发 光 学 报
CHINESE JOURNAL OF LUMINESCENCE

文章编号：1000-7032(XXXX)XX-0001-11

喷涂制备凹曲面钙钛矿薄膜及其面内均匀性研究

游 伟[1,2]，孙 凯[3,2]，向伍晨[4,2]，高彦艳[2*]，李 阳[1*]

（1. 五邑大学 电子与信息工程学院，广东 江门 529020；
2. 广东脉络能源科技有限公司，广东 珠海 519000；
3. 华南师范大学 华南先进光电子研究院，广东 广州 510006；
4. 南开大学 电子信息与光学工程学院，天津 300071）

摘要：曲面基底为钙钛矿光伏器件的形貌适配与大面积集成提供了新的应用场景，但凹曲面几何对喷涂沉积分布及薄膜面内均匀性的影响尚不明确。本文分别在平面和凹曲面ITO基底上制备钙钛矿薄膜及49 cm^2光伏组件，并对中心、中部和边缘区域的膜厚、表面形貌、光学响应及晶体结构进行比较。结果表明，平面样品中心、中部和边缘区域的平均膜厚分别为1050.5±9.5、907.3±16.0和811.3±10.7 nm，中心至边缘相对变化为22.8%；凹曲面样品对应膜厚分别为1059.3±9.0、1050.8±7.0和1043.5±4.7 nm，相对变化仅为1.49%，在本研究条件下，凹曲面样品表现出明显更小的喷涂薄膜面内厚度梯度。与膜厚分布相一致，凹曲面样品在不同位置呈现更接近的吸收强度和更小的PL强度波动，其中心与边缘平均晶粒尺寸差异也低于平面样品。与此同时，两类样品各区域的PL峰位和XRD特征峰基本一致。XPS结果表明，凹曲面中心与边缘的Pb 4f和I 3d结合能未发生明显变化。结合上述膜厚、光学及结构表征结果可知，凹曲面沉积提高了薄膜的空间均匀性，同时未引起明显的主体晶相和表面化学态变化。进一步制备的49 cm^2有效面积、14个子电池串联的凹曲面组件中，激光划线在曲面基底上仍可形成连续且清晰的划线边界，EL成像显示各串联子电池具有连续发光响应，最佳PCE达到18.42%，与平面组件的18.48%接近。上述结果表明，在凹曲面几何条件下能够在不改变材料体系和基本工艺参数的条件下有效降低喷涂成膜的面内梯度，并保持良好的组件加工兼容性，为大面积曲面钙钛矿光伏器件的喷涂制备提供了实验依据。

关 键 词：钙钛矿太阳能电池；喷涂；凹曲面光伏组件；空间均匀性；面积可扩展

中图分类号： **文献标识码：**

DOI：10.3724/CJL.20260272 **CSTR**：32170.14.CJL.20260272

Spray-Coated Perovskite Films on Concave Substrates: In-Plane Uniformity

YOU Wei[1,2], SUN Kai[3,2], XIANG Wuchen[4,2], GAO Yanyan[2*], LI Yang[1*]

(1. *School of Electronic and Information Engineering, Wuyi University, Jiangmen* 529020, *Guangdong, China*;
2. *Guangdong Mailuo Energy Technology Co., Ltd., Zhuhai* 519000, *Guangdong, China*;
3. *South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou* 510006, *Guangdong, China*;
4. *College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin* 300071, *China.*)

* *Corresponding Authors, E-mail: insidesun*51@163.*com*; *gaoyanyan@mellow-energy.cn*

Abstract: Curved substrates offer new application opportunities for the morphological adaptation and large-area integration of perovskite photovoltaic devices. However, the effects of concave-cavity geometry on spray-deposition profiles and the in-plane homogeneity of thin films remain poorly understood. Herein, perovskite thin films and 49 cm^2 photovoltaic modules are fabricated on planar and concave ITO substrates, respectively. Film thickness, surface morphology, optical response and crystal structure are compared across central, middle and edge regions of the devices. The average film thicknesses at the center, middle and edge of planar samples are 1050.5 ± 9.5 nm, 907.3 ±

收稿日期：XXXX-XX-XX；修订日期：XXXX-XX-XX
基金项目：

16.0 nm and 811.3 ± 10.7 nm, respectively, corresponding to a relative thickness variation of 22.8% from center to edge. By contrast, concave-substrate samples exhibit thickness values of 1059.3 ± 9.0 nm, 1050.8 ± 7.0 nm and 1043.5 ± 4.7 nm for the equivalent regions, with a relative variation of merely 1.49%. Under the conditions investigated here, the concave-substrate samples exhibit a substantially smaller in-plane thickness gradient in the spray-deposited films. Consistent with the thickness distribution, concave-substrate samples show more uniform absorption intensity and reduced PL intensity fluctuation across different positions, alongside a smaller discrepancy in average grain size between the center and edge relative to planar counterparts. Meanwhile, the PL peak positions and XRD characteristic peaks are largely unchanged across all regions for both sample types. XPS measurements reveal no obvious shifts in the binding energies of Pb 4f and I 3d between the center and edge of the concave sample. Collectively, film-thickness, optical and structural characterizations confirm that concave-substrate deposition improves the spatial homogeneity of thin films without inducing notable changes in the primary crystal phase or surface chemical states. Further, concave modules with an active area of 49 cm^2 and 14 series-connected subcells are fabricated. Laser scribing yields continuous, well-defined scribing boundaries even on curved substrates. Electroluminescence (EL) imaging verifies continuous light-emitting responses from all series-connected subcells, and the champion power conversion efficiency (PCE) reaches 18.42%, comparable to the 18.48% achieved for planar modules. These findings indicate that concave geometry can effectively mitigate the in-plane gradient of spray-coated films without modifying the material composition or core processing parameters, while preserving good manufacturability for module fabrication. This work provides an experimental foundation for the spray-based fabrication of large-area curved perovskite photovoltaic devices.

