

封装对聚合物太阳能电池性能和稳定性的影响

王亚玲^{1,2,3}, 闫翎鹏⁴, 董海亮², 韩云飞³, 杨永珍², 马昌期³, 许并社²

(1. 中北大学能源与动力工程学院, 山西 太原 030051)

(2. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

(3. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 印刷电子研究中心, 江苏 苏州 215123)

(4. 太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为了提高有机光伏器件的寿命, 通常采用封装技术来限制太阳能电池在水氧中的暴露程度。尽管聚合物太阳能电池 (organic solar cells, OSCs) 封装领域的相关研究已取得系列进展, 但文献中很少研究封装过程带来的损伤。以经典的聚-3 己基噻吩为给体, [6,6]-苯基-C₆₁-丁酸甲酯为受体, 通过将哌嗪作为第三组分提高器件稳定性, 以氧化锌 (ZnO) 和三氧化钼 (MoO₃) 为传输层材料制备倒置结构 OSCs, 系统考察大规模卷对卷器件封装中常用的紫外线 (ultraviolet, UV) 固化粘合剂对器件光电转化效率和稳定性的影响。结果表明, 随着辐照时间的延长, UV 胶封装器件的性能 (开路电压、短路电流密度、填充因子和光电转化效率) 呈持续下降趋势, 更换 MoO₃/Al 电极后老化器件性能恢复, 证实 MoO₃/Al 界面破坏是器件性能衰减的重要原因。激光束诱导电流成像显示 UV 胶封装出现由边缘向中心的失效过程。据此, 提出如下的降解机理: UV 胶中的光引发剂在紫外光照射下会产生强的质子酸, 产生的质子酸与 MoO₃ 发生反应, 阻碍了空穴的有效传输, 最终使得器件效率大幅度下降。此外, 还开发出一种有效的 OSCs 器件用乙烯-醋酸乙烯酯共聚物膜封装工艺。本研究指出了 UV 胶固化粘合剂封装工艺的问题, 同时也为提高聚合物太阳能电池的稳定性提供了新策略。

关键词: 封装; 聚合物太阳能电池; UV 胶; 三氧化钼; 乙烯-醋酸乙烯酯共聚物

中图分类号: TM914.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)05-0398-08

引用格式: 王亚玲, 闫翎鹏, 董海亮, 等. 封装对聚合物太阳能电池性能和稳定性的影响[J]. 中国材料进展, 2023, 42(5): 398-405.

WANG Y L, YAN L P, DONG H L, *et al.* Encapsulation Effect on Performance and Stability of Organic Solar Cells[J]. Materials China, 2023, 42(5): 398-405.

Encapsulation Effect on Performance and Stability of Organic Solar Cells

WANG Yaling^{1,2,3}, YAN Lingpeng⁴, DONG Hailiang², HAN Yunfei³,
YANG Yongzhen², MA Changqi³, XU Bingshe²

(1. School of Energy and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(2. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(3. Printed Electronics Research Center, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Suzhou 215123, China)

(4. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

收稿日期: 2022-06-28 修回日期: 2022-08-11

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (61904121); 山西省应用基础研究计划面上青年基金项目 (201901D211282); 中北大学 2019 年校科研基金项目 (XJJ201925)

第一作者: 王亚玲, 女, 1990 年生, 博士, 讲师

通讯作者: 杨永珍, 女, 1969 年生, 教授, 博士生导师,

Email: yyztut@126.com

马昌期, 男, 1976 年生, 研究员, 博士生导师,

Email: cqma2011@sinano.ac.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202206016

Abstract: In order to improve the lifetime of organic photovoltaic devices, encapsulation technology is often used to limit the exposure of solar cells to water and oxygen. Despite a series of advances in the encapsulation field of organic solar cells (OSCs), the damage caused by the encapsulation process has rarely been studied in the literature. In this paper, inverted OSCs with high stability were prepared by using classical poly (3-hexylthiophene) as the donor, [6,6]-phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester as the accep-

tor, piperazine that can improve stability of device as the third component, zinc oxide (ZnO) and molybdenum trioxide (MoO_3) as the transport layer material. The effect of ultraviolet (UV) curing adhesive commonly used in large-scale roll-to-roll device encapsulating on the photoelectric conversion efficiency and stability is systematically investigated. The results are as follows: the performance (such as open-circuit voltage, short-circuit current density, fill factor, and power conversion efficiency) of UV glue-encapsulated devices shows a continuous decline with the prolongation of the irradiation time. Meanwhile, the performance of the aging devices is restored after replacing the MoO_3/Al electrode, which confirms that the MoO_3/Al interface corruption is an important reason for the performance attenuation of the device. Laser beam induced current imaging shows a center-to-edge failure process in UV glue-encapsulated device. Based on this, the following degradation mechanism is proposed: the photoinitiator in the UV glue will generate a strong protonic acid under UV light irradiation, and react with MoO_3 , which hinders the effective transmission of the hole, and ultimately reduces the device efficiency significantly. In addition, an effective ethylene-vinyl acetate copolymer encapsulation process for OSCs devices has also been developed. This study provides a new understanding of the UV glue encapsulation process, and also develops a new strategy for improving the stability of organic solar cells.

