

【光电工程 / Optoelectronic Engineering】

基于反萃空转的高效无机钙钛矿太阳电池

闫慧博, 周定坚, 黄金成, 刘均, 王明, 罗忠明, 罗溪,
田梦瑶, 郑婷, 李贵君, 徐平

深圳大学物理与光电工程学院, 光电子器件与系统教育部 / 广东省重点实验室, 广东深圳 518060

摘要: 铯铅碘二溴(CsPbI_2Br)钙钛矿具备合适的容忍因子与良好的热稳定性, 是无机钙钛矿太阳电池的理想材料, 而其转化效率低、工艺重复性差的缺陷, 阻碍了 CsPbI_2Br 太阳电池性能的进一步提高. 研究 CsPbI_2Br 无机钙钛矿太阳电池的制备工艺发现, 成膜环境对 CsPbI_2Br 薄膜的均匀性、光学性质及器件性能重复性具有较大影响. 提出采用反萃空转辅助生长工艺提升 CsPbI_2Br 薄膜的晶粒尺寸, 提高结晶度, 降低缺陷态密度, 并获得 14.1% 的 CsPbI_2Br 太阳电池光电转换效率. 反萃空转辅助生长工艺降低了周围环境对薄膜质量的影响, 提高了器件制备的可重复性.

关键词: 光电子技术; 无机钙钛矿; 太阳电池; CsPbI_2Br ; 反萃空转辅助生长; 功率转化效率

中图分类号: TN364⁺.2

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2022.04377

High-efficiency inorganic perovskite solar cell based on a stripping and idling assisted growing technique

YAN Huibo, ZHOU Dingjian, HUANG Jincheng, LIU Jun, WANG Ming,
LUO Zhongming, LUO Xi, TIAN Mengyao, ZHENG Ting, LI Guijun, and XU Ping

College of Physics and Optoelectronic Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Cesium lead iodide dibromide (CsPbI_2Br) perovskite is an ideal material for inorganic perovskite solar cells due to its suitable tolerance factor and good thermal stability. However, the defects of low power conversion efficiency and poor device reproducibility hinder the further improvement of the performance of inorganic CsPbI_2Br solar cells. By studying the preparation process of CsPbI_2Br inorganic perovskite solar cells, we find that the film-forming environment has a great influence on the uniformity, optical properties and device performance repeatability of CsPbI_2Br films. In this paper, a stripping and idling assisted growing process strategy is proposed to obtain CsPbI_2Br films with large grain size, high crystallinity, and low trap-defects density. The power conversion efficiency of CsPbI_2Br perovskite solar cells reaches 14.1%. More importantly, this method greatly reduces the influence of ambient conditions on the film quality and improves the reproducibility of the device.

Key words: optoelectronic technology; inorganic perovskites; solar cells; CsPbI_2Br ; stripping and idling assisted growing; power conversion efficiency

Received: 2021-07-09; Accepted: 2021-11-22; Online (CNKI): 2022-05-24

Foundation: Natural Science Foundation of Guangdong Province (2020A151501079); Shenzhen-Hong Kong Innovation Circle Project A (SGDX20190918105001787)

Corresponding author: Assistant professor LI Guijun. E-mail: guijun@szu.edu.cn; Professor XU Ping. E-mail: xuping@szu.edu.cn

Citation: YAN Huibo, ZHOU Dingjian, HUANG Jincheng, et al. High-efficiency inorganic perovskite solar cell based on a stripping and idling assisted growing technique [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(4): 377-382. (in Chinese)



自 2009 年日本科学家 Tsutomu Miyasaka 首次报道功率转化效率(power conversion efficiency, PCE)为 3.8% 的钙钛矿太阳能电池以来, 其转化效率在过去十余年的时间内获得了快速提升^[1]. 当前基于有机-无机杂化钙钛矿太阳能电池的最高效率可达 25.5%, 已超过单节太阳能电池肖克利-奎伊瑟极限(Shockley-Queisser limit)效率值的 75%^[2]. 虽然有机-无机杂化钙钛矿太阳能电池取得了较高的转化效率, 但仍面临在湿热环境下的不稳定性问题. 全无机钙钛矿太阳能电池采用无机铯离子取代钙钛矿结构中的 A 位有机阳离子, 一定程度上解决了材料的热稳定性问题. 全无机钙钛矿太阳能电池的吸光层材料一般包括: CsPbI₃ 钙钛矿、CsPbI₂Br 钙钛矿及 CsPbBr₃ 钙钛矿. 其中, CsPbI₂Br 钙钛矿除了表现出优异的热稳定性之外, 约 1.91 eV 的光学带隙也使其成为与硅电池结合的高效串联叠层太阳能电池的理想材料^[3-5].

