如图 6(a)中的实线标记处。而当热蒸发电流较小时,少量的蒸汽原子或较小原子团沉积在基底上形成了均匀、细小,且可以运动的原子

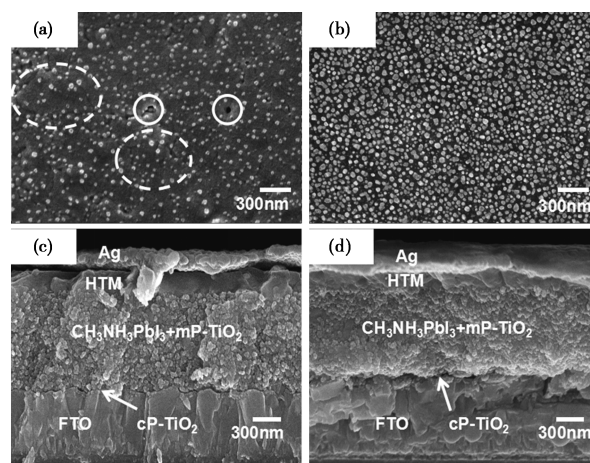


图 6 钙钛矿电池银电极表面和截面 SEM 图

[(a)热蒸发电流 250A,银电极表面;(b)热蒸发电流 170A,银电极表面;(c)热蒸发电流 250A,银电极截面;
(d)热蒸发电流 170A,银电极截面]

团。所以热蒸发电流为 170A 时沉积的银薄膜颗粒较小,如图 6(b)所示。

进一步分析得出,在热蒸发电流为 250A 的条件下,大颗粒银原子团无法与有一定粗糙度的 HTM 层完全接触,薄膜之间出现了缝隙,如图 6(c)所示。银电极与 HTM 层接触不良导致的串联电阻增大,减小了电荷抽取面积。而当蒸发电流为 170A 时,银原子团较小且可以在基底上运动,与有一定粗糙度的 HTM 层充分接触,如图 6(d)所示。所以,在 170A 热蒸发电流条件下制备的钙钛矿太阳能电池背电极银薄膜与 HTM 层接触良好,更利于电荷的提取与传输。

2.2.2 J-V 分析

通过对比钙钛矿太阳能电池的光电转换效率曲线 J - V ,分析了 170A 和 250A 热蒸发电流条件下沉积银电极对钙钛矿太阳能电池光电性能的影响。为了分析电池的 J - V 曲线,首先引入了太阳能电池的等效电路图,如图 7 所示。

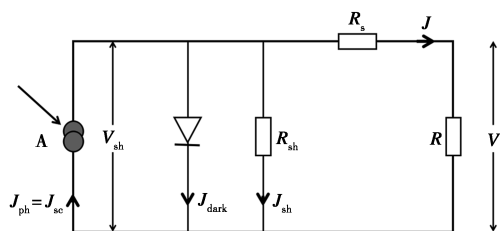


图 7 太阳能电池等效电路图

(R_{sh} 为电池的并联电阻; R_s 为电池的串联电阻;

R 为电池的负载电阻)

恒流源 A 在持续稳定的太阳光照下产生电流,即光生电流 J_{ph} ,光生电流与短路电流 J_{sc} 相等,由入射光强和电池性能共同决定。 R_{sh} 为并联电阻,所对应的电流为 J_{sh} 。 R_s 和 R 分别为串联电阻和负载电阻,其所对应的电流为 J 。钙钛矿太阳能电池内部电子空穴的复合会使一部分本应通过负载的电流短路,影响整流效果,用并联电阻 R_{sh} 来等效这种电池内部电子与空穴的复合。电池中各层薄膜材料的表面接触电阻及材料的电阻用串联电阻 R_s 来等效。由电路图可得式(3)及式(4):

$$J = J_{sc} - J_{dark} - J_{sh} \quad (3)$$

$$V_{sh} = V + AJR_s \quad (4)$$

由式(3)、式(4)得出,并联电阻 R_{sh} 影响电流密度 J ,串联电阻 R_s 影响电压 V ^[18]。

寄生电阻对太阳能电池电光性能的影响如图 8 所示。 J - V 曲线前半部分斜率越小 R_{sh} 越大,曲线后半部分斜率越小 R_s 越大。170A 热蒸发电流下制