Key words: encapsulation; organic solar cells; UV glue; molybdenum(VI) oxide; ethylene-vinyl acetate copolymer

1 前言

聚合物太阳能电池(organic solar cells, OSCs)是通过光电效应直接把光能转化成电能的装置,具有成本低、质量轻、柔性和可大面积制备等优点^[1],在清洁能源领域受到了研究者的广泛关注。在过去的10年间,研究者们通过开发新型活性层材料^[2]、优化器件制备过程^[3]、调控形貌的演变过程^[4]以及界面调控^[5]等手段来提高OSC的光电转换效率(power conversion efficiency, PCE)。目前,单结OSC器件的PCE已达到18%~19%^[6-8],叠层器件的PCE更是超过了20%^[9],逐渐接近商业化门槛,但是较差的稳定性成为限制其商业化应用的一大因素。

近年来,越来越多的研究者关注到了OSC的稳定性问题,OSC内各层性能退化的主要机制研究也在不断发展,衰减机理涉及光活性层、电极、界面层及封装工艺等多种因素^[10]。刘彦甫等^[11]概括了由于给受体材料化学分解、活性层形貌变化、传输层和电极的腐蚀以及界面反应等原因造成的器件性能衰减。这种由光、热和电场引起的材料和界面降解称为本征衰减,可以通过材料分子设计^[12, 13]、加入第三组分^[14-16]和器件结构优化^[10, 17]进行缓解。

另一方面,由外界空气中水氧渗入而引起的器件老化称为非本征衰减。为了限制氧气和水分从环境中渗透到器件层,研究者们始终致力于开发高质量的封装技术^[18-21]。具有良好的加工性、高透光性、低的吸水性和渗透性、高的抗紫外线(UV)降解性和热氧化性、良好的附着力、高机械强度和化学惰性的高性能封装材料可进一步延长OSC器件稳定性^[18, 19],使之更具有商业吸引力。当前,UV胶固化粘合剂是大规模卷对卷OSC器件制备中最常见的封装材料^[20, 22],但是该材料是否可靠仍然是一个值得探究的问题。

本文将作者课题组前期报道的具有较高稳定性的OSC器件作为研究模型^[16],以聚-3-己基噻吩(P3HT)为

给体、[6,6]-苯基- C_{61} -丁酸甲酯(PC_{61}BM)为受体、哌嗪(piperazine)作为第三组分,获得P3HT: PC_{61}BM :3% piperazine(质量分数)活性层材料,以氧化锌(ZnO)为电子传输层、氧化钼(MoO_3)为空穴传输层、氧化铟锡(indium tin oxide, ITO)和Al作为电极,制备倒置结构OSC器件。详细研究了UV胶封装对倒置结构OSC器件性能的影响,并提出了合理的降解机理。同时也开发出一种有效的倒置结构聚合物太阳能电池用封装工艺。

2 实验

2.1 实验原料与试剂

P3HT(数均分子量=5.0×10⁴ g/mol,聚合物分散性指数=1.7,规整度=95%)购买自朔纶有机光电科技(北京)有限公司;(6,6)-苯基- C_{61} -丁酸甲酯(PC_{61}BM)购买自荷兰Solenne B. V公司;ZnO溶液为实验室自制,分散液为丙酮,浓度为10 mg/mL;哌嗪购自百灵威化学技术有限公司;1,2-二氯苯(99.5%)购自西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;丙酮(分析纯)和异丙醇(分析纯)购自国药集团化学试剂有限公司。

2.2 聚合物太阳能电池器件的制备和封装

倒置OSC的器件结构为ITO/ZnO/P3HT: PC_{61}BM :3% piperazine/ MoO_3/Al ,结构如图1所示。具体制备过程如下:

(1)活性层溶液配制:将P3HT、 PC_{61}BM 和哌嗪按照质量比1:1:0.03溶于1,2-二氯苯溶剂中,其中,P3HT和 PC_{61}BM 的浓度均为20 mg/mL,将混合溶液密封并置于充满 N_2 的手套箱内,在50℃下搅拌12 h,制得P3HT: PC_{61}BM :3% piperazine共混液。

(2)倒置OSC器件的制备:首先依次用玻璃清洗剂、去离子水、丙酮和异丙醇溶液分别超声清洗ITO玻璃基底30 min,之后将玻璃基底置于异丙醇溶剂中备用。为进一步提高基底平整度和浸润性,使用时先用氮气枪

吹干表面,再用紫外-臭氧清洗机处理 30 min。随后,将 130 μL 的 ZnO 溶液滴加到 ITO 玻璃基底上,转速为 2000 r/min,旋涂时间为 1 min,然后置于 120 $^{\circ}\text{C}$ 加热台上退火 10 min,自然冷却后制得 ZnO 薄膜。接着,将 50 μL 的 P3HT:PC₆₁BM:3% piperazine 共混液滴加到已经制备了 ZnO 薄膜的玻璃基底上,转速为 600 r/min,旋涂时间为 1 min,先置于带有盖的表面皿内溶剂退火 1.5 h,再置于 120 $^{\circ}\text{C}$ 热台上退火 10 min,自然冷却后制得活性层薄膜。最后,在 10^{-4} Pa 以下的真空蒸镀腔体内,在活性层膜表面蒸镀 10 nm 的 MoO₃ 和 100 nm 的金属 Al 电极,最终获得有效面积为 0.09 cm^2 的倒置 OSCs 器件(图 2a)。

(3) OSCs 器件的封装:将 50 μL 的 UV 胶(主体成分:环氧丙烯酸酯;固化机制:阳离子型(光产酸))均匀涂覆在器件周围,盖上盖玻片,用高功率 UV 灯(波长:365 nm;光照强度:6000 mW/cm^2)照射 30 s,得到 UV 胶封装后的 OSCs 器件(图 2b)。