溶剂萃取法可通过灵活选择不同溶剂来萃取钙钛矿前驱体薄膜中沸点较高的极性溶剂, 将可溶性微量物质添加至萃取剂中, 通过反萃工艺将其掺杂至钙钛矿薄膜中, 可改善薄膜的成膜质量, 其中, 溶剂配比、退火温度及萃取溶剂类型等均会影响薄膜质量. 萃取溶剂类型对 CsPbI₂Br 无机钙钛矿薄膜质量具有影响^[6-10], CHEN 等^[11]通过实验对比发现, 基于异丙醇萃取溶剂制备的 CsPbI₂Br 薄膜质量远优于基于甲苯和氯苯溶剂所制备的薄膜. 但由于不同萃取溶剂的沸点和反溶剂作用效果不同, 需要精确控制退火时间, 不利于实现高重复率制备. 此外, 钙钛矿前驱体薄膜退火前的静置时间也会对 CsPbI₂Br 无机钙钛矿薄膜的成膜质量产生较大影响, 虽然可通过溶剂控制生长工艺进行优化^[12], 但仍存在一定缺陷. 如在前驱体薄膜静置过程中, 受到周围环境气氛的影响, 前驱体薄膜中溶剂的缓慢蒸发过程会变得不均匀, 使晶核生长速率不一致, 导致钙钛矿薄膜所对应晶粒的尺寸和均匀性具有较大差别. 此外, 高质量钙钛矿薄膜的溶剂控制生长工艺静置过程需耗费较长时间, 不利于工业化应用^[13-14].

本研究提出反萃空转辅助生长法, 以获得具有较大晶粒尺寸、高结晶度及低缺陷密度的 CsPbI₂Br 钙钛矿薄膜, CsPbI₂Br 无机钙钛矿太阳能电池的转化效率可达 14.1%. 本方法提高了器件的可重复性, 降低环境氛围对薄膜质量和器件性能的影响.

1 实验

1.1 反萃空转辅助生长法

反萃空转辅助生长法是采用反萃溶剂对钙钛矿前驱体薄膜进行萃取后, 再进行高速空转的一种薄膜生长工艺, 其工艺流程如图 1. 异丙醇(isopropyl alcohol, IPA)既能带走前驱体薄膜中的极性溶剂, 又有助于提高前驱体薄膜的平整度, 因此, 选择 IPA 作为反萃溶剂. 反萃后利用旋涂仪高速空转程序, 找到最适合 CsPbI₂Br 前驱体薄膜中溶剂挥发的转速. 采用高速空转程序取代溶剂控制生长工艺中的前驱体薄膜静置程序的优势在于: ① 旋转能够加速前驱体薄膜中溶剂的挥发, 一定程度上加快晶核的生长过程, 缩短缓慢结晶过程所需的时间; ② 高速旋转下前驱体薄膜周围的气体流动氛围主要受高速程序影响, 对于特定的高速程序, 气体流动情况基本一致, 因此, 能够确保钙钛矿薄膜生长氛围的一致性, 提高优质钙钛矿薄膜生长的重复性. 实验发现旋转时间和转速对退火后钙钛矿薄膜的成膜质量影响较大. CsPbI₂Br 无机钙钛矿薄膜的生长过程中, 高速空转过程需要约 2.5 min, 与溶剂控制生长工艺的静置时间相比, 这个时间非常短.

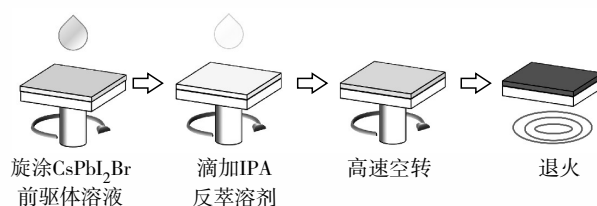


图 1 反萃空转辅助生长工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stripping and idling assisted growing process.

