

# 印刷钙钛矿太阳能电池研究进展

秦 昱, 林珍华, 常晶晶\*, 郝 跃

(西安电子科技大学 微电子学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 钙钛矿材料不仅具有载流子扩散长度长、可调节带隙宽、光吸收效率大等优点, 并且其原料储量十分丰富, 沉积过程所需的形成能较低, 制备工艺可兼容大面积制造技术。总之, 低生产成本、高转换效率和宽应用领域等优点使钙钛矿太阳能电池可与硅基太阳能电池相媲美, 在能源生产中优势十分明显。在现阶段的钙钛矿研究中, 高稳定性和大制备面积是钙钛矿光伏技术的研究热点, 也是亟待突破的难点。本文综述了近年来采用印刷技术制备钙钛矿太阳能电池的原料组成、工艺控制等方面的研究进展, 简述并比较了各种印刷技术的优点与局限性。重点讨论了钙钛矿太阳能电池印刷制备时需要考虑的因素, 并列出了对于改善钙钛矿太阳能电池薄膜性能不同制备方法的尝试, 评价了对于提高器件稳定性及工业生产适用性所采取的一些策略。

**关键词:** 钙钛矿; 太阳能电池; 印刷制备

**中图分类号:** TK519 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20191205.1015

## Research progress of printed perovskite solar cells

QIN Yu, LIN Zhen-hua, CHANG Jing-jing\*, HAO Yue

(School of Microelectronic, Xidian University, Xian 710071, China)

\* Corresponding author, E-mail: jjingchang@xidian.edu.cn

**Abstract:** Perovskite materials have the advantages of long carrier diffusion length, tunable band gap and high light absorption efficiency. Additionally, the storage of raw materials used in the production of perovskite solar cells is very rich and the formation energy required for the deposition process is low. Meanwhile, the production process is compatible with large-area manufacturing techniques. Low production cost, high conversion efficiency and wide application fields make the perovskite solar cells comparable to silicon-based solar cells. In today's perovskite research, high stability and large-area production are the research hotspots of photovoltaic technology. The research progress of the ink composition and process control of recent printing techniques are reviewed in this paper. The advantages and limitations of these methods are briefly described and compared. We focus on the factors that need to be considered in the production of perovskite solar cells, different preparation methods that can improve perovskite film quality and strategies for improving stability and applicability in industrial production.

**Key words:** perovskites; solar cells; printing technique

收稿日期: 2019-01-29; 修订日期: 2019-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61604119, No. 61704131, No. 61804111)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61604119, No. 61704131, No. 61804111)

## 1 引言

钙钛矿作为一种新型太阳能电池材料,其化学组成一般为 $ABX_3$ ,其中A为一价阳离子,例如 $Cs^+$ 、 $MA^+$ 或 $FA^+$ 等;B为二价金属阳离子,例如 $Pb^{2+}$ 、 $Sn^{2+}$ 等;X为卤化物,例如 $Cl^-$ 、 $Br^-$ 或 $I^-$ 等<sup>[1-3]</sup>。得益于近年来研究人员对其制备的光电转换器件的积极研究,钙钛矿太阳能电池的能量转换效率得到很大提升,如Nam Gyu Park等人通过溶液法制备的面积为 $0.095\text{ cm}^2$ 和 $1.0\text{ cm}^2$ 的太阳能电池分别获得了22.7%和19.7%的能量转换效率<sup>[4]</sup>。这些卓越的性能使其成为替代目前广泛使用的硅基太阳能电池的光伏器件之一。但在当前的光伏市场上,硅基器件仍然占据着最主要的地位,其效率已达到约26%<sup>[5]</sup>。相比于硅基器件制备所采用的复杂昂贵的真空沉积方法,钙钛矿太阳能电池低廉的成本和简便的制造工艺具有很大优势。目前,钙钛矿太阳能电池要实现大规模商业化应用还需要克服以下几个障碍。首先,需要开发能够在较大面积上实现高性能器件制造的方法<sup>[6]</sup>;其次,应延长钙钛矿太阳能电池的寿命,通过了解其退化机制并减少制备和使用过程中因温度、湿度和光照造成的降解,提高器件的可重复性和稳定性;最后,对于投资者、制造商和用户来说,铅在制造、使用和处理阶段都是巨大的污染源,其毒性可能对使用者和环境造成不良影响,因此需要降低铅的使用或开发出具有相近性能的替代物<sup>[7]</sup>。

大面积制备技术的发展首先依赖于对钙钛矿薄膜复杂成核和生长过程的基础研究,其次取决于溶液法或真空法等薄膜沉积方法的高度可控性,这样才能确保太阳能电池在同一衬底的不同位置之间以及不同生产批次之间具有较好的质量连续性,最后需对钙钛矿薄膜进行化学成分、形态形貌、电学特性的表征,并将结果反馈到制备流程中<sup>[8]</sup>。现阶段的研究目标为在尽量不牺牲效率的前提下使用大规模制备方法,反映在器件方面即要求印刷法与旋涂法制备的钙钛矿太阳能电池在微观结构和光学特性方面区别不大<sup>[9]</sup>。但事

实证明当太阳能电池的面积增加时,其效率损失是不可避免的,其原因包括高串联电阻、低并联电阻和大面积薄膜不均匀等。太阳能电池的转换效率(PCE)与面积成反比关系,单晶硅(c-Si)太阳能电池、碲化镉(CdTe)薄膜太阳能电池、铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池、染料敏化太阳能电池(DSSC)和有机太阳能电池(OPV)的面积增加一个数量级时其转换效率下降约0.8%,而钙钛矿太阳能电池(PSC)随面积增加其转换效率下降的幅度则更大<sup>[10]</sup>。

## 2 钙钛矿太阳能电池的印刷制备

钙钛矿活性层的制备方法主要包括一步法和两步法两种方法,前者直接将含有钙钛矿的溶液均匀沉积于基底表面,对溶剂进行蒸发后即可形成钙钛矿薄膜,之后的热退火可以使其充分结晶;后者则将含有两种反应物的溶液依次沉积于基底表面,使其反应以得到钙钛矿薄膜。制备中的具体工艺分为溶液法和干式沉积法,前者包含旋涂、刮涂、喷涂、丝网印刷、狭缝式涂布和喷墨打印等方法,后者包含物理气相沉积等方法。钙钛矿晶粒的成核、生长和粗化常在一个或几个工艺流程中重叠,这使得形成过程的分析和控制较为复杂<sup>[11]</sup>,制备出的薄膜往往表面粗糙度较高,缺陷也较为明显,而缺陷对光电转换效率的影响是十分显著的,这些问题在工业生产中将会被进一步放大。

旋涂法是一种较为简便的方法,使用少量溶液即可完成基底的涂覆,工艺过程如图1(a)所示。但旋涂法对材料的利用率较低,材料浪费较为严重,因此不能满足商业化所需的高生产效率和制备尺寸。由于特定条件下薄膜形成的影响因素比较复杂,不同制备方法在钙钛矿薄膜的生长机制、表面形貌和微观结构等方面的影响往往有着显著的不同,因此若要实现钙钛矿太阳能电池的大面积制备,需要开发新的制备工艺。