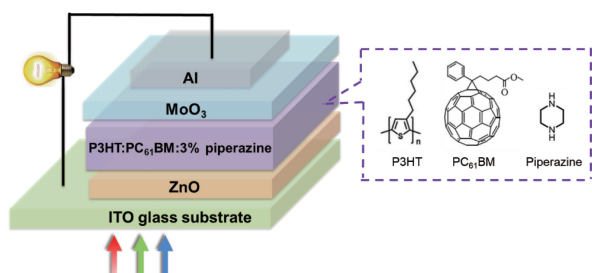


图 1 聚合物太阳能电池(OSCs)器件的结构和活性层材料的分子结构

Fig. 1 Device structure of the organic solar cells (OSCs) and the molecular structure of the active layer materials

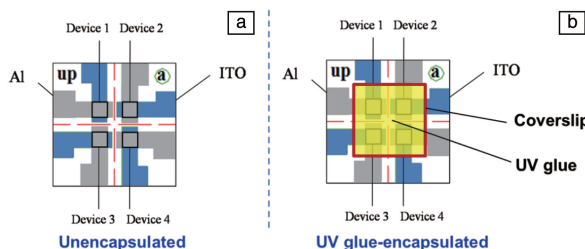


图 2 未封装(a)和 UV 胶封装(b)的 OSCs 器件示意图(器件结构: ITO/ZnO/P3HT:PC₆₁BM:3% piperazine/MoO₃/Al)

Fig. 2 Schematic diagram of unencapsulated (a) and UV glue-encapsulated (b) OSCs device (device structure: ITO/ZnO/P3HT:PC₆₁BM:3% piperazine/MoO₃/Al)

2.3 性能测试与表征

通过测试倒置 OSCs 器件的 J - V 曲线可以获得开路电压(open circuit voltage, V_{oc})、短路电流密度(short circuit current density, J_{sc})、填充因子(fill factor, FF)和 PCE,测试时用功率为 100 mW/cm^2 的光源模拟标准太阳光谱,并通过 Keithley 2400 数字源表输出电流信号。外量子效

率(external quantum efficiency, EQE)测试系统用 150 W Osram 64610 型卤钨灯模拟一个太阳标准光强,先经 Omni- λ 300 型单色仪进行机械调制,然后利用苏州德睿科仪有限公司 QE-IV Convertor 型 J - V 转换器和 Stanford Research Systems SR 830 型锁相放大器将测得的光电响应转换为电压信号。在测试 EQE 光谱时,器件需密封在充满 N₂ 的透明石英窗口密闭盒内,且需用标准硅电池进行校准。

OSCs 器件稳定性测试是采用苏州德睿科仪有限公司 PVLT-G8001M 型太阳能电池寿命测试系统对其进行周期性数据记录。采用实验室搭建的电子器件光电缺陷无损成像分析系统对老化前后器件进行激光光束诱导电流(laser beam induced current, LBIC)成像分析,研究老化前后器件光电性能的变化;采用 Perkin Elmer Lambda 750 型紫外可见分光光度计对薄膜的吸收光谱进行表征分析。

3 结果与讨论

在同一制备工艺条件下,制备了一系列如图 1 所示的倒置 OSCs 器件,并从中优选出器件性能相近的电池用于研究 UV 胶封装对器件稳定性的影响。所选器件的初始性能为 $V_{\text{oc}} = (0.617 \pm 0.003) \text{ V}$, $J_{\text{sc}} = (10.78 \pm 0.22) \text{ mA}/\text{cm}^2$, $\text{FF} = 0.609 \pm 0.017$, $\text{PCE} = (3.99 \pm 0.18) \%$ 。将所选器件依次进行 UV 胶封装之后再对其进行性能测量,结果如下: $V_{\text{oc}} = (0.617 \pm 0.002) \text{ V}$, $J_{\text{sc}} = (10.45 \pm 0.19) \text{ mA}/\text{cm}^2$, $\text{FF} = 0.604 \pm 0.008$, $\text{PCE} = (3.78 \pm 0.35) \%$ 。图 3 为归一化的 UV 胶封装前后 OSCs 器件性能参数对比图,由图可以看出,UV 胶封装后器件的 J_{sc} 略微降低,器件性能略微降低。

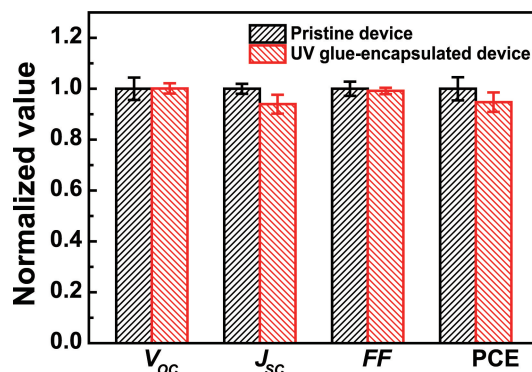


图 3 P3HT:PC₆₁BM:3% 哌嗪基 OSCs 器件封装前后 V_{oc} 、 J_{sc} 、FF 和 PCE 对比图

Fig. 3 V_{oc} , J_{sc} , FF and PCE difference of P3HT:PC₆₁BM:3% piperazine based OSCs devices before and after encapsulation