Keywords: Perovskite solar cells; Spray coating; Concave photovoltaic modules; Spatial uniformity; area scalability

1 引 言

钙钛矿太阳能电池具有高吸收系数、优异光电性能及溶液可加工性,在低成本光伏器件和大面积制造方面具有重要应用潜力[1-4]。随着钙钛矿光伏技术由实验室小面积器件向大面积组件和复杂形貌基底拓展,薄膜在不同空间位置上的沉积一致性逐渐成为影响器件性能的关键因素[5-7]。尤其对于曲面基底,局部法向、喷射距离及液滴入射条件会随位置发生变化,可能进一步影响液滴沉积、铺展、溶剂挥发及结晶过程,从而使基底几何成为影响薄膜面内均匀性的重要因素[8]。

目前,旋涂仍是实验室制备高质量钙钛矿薄膜的常用方法,但其材料利用率较低、连续化和大面积制造能力受到限制,且对复杂形貌基底的适应性有限。相比之下,刮涂、狭缝涂布和喷涂等可扩展制备技术更适用于面积放大[5-6,8]。例如,已有研究报道刮涂制备的57.20 cm^2钙钛矿组件效率达到22.76%[9],狭缝涂布制备的64 cm^2组件效率达到20.65%[10]。然而,刮涂和狭缝涂布通常依赖稳定的涂布间隙和液体弯月面,其沉积过程容易受到基底表面起伏和曲率变化的影响[6,11]。真空蒸镀虽然能够实现较好的共形覆盖,但通常涉及高真空、多源蒸发及组分化学计量控制等问题,成本、设备和工艺复杂度相对较高[6,12]。

喷涂采用非接触式液滴沉积方式,无需维持固定的涂布间隙,因此在复杂形貌和非平面基底上具有较好的工艺适应性[13-14]。例如,已有研究通过喷涂制备了有效面积112 cm^2、效率13.82%的大面积钙钛矿组件[15];Thornber等进一步在凸曲面玻璃基底上制备了喷涂钙钛矿太阳能电池,最高效率达到12.5%,证明了喷涂技术在凸曲面光伏器件中的可行性[16]。此外,气体辅助喷涂与界面层协同优化可将喷涂单电池效率提高至20%以上[17]。然而,凸曲面与凹曲面在喷射距离和局部入射几何上具有不同的空间分布特征,现有研究对于凹曲面条件下喷涂薄膜的面内沉积分布、不同空间位置的结构与光学一致性,以及其向大面积串联组件加工延伸的影响仍缺乏系统研究。

基于此,本文以平面和凹曲面玻璃为对比基底,系统比较喷涂钙钛矿薄膜中心、中部和边缘区域的膜厚、光学响应、晶体结构及表面形貌差异,并进一步考察凹曲面基底对激光划线、串联互联及组件制备的适配性。在此基础上,构筑有效面积49 cm^2、由14个子电池串联组成的凹曲面钙钛矿光伏组件,以研究凹曲面条件下薄膜的面内均匀性及其组件制备可行性。

2　实　　验

2.1　器件结构及制备过程

平面和凹曲面器件均采用ITO/空穴传输层(Me-4PACZ)/钙钛矿吸收层(PVK)/富勒烯(C_{60})/二氧化锡原子层沉积(ALD-SnO_2)/金属电极(Cu)结构。ITO玻璃经清洗后，依次制备HTL、喷涂PVK、C_{60}、ALD-SnO_2和Cu。其中，Me-4PACZ空穴传输层采用浸润法制备，即将ITO基底浸入Me-4PACZ溶液中，使Me-4PACZ分子在ITO表面吸附并形成自组装单分子层，从而构建空穴选择性传输界面；钙钛矿吸收层通过喷涂法沉积并经热处理形成薄膜；随后采用真空热蒸镀法制备C_{60}电子传输层，设备设定蒸镀厚度为30 nm，再通过原子层沉积法制备SnO_2层，沉积循环次数为160次，估计膜厚约为18 nm，最后采用磁控溅射法沉积Cu电极，设定厚度为40 nm。组件制备过程中，采用激光划线工艺对器件进行图形化加工。激光划线参数设置为：激光功率3 W、频率1500 KHz、扫描速度500 mm/s。平面和凹曲面钙钛矿光伏组件均以中央7 cm × 7 cm区域作为有效区域，有效面积均为49 cm^2。两类组件采用相同的有效面积定义及计算方式，J－V测试中使用一致的面积计算依据，以保证组件性能比较的可比性。钙钛矿前驱液由576.6 mg PbI_2、185.6 mg FAI、19.1 mg MAI和10.0 mg MACl配制而成，溶剂为1 mL DMF/NMP混合溶剂，体积比为6:1。按照FAI和MAI的投料量计算，A位前驱体总浓度约为1.20 mol·L^{-1}；PbI_2的标称浓度约为1.25 mol·L^{-1}。以FAI和MAI的总摩尔量为基准，PbI_2相对过量约4.3%。MACl作为添加剂加入配方，不计入上述A位前驱体总量。

2.2　平面及曲面喷涂工艺

平面和凹曲面样品采用相同前驱液组成、喷涂设定和热处理条件。按FAI和MAI的投料量计算，A位前驱体总浓度为1.2 mol·L^{-1}，喷涂高度为8 cm，液体流量设定为0.12 mL·min^{-1}，超声功率设定为3 W，微量注射泵移动速度设定为1.530 mm·s^{-1}。两类样品采用完全一致的喷涂扫描方式。喷涂完成后进行热处理，退火温度为120 ℃，时间为20 min。

2.3　平面与凹曲面基底的喷涂策略、样品构型及组件串联互联结构

图1展示了平面与凹曲面基底的喷涂构型、凹曲面组件实物及组件串联互联结构图。喷涂采用非接触液滴沉积方式，喷头与基底之间无需保持固定的接触式涂布间隙。平面玻璃与凹曲面玻璃基底的尺寸均为20 cm × 20 cm，器件有效区域均为中央7 cm × 7 cm，即49 cm^2。凹曲面玻璃的

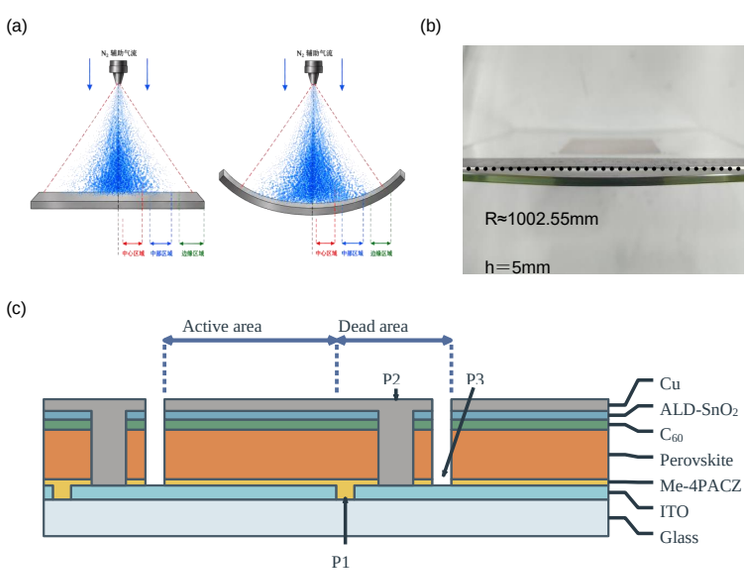


图1　平面与凹曲面基底喷涂策略及凹曲面组件曲率展示。(a)平面和凹曲面基底喷涂示意图，其中标出了中心、中部和边缘区域；(b)凹曲面组件侧视图；(c)组件串联互联结构及P1、P2、P3激光划线位置示意图。