1.2 器件制备

分别采用常规工艺法、反萃静置法及反萃空转法制备钙钛矿薄膜. 在 3 种工艺中, CsPbI₂Br 钙钛矿薄膜均生长于电子传输层(electron transport layer, ETL)衬底上, 选用纳米氧化锌颗粒作为 ETL.

采用常规工艺法的钙钛矿薄膜制备流程为:

① 清洗氧化铟锡(indium tin oxides, ITO)玻璃, 然后将 ITO 置于紫外臭氧清洗机中 20 min, 旋涂氧化锌(ZnO, 质量浓度为 15 mg/mL), 转速为 800 r/min 下旋转 5 s, 4 000 r/min 下旋转 30 s, 在 150 °C 的温度下退火 30 min; ② 旋涂钙钛矿薄膜, 转速为

800 r/min 下旋转 5 s, 3 000 r/min 下旋转 30 s, 在旋涂程序还剩 10 s 时, 取 60 μ L 高纯 IPA 溶液对前驱体薄膜进行萃取, 随后在 180 $^{\circ}$ C 下退火 10 min; ③采用转速 800 r/min 下旋转 5 s 和 2 500 r/min 下旋转 30 s 旋涂空穴传输层 2,2',7,7'-四[N,N-二(4-甲氧基苯基)氨基]-9,9'-螺二芴(spiro-OMeTAD), 无需退火; 蒸镀厚度为 100 nm 的银作为电极. 钙钛矿前驱体溶液的物质的量浓度为 1 mol/L, 溶剂采用体积比为 1:1 的二甲基亚砜(dimethyl sulfoxide, DMSO)和 N,N-二甲基甲酰胺(dimethyl fumarate, DMF). 溶液配置过程中用到的碘化铯、碘化铅及溴化铅是中国西安宝莱特公司的纯度为 99.99% 的粉末制品; DMSO 和 DMF 是阿拉丁公司的纯度为无水级别的溶液.

采用反萃静置法与反萃空转法的钙钛矿薄膜制备流程中, 仅在钙钛矿薄膜的生长处理上略有不同. 其中, 反萃静置法中, 待旋涂程序停止, 将旋涂后湿的钙钛矿薄膜静置 2.5 min 后, 迅速转移至 180 $^{\circ}$ C 的热板上退火 10 min; 反萃空转法中, 待旋涂程序停止后, 继续运行程序 6 000 r/min 下旋转 35 s 和 4 000 r/min 下旋转 40 s, 最后将玻璃衬底迅速转移至温度为 180 $^{\circ}$ C 的热板上退火 10 min.

1.3 材料和器件表征

对 3 种制备工艺下的钙钛矿薄膜性能采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、光致发光(photoluminescence, PL)测试、X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)图谱分析及紫外-可见分光光度法(ultraviolet-visible spectroscopy, UV-VIS)测试等手段进行表征, 并采用太阳光模拟器对太阳能电池性能进行测试.

2 结果与讨论

常规工艺法、反萃静置法及反萃空转法所制备 CsPbI₂Br 钙钛矿薄膜的 SEM 图与晶粒尺寸统计图如图 2. 可见, 3 种工艺下的晶粒尺寸依次增大, 薄膜平整性也依次提升. 晶粒尺寸的增大表明钙钛矿薄膜内部的晶界数量和晶界缺陷都在减少. 采用反萃空转辅助生长法制备的 CsPbI₂Br 钙钛矿薄膜, 其晶粒尺寸大, 各晶粒之间的排布错落有致, 无重叠或皱褶现象发生, 表面平整度高. 反萃空转辅助成膜工艺下的薄膜表面致密光滑, 薄膜上表面的缺陷得到有效抑制. 因此, 有利于上层空穴传输层的平整生长, 减小 CsPbI₂Br 钙钛矿薄膜与其空穴传输层之间的界面缺陷, 从而减少不必要的非辐射复合.