为了探究 UV 胶封装的可靠性,分别测试了 UV 胶封装和未封装的 OSCs 器件在空气中的稳定性,如图 4 所

示。对于未封装的 OSCs 器件,随着在空气中暴露时间的延长,电池性能持续衰减,其中,器件 J_{sc} 衰减最严重。与文献报道的结果一致^[23-25],未封装 OSCs 器件的性能衰减分为 2 个阶段:第一阶段为前 75 h 内发生的“burn-in”指数型衰减,该过程造成电池性能衰减至初始性能的 75%~80%,是由富勒烯二聚导致的^[26];第二阶段为 75 h 老化过程结束后显示的缓慢线性衰减过程。然而,

随着在空气中暴露时间的延长,UV 胶封装 OSCs 器件的 V_{oc} 、 J_{sc} 和 FF 均出现急速衰减,最终导致器件性能呈现急速衰减,相同时间下甚至比未封装 OSCs 器件的衰减都快。为了排除水氧对 OSCs 器件造成的破坏,测试了 UV 胶封装和未封装 OSCs 器件在 N_2 中的稳定性。如图 5 所示,随着时间的延长,未封装 OSCs 器件的性能基本保持不变,而 UV 胶封装 OSCs 器件性能仍然急速衰减。

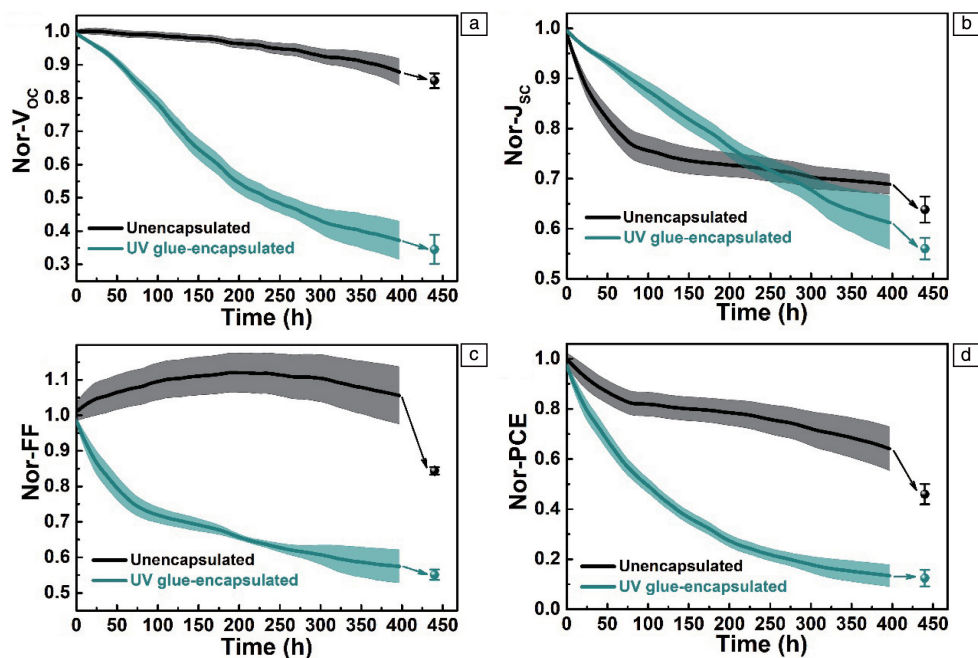


图4 P3HT:PC₆₁BM:3%哌嗪基 OSCs 器件在空气中衰减所得归一化的 V_{oc} (a)、 J_{sc} (b)、FF(c)和 PCE(d)曲线

Fig. 4 Normalized V_{oc} (a), J_{sc} (b), FF (c) and PCE (d) decay curve of P3HT:PC₆₁BM:3% piperazine based OSCs devices in air

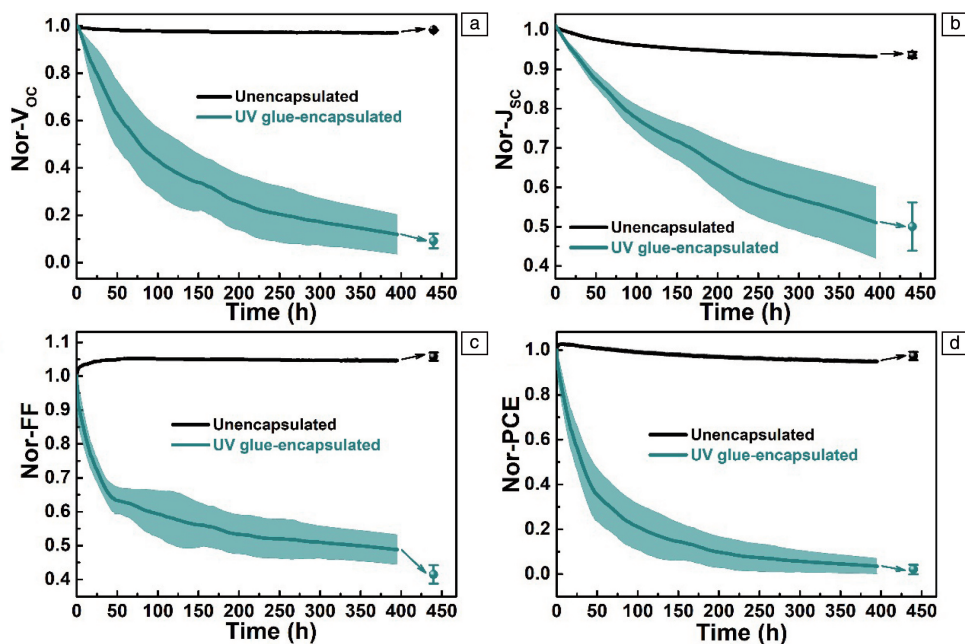


图5 P3HT:PC₆₁BM:3%哌嗪基 OSCs 器件在 N_2 中衰减所得归一化的 V_{oc} (a)、 J_{sc} (b)、FF(c)和 PCE(d)曲线