备的太阳能电池的短路电流为 13.30mA/cm²,开路电压为 0.78V,影响因子为 0.66,光电转换效率为 6.87%。250A 热蒸发电流下制备的太阳能电池的短路电流为 9.15mA/cm²,开路电压为 0.72V,影响因子为 0.51,光电转换效率为 3.34%。250A 热蒸发电流下制备电池的短路电流低于 170A 热蒸发电流下制备电池的短路电流,得出 250A 热蒸发电流下制备电池的串联电阻大于 170A 热蒸发电流下制备的电池。所以银电极薄膜的孔洞与颗粒边界缺陷阻碍了电荷的传导,且银薄膜与空穴传输层接触不良阻碍了电荷的提取,从而导致串联电阻过大。

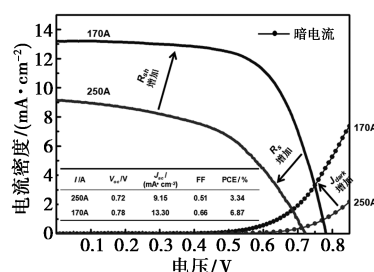


图 8 不同热蒸发电流下钙钛矿太阳能电池的 J - V 曲线和暗电流曲线图

对比分析图 8 中暗电流曲线得出,170A 热蒸发电流条件下的电池暗电流大于 250A 热蒸发电流下的电池暗电流。即 $J_{dark}(170A) > J_{dark}(250A)$, $J_{(170A)} > J_{(250A)}$ 。结合公式(3),在 250A 热蒸发电流下制备的钙钛矿太阳能电池暗电流较小,测得的光生电流也小于 170A 下制备的光生电流。所以 250A 热蒸发电流除了使银薄膜与空穴传输层接触不良影响了钙钛矿太阳能电池性能外,温度过高的蒸发源辐射还损害了钙钛矿太阳能电池中的有机层,进一步降低了电池的光电性能。

3 结论

采用两步浸泡法制备了钙钛矿太阳能电池。对比分析得出,随着 $CH_3NH_3PbI_3$ 钙钛矿型光吸收材料中 PbI_2 含量的减少,电池的光电性能逐渐提高。观察分析了 250A 和 170A 热蒸发电流条件下制备的银薄膜的形貌及其与空穴传输层的接触性。热蒸发电流为 250A 时制备的背电极银薄膜表面颗粒较大,与空穴传输层接触不良,阻碍了电荷的传输与抽取,增大了电池的串联电阻,从而降低了钙钛矿太阳能电池的性能。此外,通过对比 J - V 曲线和暗电流曲线,得出在较高热蒸发电流下,蒸发源产生的辐射对钙钛矿太阳能电池的有机层有一定的损害。