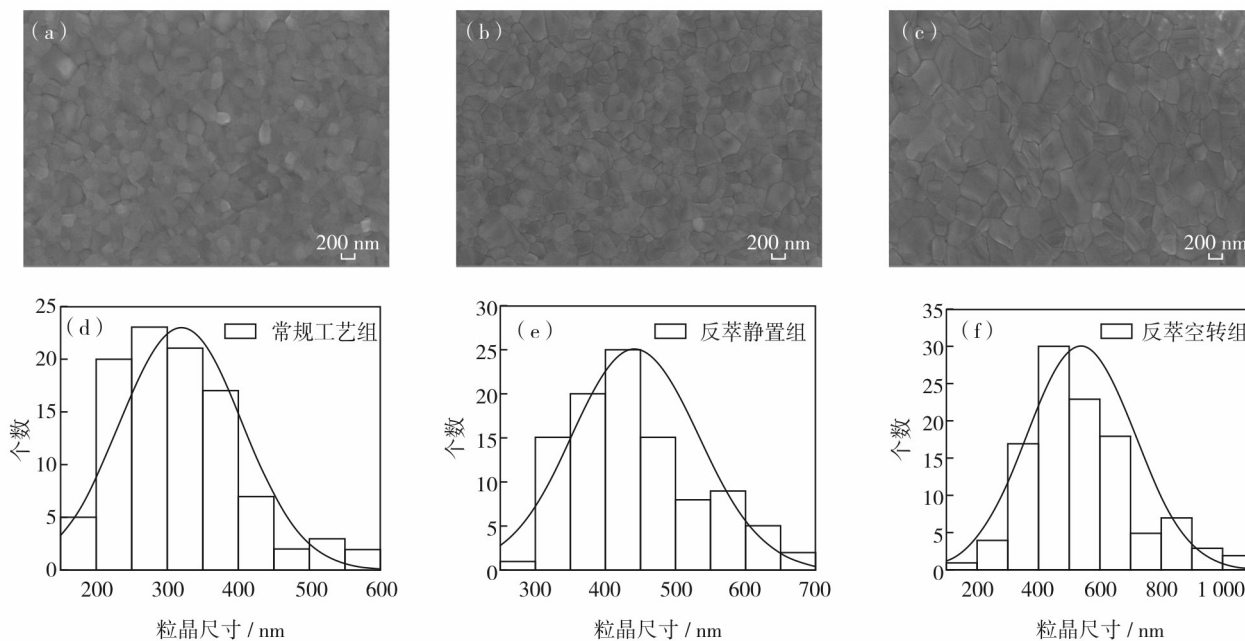


图2 (a)常规工艺、(b)反萃静置工艺、(c)反萃空转工艺制备条件下 CsPbI₂Br 钙钛矿薄膜的扫描电子显微镜图; (d)常规工艺、(e)反萃静置工艺、(f)反萃空转工艺制备条件下 CsPbI₂Br 钙钛矿薄膜的晶粒尺寸统计图

Fig. 2 Scanning electron microscopy images of CsPbI₂Br films with fabrication scheme (a) conventional process, (b) anti-solvent and standing process, and (c) stripping and idling assisted process. Statistical diagram of CsPbI₂Br films grain size with fabrication scheme (d) conventional process, (e) anti-solvent and standing process, and (f) stripping and idling assisted process.

晶核生长过程中的相互作用力会影响钙钛矿晶粒的大小和平整度,晶核之间的挤压力过大,限制了周围晶粒生长,导致钙钛矿晶粒尺寸大小不均,薄膜平整度变差,晶界缺陷增多.本实验在前驱体薄膜空转过程中使用高速空转程序,离心力作用于前驱体薄膜,在一定程度上抵消晶核生长过程中方向不均、大小不一的相互作用力,从而增大 CsPbI_2Br 薄膜的晶粒尺寸和平整度.此外,奥斯瓦尔德(Ostwald)熟化过程也使得晶粒变大.实验中观察到晶粒尺寸增大的现象,验证了高速空转过程所带来的离心力能够在一定程度上抵消晶粒成长过程中所出现的内部挤压力,如图3.