Fig. 1　Spray-coating strategy for planar and concave substrates and the curved configuration of the concave photovoltaic module. (a) Schematic illustration of spray coating on planar and concave substrates, with the center, middle, and edge regions indicated; (b) side-view photograph of the concave photovoltaic module; (c) schematic illustration of the module series interconnection structure and the positions of P1, P2, and P3 laser scribing lines.

厚度为3 mm、拱高为5 mm。按照弦长200 mm、弧高5 mm计算,其曲率半径约为1002.55 mm,曲率约为1.00×10^{-3} mm^{-1}。该几何参数为比较平面与凹曲面上的液滴沉积和膜厚分布提供了明确边界条件。

如图1 (c)所示,组件采用激光划线实现子电池的串联互联,由14个子电池串联构成。P1、P2和P3分别对应底部透明导电电极的图形化隔离、相邻子电池之间的串联接触区域以及顶部金属电极的隔离区域。通过上述划线结构,实现相邻子电池之间的电学连接与隔离。该结构示意图用于说明组件串联互联的基本原理及各划线区域的位置。

2.4 表征方法

在平面和凹曲面样品的中心、中部和边缘区域进行白光干涉、紫外-可见吸收光谱、稳态光致发光(PL)和X射线衍射(XRD)测试。采用扫描电子显微镜(SEM)观察中心与边缘的薄膜表面及器件截面,并以Feret粒径表征表面晶粒尺度,晶粒统计基于各区域对应的SEM图像进行,对图像中能够清晰识别的晶粒进行统计,对于位于图像边缘、轮廓显示不完整的晶粒,以及相互重叠或无法清晰识别的晶粒,均予以排除。根据统计结果计算Feret粒径的平均值、标准差及变异系数(CV),用于比较平面与凹曲面样品不同区域的晶粒尺度分布。截面厚度由同一截面图中的8个位置计算。X射线光电子能谱(XPS)测量平面中心、平面边缘、凹曲面中心和凹曲面边缘区域。各样品以自身C 1s主峰校准至284.8 eV,高分辨谱采用Shirley背景和统一约束模型拟合,不进行平滑、插值或数据点剔除,扫描步长为0.1 eV。采用光学显微镜观察激光划线形貌,并通过电致发光(EL)成像评价串联子电池的发光连续性。组件在1 sun光强下进行J-V测量。本文的区域差异采用均值、标准差、极差或变异系数进行描述性比较,未据此进行统计显著性推断。

3 结果与讨论

3.1 喷涂钙钛矿薄膜的面内均匀性

为评价喷涂薄膜的面内一致性,分别比较平面和凹曲面样品中心、中部和边缘区域的膜厚、吸收强度、PL峰位与峰强以及XRD特征峰,并以中心与边缘的SEM晶粒统计提供粒径分布。各项表征分别从沉积量、光学响应、晶体结构和表面形貌等方面反映薄膜的面内一致性。

3.1.1 表面与截面形貌

图2 (a, b)显示,平面样品中心与边缘均形成连续多晶薄膜,但晶粒尺度分布不同;图2 (c, d)中,凹曲面中心与边缘的表面形貌较为接近。表1的描述性统计显示,平面中心和边缘的平均Feret粒径分别为770.9±282.4和618.4±258.0 nm,相差152.5 nm,中心值比边缘高24.7%;凹曲面中心和边缘分别为999.3±306.8和903.8±237.1 nm,相差95.5 nm,中心值比边缘高10.6%。平面中心和边缘的变异系数为36.6%和41.7%,凹曲面相应位置为30.7%和26.2%。在当前视场和晶粒统计范围内,凹曲面样品的中心-边缘平均粒径差及离散度均小于平面样品。图2 (e, f)展示了平面和凹曲面器件的截面SEM形貌,主要用于观察器件各功能层的堆叠及界面形貌。鉴于截面观察方向与表面俯视观察存在差异,且截面样品经过喷金处理,本文不直接依据截面图中的细小颗粒状纹理判断钙钛矿晶粒尺寸及薄膜质量。平面中心局部截面的PVK层厚度为706.9±13.7 nm,范围为690.2~725.5 nm,变异系数为1.94%;凹曲面中心为1073.6±41.4 nm,范围为1019.2~1123.1 nm,变异系数为3.86%,每组均由同一截面图中选取8个位置。需要说明的是,截面SEM与白光干涉的测量方式及测量位置不同,前者用于观察局部截面结构及测量位置上的膜厚变化,后者用于比较样品中心、中部和边缘区域的膜厚分布。因此,两种方法所得膜厚数值不作直接对应或绝对值比较。由上述结果可见,平面样品从中心到边缘存在明显的膜厚衰减,而凹曲面样品的膜厚在三个位置间基本保持稳定。结合SEM中凹曲面中心与边缘较小的晶粒尺寸差异,可以看出凹曲面条件不仅减弱了宏观沉积量的空间梯度,也使不同位置的局部成膜状态更加接近。综合上述结果,在本研究条件下,凹曲面样品在不同空间位置表现出更小的膜厚梯度,并呈现出较高的面内一致性。这种差异可能与凹曲面条件下喷头与基底的局部空间关系及液滴沉积条件发生变化有关。