参考文献

- [1] Newcomer juices up the race to harness sunlight[J]. Science, 2013, 342(6165): 1438-1439.
- [2] 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.
- [3] Im J H, Lee C R, Lee J W, et al. 6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell[J]. Nanoscale, 2011, 3(10): 4088.
- [4] Kim H S, Lee C R, Im J H, et al. Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9% [J]. Scientific Reports, 2012, 2(8): 591.
- [5] Liu M, Johnston M B, Snaith H J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition[J]. Nature, 2013, 501(7467): 395-398.
- [6] Zhou H P, Chen Q, Li G, et al. Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells[J]. Science, 2014, 345(6196): 542-546.
- [7] Yang W S, Noh J H, Jeon N J. High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange [J]. Science, 2015, 348(6240): 1234-1237.
- [8] Chen W, Wu Y, Yue Y, et al. Efficient and stable large-area perovskite solar cells with inorganic charge extraction layers [J]. Science, 2015, 350(6263): 944-948.
- [9] Bi D Q, Tress W, Dar M I, et al. Efficient luminescent solar cells based on tailored mixed-cation perovskites [J]. Science Advances, 2016, 2(1): e1501170.
- [10] Ergen O, Gilbert S M, Pham T, et al. High current, high efficiency graded band gap perovskite solar cells [J]. Materials Science, arXiv:1608.02150.
- [11] Ku Z, Rong Y, Xu M, et al. Full printable processed mesoscopic $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$ heterojunction solar cells with carbon counter electrode [J]. Sci Rep, 2013, 3(11): 3132.
- [12] You J B, Hong Z, Yang Y, et al. Low-temperature solution-processed perovskite solar cells with high efficiency and flexibility [J]. ACS Nano, 2014, 8(2): 1674-1680.
- [13] You J B, Yang Y, Hong Z, et al. Moisture assisted perovskite film growth for high performance solar cells [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(18): 183902.
- [14] Liu T F, Liu L F, Hu M, et al. Critical parameters in $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ /Carbon-based mesoscopic perovskite solar cell [J]. Journal of Power Sources, 2015, 293: 533-538.
- [15] Zhang H, Wang H, Williams S T, et al. SrCl_2 derived perovskite facilitating a high efficiency of 16% in hole-conductor-free fully printable mesoscopic perovskite solar cells [J]. Advanced Materials, 2017, 29(15).
- [16] Chen Q, Zhou H, Song T B, et al. Controllable self-induced passivation of hybrid lead iodide perovskites toward high performance solar cells [J]. Nano Letters, 2014, 14(7): 4158-4163.
- [17] 唐伟忠. 薄膜材料制备原理、技术及应用(第二版)[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 1-46, 162-226.
- [18] Nelson J. 太阳能电池物理[M]. 高阳, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2011: 1-53.
- 收稿日期: 2017-03-24
-
- (上接第 184 页)
- [2] 刘守新, 鄂雷, 李伟, 等. 炭气凝胶研究现状及其发展前景[J]. 林业工程学报, 2017, 2(2): 1-8.
- [3] 吴国友, 程璇, 余煜玺, 等. 常压干燥制备二氧化硅气凝胶[J]. 化学进展, 2010, 22(10): 1892-1900.
- [4] 李明明, 王坤杰, 张晓虎. 纤维增强 SiO_2 气凝胶复合材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2017, 45(3): 19-21.
- [5] 陈宇卓, 欧忠文, 刘朝辉, 等. 隔热材料 SiO_2 气凝胶改性研究进展[J]. 化工新型材料, 2017, 45(8): 45-47.
- [6] 田军, 乔秀丽, 迟彩霞. 石墨烯气凝胶的水热法制备及表征[J]. 应用化工, 2017, 46(7): 1351-1358.
- [7] 刘念平, 沈军, 关大勇, 等. 碳气凝胶活化对于电极嵌锂性能的影响[J]. 物理化学学报, 2013, 29(5): 966-972.
- [8] 张志华, 王文琴, 祖国庆, 等. SiO_2 气凝胶材料的制备、性能及其低温保温隔热应用[J]. 航空材料学报, 2015, 35(1): 87-96.
- [9] Passerini S, Ressler J J, Le D B, et al. High rate electrodes of V_2O_5 aerogel [J]. Electrochimica Acta, 1999, 44(1999): 2209-2217.
- [10] 房兴梅, 吴广明, 王爱荣, 等. 锂电池阴极材料 V_2O_5 常压干燥气凝胶的制备及离子输运特性[J]. 功能材料与器件学报, 2007, 13(6): 522-528.
- [11] Fabrice C, Jong-Min Lee, Stefano P, et al. V_2O_5 aerogel-like lithium intercalation host [J]. Solid State Ionics, 1999, 116(3): 279-291.
- [12] 张明霞, 吴广明, 孙娟萍, 等. 过氧化法常压干燥制备的 V_2O_5 气凝胶的性能探究[J]. 材料导报, 2009, 23(8): 102-105.
- [13] 王爱荣, 吴广明, 杨辉宇, 等. 多壁碳纳米管复合 V_2O_5 材料的制备及性能研究[J]. 材料导报, 2008, 22(8): 108-119.
- [14] Wang Ying, Cao Guozhong. Synthesis and enhanced intercalation properties of nanostructured vanadium oxides [J]. Chem Mater, 2006, 18: 2787-2804.
- [15] 刘旭华, 贾献峰, 王际童, 等. 碳纳米管增强 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 气凝胶制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(5): 244-246.
- [16] 李志华, 张艳舞. 同一体系内水热合成 $\text{VO}_x \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 纳米线和纳米带[J]. 唐山师范学院学报, 2009, 31(2): 16-18.
- [17] 崔朝军, 王磊, 牛永生, 等. 水热合成温度对氧化钒纳米管的影响[J]. 化工新型材料, 2013, 41(6): 75-77.
- [18] 崔朝军, 吴广明, 张明霞, 等. 锂钒氧化物纳米管的合成与表征[J]. 无机材料学报, 2009, 24(4): 787-792.
- [19] Gao Guohua, Wu Guangming. Synthesis, structure and electrochemical properties of VO_x nanosheets prepared from V_2O_5 and carbon aerogels [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(S1): 315-319.
- 收稿日期: 2017-11-20
修稿日期: 2018-04-08