印刷制备是一种实现大面积、低成本和高效率钙钛矿薄膜的优良途径。在该项技术中,含有钙钛矿有效成分的溶液可以较为容易地沉积在各

种基底上,并能精确控制化学计量,与柔性基底也具有较好的适应性<sup>[12]</sup>。印刷制备钙钛矿太阳能电池的挑战主要在于大面积沉积技术的开发,为获得高效的器件,首先需要改进印刷材料的化学组分,使其更好地与印刷工艺相匹配,以此实现对薄膜形貌以及电学特性的有效控制;其次要在大面积基板上均匀涂覆钙钛矿活性层、电子输运层、空穴输运层和电极,并确保层与层之间的良好接触;最后需要集成钙钛矿的各个模块,确定设备结

构对模块互连的影响并提高模块运行的稳定性。现如今,刮涂、丝网印刷、狭缝式涂布、喷墨打印、喷涂、PDMS 转印等印刷制备钙钛矿太阳能电池的技术均已获得长足进步,其中印刷制备的小面积器件的效率转换水平已经接近旋涂法<sup>[11]</sup>。因此,充分了解当前印刷制备钙钛矿太阳能电池技术十分必要,本文将着重介绍钙钛矿太阳能电池印刷制备的各种技术。

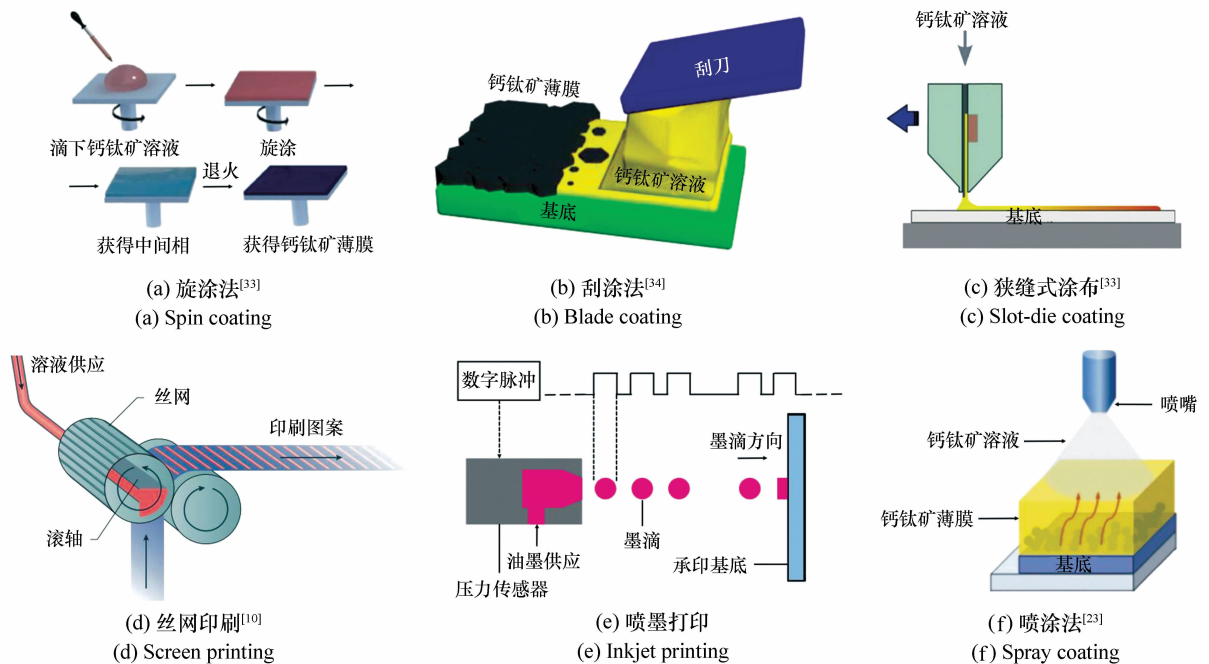


图 1 几种印刷制备方法

Fig. 1 Several printing production methods

## 2.1 刮涂法

刮涂法利用刮刀与基底的相对运动将钙钛矿溶液分散在基底上以形成湿薄膜,是一种简单高效的成膜方法,工艺过程如图 1(b)所示。在刮涂过程中,影响薄膜厚度的因素主要包括溶液浓度、刮刀与基底之间的空隙以及相对基底的移动速度。一般来说,溶剂蒸发时间越长,成核和晶体生长越慢,形成的钙钛矿薄膜的覆盖面积越大,质量越好<sup>[13]</sup>。在刮刀运动过程中,溶液将基底润湿并均匀平铺,这种相对柔和的方式在一定程度上避免了缺陷的产生。刮涂法制备器件的载流子扩散长度可达  $3.5 \mu\text{m}$ ,优于旋涂法制备的器件,这说明刮涂法适合大晶粒、大面积的钙钛矿器件制备。

与旋涂法相比,刮涂法可以在空气环境条件下进行操作,批量生产时对溶液的浪费大幅减少,成膜质量、转换效率和稳定性均有明显优势,刮涂法制备的钙钛矿太阳能电池的转换效率已增长到 19% 以上<sup>[14]</sup>。除此之外,刮涂法还可以较为容易地转化为狭缝式涂布制造<sup>[15]</sup>,并且刮涂法也同样适用于太阳能电池其他层的成膜制造,并能取得较好的薄膜平整度。总而言之,刮涂法可实现高效率钙钛矿太阳能电池的印刷制备。

## 2.2 狭缝式涂布

狭缝式涂布是一种非接触式湿膜沉积方法,起初应用于胶片和纸张的生产<sup>[16]</sup>。在钙钛矿溶液的涂布过程中,溶液受到压力沿着喷头的缝隙

被压出后填补模具与基体之间的间隙,随着相对移动获得均匀的湿膜,其蒸发或固化后得到致密的钙钛矿层。狭缝式涂布工艺过程如图1(c)所示,其具有成膜速度快、均匀性好、涂布窗口宽等优点,所提供的溶液都沉积在基体上,不存在浪费。在涂布过程中,通过预设的基底温度、溶液流量和移动速度等条件,能够较为精确地控制膜的厚度。为提高钙钛矿薄膜的质量,实践中多采用两步法制备,现已制备出基底面积为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 、PCE为18.3%的钙钛矿太阳能电池,该PCE达到旋涂法制备的参考器件PCE的97%<sup>[17]</sup>。与旋涂法类似的是,含铅化合物的涂布制备在该方法中仍然是比较重要的环节,虽然狭缝式涂布也可以集成到大规模柔性钙钛矿太阳能电池的辊对辊加工中,但目前报道的大面积器件的光伏性能仍相对较差<sup>[18]</sup>。在报道中,研究人员利用狭缝式涂布在玻璃基板和柔性基板上分别实现了PCE为12.5%和8.0%的钙钛矿太阳能电池,旋涂法制备的参考器件的PCE为14.9%<sup>[19]</sup>。

### 2.3 丝网印刷

丝网印刷是用刮刀将具有一定粘度的溶液涂抹在丝网上并移动,丝网上有图案的开孔可以容纳溶液,因此溶液即被转移到基底上并形成所需的图案,工艺过程如图1(d)所示。丝网印刷所制备的薄膜厚度取决于丝网网格的大小和深度,因此可以通过控制钙钛矿太阳能电池各层的厚度来有效地改变器件的串联电阻,从而提高器件的效率和稳定性。丝网印刷已被用于制备钙钛矿太阳能电池的碳电极或钙钛矿层,现已制备出活性面积为 $0.28\text{ cm}^2$ 、PCE认证为12.8%的太阳能电池,其在全日照空气环境中可稳定工作1 000 h以上<sup>[20-21]</sup>。除了在稳定性方面的优势,丝网印刷还可以较容易地按比例放大制备尺寸,该特点有望实现稳定的大面积太阳能电池制造。