3.1.2 膜厚与光学响应的区域一致性

如图3 (a)所示,采用白光干涉法测量钙钛矿薄膜的局部厚度。分别从平面和凹曲面样品的中心、中部及边缘区域截取局部试样,并对截取后的

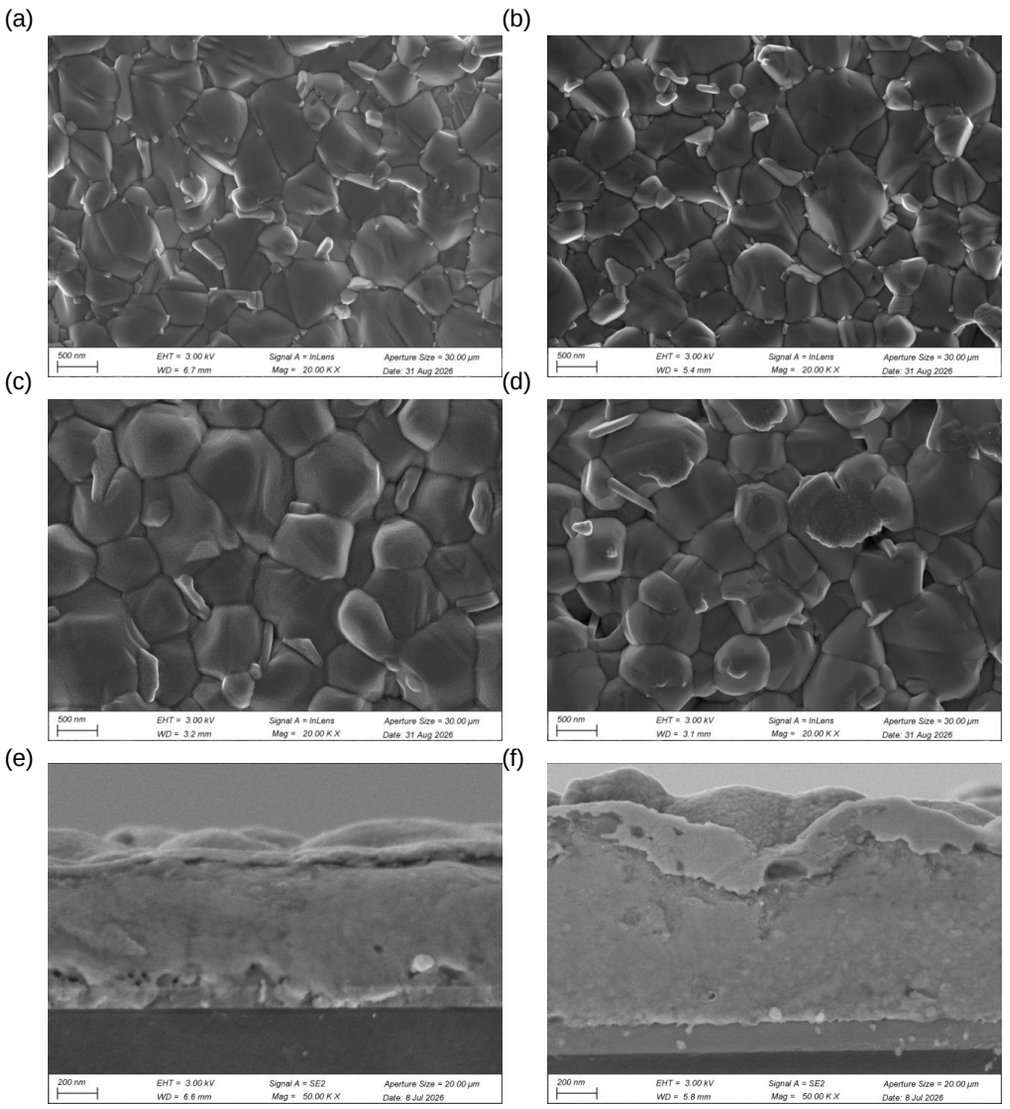


图2　平面与凹曲面喷涂钙钛矿薄膜及器件的SEM图像。(a,b)平面样品中心和边缘的表面SEM图;(c,d)凹曲面样品中心和边缘的表面SEM图;(e,f)平面和凹曲面器件的截面SEM图。

Fig. 2　SEM images of spray-coated perovskite films and devices on planar and concave substrates. (a,b) Top-view SEM images of the center and edge regions of the planar sample; (c,d) top-view SEM images of the center and edge regions of the concave sample; (e,f) cross-sectional SEM images of the planar and concave devices, respectively.

表1　平面与凹曲面样品中心和边缘区域的晶粒Feret粒径统计

Table 1　Statistics of grain Feret diameters at the center and edge regions of planar and concave-surface samples

基底	位置	n(晶粒)	Feret均值±SD (nm)	Feret CV (%)
平面	中心	56	770.9 ± 282.4	36.6%
平面	边缘	76	618.4 ± 258.0	41.7%
曲面	中心	33	999.3 ± 306.8	30.7%
曲面	边缘	37	903.8 ± 237.1	26.2%

试样进行测量。由于凹曲面基底的曲率较小,截取后的局部试样整体形态近似于平面,可平稳放置于测量平台上。每个区域随机选取4个测量点,并以测量结果的平均值和标准差表征该区域的膜厚及其离散程度。结果显示平面样品center、middle和edge区域平均膜厚分别为1050.5±9.5、907.3±16.0和811.3±10.7 nm,区域极差为239.3 nm,占center区域平均膜厚的22.8%。凹曲面样品对应的平均膜厚分别为1059.3±9.0、1050.8±7.0和1043.5±4.7 nm,区域极差为15.8 nm,仅占center区域平均膜厚的1.49%。因此,在本研究喷涂条件下,凹曲面样品的center-to-edge

膜厚变化由平面样品的22.8%降低至1.49%,相对降低约93.5%,表现出更小的面内膜厚梯度。此外,喷涂后湿膜的稳定性可能受到基底润湿性、重力及溶剂挥发等因素的共同影响。随着溶剂挥发,前驱液逐渐浓缩并发生结晶,液膜的流动性随之降低。本研究中,凹曲面样品中心、中部和边缘区域的膜厚差异较小,表明最终成膜后未出现明显的宏观堆积现象。