Fig. 5 Normalized V_{oc} (a), J_{sc} (b), FF (c) and PCE (d) decay curve of P3HT:PC₆₁BM:3% piperazine solar cells in N_2

为了进一步研究封装引起的降解原理,采用 LBIC 无损成像对比 UV 胶封装和未封装 OSCs 器件在 N_2 中老化 400 h 后的光电性能。LBIC 表征技术可以探测激光束扫描时从 OSCs 器件中提取的电流,还可以对光吸收、自由电荷收集及 OSCs 器件性能进行定量映射^[21]。LBIC 成像的工作原理是通过点激光扫描薄膜产生光电流,进而被仪器检测形成 LBIC 图像,因此只有在活性层区域中有效面积内才会呈现明亮的图像。图 6 为未封装 P3HT : PC₆₁BM : 3% piperazine 器件老化前、老化 100 和 400 h 后的 LBIC 图,从图中可以看出,老化前、老化 100 和 400 h 后的未封装 OSCs 器件活性层有效区域光电响应都比较均

匀,仅出现少量缺陷点,这可能是由于活性层中 PC₆₁BM 存在少量结晶。图 7 分别为原始未封装、UV 胶封装后、老化 0, 12, 30, 100 和 400 h 所得 P3HT : PC₆₁BM : 3% piperazine 器件的 LBIC 图,与原始未封装的器件(图 7a)相比,UV 胶封装后的器件(图 7b)活性层有效面积仍比较均匀。随着老化时间的延长,活性层有效区域逐渐皱缩。老化 400 h 后的 UV 胶封装 OSCs 器件(图 7f)的活性层有效区域光电响应分布非常不均,出现大量缺陷,这些缺陷使得活性层薄膜中给受体材料的有效接触面积降低,抑制了电荷的分离和传输,从而导致器件性能骤降,这与图 5 中的实验结果相一致。

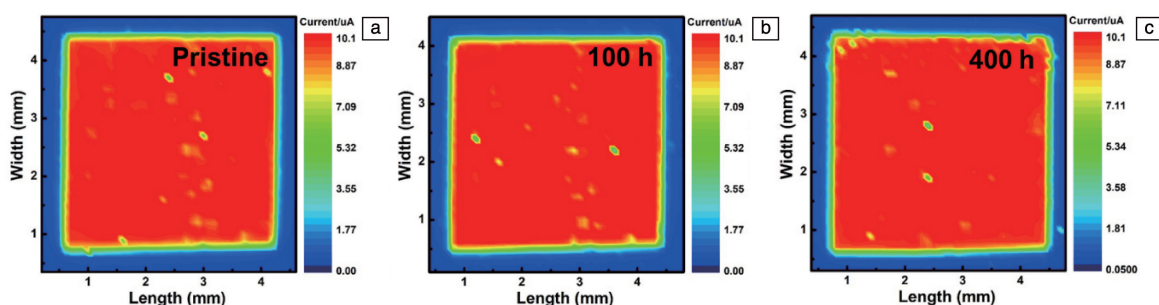


图 6 未封装 P3HT : PC₆₁BM : 3%哌嗪基 OSCs 器件老化前(a)、老化 100 h(b)和老化 400 h(c)的 LBIC 图

Fig. 6 LBIC maps of the unencapsulated P3HT : PC₆₁BM : 3% piperazine based OSCs devices before (a) and after aging of 100 h (b) and 400 h (c)

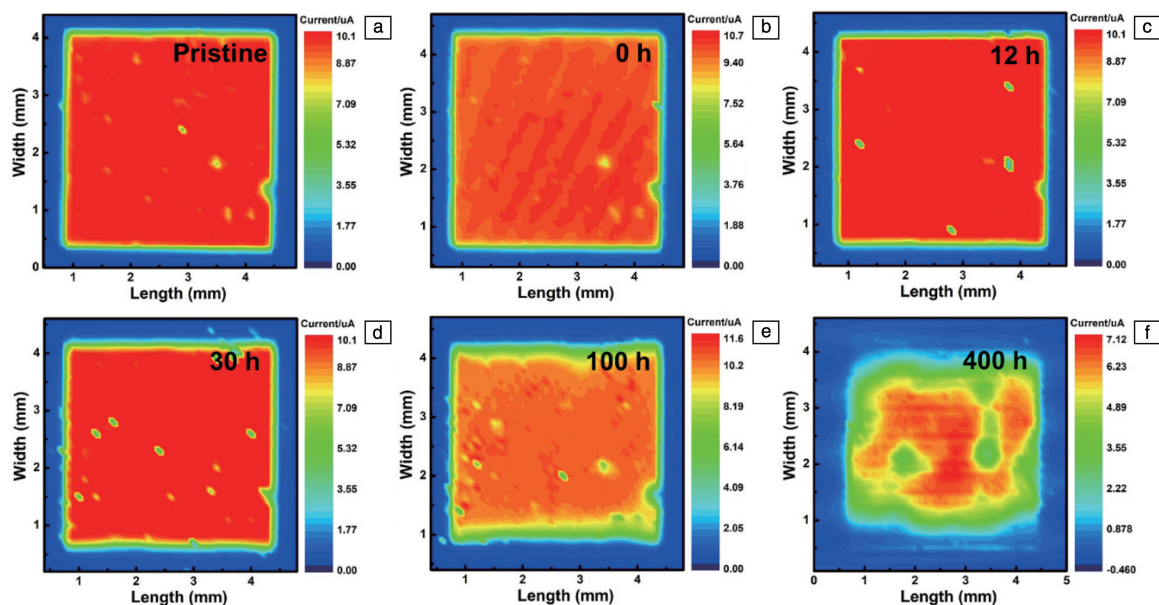


图 7 P3HT : PC₆₁BM : 3%哌嗪基 OSCs 器件原始未封装(a)、UV 胶封装后老化 0 h(b)、12 h(c)、30 h(d)、100 h(e)和 400 h(f)的 LBIC 图