### 2.4 喷墨打印

喷墨打印利用喷腔内压力的变化将油墨从喷嘴喷出,如图1(e)所示。在喷出油墨的同时,喷头和基板之间按照预设的轨迹进行相对运动,因此油墨被均匀地覆盖至对应的位置,设计的图案即被直接印刷在基底上,这省去了制版等工艺步

骤并提高了材料利用率。在喷墨打印过程中,可以通过改变喷头和基底之间的相对运动速度、数字脉冲的频率和幅度等条件对液滴大小和轨迹进行精细控制。除此之外,喷墨打印还能够在电脑的精确控制下实现多喷头同时打印以进行多种材料的套印。喷墨打印是一种非接触式的印刷技术,喷嘴与基底之间没有机械应力,这大大放宽了对基底材料强度和表面粗糙度的要求。喷墨打印对墨水黏度的要求较低,墨水可以是溶液、胶体以及悬浮液,其黏度一般在 $0.04\text{ Pa} \cdot \text{s}$ 左右,甚至更低,在沉积过程之后,可以单独进行薄膜干燥,因此可以实现质量更好的钙钛矿薄膜。Florian Mathies等人制备出功率转换效率达到12.9%的钙钛矿太阳能电池,其钙钛矿层的厚度可以在 $175 \sim 780\text{ nm}$ 的范围内进行调节<sup>[22]</sup>。此外,Florian Mathies等人还使用喷墨打印在 $\text{TiO}_2$ 电子传输层上进行多次印刷,制备出致密且晶粒较大的钙钛矿薄膜,真空退火后转换效率为11.3%,而旋涂法制备的参考器件的转换效率为12.8%<sup>[23]</sup>。除了制备钙钛矿活性层,喷墨打印还可用于印刷导电层。Zhanhua Wei等人利用喷墨打印技术精确控制纳米碳电极的形状,制备出转换效率为11.60%的钙钛矿太阳能电池<sup>[24]</sup>。

### 2.5 喷涂法

喷涂法是对喷腔内的溶液施加压力,使溶液从喷嘴喷出后分散成微小的液滴并均匀沉积到基体上,如图1(f)所示,该方法被广泛应用于钙钛矿薄膜和载流子传输层的沉积,并与大面积制备工艺兼容。根据产生液滴的方法,喷涂法分为高压气体驱动的高压气体喷涂<sup>[25-26]</sup>、超声驱动的超声喷涂<sup>[27-28]</sup>和高电压驱动的电喷涂<sup>[29-30]</sup>,其中电喷涂是在喷头和基片之间施加高压,依靠电荷的排斥作用将溶液分散为液滴,而电场的存在也增加了液滴相对基底的运动速度,通过调整电压的大小,液滴可以精确、均匀地沉积于衬底上<sup>[31]</sup>。但总体来说,喷涂过程中液滴大小和沉积位置的不确定性较大,所以在待沉积的某一区域需要有多个液滴重叠才能保证完全覆盖,这仍是待解决的难题。喷涂过程中,由于多个液滴先后沉积导致新的液滴可以溶解已经沉积的材料,这无疑增

加了分析的复杂性,所以一般通过调节溶剂挥发性和基底温度来控制溶剂去除和材料溶解的速度,以此抑制沉积材料的再溶解。此外,控制薄膜干燥时间和退火条件也是形成高质量钙钛矿薄膜的关键。Mohan Ramesh 等人使用高压气体喷涂沉积钙钛矿薄膜,测得的器件最高转换效率为 10.2%<sup>[26]</sup>。Alexander T. Barrows 等人使用超声喷涂沉积钙钛矿薄膜,利用一步法制备出表面覆盖度在 85% 以上,转换效率达到 11% 的钙钛矿太阳能电池<sup>[27]</sup>。David K. Mohamad 等人利用超声波喷涂法印刷制备钙钛矿活性层、电子传输层等,获得转换效率为 9.9% 的钙钛矿太阳能电池,而使用旋涂法在氮气氛围下制备的参考器件的转换效率为 12.8%<sup>[32]</sup>。

表 1 总结了印刷制备钙钛矿太阳能电池的性能,包括各种印刷制备方法对辊对辊工艺的适用性、是否可以印刷图案以及最新的 PCE。

表 1 几种印刷制备钙钛矿太阳能电池方法比较

Tab. 1 Comparison of printed perovskite solar cells

制备方法	适用辊对辊	可印刷图案	最新 PCE
刮涂法	☑	☒	19% <sup>[14]</sup>
狭缝式涂布	☑	☑	18.3% <sup>[17]</sup>
丝网印刷	☑	☑	12.8% <sup>[21]</sup>
喷墨打印	☑	☑	12.9% <sup>[22]</sup>
喷涂法	☑	☑	11% <sup>[27]</sup>

### 3 印刷制备中改善钙钛矿太阳能电池性能的方法

#### 3.1 界面层调控

通过界面层调控,钙钛矿太阳能电池可以更好地收集电荷并减少界面复合。钙钛矿太阳能电池一般包含 6 个界面,即透明导电氧化物与电子传输层之间的界面、电子传输层与钙钛矿层的界面、钙钛矿晶粒之间的界面(即晶界)、钙钛矿层与空穴传输层的界面、空穴传输层与电极的界面、电极材料与大气环境的界面<sup>[35]</sup>。钙钛矿太阳能电池的结构分为正向结构和反向结构,两种结构都存在上述界面。2015 年,Zhibin Yang 等人使用

刮涂法在空气环境条件下使用 PEDOT:PSS 与异丙醇体积比为 1:3 的混合溶液制备空穴传输层,异丙醇的加入降低了溶液的表面张力,改善了空穴传输层与钙钛矿活性层以及电极的界面接触,所制备器件的最高转换效率达到 10.44%<sup>[36]</sup>,器件结构如图 2(a) 所示。Jong H. Kim 等人将刮涂制备的空穴传输层 PEDOT:PSS 和电子传输层 PC<sub>61</sub>BM 在室温下干燥 40 min,在该过程中溶剂 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)基本蒸发完毕,之后进行 90 °C 下 2 h 的退火,制备器件的最大转换效率为 9.52%<sup>[13]</sup>。钙钛矿薄膜沉积后处理过程如图 2(b) 所示,在退火前加入了室温下的溶剂干燥步骤。溶剂对薄膜质量的影响较大,缓慢而充分的蒸发有利于形成均匀致密的薄膜,表面形貌的改善使活性层和电荷传输层获得了更好的界面接触,因此光伏性能得到了显著提高。此外,旋涂法制备的参考器件在空气中放置一段时间后其光伏性能下降较快,而刮涂法制备的器件因具有良好的界面接触,其环境稳定性相对较高。Kyeongil Hwang 等人将双三氟甲烷磺酰亚胺锂(Li-TFSI)和 4-叔丁基吡啶(TBP)掺杂的聚-3-己基噻吩(P3HT)作为空穴传输层,在狭缝式涂布速度为 7 mm/s 时所制备器件的转换效率达到 11.58%<sup>[18]</sup>。添加剂的加入提高了空穴传输层的稳定性和电导率并改善了空穴传输层与钙钛矿的界面,对太阳能电池的开路电压有一定的提升作用。2016 年,Hyungcheol Back 等人在 PEDOT:PSS 中通过加入聚对苯乙烯磺酸(PSSH)对 PEDOT:PSS 进行优化,制备的面积为 15 mm × 40 mm 的钙钛矿薄膜具有良好的均匀性和表面覆盖度,器件的转换效率从 6% 提高到 10.15%<sup>[37]</sup>。如图 2(c) 所示,钙钛矿溶液和加入 PSSH 的 PEDOT:PSS 之间的界面层存在较强的静电作用,这增加了空穴传输层上钙钛矿薄膜的覆盖率,并改善了薄膜的均匀性和结晶度。2018 年,Yumin Zhang 等人通过丝网印刷制备了添加 1.2% 镓铟锡合金的碳电极,所制备钙钛矿太阳能电池的最高转换效率为 13.51%,参考器件的转换效率为 10.69%<sup>[38]</sup>。如图 2(d) 所示,由于金属颗粒具有较高的密度和流动性,其倾向于聚集在碳电极和