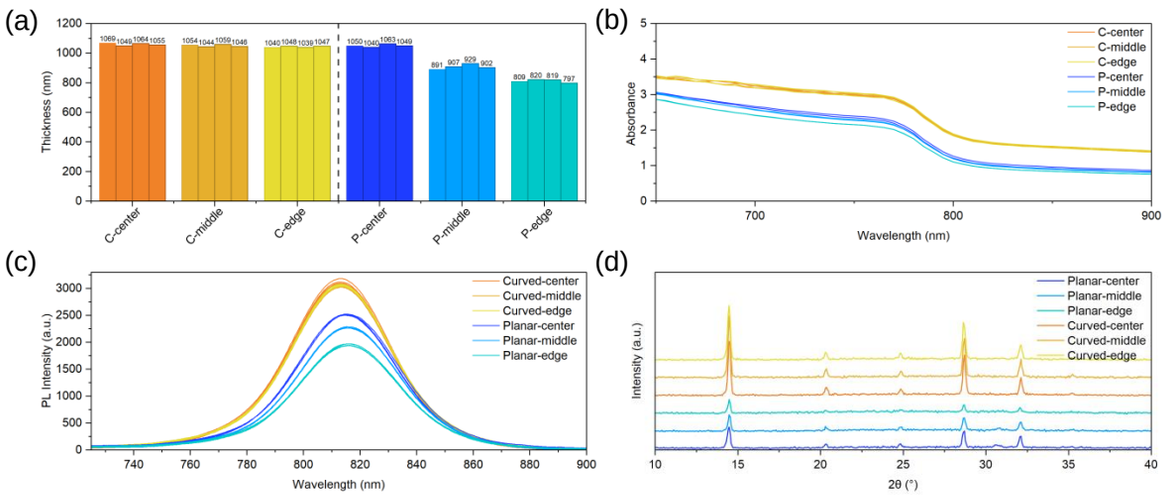


图3 平面与凹曲面喷涂钙钛矿薄膜的空间均匀性。(a)白光干涉法测得的膜厚;(b)光吸收光谱;(c)center、middle和edge区域的稳态PL光谱;(d)XRD图谱。P和C分别表示平面与凹曲面样品。

Fig. 3 Spatial uniformity of spray-coated perovskite films on planar and concave substrates. (a) Film thickness measured by white-light interferometry; (b) optical absorption spectra; (c) steady-state photoluminescence (PL) spectra; (d) X-ray diffraction (XRD) patterns of the center, middle, and edge regions. P and C denote the planar and concave samples, respectively.

图3(b)中,两类样品均呈现钙钛矿薄膜的典型吸收特征。需要注意的是,测得的光谱反映了钙钛矿薄膜与玻璃基底体系的综合光学响应,基底的光学贡献可能影响吸光度的基线及绝对值,因此不宜直接依据吸光度绝对值比较两类样品薄膜的本征吸收强度。为分析薄膜的区域光学响应一致性,本文重点比较同类样品不同区域之间的光谱差异。以约800 nm处的吸光度进行比较,平面样品center、middle和edge区域的吸光度约为1.0–1.3,区域差值约为0.3;凹曲面不同区域的吸光度约为1.9–2.0,区域吸光度差值不超过约0.1。凹曲面样品不同区域的吸收曲线具有较高的重合度,表明其测得的区域光学响应较为接近。考虑到测得的吸光度反映了薄膜与玻璃基底体系的综合光学响应,上述结果主要用于描述不同区域间的光谱差异,不单独作为薄膜厚度均匀性的定量依据。

图3(c)为平面与凹曲面样品不同区域的稳态PL光谱。两类样品各区域均呈现单一主发射峰,未观察到明显的峰分裂现象。平面样品center、middle和edge区域的PL峰位分别为814.82、815.46和815.46 nm,对应的峰强度分别为2501.60、2287.02和1970.31 a.u.;凹曲面样品对应区域的PL峰位分别为812.91、812.91和813.54 nm,峰强度分别为3181.96、3082.95和3076.20 a.u.。对于各自样品内部而言,平面样品center、middle和edge区域的PL峰位变化范围约为0.64 nm,凹曲面样品亦约为0.64 nm,且均未表现出明显的连续红移或蓝移趋势,表明两类样品不同空间位置的PL主峰位置均较为稳定。在PL峰强方面,平面样品三个区域的峰强约为1.97–2.50 × 10^3 a.u.,区域峰强极差约为0.53 × 10^3 a.u.;凹曲面样品对应区域的峰强约为3.08–3.18 × 10^3 a.u.,区域峰强极差约为0.11 × 10^3 a.u.。为定量比较同一样品不同区域之间的PL峰强变化,本文将区域相对波动率定义为峰强极差与最小峰强之比。据此计算,平面样品和凹曲面样品的区域相对波动率分别为26.96%和3.44%。相比之下,凹曲面样品不同区域之间的PL峰强波动较小,表现出更好的区域PL响应一致性。

3.1.3　晶体结构与表面化学态

如图3 (d)，平面样品center、middle和edge区域均出现相同的钙钛矿特征衍射峰。以平面样品为参照，凹曲面样品三个区域的主要衍射峰同样位于约14.4°、28.7°和32.1°，且未出现额外衍射峰。XRD未观察到由基底曲率引起的可分辨主体晶相变化。该结果与PL峰位仅发生小幅波动的现象相一致，表明曲面沉积条件未明显改变薄膜的主体晶体结构。

图4进一步比较了平面中心、平面边缘、凹曲面中心和凹曲面边缘区域的XPS谱。Survey谱显示，各区域具有相同的主要元素信号。高分辨XPS结果中，Pb $4f_{7/2}$峰位位于138.02 – 138.10 eV，I $3d_{5/2}$峰位位于618.79 – 618.85 eV。凹曲面中心与边缘的Pb 4f和I 3d结合能未发生明显变化，表明两区域的Pb和I表面化学环境基本一致。XPS进一步表明不同位置间未出现明显的表面化学态分化。结合前述膜厚、SEM、吸收和PL结果可以认为，凹曲面带来的主要影响集中于薄膜的空间沉积与成膜一致性，而对材料主体晶相及表面化学环境的影响相对有限。