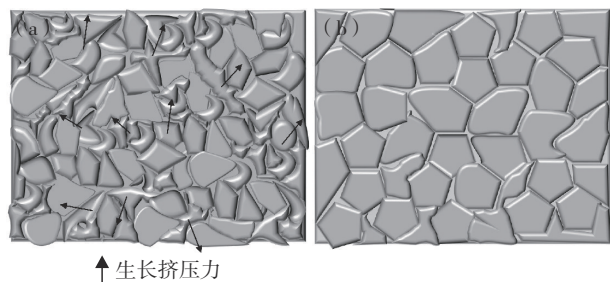


图3 反萃空转工艺条件下离心力对晶粒生长过程的影响示意图 (a)离心力作用前;(b)离心力作用后

Fig. 3 Schematic illustration of the grain growing under the stripping and idling assisted process (a) before and (b) after the centrifugal force action.

图4(a)为常规工艺法、反萃静置法及反萃空转法所制备薄膜的XRD图谱.可见,薄膜的XRD衍射峰位置分别位于 $2\theta = 14.4^\circ$ 、 20.7° 及 29.4° 处,分别对应立方相 CsPbI_2Br 钙钛矿的(100)、(110)及(200)晶面,表明3种生长方法制备的薄膜均属于立方相结构钙钛矿薄膜.反萃空转法钙钛矿薄膜的衍射峰最高,对应半峰宽也最窄.由于衍射半峰宽度与晶粒大小成负相关,表明反萃空转工艺对钙钛矿薄膜生长起到促进作用.此外, $2\theta = 20.7^\circ$ 位置衍射峰的消失,表明反萃空转工艺下 CsPbI_2Br 立方相钙钛矿具有沿(100)和(200)晶面择优取向生长的特点.XRD结果也验证了SEM图中反萃空转辅助成膜工艺下生长的 CsPbI_2Br 钙钛矿薄膜晶粒尺寸明显比静置控制组和反萃静置组大的结论.

图4(b)为3种工艺下钙钛矿薄膜的PL谱.可见,反萃空转法对应的光致发光强度最弱,反萃静置组次之,常规控制组最强.由于测试样品均生长于ZnO上,光致发光强度越弱,其光生载流子从光吸收层向ETL层的注入效率越高.高的注入效率源

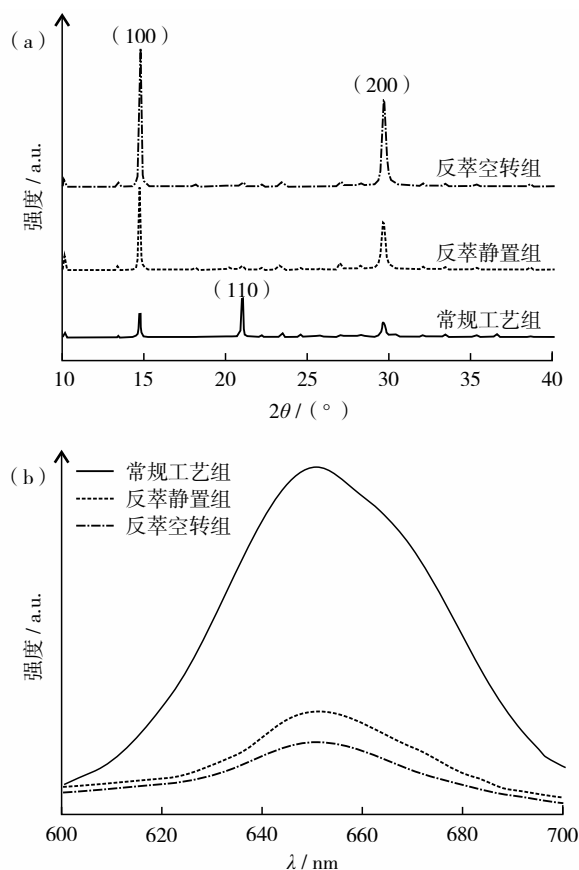
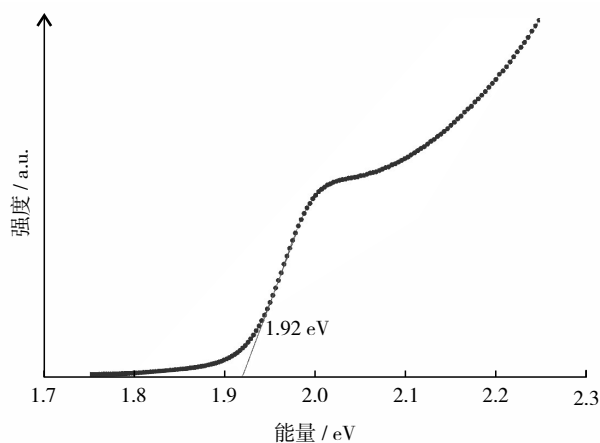