钙钛矿层之间,其优良的导电性为界面增加了空穴运输通道,这增强了钙钛矿层与碳电极界面的

空穴萃取,使载流子聚集和复合的可能性降低,优化了两者的接触性能。

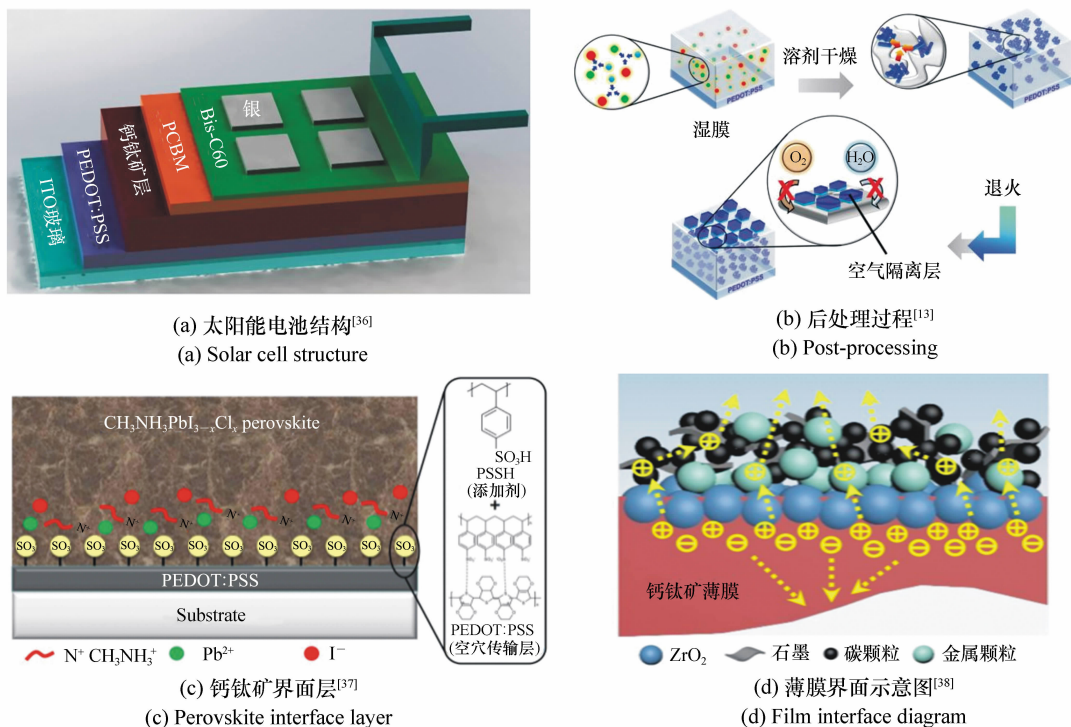


图 2 界面层调控方法及结果

Fig. 2 Regulation methods and results for interface layer

### 3.2 活性层调控

钙钛矿活性层是太阳能电池中光电转换的关键结构,对其化学组分、晶粒生长等方面进行优化可以改善钙钛矿太阳能电池的性能,从而提高器件的开路电压、短路电流、光电转化效率等。本节主要从添加剂工程和工艺调控两方面论述活性层调控策略。

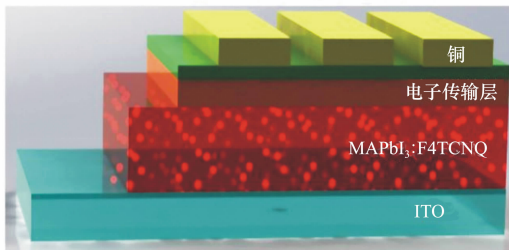
#### 3.2.1 添加剂工程

在制备钙钛矿活性层的溶液中加入添加剂可以控制晶粒尺寸、晶界、形貌以及缺陷以提高光伏性能和稳定性。2015年,Shao-Gang Li等人将 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl}$ 作为添加剂对钙钛矿型薄膜的形貌和结构进行优化,其将 $\text{PbI}_2$ 、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 和 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl}$ 以 $1:(1-x):x$ 的比例配制钙钛矿溶液,并使用喷墨打印技术在 $\text{TiO}_2$ 上制备了形貌平整、性能稳定的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜,最终得出 $x=0.6$ 时器件转换效率最高可达到 $12.3\%$ <sup>[39]</sup>。2016年,Sae-Mi Park等人将N-环己基吡咯烷酮(CHP)作为添加剂为钙钛矿太阳能电池活性层提供了更好的形貌

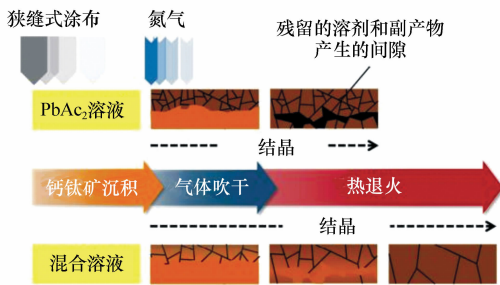
控制,在CHP与 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 体积比为1:99时,在连续辊涂的条件下得到了转换效率为 $7.36\%$ 的器件,而未添加CHP的参考器件的转换效率为 $6.42\%$ <sup>[40]</sup>。2018年,Wu-Qiang Wu等人将p型杂质四氟四氰基醌二甲烷(F4TCNQ)加入 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 溶液中,刮涂法制备钙钛矿太阳能电池的转换效率与未掺杂器件相比提高了将近1倍,达到 $20.2\%$ <sup>[34]</sup>,其太阳能电池结构如图3(a)所示。F4TCNQ的加入增加了钙钛矿的功函数,ITO/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ :F4TCNQ界面处产生了向上的能带弯曲,二者的能级更加匹配。以上变化促进了钙钛矿层到ITO的空穴转移,因此载流子浓度大幅增加,串联电阻减小。Florian Mathies等人将钙钛矿溶液中掺入碘化铯,获得了转换效率为 $12.9\%$ 的铯-甲脒-甲胺三元阳离子钙钛矿太阳能电池<sup>[22]</sup>。如图3(b)所示,在 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境条件下放置100 min后, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 钙钛矿太阳能电池的归一化转换效率有接近50%的下降,而三元阳离子钙钛矿太阳能电池的归一化转换效率在