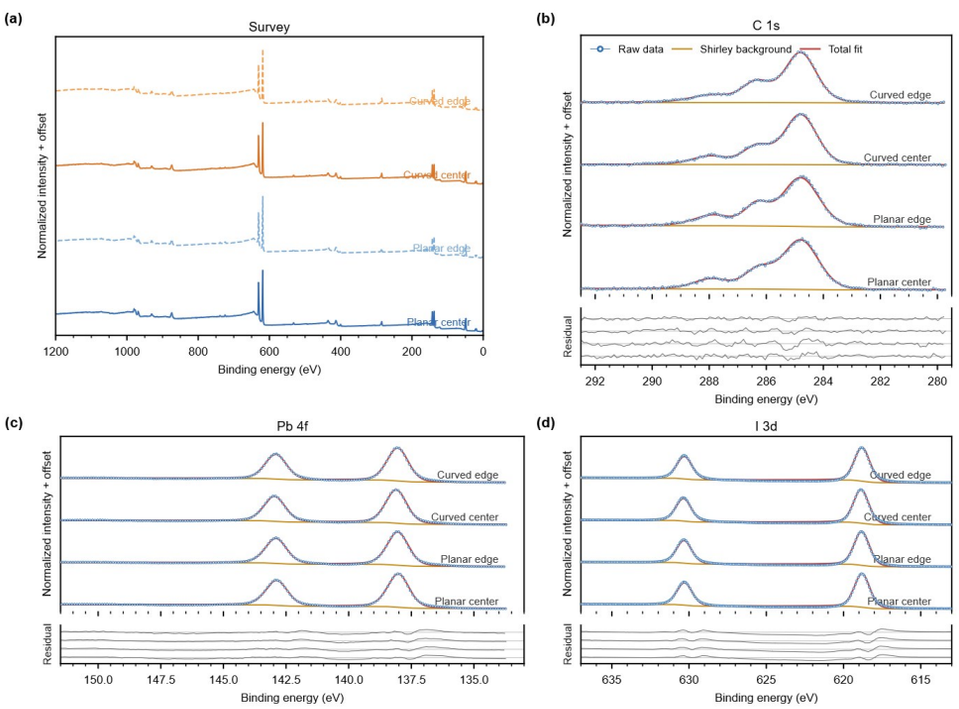


图4　平面与凹曲面钙钛矿薄膜不同位置的XPS表征。(a)Survey原始谱；(b)C 1s谱；(c)Pb 4f谱；(d)I 3d谱。高分辨谱中的蓝色空心圆、赭黄色曲线和红色曲线分别表示原始数据、Shirley背景和总拟合，下方灰色曲线为残差。四个样品均以各自C 1s峰校准至284.8 eV，拟合前未进行平滑或插值。

Fig. 4　XPS characterization of spray-coated perovskite films at different positions on planar and concave substrates. (a) Raw survey spectra; (b) C 1s spectra; (c) Pb 4f spectra; (d) I 3d spectra. In the high-resolution spectra, blue open circles, ochre curves and red curves denote the raw data, Shirley backgrounds and total fits, respectively; grey curves below the spectra show the residuals. Each spectrum was independently calibrated to C 1s = 284.8 eV, without smoothing or interpolation before fitting.

4　器件光伏性能与面积放大

4.1　曲面组件的激光划线与电致发光表征

激光划线是组件串联互联及有效面积定义的关键工艺，其划线质量会直接影响死区面积、串联电阻及组件性能[18]。如图5 (a, b)所示，平面和凹曲面基底上的划线均形成连续边界，未见明显的贯穿性断裂或中断，表明在本实验中凹曲面几何未对激光图形化加工造成可见障碍。

图5 (c, d)分别给出了平面和凹曲面组件的EL图像。EL成像可用于直观评价大面积器件的发光均匀性及局部性能差异，两类组件均呈现连续的串联子电池发光区域，凹曲面组件在14个串联子电池范围内保持连续EL响应，未观察到贯穿单个子电池的大尺度不发光区域，表明曲面组件具备完整的串联互联及通电发光能力[19-20]。

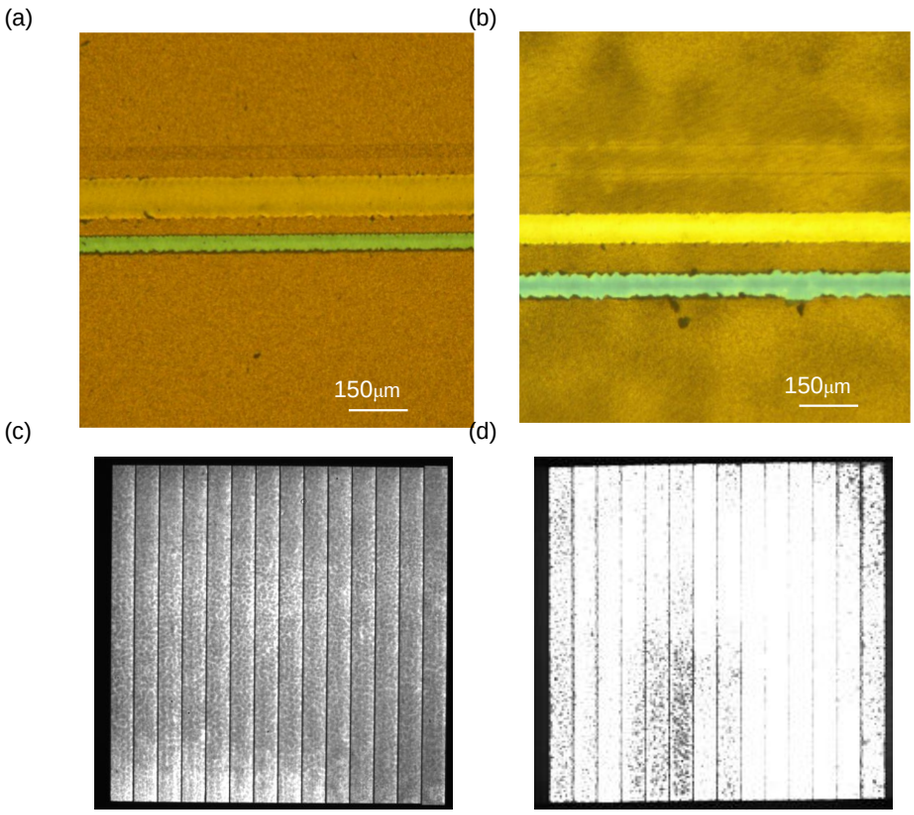


图5 平面与凹曲面组件的激光划线与EL表征。(a,b)平面和凹曲面基底上的激光划线显微图;(c,d)平面和凹曲面组件的EL图像。

Fig. 5 Laser-scribing and electroluminescence (EL) characterization of planar and concave photovoltaic modules. (a, b) Optical micrographs of the laser-scribed regions on the planar and concave substrates; (c, d) EL images of the corresponding planar and concave modules.