图4 不同工艺条件下钙钛矿薄膜表征 (a)XRD图谱; (b)光致发光图谱

Fig. 4 (a) XRD pattern and (b) PL spectra for perovskite films fabricated by conventional process (solid line), anti-solvent and standing process (dashed line), and stripping and idling assisted process (dotted line).

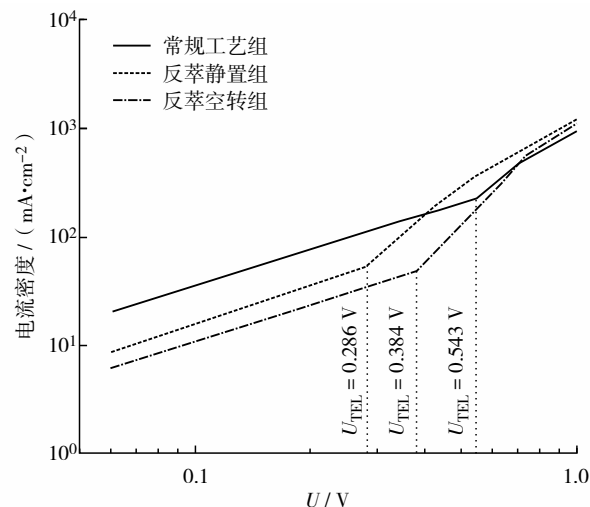
于钙钛矿薄膜与ETL层之间良好的接触.反萃空转法薄膜的PL强度最弱,表明光生载流子从钙钛矿光吸收层向ETL的电荷注入能力最强,钙钛矿薄膜与ETL之间的接触界面最好.由图4(b)还可见,3种工艺所制备薄膜的PL中心波长均在649 nm附近,表明反萃空转并不会改变 CsPbI_2Br 的禁带宽度.UV-VIS测量结果显示, CsPbI_2Br 钙钛矿的光学带隙为1.92 eV,见图5.

为进一步验证反萃空转辅助成膜工艺对降低钙钛矿薄膜缺陷态密度的作用,利用空间电荷限制电流(space charge limited current, SCLC)技术测量3种钙钛矿薄膜的缺陷态密度,采取纯电子传输层器件结构ITO/ZnO/ CsPbI_2Br /PCBM/Ag.在偏压较低时,电压与电流呈线性关系.当偏压增大时,注入载流子会被缺陷捕获.当缺陷完全被填充时,电流随电压的增大呈现非线性增加, $J-V$ 曲线上出现转折点,所对应电压为缺陷填充电压 U_{TFL} ,可由线性部分与

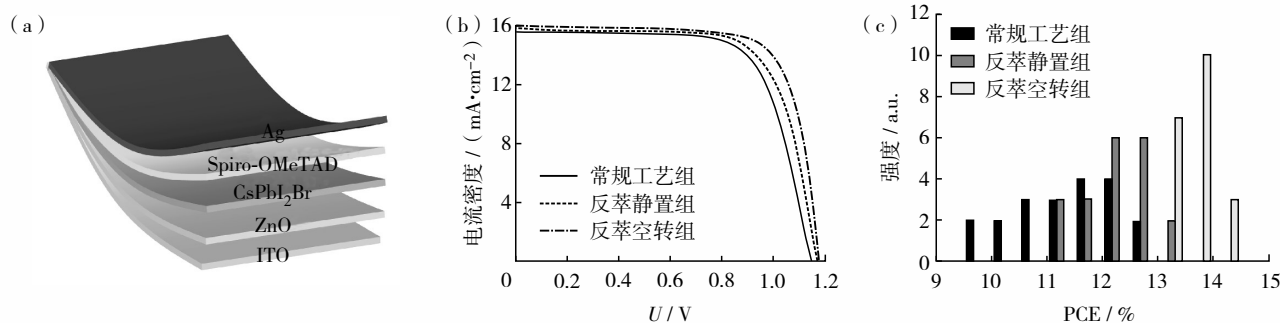
图5 CsPbI₂Br薄膜的吸收光谱Fig. 5 Absorption spectrum of CsPbI₂Br film.