80 °C 下仅有 10% 的轻微下降。这说明少量铯 (< 15%) 的加入使器件具有更高的转换效率以及热稳定性,这主要得益于钙钛矿薄膜结晶度的改善。Donmin Lee 等人采用  $\text{PbAc}_2$  和  $\text{PbCl}_2$  的混合溶液并利用狭缝式涂布制备了钙钛矿薄膜,在二者的摩尔比为 8:2 时得到了转换效率为 13.3% 的钙钛矿太阳能电池<sup>[41]</sup>。如图 3(c) 所示,单一的  $\text{PbAc}_2$  溶液在狭缝式涂布后的结晶过程中容易产生间隙,而  $\text{PbAc}_2$  和少量  $\text{PbCl}_2$  的混合溶液中,前者有助于钙钛矿薄膜的快速结晶和完全覆盖,后者改善了薄膜晶粒尺寸和形貌,因此制备的钙钛矿薄膜更加均匀致密,这是使用单一含铅溶液很难实现的。Yongyi Peng 等人使用二甲基亚砜(DMSO)和二甲基酰胺(DMF)的混合物作为溶

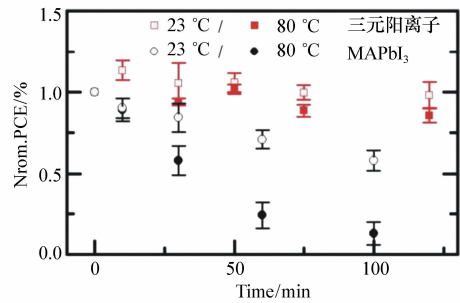
剂,并在钙钛矿溶液中加入过量的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ,最终在空气环境条件下采用一步法刮涂制备  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  薄膜,在 DMSO 和 DMF 体积比为 1:10、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  超量 6.3% 时得到了转换效率为 10.92% 的太阳能电池<sup>[42]</sup>,图 3(d) 所示的电流密度可以直观地表明混合溶剂和超量的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  对于太阳能电池光电特性的提升有着明显的帮助。在 DMF 中加入少量 DMSO 可延缓钙钛矿薄膜的结晶过程,这对晶体内部的致密结构以及成膜的均匀性有较大改善。钙钛矿溶液中过量的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  在退火过程中能够促进晶粒的择优取向生长,从而获得了较大的晶粒,进一步提高了薄膜的光滑度和致密性。



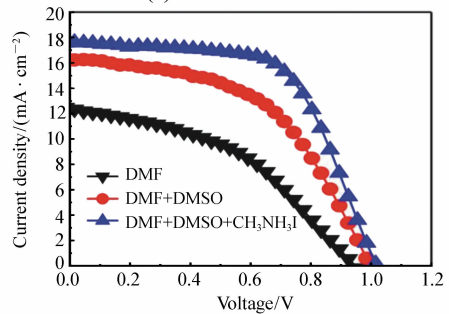
(a) 太阳能电池结构<sup>[34]</sup>  
(a) Solar cell structure



(c) 工艺流程对比<sup>[41]</sup>  
(c) Process comparison



(b) 归一化转换效率<sup>[22]</sup>  
(b) Normalized PCE



(d) 电流密度<sup>[42]</sup>  
(d) Current density

图 3 添加剂工程调控方法及结果

Fig. 3 Additive engineering regulation method and results

### 3.2.2 工艺调控

在钙钛矿薄膜的沉积过程以及退火过程中调整温度、印刷层数、干燥时间等工艺条件可以调控活性层的性质,并探索出最优的制备条件。2015 年, Yehao Deng 等人利用重结晶纯化的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  配制钙钛矿溶液,在 PEDOT:PSS 上刮涂制备了载

流子扩散长度达 3.5  $\mu\text{m}$  的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  薄膜,并获得了 15.1% 的转换效率<sup>[43]</sup>。使用去除杂质的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  所制备的钙钛矿薄膜表面各区域具有良好的连接,在较大范围内没有明显间隙。晶体质量的改善对提高载流子寿命有很大的促进作用,这对实现大面积连续无针孔的钙钛矿薄膜至关重

要。此外,与旋涂法制备的参考器件相比,刮涂法形成的薄膜晶粒较大、载流子扩散长度较长。Stefano Razza 等人利用  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $17\text{ m}^3/\text{s}$  的高温气流快速蒸发刮涂后残留的溶剂来控制  $\text{PbI}_2$  的结晶,并获得了光滑致密的  $\text{PbI}_2$  层,此后将其浸入  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  溶液中形成  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  薄膜,最终在  $0.1\text{ cm}^2$  的器件面积下获得了 13.3% 的转换效率<sup>[44]</sup>。Yehao Deng 等人发现当钙钛矿溶液浓度低于  $350\text{ mg/mL}$  时,刮涂制备的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  薄膜具有鲜艳的色彩,通过调节刮涂温度和钙钛矿溶液的浓度,薄膜上连续模块的直径可从  $20\text{ }\mu\text{m}$  连续调整到  $100\text{ }\mu\text{m}$ ,彩色圆环的环间距可从  $2\text{ }\mu\text{m}$  调整到  $6\text{ }\mu\text{m}$ <sup>[45]</sup>,图 4(a) 是扫描电子显微镜拍摄的薄膜照片。除此之外,该类器件的转换效率为 12.2%,达到类似方法所制备标准黑色器件转换效率的 80% 左右,可见这种制备大面积钙钛矿薄膜的方法并不会显著降低薄膜的光电性能。Mohan Ramesh 等人利用喷涂法制备钙钛矿薄膜,通过使用不同的溶液体积来控制膜厚,当  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  与  $\text{PbI}_2$  的摩尔比为 1:0.75、喷涂量为  $150\text{ }\mu\text{L}$ 、基体温度为  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、喷涂后退火温度为  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,获得了最佳的器件性能和最高的薄膜覆盖率,其转换效率为 10.2%<sup>[26]</sup>。2016 年,David K. Mohamad 等人在空气环境条件下通过控制喷头移动速度、溶液浓度和基体温度等因素调整喷涂制备的钙钛矿活性层和电子传输层的厚度以及成膜质量,并在活性层沉积之后进行红外热退火,得到了转换效率为 9.9% 的钙钛矿太阳能电池,在氮气氛围下使用旋涂法制备的参考器件的转换效率为 12.8%<sup>[32]</sup>。Beomjin Jeong 等人将溶解在高沸点溶剂二甲基亚砜(DMSO)中的钙钛矿溶液旋涂到  $\text{SiO}_2$  衬底上,随后将薄膜转移到等离子体处理过的具有图案的 PDMS 模具上,在  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  下处理 15 min,最终将 PDMS 上具有图案的钙钛矿薄膜在 1 kPa 的压力下转印到柔性衬底上,转印后的钙钛矿薄膜的光伏性能并未产生较大的衰减<sup>[46]</sup>,器件制备流程如图 4(b) 所示。相比于制备钙钛矿太阳能电池过程中常用的溶剂——二甲基甲酰胺(DMF),DMSO 的沸点为  $189\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在室温下蒸发速度较慢,所以旋涂制备的钙钛矿薄膜