Fig. 7 LBIC maps of P3HT : PC₆₁BM : 3% piperazine based OSCs devices, pristine without UV glue encapsulation (a), UV glue-encapsulated after aging of 0 h (b), 12 h (c), 30 h (d), 100 h (e) and 400 h (f)

利用胶带去除 OSCs 器件的金属电极,再重新蒸镀新的电极,可以证明器件老化是否与界面有关^[27, 28]。若重新蒸镀后性能有所恢复,则说明 OSCs 器件的老化与界面

相关。图 8a 和 8b 为原始器件、UV 胶封装老化后器件和重新蒸镀 MoO₃/Al 电极后所得器件的 $J-V$ 曲线和 EQE 光谱,从图中可以看出,原始器件、UV 胶封装老化后器件

和重新蒸镀 MoO_3/Al 电极后所得器件的 EQE 分别为 3.88%、0.12% 和 3.01%。也就是说, UV 胶封装老化后器件基本无法正常工作, 对老化后的 UV 胶封装器件进行重新蒸镀 MoO_3/Al 电极后, 器件的 PCE 恢复至原来的 78%, 说明 UV 胶封装器件的老化过程发生在活性层和顶电极之间的界面, 这与文献报道的老化过程中在电极和活性层界面处形成了厚约 10 nm 的聚合物层, 阻挡

电极电荷收集, 从而降低器件性能的结论相一致^[28]。图 8c 为重新蒸镀 MoO_3/Al 电极后所得器件的 LBIC 图, 与老化 400 h 所得器件的 LBIC 图(图 7f)相比, 重新蒸镀 MoO_3/Al 电极后所得器件的活性层有效区域恢复, 光电响应较均匀, 仅出现少量缺陷点, 因此器件性能得到恢复, 这进一步证实了 MoO_3 降解导致的界面变化是器件性能衰减的重要原因。

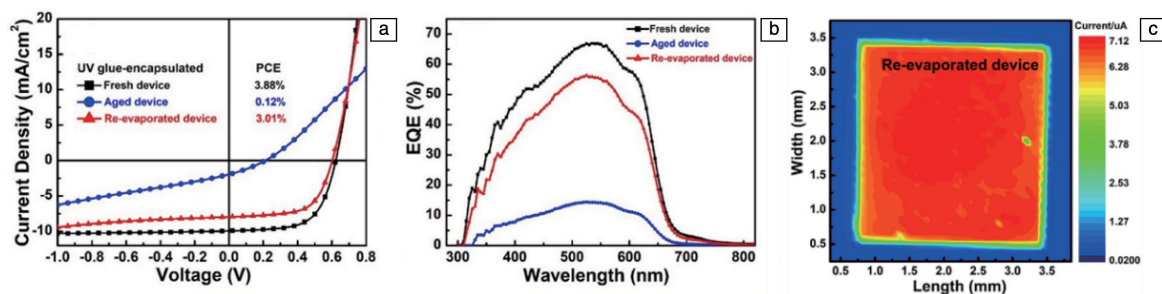


图 8 原始的、老化后和重新蒸镀所得器件的 J - V 曲线(a)和 EQE 光谱(b); 重新蒸镀所得器件的 LBIC 图(c)

Fig. 8 J - V curves (a) and EQE spectra (b) of fresh, aged and re-evaporated devices; LBIC maps of re-evaporated devices (c)

为了进一步揭示 UV 胶的破坏机制, 设计如下实验: 首先在干净的石英片上蒸镀一层 MoO_3 薄膜, 然后在 MoO_3 薄膜上涂敷一层 UV 胶, 分别测试不同辐照时间下的 UV-vis 吸收光谱。为排除空气中水氧的影响, 除样品测试外, 其他操作均在充满 N_2 的手套箱中进行。如图 9 所示, 随着光照时间的延长, 位于 400 nm 处 MoO_3 的吸收峰逐渐减弱, 这是由于 UV 胶为环氧丙烯酸酯类, 所用的光引发剂为鎗盐, 该种光引发剂在紫外光照射下会产生强六氟磷酸, 呈现出强酸性, 此类强的质子酸会与 MoO_3 反应, 使得 MoO_3 的紫外吸收强度降低, 导致器件性能下降。

基于以上研究结果, 对 UV 胶封装引起的 OSCs 器件持续老化问题提出可能的降解机理(图 10): 由于 OSCs 器件活性层采用本体异质结构, 虽引入第三组分, 并

