

# 多温度阶梯退火对有机聚合物太阳能电池器件性能的影响\*

孙凯 何志群† 梁春军

(北京交通大学, 光电子技术研究所, 教育部发光与光信息技术重点实验室, 北京 100044)

(2013年9月21日收到; 2013年10月31日收到修改稿)

以聚3-己氧基噻吩(P3HT)作为给体, 富勒烯衍生物(ICBA)作为受体, 制备了体异质结构的聚合物太阳能电池, 研究不同热退火条件对器件的光伏输出特性及稳定性的影响. 研究发现, 采用多温度、阶梯退火比单一温度退火能使器件的光伏输出性能明显提高, 与此同时器件的寿命显著延长, 可以在未封装的环境下保持器件性能的稳定, 减缓器件的衰退.

**关键词:** 有机聚合物电池, 稳定性, 多温度阶梯退火, 极化

**PACS:** 88.40.jr, 72.40.+w, 73.61.Wp

**DOI:** 10.7498/aps.63.048801

## 1 引言

与传统的晶硅太阳能电池相比, 有机聚合物太阳能电池(PSCs)具有制作工艺简单、制作成本低、器件薄且轻便、可制作在柔性衬底上以及能够通过打印技术制作大面积的电池产品等优点<sup>[1-5]</sup>, 因此有着较好的研究价值和应用前景. 为了获得高的电池效率, 研究者从不同的方面去改善电池的性能. 例如: 可以通过对活性层和电极进行优化, 改善器件的性能<sup>[6]</sup>. 热退火处理是本体异质结、有机聚合物太阳能电池的制备过程中非常关键的一道工序. 目前普遍认同经过热退火可以显著改善活性层的形貌<sup>[7]</sup>, 优化器件的性能. 在高温退火的条件下, 可以促进相分离网络中的晶化<sup>[7]</sup>, 以提高器件中电荷向电极的传输能力, 从而可提高器件的效率<sup>[8]</sup>. 经过热退火处理后的聚3-己氧基噻吩(P3HT)太阳能电池的能量转换效率(PCE)明显提高, 可以达到3.4%<sup>[9,10]</sup>; 采用不同溶剂相互混合, 对活性层混合膜进行微相调节, 也可以带来器件性能的改善<sup>[11]</sup>. 采用低带隙的聚合物材料增加吸收光谱的宽度也

可以大大提高器件的性能, 使得PCE达到9.2%<sup>[12]</sup>. 此外, 器件的辅助修饰层的引入, 如插入阴极修饰层可以改善器件的欧姆接触或提高电子的传输速率<sup>[13]</sup>. 串联结构的设计<sup>[14]</sup>, 使得PSCs的PCE已突破10.6%<sup>[15]</sup>.

随着实验室研发的PSCs器件的性能不断提升, 人们也越来越关注器件的工作寿命以及器件衰变的物理机制. 一些初步研究表明: 器件的衰变主要是由材料的物理性能、光学性能、电学性能以及化学性能多种变化过程引起的. 最早的关于稳定性的报道是1994年基于PPV聚合物电池<sup>[16]</sup>, 且暴露在外部环境中的寿命只有几分钟. 目前, PSCs在户外使用寿命的记录已达到几千小时<sup>[17]</sup>. 即使这样, 仍不能满足市场的要求. 由于PSCs性能受外部环境中H<sub>2</sub>O和O<sub>2</sub>的影响衰减很快, 因此器件封装技术的应用成为延长器件使用寿命最有效的方法. 研究者还从其他方面去减少PSCs的衰减, 其中包括: 将氧化铟锡(ITO)作为电池阴极的倒置结构的设计<sup>[12]</sup>; 采用不易光解相对稳定的聚合物材料<sup>[18]</sup>; 蒸镀MoO<sub>3</sub>

\* 科技部国际科技合作计划(批准号: 2008DFA61420)、中央高校基本科研业务费(批准号: 2013JBZ004)、国家自然科学基金(批准号: 21174016)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20120009110031)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhqhe@bjtu.edu.cn

或者溅射 NiO 等取代 PEDOT : PSS (poly(3,4-ethylenedioxythiophene: poly(styrenesulfonate) 作为空穴传输层, 提高 PSCs 的稳定性<sup>[19]</sup>. 但关于退火条件与 PSCs 稳定性方面的研究还鲜有报道.

本文引入多温度阶梯退火, 研究基于 P3HT : ICBA (富勒烯衍生物) 的电池在多温度阶梯退火和单一温度退火方式下的电池性能, 重点研究了两种不同退火方式下的器件性能的稳定性, 并基于器件衰减后电压扫描的影响<sup>[20]</sup>, 对可能的机制进行了解释.

## 2 实验材料和仪器

### 2.1 实验材料

本文所制备的器件采用 P3HT 和 ICBA 为活性材料, 二者均来自台湾 Luminescence Technology Corp 公司, 其中聚合物 P3HT 作为给体, ICBA 作为受体. 阳极修饰材料 PEDOT : PSS 购自 Heraeus Al(配方型号为 4083); LiF 及其他有机溶剂若无特别说明均为分析纯 (> 99.7%), 源自国药集团化学试剂有限公司; ITO 购自中国南玻. 活性层材料 P3HT 和 ICBA 结构及能级如图 1 所示<sup>[21]</sup>.