会处于凝胶状态而不会迅速结晶,一定的流动性便于薄膜后续的图案化和转印步骤。Qiao Hu 等人使用刮涂法制备了钙钛矿光探测器,通过改变  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  的浓度,控制钙钛矿纳米线的长度和密度,获得了长度可达 15 mm 的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  纳米线,光探测器在光强为  $36\text{ mW/cm}^2$  时光电流与暗电流的比值可达到 100,表现出较好的光响应性能<sup>[47]</sup>。在图 4(c) 所示的钙钛矿蒸发结晶过程的示意图中,由于衬底边缘的钙钛矿溶液具有更大的暴露表面,其溶剂蒸发也更为快速,所以成为钙钛矿纳米线的初始成核位置,钙钛矿纳米线逐渐从边缘向内生长。Florian Mathies 等人在基底上多次喷墨印刷钙钛矿溶液,在印刷 3 次时钙钛矿薄膜的厚度从 180 nm 增加到 480 nm,所制备器件在真空退火后转换效率达 11.3%,而旋涂法制备的参考器件的转换效率为 12.8%<sup>[23]</sup>。喷墨打印的次数越多,沉积的溶液越多,基板上钙钛矿薄膜的厚度就越厚,在一定范围内可促进光照的充分吸收。2018 年,James B. Whitaker 等人通过改变狭缝式涂布所用钙钛矿溶液的浓度、狭缝宽度,将狭缝式涂布的钙钛矿薄膜室温干燥 20 min 后浸泡在反溶剂中,所制备器件的转换效率达 18%<sup>[9]</sup>。因为钙钛矿薄膜在涂布和抗溶剂处理之间存在固有的均匀覆盖过程,额外的室温干燥步骤对扩大晶粒尺寸和改善表面形貌具有促进作用,实验还验证了室温干燥对于旋涂法、刮涂法、喷涂法等其他印刷方法的通用性。Yongchao Ma 等人使用旋涂制备钙钛矿薄膜,将两层薄膜面对面组合后在一定压力下退火,该方法制备了沿  $\langle 110 \rangle$  晶向定向生长的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  薄膜,器件的转换效率达到 17.15%<sup>[48]</sup>。将两个钙钛矿薄膜面对面退火可以调节溶剂蒸发速率,制备出高质量的钙钛矿薄膜,与传统器件相比,上下膜都表现出均匀致密的形态。在一定范围内,两层薄膜面对面辊制的压力越大、持续时间越长,晶粒尺寸越大。Yufei Zhong 等人在刮涂法制备钙钛矿太阳能电池的过程中尝试了不同的基底温度,在中高温 ( $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 下沉积  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  时避免了溶剂残留,最终在基底温度为  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  时获得了 17.5% 转换效率<sup>[49]</sup>。如图 4(d) 所示,在  $25\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  内,



基底温度越高,钙钛矿太阳能电池的效率越高,这 主要得益于薄膜结晶度的提高。

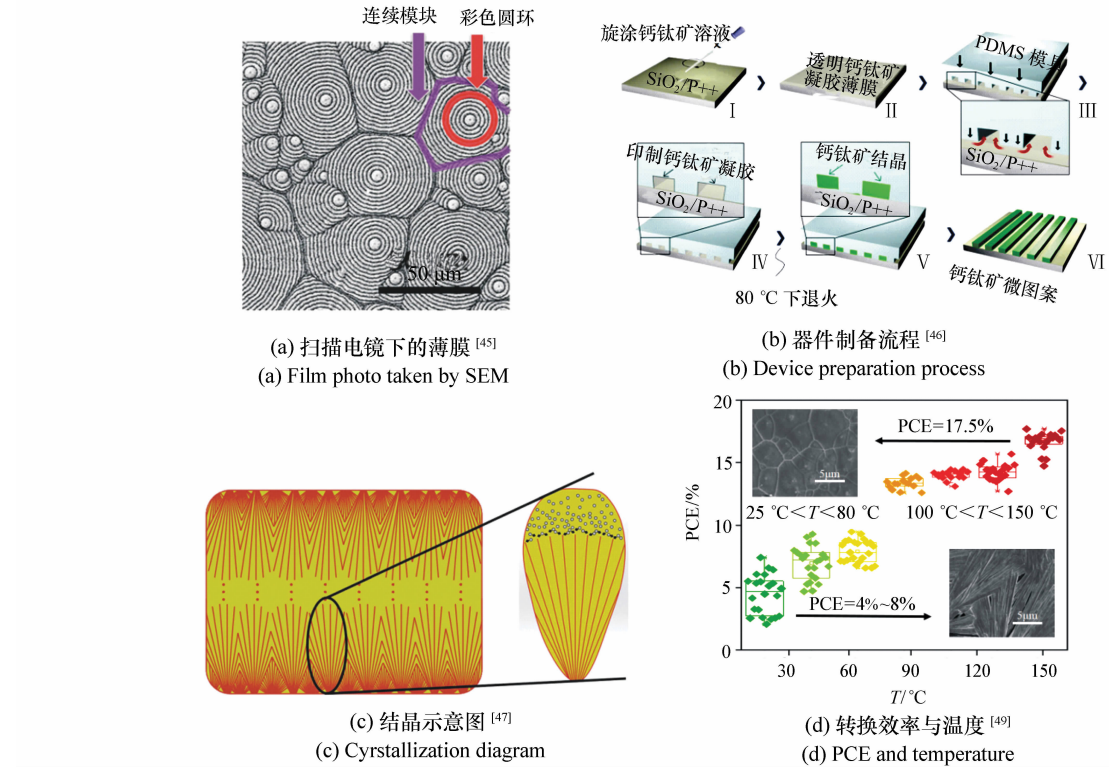


图4 活性层调控方法及结果

Fig. 4 Active layer regulation method and results

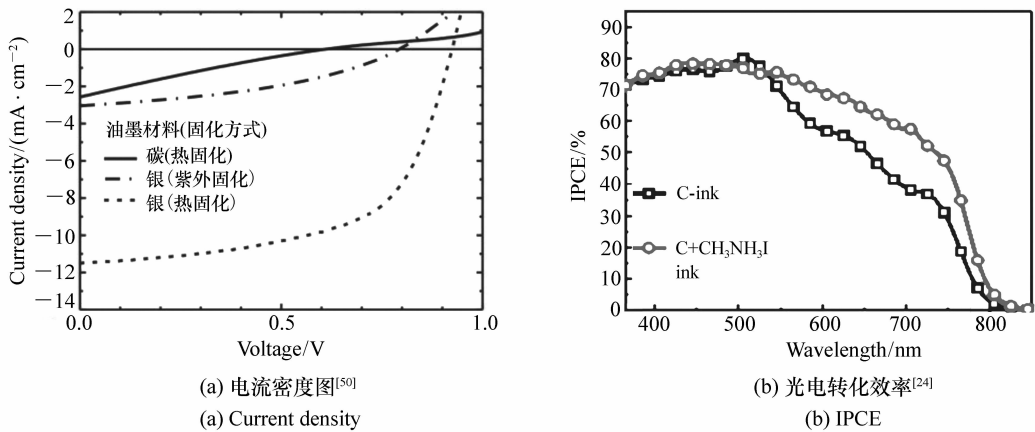


图5 电极调控方法及结果

Fig. 5 Electrode regulation method and results

### 3.3 电极调控

虽然电极与钙钛矿层没有直接接触,但是电极材料稳定的导电性能及与电荷传输层的良好接触对钙钛矿太阳能电池的长期高效稳定运行起着十分重要的作用。2015年,Thomas M. Schmidt等

人在空气环境条件下使用丝网印刷制备银电极,钙钛矿太阳能电池的其余各层使用狭缝式涂布制备,在聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜上制备的全印刷器件的转换效率为4.9%<sup>[50]</sup>。不同油墨和固化方式对电流密度的影响如图5(a)所示。