4.2 组件光伏输出性能

在薄膜沉积和互联工艺完成后,对有效面积均为49 cm^2、均由14个子电池串联构成的平面和凹曲面组件进行J-V测试。电流密度基于单个子电池有效面积计算。图6(a, b)分别展示了平面与凹曲面冠军组件的J-V曲线,其中红色曲线表示反扫,黑色曲线表示正扫。平面组件的最佳PCE为18.48%,V_{OC}、J_{SC}和FF分别为15.061 V、24.10 mA cm^{-2}和71.29%;凹曲面组件的最佳PCE为18.42%,V_{OC}、J_{SC}和FF分别为16.227 V、24.95 mA cm^{-2}和63.69%。与平面组件相比,凹曲面组件的V_{OC}和J_{SC}分别增加1.166 V(7.74%)和0.85 mA cm^{-2}(3.53%),而FF降低7.60%。尽管凹曲面组件的FF较低,其较高的V_{OC}和J_{SC}在一定程度上抵消了FF降低对光电转换效率的影响,使其最佳PCE仅比平面组件低0.06%,相对差异为0.32%。在相同有效面积和子电池数量下,两类组件获得相近的最佳PCE,说明该喷涂工艺能够在凹曲面基底上实现器件制备和串联互联。与平面组件相比,凹曲面组件的J_{SC}由24.10 mA cm^{-2}提高至24.95 mA cm^{-2},增加0.85 mA cm^{-2}(3.53%)。这一差异可能与凹曲面样品较小的面内膜厚差异及更接近的区域光学响应有关,较为一致的成膜状态可能有助于减小串联子电池之间由局部成膜差异引起的光生电流不一致,从而对组件整体电流输出产生一定影响。从J-V曲线形状来看,凹曲面组件的FF较低,表明其J-V曲线的矩形度有所下降。这可能与曲面器件制备过程中功能层接触状态、载流子传输及组件互联过程中的电阻损耗有关。与此同时,两类组件的正扫和反扫曲线均存在一定差异,表明器件的J-V特性具有扫描方向依赖性,表现出一定的迟滞现象。为进一步比较两类组件的性能分布,本文对每组10个独立组件的V_{OC}、J_{SC}、FF和PCE进行了统计,并以箱线图展示,如图6(c-f)所示。各参数的统计结果补充了冠军组件的性能对比,能够进一步反映平面与凹曲面组件的参数分布及离散程度。

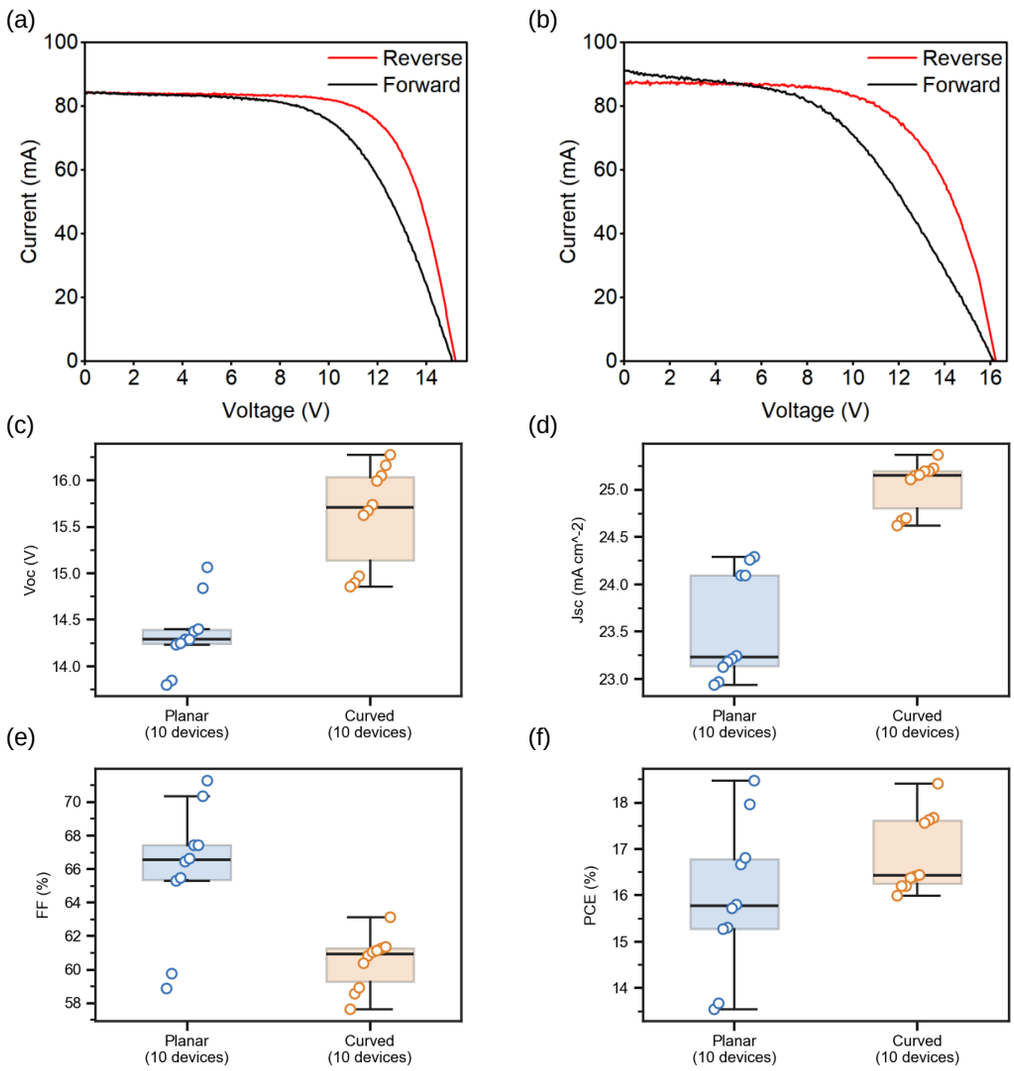


图6　平面与凹曲面钙钛矿光伏组件的J－V特性及光伏参数统计。(a,b)分别为平面组件和凹曲面组件的冠军J－V曲线,其中红色曲线表示反扫,黑色曲线表示正扫;(c－f)分别为平面与凹曲面组件的开路电压、短路电流密度、填充因子和光电转换效率箱线图,每组包含10个独立组件。短路电流密度按照单个子电池的有效面积进行归一化。

Fig. 6　J－V characteristics and photovoltaic parameter statistics of planar and concave perovskite photovoltaic modules. (a, b) Champion J－V curves of the planar and concave modules, respectively, with the red and black curves representing reverse and forward scans, respectively; (c－f) box plots of open-circuit voltage, short-circuit current density, fill factor, and power conversion efficiency for planar and concave modules, respectively. Each group contains 10 independent modules. The short-circuit current density is normalized to the effective area of an individual subcell.

表2　平面组件和凹曲面组件的冠军光伏参数

Table 2　Champion photovoltaic parameters of spray-coated planar and concave perovskite photovoltaic modules.