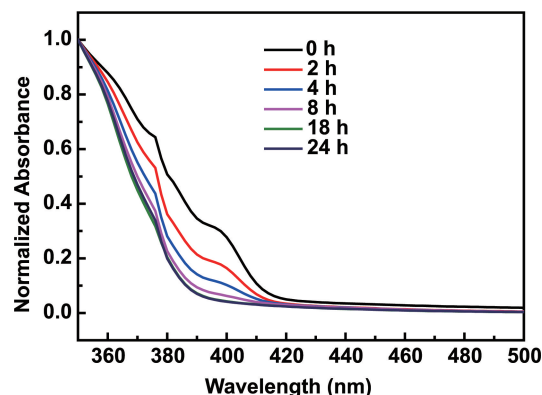


图 9 MoO_3 上涂覆 UV 胶所得薄膜在不同辐照时间下所得归一化的 UV-vis 吸收光谱图

Fig. 9 Normalized UV-vis absorption spectra of films coated with UV glue on MoO_3 at different irradiation times

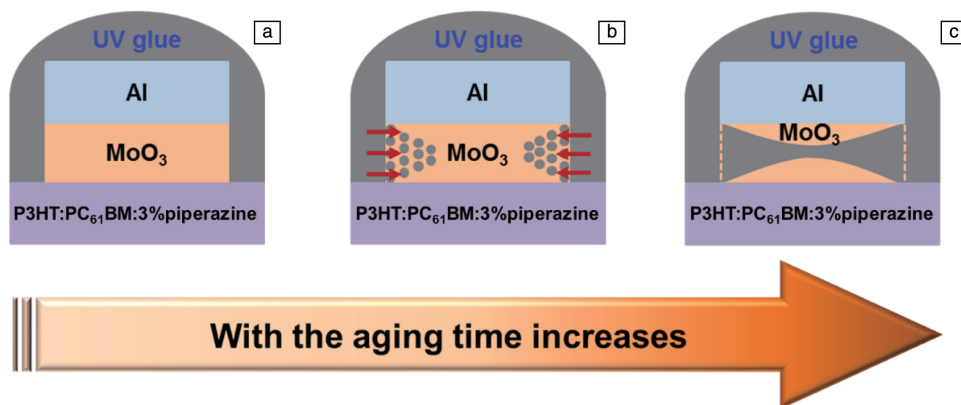


图 10 UV 胶封装引起 OSCs 中 MoO_3 降解的机理图

Fig. 10 Mechanism of MoO_3 degradation in OSCs caused by UV glue encapsulation

通过工艺优化使得器件的 PCE 和稳定性达到最优, 但该活性层机构始终处于热力学亚稳态, 当采用 UV 胶封装 OSCs 器件时, UV 胶在紫外光照射下会产生强的质子酸, 并与 MoO_3 反应, 阻碍了空穴传输, 最终使得器件效率大幅度下降。

值得欣慰的是, 将乙烯-醋酸乙烯酯共聚物 (EVA) 膜代替 UV 胶对 OSCs 器件进行封装可提高 OSCs 器件在空

气中的稳定性。图 11 为未封装和 EVA 膜封装 OSCs 器件在空气中的稳定性测试图, 相比于未封装的 OSCs 器件, EVA 膜封装后的器件 J_{sc} 大幅提升, 使得器件在空气中的稳定性得到提升, 说明 EVA 膜的存在不仅能有效阻隔水氧的侵蚀, 而且还不破坏器件各功能层之间的连接, 因此表现出较高的稳定性, 证实 EVA 膜封装是一项非常可行的封装技术。

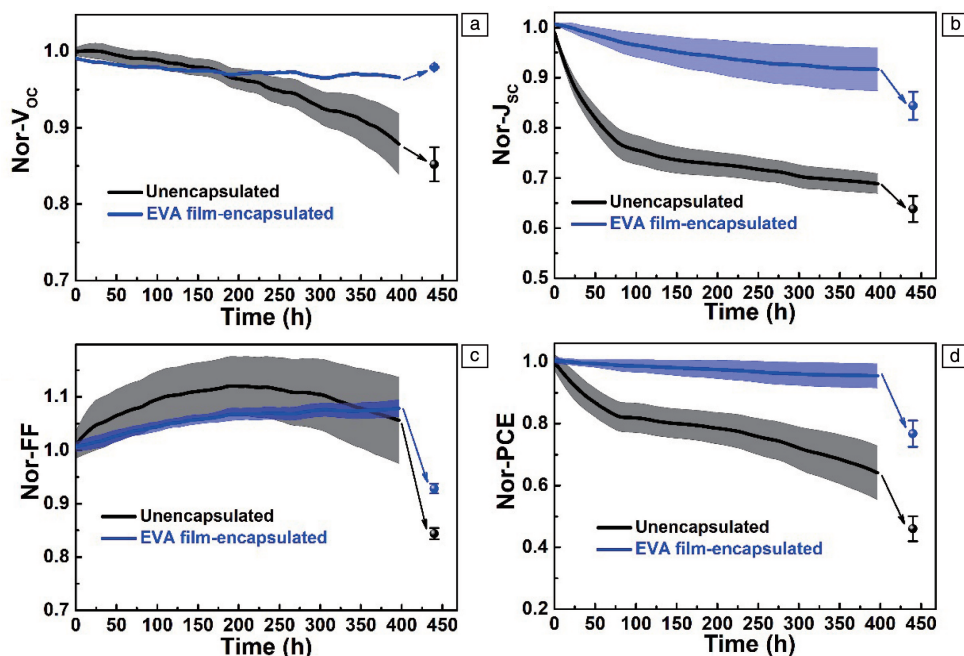


图 11 EVA 膜封装 P3HT:PC₆₁BM:3%哌嗪基 OSCs 器件在空气中衰减所得归一化的 V_{oc} (a)、 J_{sc} (b)、FF(c) 和 PCE(d) 曲线