此外,从单个设备的印刷到连续大批量的印刷,电极的导电性能几乎没有衰减,这说明丝网印刷制备钙钛矿太阳能电池的电极是一种稳定有效的方式。Zhanhua Wei 等人使用喷墨打印技术制备碳电极,并在制备钙钛矿活性层时将碳纳米颗粒加入 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ 中以抑制 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 和碳电极界面的载流子复合,制备器件的转换效率达到 11.6%<sup>[24]</sup>。图 5(b)表明在波长小于 550 nm 时,用 C +  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  油墨制备的太阳能电池与用 C 油墨制备的参考器件在光学特性方面差别不大,二者的光电转化效率(IPCE)均在 70% 以上。在波长为 550 ~ 800 nm 的红光区域,前者的 IPCE 明显较高,这主要得益于碳纳米颗粒对  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  和碳电极界面的改善作用,C +  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  油墨抑制了界面电荷复合,提升了载流子的输运能力,因此对太阳能电池的性能有较大提升效果。

## 4 挑战和前景

目前转换效率较高的钙钛矿太阳能电池面积基本在  $0.1 \text{ cm}^2$  左右,面积大于  $1 \text{ cm}^2$  的钙钛矿太阳能电池的报道比较有限,但大面积且均匀的钙钛矿薄膜对于工业应用是必不可少的,本综述所引用的文献中钙钛矿太阳能电池面积最大为  $100 \text{ cm}^2$ <sup>[44]</sup>。相比于旋涂法,印刷制备的钙钛矿

太阳能电池在实现太阳能到电能的高效率转换方面还有待提高,但如今许多有望实现更高效率的改进方法已经被广泛研究,科研人员在钙钛矿各层化学组成、制备工艺等方面进行了不懈的探索,与此同时,转换效率也正在稳步提升。

钙钛矿太阳能电池的长期稳定性一直是亟待突破的瓶颈,在公布的大多数数据中,器件寿命常指在黑暗、惰性气体氛围中保存的时间,但考虑商业应用时太阳能电池需要在高湿度、高温、大温差的环境下工作,器件寿命的偏差会比较大。在实际应用中,为提高钙钛矿太阳能电池的寿命需要对其进行良好的封装,这增加了额外的费用,而更高的薄膜质量则可以从更深层次上提高器件的稳定性。上文已指出,印刷制备的薄膜相对比较均匀,致密的表面有助于阻隔各种物质,因此钙钛矿活性层的降解失效也会减慢。对于钙钛矿活性层中所含铅元素的毒性这一问题,可以开发无铅的吸收层材料,但目前无铅钙钛矿的性能与含铅器件的差距仍然较大,因此制定相应的回收策略是一种有效的解决方法<sup>[51]</sup>,对于其他危害较大的溶剂,则可以寻找性能相近的替代品<sup>[52]</sup>。

总之,开发新一代高效率、低成本、大面积、长寿命、低毒性、高重复性的制备方法是顺势所趋,而印刷制备钙钛矿太阳能电池的方法正是实现上述目标的有效尝试。

## 参考文献:

- [1] ZHANG J R, BAI D L, JIN ZH W, *et al.*. 3D-2D-0D interface profiling for record efficiency all-inorganic CsPbBr<sub>2</sub> perovskite solar cells with superior stability[J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(15):1703246.
- [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] EGGER D A, BERA A, CAHEN D, *et al.*. What remains unexplained about the properties of halide perovskites? [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(20):1800691.
- [4] YANG W S, PARK B W, JUNG E H, *et al.*. Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells[J]. *Science*, 2017, 356(6345):1376-1379.
- [5] YOSHIKAWA K, KAWASAKI H, YOSHIDA W, *et al.*. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26% [J]. *Nature Energy*, 2017, 2(5):17032.
- [6] SANCHEZ S, XIAO H, PHUNG N, *et al.*. Flash infrared annealing for antisolvent-free highly efficient perovskite solar cells [J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(12):1702915.
- [7] WILLIAMS S T, RAJAGOPAL A, CHUEH C C, *et al.*. Current challenges and prospective research for upscaling hybrid perovskite photovoltaics[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2016, 7(5):811-819.
- [8] ONO L K, PARK N G, ZHU K, *et al.*. Perovskite solar cells-towards commercialization[J]. *ACS Energy Letters*, 2017, 2(8):1749-1751.

- [9] WHITAKER J B, KIM D H, LARSON B W, *et al.*. Scalable slot-die coating of high performance perovskite solar cells[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2018, 2(11):2442-2449.
- [10] LI ZH, KLEIN T R, KIM D H, *et al.*. Scalable fabrication of perovskite solar cells[J]. *Nature Reviews Materials*, 2018, 3(4):18017.
- [11] CHEN H, YE F, TANG W T, *et al.*. A solvent- and vacuum-free route to large-area perovskite films for efficient solar modules[J]. *Nature*, 2017, 550(7674):92-95.
- [12] HE M, LI B, CUI X, *et al.*. Meniscus-assisted solution printing of large-grained perovskite films for high-efficiency solar cells[J]. *Nature Communications*, 2017, 8:16045.
- [13] KIM J H, WILLIAMS S T, CHO N, *et al.*. Enhanced environmental stability of planar heterojunction perovskite solar cells based on blade-coating[J]. *Advanced Energy Materials*, 2015, 5(4):1401229.
- [14] TANG SH, DENG Y H, ZHENG X P, *et al.*. Composition engineering in doctor-blading of perovskite solar cells[J]. *Advanced Energy Materials*, 2017, 7(18):1700302.
- [15] YANG M J, LI ZH, REESE M O, *et al.*. Perovskite ink with wide processing window for scalable high-efficiency solar cells[J]. *Nature Energy*, 2017, 2(5):17038.
- [16] RONG Y G, MING Y, JI W X, *et al.*. Toward industrial-scale production of perovskite solar cells: screen printing, slot-die coating, and emerging techniques[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2018, 9(10):2707-2713.
- [17] KIM Y Y, PARK E Y, YANG T Y, *et al.*. Fast two-step deposition of perovskite via mediator extraction treatment for large-area, high-performance perovskite solar cells[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(26):12447-12454.
- [18] HWANG K, JUNG Y S, HEO Y J, *et al.*. Toward large scale roll-to-roll production of fully printed perovskite solar cells [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(7):1241-1247.
- [19] ZUO CH T, SCULLY A D, VAK D, *et al.*. Self-assembled 2D perovskite layers for efficient printable solar cells[J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(4):1803258.
- [20] LI X, TSCHUMI M, HAN H W, *et al.*. Outdoor performance and stability under elevated temperatures and long-term light soaking of triple-layer mesoporous perovskite photovoltaics[J]. *Energy Technology*, 2015, 3(6):551-555.
- [21] MEI A Y, LI X, LIU L F, *et al.*. A hole-conductor-free, fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability [J]. *Science*, 2014, 345(6194):295-298.
- [22] MATHIES F, EGGERS H, RICHARDS B S, *et al.*. Inkjet-printed triple cation perovskite solar cells[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2018, 1(5):1834-1839.
- [23] MATHIES F, ABZIEHER T, RUEDA D, *et al.*. Multipass inkjet printing of methylammonium lead iodide for planar perovskite solar cells (Conference Presentation) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9942:994209.
- [24] WEI ZH H, CHEN H N, YAN K Y, *et al.*. Inkjet printing and instant chemical transformation of a  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /nanocarbon electrode and interface for planar perovskite solar cells [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53(48):13239-13243.
- [25] GAMLIEL S, DYMSHITS A, AHARON S, *et al.*. Micrometer sized perovskite crystals in planar hole conductor free solar cells[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2015, 119(34):19722-19728.
- [26] RAMESH M, BOOPATHI K M, HUANG T Y, *et al.*. Using an airbrush pen for layer-by-layer growth of continuous perovskite thin films for hybrid solar cells[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(4):2359-2366.
- [27] BARROWS A T, PEARSON A J, KWAK C K, *et al.*. Efficient planar heterojunction mixed-halide perovskite solar cells deposited via spray-deposition[J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(9):2944-2950.
- [28] HUANG H B, SHI J J, ZHU L F, *et al.*. Two-step ultrasonic spray deposition of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  for efficient and large-area perovskite solar cell[J]. *Nano Energy*, 2016, 27:352-358.
- [29] CHANDRASEKHAR P S, KUMAR N, KUMAR SWAMI S, *et al.*. Fabrication of perovskite films using an electrostatic assisted spray technique: the effect of the electric field on morphology, crystallinity and solar cell performance [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(12):6792-6800.
- [30] ISHIHARA H, SARANG S, CHEN Y C, *et al.*. Nature inspiring processing route toward high throughput production of