器件	有效面积/cm^2	子电池数	V　/V	Js　/(mA cm^{-2})	FF/%	PCE/%
平面组件	49	14	15.061	24.10	71.29	18.48
凹曲面组件	49	14	16.227	24.95	63.69	18.42

5　结　　论

本文研究了喷涂钙钛矿薄膜在平面和大面积凹曲面基底上的面内均匀性,并进一步制备了凹曲面钙钛矿光伏组件。在相同喷涂条件下,凹曲面样品中心、中部和边缘区域的平均膜厚分别为1059.3±9.0、1050.8±7.0和1043.5±4.7 nm,center-to-edge相对变化为1.49%,明显低于平面样品的22.8%,表现出更小的面内膜厚梯度。

与膜厚分布结果相对应,凹曲面样品不同区域的表面形貌、晶粒尺寸和光学响应表现出较好

的一致性，其PL峰强区域相对波动率为3.44%，低于平面样品的26.96%。同时，XRD结果表明两类样品不同区域保持相近的主体晶相特征，XPS结果显示凹曲面样品中心与边缘区域的表面化学态未发生明显变化。

在器件制备方面，凹曲面样品实现了49 cm^2有效面积、14个子电池串联的组件制备。凹曲面组件的最佳光电转换效率为18.42%，与平面组件的18.48%接近；其V_{OC}和J_{SC}分别为16.227 V和24.95 mA cm^{-2}，高于平面组件，而FF为63.69%，低于平面组件的71.29%。较高的V_{OC}和J_{SC}在一定程度上抵消了较低FF对组件效率的影响，使凹曲面组件最终获得了与平面组件接近的PCE。

综上，在本研究条件下，凹曲面样品表现出较小的面内膜厚梯度，并在表面形貌、光学响应、晶体结构及表面化学态方面保持较好的区域一致性，同时能够实现大面积曲面组件的器件加工，并获得与平面组件接近的光伏性能，为喷涂钙钛矿光伏器件向曲面基底拓展提供了实验依据。

参 考 文 献：

[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. DOI: 10.1021/ja809598r.

[2] STRANKS S D, EPERON G E, GRANCINI G, *et al*. Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber[J]. *Science*, 2013, 342(6156): 341-344. DOI: 10.1126/science.1243982.

[3] DE WOLF S, HOLOVSKY J, MOON S J, *et al*. Organometallic halide perovskites: sharp optical absorption edge and its relation to photovoltaic performance[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2014, 5(6): 1035-1039. DOI: 10.1021/jz500279b.

[4] GREEN M A, HO-BAILLIE A, SNAITH H J. The emergence of perovskite solar cells[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 506-514. DOI: 10.1038/nphoton.2014.134.

[5] LI Z, KLEIN T R, KIM D H, *et al*. Scalable fabrication of perovskite solar cells[J]. *Nature Reviews Materials*, 2018, 3: 18017. DOI: 10.1038/natrevmats.2018.17.

[6] PARK N G, ZHU K. Scalable fabrication and coating methods for perovskite solar cells and solar modules[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5: 333-350. DOI: 10.1038/s41578-019-0176-2.

[7] RONG Y, HU Y, MEI A, *et al*. Challenges for commercializing perovskite solar cells[J]. *Science*, 2018, 361(6408): eaat8235. DOI: 10.1126/science.aat8235.

[8] HOWARD I A, ABZIEHER T, HOSSAIN I M, *et al*. Coated and printed perovskites for photovoltaic applications[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(26): 1806702. DOI: 10.1002/adma.201806702.

[9] ZHU X, YU D, ZHOU X, *et al*. Interfacial molecular anchor for ambient all-bladed perovskite solar modules[J]. *Joule*, 2025, 9(5): 101919. DOI: 10.1016/j.joule.2025.101919.

[10] HEO J H, HONG S Y, PARK J K, *et al*. Chemical oxidization of PTAA enables stable slot-die-coated perovskite solar modules[J]. *Joule*, 2025, 9(4): 101850. DOI: 10.1016/j.joule.2025.101850.

[11] SANGALE S S, MANN D S, LEE H J, *et al*. Influence of interfacial roughness on slot-die coatings for scaling-up high-performance perovskite solar cells[J]. *Communications Materials*, 2024, 5: 201. DOI: 10.1038/s43246-024-00645-7.

[12] LIU M, JOHNSTON M B, SNAITH H J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition[J]. *Nature*, 2013, 501: 395-398. DOI: 10.1038/nature12509.

[13] 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: 2944-2950. DOI: 10.1039/C4EE01546K.

[14] BISHOP J E, SMITH J A, LIDZEY D G. Development of spray-coated perovskite solar cells[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(43): 48237-48245. DOI: 10.1021/acsami.0c14540.

[15] HEO J H, ZHANG F, XIAO C, *et al*. Efficient and stable graded CsPbI3-xBrx perovskite solar cells and submodules by orthogonal processable spray coating[J]. *Joule*, 2021, 5(2): 481-494. DOI: 10.1016/j.joule.2020.12.010.

[16] THORNBER T, GAME O S, CASSELLA E J, *et al*. Nonplanar spray-coated perovskite solar cells[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(33): 37587-37594. DOI: 10.1021/acsami.2c05085.

[17] CASSELLA E J, SPOONER E L K, THORNBER T, *et al*. Gas-assisted spray coating of perovskite solar cells incorporating sprayed self-assembled monolayers [J]. *Advanced Science*, 2022, 9(14): 2104848. DOI: 10.1002/advs.202104848.

[18] JEONG Y, KIM Y, LEE H, *et al*. Laser scribing for perovskite solar modules of long-term stability [J]. *Solar RRL*, 2024, 8: 2301040. DOI: 10.1002/solr.202301040.

[19] SOUFIANI A M, TAYEBJEE M J Y, MEYER S, *et al*. Electro- and photoluminescence imaging as fast screening technique of the layer uniformity and device degradation in planar perovskite solar cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(3): 035702. DOI: 10.1063/1.4956436.

[20] WU H, ZHANG J, ZHANG Y, *et al*. Anomalous electroluminescence characteristics of perovskite modules [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(32): 41986-41995. DOI: 10.1021/acsami.4c03397.



游伟(2002-),男,江西宜春人,硕士研究生,2024年于南昌大学科学技术学院获得学士学位,主要从事计算机技术与新型钙钛矿太阳能电池方面的相关研究。
E-mail: 2023219727@qq.com



高彦艳(1988-),女,内蒙古赤峰人,博士,2023年于暨南大学获得博士学位,在光伏器件领域从业15年。
E-mail: 1757038077@qq.com



李阳(1969-),男,辽宁鞍山人,博士,教授,2000年于南开大学获得博士学位,主要从事光电材料与器件、人工智能等方面的研究。
E-mail: insidesun51@163.com