Fig. 11 Normalized V_{oc} (a), J_{sc} (b), FF (c) and PCE (d) decay curves of P3HT:PC₆₁BM:3% piperazine based OSCs devices with EVA film encapsulation in air

4 结 论

本文以 ITO/ZnO/P3HT:PC₆₁BM:3% piperazine/MoO₃/Al 为研究模型, 研究了 UV 胶封装对倒置结构聚合物太阳能电池 (OSCs) 器件性能的影响。随着辐照时间的延长, UV 胶封装器件的性能明显下降, 这是由于活性层有效区域光电响应分布不均, 出现大量缺陷, 使得给/受体材料的有效接触面积降低, 抑制了电荷的分离和传输, 从而导致器件性能骤降。更换 MoO₃/Al 电极后老化器件性能恢复, 证实 MoO₃/Al 界面破坏是器件性能衰减的重要原因, 这可能是由于 UV 胶中的光引发剂在紫外光照射下会产生强质子酸, 质子酸与 MoO₃ 反应, 阻碍了空穴的有效传输, 从而使器件性能大幅下降。同时也开发出一种有效的 OSCs 器件用 EVA 膜封装工艺, 丰富了 OSCs 的封装工艺。

参考文献 References

- [1] WANG J Y, LIU K, MA L C, *et al.* Chemical Reviews[J], 2016, 116(23): 14675–14725.
- [2] YE L, ZHANG S Q, HUO L J, *et al.* Accounts of Chemical Research[J], 2014, 47(5): 1595–1603.
- [3] GUO F, LI N, FECHER F W, *et al.* Nature Communications[J], 2015, 6: 7730.
- [4] ZHANG X, LI W P, YAO J N, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2016, 8(24): 15415–15421.
- [5] GRAETZEL M, JANSSEN R A J, MITZI D B, *et al.* Nature[J], 2012, 488(7411): 304–312.
- [6] LI C, ZHOU J, SONG J, *et al.* Nature Energy[J], 2021, 6(6): 605–613.
- [7] MENG H, LIAO C, DENG M, *et al.* Angewandte Chemie-International Edition[J], 2021, 133(41): 22728–22735.
- [8] CUI Y, XU Y, YAO H, *et al.* Advanced Materials[J], 2021, 33(41): 2102420.
- [9] ZHENG Z, WANG J, BI P, *et al.* Joule[J], 2022, 6: 171–184.
- [10] GROSSIORD N, KROON J M, ANDRIESEN R, *et al.* Advanced Engineering Materials[J], 2013, 15(11): 1068–1075.
- [11] 刘彦甫, 李世麟, 荆亚楠, 等. 化学学报[J/OL]. (2022-04-22)

- [2022-06-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1320.06.20220421.1632.002.html>.
- LIU Y F, LI S L, JING Y N, *et al.* Acta Chimica Sinica[J/OL]. (2022-04-22) [2022-06-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1320.06.20220421.1632.002.html>.
- [12] YU Z P, LIU Z X, CHEN F X, *et al.* Nature Communications[J], 2019, 10(1): 1-9.
- [13] LIU Z X, YU Z P, SHEN Z, *et al.* Nature Communications[J], 2021, 12(1): 1-10.
- [14] MING S, WU H, WANG X, *et al.* Journal of Materials Chemistry A [J], 2020, 8(43): 22907-22917.
- [15] CHENG P, ZHAN X. Materials Horizons[J], 2015, 2(5): 462-485.
- [16] YAN L, WANG Y, WEI J, *et al.* Journal of Materials Chemistry A [J], 2019, 7(12): 7099-7108.
- [17] YIN Z, MEI S, GU P, *et al.* iScience[J], 2021, 24(9): 103027.
- [18] AHMAD J, BAZAKA K, ANDERSON L J, *et al.* Renewable and Sustainable Energy Reviews[J], 2013, 27: 104-117.
- [19] KIM N, POTSCAVAGE J W J, SUNDARAMOOTHY A, *et al.* Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2012, 101: 140-146.
- [20] KOVROV A, HELGESEN M, BOEFFEL C, *et al.* Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2020, 204: 110210.
- [21] PLANES E, JUILLARD S, MATHERON M, *et al.* Advanced Materials Interfaces[J], 2020, 7(15): 2000293.
- [22] HÖSEL M, SØNDERGAARD R R, JØRGENSEN M, *et al.* Advanced Engineering Materials[J], 2013, 15(11): 1068-1075.
- [23] PETERS C H, SACHS-QUINTANA I T, KASTROP J P, *et al.* Advanced Energy Materials[J], 2011, 1(4): 491-494.
- [24] KONG J, SONG S, YOO M, *et al.* Nature Communications[J], 2014, 5(1): 1-8.
- [25] 闫翎鹏, 赵文盛, 杨永珍, 等. 高分子学报[J], 2021, 52(4): 350-362.
- YAN L P, ZHAO W S, YANG Y Z, *et al.* Acta Polymerica Sinica [J], 2021, 52(4): 350-362.
- [26] HEUMUELLER T, MATEKER W R, DISTLER A, *et al.* Energy & Environmental Science[J], 2016, 9(1): 247-256.
- [27] MATEKER W R, DOUGLAS J D, CABANETOS C, *et al.* Energy & Environmental Science[J], 2013, 6(8): 2529-2537.
- [28] SACHS-QUINTANA I T, HEUMÜLLER T, MATEKER W R, *et al.* Advanced Functional Materials[J], 2014, 24(25): 3978-3985.

(编辑 张雨明)