非线性部分的切线交点获得^[15]. 由图6可见, 反萃空转法、反萃静置法及常规控制法的 U_{TFL} 分别为 0.286、0.384 及 0.543 V. 薄膜缺陷密度为 $N_{\text{trap}} = 2\varepsilon_0\varepsilon_r U_{\text{TFL}}/qL^2$, 其中, ε_r 为钙钛矿的相对介电常数; ε_0 为真空中的介电常数; q 为基本电荷量; L 为薄膜厚度. 计算得到的3种薄膜的缺陷密度分别为 2.49×10^{15} 、 3.34×10^{15} 及 $4.73 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 进一步表明反萃空转辅助成膜工艺可以降低钙钛矿薄膜的缺陷密度.

本实验所制备钙钛矿太阳能电池的结构如图7(a)所示. 图7(b)为3种钙钛矿太阳能电池的 J - V 曲线.

图6 不同工艺条件下纯电子器件的 J - V 曲线Fig. 6 J - V curves of the electron-only devices with conventional process (solid line), anti-solvent and standing process (dashed line), and stripping and idling assisted process (dotdashed line).

可见, 经过反萃静置工艺处理的钙钛矿太阳能电池的开路电压(U_{oc})要高于常规控制组, 电池填充因子(FF)和光电转化效率(PCE)均得到提升. 而反萃空转辅助生长工艺所制备电池的 U_{oc} 和 FF 相比于反萃静置工艺组器件具有明显提升, 表明反萃空转辅助成膜工艺可通过提高 CsPbI₂Br 钙钛矿晶粒尺寸, 大幅减少薄膜的体缺陷和界面缺陷.

图7 CsPbI₂Br无机钙钛矿太阳能电池 (a)电池结构;(b) J - V 曲线;(c)转化电池效率统计图Fig. 7 (a) Schematic structure, (b) J - V characteristics, and (c) histograms of PCEs of CsPbI₂Br inorganic perovskite solar cells.

In (b) the solid, dashed and dotdashed lines are for conventional process, anti-solvent and standing process, and stripping and idling assisted process, respectively.

表1是3种太阳能电池的光伏参数. 其中, J_{sc} 为短路电流密度; R_s 为串联电阻; R_{sh} 为并联电阻. 可见, 随着钙钛矿处理工艺的改进, 太阳能电池的 U_{oc} 从常规控制组电池的 1.148 V 提升到反萃空转组的 1.179 V, FF 也从 70.4% 提升至 75.2%, 最终使太阳能电池的转化效率得到提升. CsPbI₂Br 太阳能电池的

PCE 从控制法的 12.7% 提高至反萃空转法的 14.1%, 提升幅度达 12%. 由串联电阻阻值的下降及复合电阻阻值的上升可知, 钙钛矿薄膜内部的非辐射复合及界面复合现象得到一定抑制, 最终使载流子传输过程中发生的非必要复合损失减小, 对应提升电池短路电流.

表1 常规工艺、反萃静置工艺及反萃空转工艺下钙钛矿太阳能电池的效率参数

Table 1 Device parameters of perovskite solar cells fabricated with conventional process, anti-solvent and standing process, and stripping and idling assisted process

生长工艺	U_{oc} / V	PCE / %	FF / %	$J_{sc} / (mA \cdot cm^{-2})$	R_s / Ω	R_{sh} / Ω
常规工艺法	1.148	12.70	70.4	15.70	104	38 789
萃取静置法	1.169	13.17	71.4	15.78	91	20 959
反萃空转法	1.179	14.10	75.2	15.91	82	40 666

实验还考察了3组工艺下制备器件的重复性与可靠性. 每种工艺下制备20组器件, 其转化效率统计直方图如图7(c). 可见, 反萃空转工艺太阳能电池的再现性和效率优于常规和反萃静置工艺.