- perovskite photovoltaics[J]. *Journal of Materials Chemistry A*,2016,4(18):6989-6997.
- [31] HONG S C, LEE G, HA K, *et al.*. Precise morphology control and continuous fabrication of perovskite solar cells using droplet-controllable electrospray coating system[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*,2017,9(9):7879-7884.
- [32] MOHAMAD D K, GRIFFIN J, BRACHER C, *et al.*. Spray - cast multilayer organometal perovskite solar cells fabricated in air[J]. *Advanced Energy Materials*,2016,6(22):1600994.
- [33] QIU L B, ONO L K, QI Y B. Advances and challenges to the commercialization of organic-inorganic halide perovskite solar cell technology[J]. *Materials Today Energy*,2018,7:169-189.
- [34] WU W Q, WANG Q, FANG Y J, *et al.*. Molecular doping enabled scalable blading of efficient hole-transport-layer-free perovskite solar cells[J]. *Nature Communications*,2018,9(1):1625.
- [35] CHO A N, PARK N G. Impact of interfacial layers in perovskite solar cells[J]. *ChemSusChem*,2017,10(19):3687-3704.
- [36] YANG ZH B, CHUEH C C, ZUO F, *et al.*. High-performance fully printable perovskite solar cells via blade-coating technique under the ambient condition[J]. *Advanced Energy Materials*,2015,5(13):1500328.
- [37] BACK H, KIM J, KIM G, *et al.*. Interfacial modification of hole transport layers for efficient large-area perovskite solar cells achieved via blade-coating[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*,2016,144:309-315.
- [38] ZHANG Y M, ZHAO J H, ZHANG J, *et al.*. Interface engineering based on liquid metal for compact-layer-free, fully printable mesoscopic perovskite solar cells[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*,2018,10(18):15616-15623.
- [39] LI SH G, JIANG K J, SU M J, *et al.*. Inkjet printing of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  on a mesoscopic  $\text{TiO}_2$  film for highly efficient perovskite solar cells[J]. *Journal of Materials Chemistry A*,2015,3(17):9092-9097.
- [40] PARK S M, NOH Y J, JIN S H, *et al.*. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells fabricated via roller-coating [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*,2016,155:14-19.
- [41] LEE D, JUNG Y S, HEO Y J, *et al.*. Slot-die coated perovskite films using mixed lead precursors for highly reproducible and large-area solar cells[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*,2018,10(18):16133-16139.
- [42] PENG Y Y, CHENG Y D, WANG CH H, *et al.*. Fully doctor-bladed planar heterojunction perovskite solar cells under ambient condition [J]. *Organic Electronics*,2018,58:153-158.
- [43] DENG Y H, PENG E, SHAO Y CH, *et al.*. Scalable fabrication of efficient organolead trihalide perovskite solar cells with doctor-bladed active layers[J]. *Energy & Environmental Science*,2015,8(5):1544-1550.
- [44] RAZZA S, DI GIACOMO F, MATTEOCCI F, *et al.*. Perovskite solar cells and large area modules ( $100\text{ cm}^2$ ) based on an air flow-assisted  $\text{PbI}_2$  blade coating deposition process[J]. *Journal of Power Sources*,2015,277:286-291.
- [45] DENG Y H, WANG Q, YUAN Y B, *et al.*. Vividly colorful hybrid perovskite solar cells by doctor-blade coating with perovskite photonic nanostructures[J]. *Materials Horizons*,2015,2(6):578-583.
- [46] JEONG B, HWANG I, CHO S H, *et al.*. Solvent-assisted gel printing for micropatterning thin organic-inorganic hybrid perovskite films[J]. *ACS Nano*,2016,10(9):9026-9035.
- [47] HU Q, WU H, SUN J, *et al.*. Large-area perovskite nanowire arrays fabricated by large-scale roll-to-roll micro-gravure printing and doctor blading[J]. *Nanoscale*,2016,8(9):5350-5357.
- [48] MA Y CH, LEE J, LIU Y L, *et al.*. Synchronized-pressing fabrication of cost-efficient crystalline perovskite solar cells via intermediate engineering[J]. *Nanoscale*,2018,10(20):9628-9633.
- [49] ZHONG Y F, MUNIR R, LI J B, *et al.*. Blade-coated hybrid perovskite solar cells with efficiency  $> 17\%$  : an in situ investigation[J]. *ACS Energy Letters*,2018,3(5):1078-1085.
- [50] SCHMIDT T M, LARSEN-OLSEN T T, CARLÈ J E, *et al.*. Upscaling of perovskite solar cells: fully ambient roll processing of flexible perovskite solar cells with printed back electrodes[J]. *Advanced Energy Materials*,2015,5(15):1500569.
- [51] BINEK A, PETRUS M L, HUBER N, *et al.*. Recycling perovskite solar cells to avoid lead waste[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*,2016,8(20):12881-12886.
- [52] NOEL N K, ABISREUTINGER S N, WENGER B, *et al.*. A low viscosity, low boiling point, clean solvent system for the rapid crystallisation of highly specular perovskite films[J]. *Energy & Environmental Science*,2017,10(1):145-152.

## 作者简介:



秦昱(1997—),男,河南南阳人,硕士研究生,2017年于西安电子科技大学获得学士学位,主要从事钙钛矿太阳能电池方面的研究。E-mail: qinyu\_ic@163.com



常晶晶(1988—),男,河南三门峡人,教授,2010年6月于四川大学获得学士学位,2014年于新加坡国立大学获得博士学位,毕业后继续在新加坡国立大学从事博士后研究工作。2015年通过“华山学者”菁英人才计划加入西安电子科技大学微电子学院。2016年入选国家“青年千人”人才计划。主要研究方向:1. 有机及氧化物晶体管的制备及应用。2. 有机及钙钛矿太阳能电池的相关研究。3. 柔性印刷电子器件的制备及应用。E-mail: jjingchang@xidian.edu.cn

## 向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地址:长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

电话:(0431)6176059

E-mail: yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:50元/期

网址:www.yjyxs.com