结 语

本研究提出反萃空转辅助生长技术的CsPbI₂Br薄膜生长方法, 并实验验证该工艺的有效性和简便性. 设计常规控制法、反萃静置法及反萃空转法对比实验, 分别对钙钛矿薄膜进行SEM测试、实物拍照、XRD图谱、PL图谱及电池效率等分析, 证明反萃空转辅助成膜工艺有助于CsPbI₂Br薄膜的优异性生长. 反萃空转辅助成膜CsPbI₂Br钙钛矿太阳能电池的PCE可达14.1%. 考虑到CsPbI₂Br的带隙宽度为1.91 eV, 器件性能仍有较大提升空间.

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2020A151501079); 深港创新圈项目A资助项目(SGD20190918105001787)

作者简介: 闫慧博(1997—), 深圳大学硕士研究生. 研究方向: 光伏器件和发光器件. E-mail: ass0720@outlook.com

引 文: 闫慧博, 周定坚, 黄金成, 等. 基于反萃空转的高效无机钙钛矿太阳能电池[J]. 深圳大学学报理工版, 2022, 39(4): 377-382.

参考文献 / References:

- [1] 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.
- [2] MIN H, LEE D Y, KIM J, et al. Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO₂ electrodes [J]. Nature, 2021, 598: 444-450.
- [3] KULBAK M, GUPTA S, KEDEM N, et al. Cesium enhances long-term stability of lead bromide perovskite-based solar cells [J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2016, 7(1): 167-172.
- [4] LIANG Jia, WANG Caixing, WANG Yanrong, et al. All-inorganic perovskite solar cells [J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(49): 15829-15832.
- [5] SUTTON R J, EPERON G E, MIRANDA L, et al. Bandgap-tunable cesium lead halide perovskites with high

thermal stability for efficient solar cells [J]. Advanced Energy Materials, 2016, 6(8): 1502458.

- [6] SWARNKAR A, MARSHALL A R, SANEHIRA E M, et al. Quantum dot-induced phase stabilization of alpha-CsPbI₃ perovskite for high-efficiency photovoltaics [J]. Science, 2016, 354(6308): 92-95.
 - [7] TAI Qidong, TANG Kaichi, YAN Feng. Recent progress of inorganic perovskite solar cells [J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12(8): 2375-2405.
 - [8] XIANG Wanchun, TRESS W. Review on recent progress of all-inorganic metal halide perovskites and solar cells [J]. Advanced Materials, 2019, 31(44): e1902851.
 - [9] XIANG Wanchun, WANG Zaiwei, KUBICKI D J, et al. Ba-induced phase segregation and band gap reduction in mixed-halide inorganic perovskite solar cells [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4686.
 - [10] BAI Dongliang, BIAN Hui, JIN Zhiwen, et al. Temperature-assisted crystallization for inorganic CsPbI₂Br perovskite solar cells to attain high stabilized efficiency 14.81% [J]. Nano Energy, 2018, 52: 408-415.
 - [11] CHEN Weijie, CHEN Haiyang, XU Guiying, et al. Precise control of crystal growth for highly efficient CsPbI₂Br perovskite solar cells [J]. Joule, 2019, 3(1): 191-204.
 - [12] WANG Pengyang, ZHANG Xinwang, ZHOU Yuqin, et al. Solvent-controlled growth of inorganic perovskite films in dry environment for efficient and stable solar cells [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 22-25.
 - [13] ZHOU Dingjian, HUANG Jincheng, LIU Jun, et al. Dual passivation strategy for high efficiency inorganic CsPbI₂Br solar cells [J]. Solar RRL, 2021, 5: 2100112.
 - [14] HUANG Jincheng, YAN Huibo, ZHOU Dingjian, et al. Introducing ion migration and light-induced secondary ion redistribution for phase-stable and high-efficiency inorganic perovskite solar cells [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12: 40364-40371.
 - [15] 吴步军, 林东旭, 李征, 等. 钙钛矿薄膜气相制备的晶粒尺寸优化及高效光伏转换[J]. 物理学报, 2019, 68(7): 287-295.
- WU Bujun, LIN Dongxu, LI Zheng, et al. Optimization of grain size to achieve high-performance perovskite solar cells in vapor deposition [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(7): 287-295. (in Chinese)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 溯心】