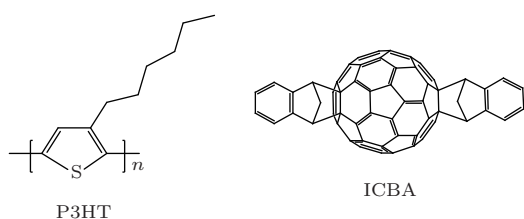


图1 给体 P3HT 和受体 ICBA 的结构

### 2.2 基片处理及器件制作

器件制作在预先刻蚀好的 ITO 导电玻璃 (面电阻为 15  $\Omega$ ) 基片上, ITO 基片首先需经过清洗, 将基片用沾过洗涤剂棉花球进一步清洗, 直到基片表面形成一层均匀的水膜为止. 将洗净的基片在不同的超声浴中, 使用不同溶剂, 按照乙醇-丙酮-乙醇-丙酮-异丙醇的顺序用超声仪各进行超声振荡清洗 15 min, 然后用氮气吹干待用. 实验前要将基片置于紫外臭氧处理箱中进行表面处理 10 min, 然后将 PEDOT : PSS 先通过旋涂机以 3000 r/min 转速旋涂在基片上, 制备好的薄膜需放置在真空干燥箱中以 150  $^{\circ}\text{C}$  快速干燥 10 min, 随后将该基片转移到高纯氮气保护的手套箱中, 气氛监测为  $\text{H}_2\text{O}$

< 0.1 ppm;  $\text{O}_2$  < 0.1 ppm; 温度 25  $^{\circ}\text{C}$ . 将 P3HT 与 ICBA 以 1 : 0.9 wt% 共同均匀溶解在氯苯中, 然后以 1200 r/min 的转速旋涂在已涂有 PEDOT : PSS 的基片上; 将基片转移进有机真空镀膜机, 在真空度约为  $2.4 \times 10^{-4}$  Pa 气压下, 先后以 0.3  $\text{\AA}/\text{s}$  蒸镀 LiF (1 nm)、金属铝电极 (100 nm), 所得的器件将放置在真空干燥箱内进行退火处理研究.

### 2.3 器件制作和测试仪器设备

器件制作及测试仪器包括: 紫外臭氧基片清洗机 (上海彩融经贸发展有限公司, 型号 UV- $\text{O}_3$ ), 匀胶机 (中科院微电子所, KW-4A), 手套箱系统 (伊特克斯, LAB2000) 和有机真空镀膜机 (北京泰科诺科技有限公司), 台阶测厚仪 (美国 Ambios, 型号 XP-2), 半导体参数仪 (Keithley, 4200) 和太阳能模拟光源 (Abet Technologies, Sun 2000).

## 3 结果与讨论

本文以 P3HT : ICBA 为活性层, 制备了基本结构为: ITO/PEDOT : PSS/P3HT : ICBA/LiF/Al 的聚合物太阳能电池, 设计了不同的退火方案, 研究不同退火条件对器件性能的影响.

### 3.1 单一退火温度对器件性能的影响

首先将制备好的一系列相同结构的器件分别选择不同的温度进行恒温热退火, 退火方案具体如下.

方案一: 将器件在单一温度连续恒温退火 10 min, 该方案所制备的器件命名为: D120A, D140A, D160A, D180A, 即, 分别为在 120, 140, 160, 180  $^{\circ}\text{C}$  下将器件恒温热处理 10 min.

该系列器件的光伏响应特性曲线如图 2 所示, 所测得的光伏响应参数列于表 1. 从图 2 中可见, 当退火温度升高时, 开路电压 ( $V_{oc}$ ) 基本稳定, 其变化范围保持在 0.86—0.89 V 之间; 随着退火温度升高,  $V_{oc}$  略有下降; 但短路电流 ( $J_{sc}$ ) 随着退火温度的改变发生明显变化, 退火温度升高,  $J_{sc}$  先升高后下降, 其中退火温度为 160  $^{\circ}\text{C}$  时  $J_{sc}$  达到最大, 值为 5.34  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , 同时可以观察到, 该器件的填充因子 (FF) 为 64.4%, PCE 为 2.96%, 都达到了该系列器件的最大值. 因此该器件结构若采用单一温

度进行 10 min 恒温退火处理, 160 °C 为最佳退火温度.

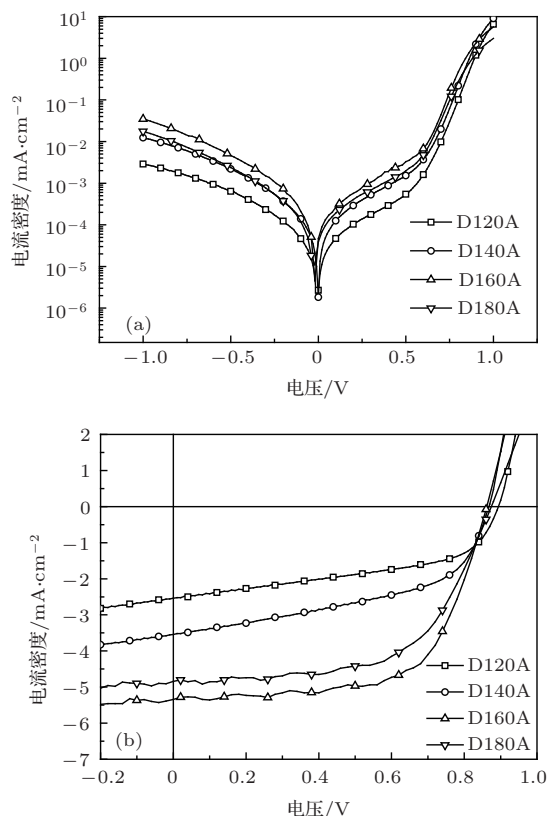


图2 (a) 方案一器件在暗场下的电流密度-电压 ( $J$ - $V$ ) 半对数曲线; (b) 方案一器件在光照下的  $J$ - $V$  曲线

表1 器件各物理性能参数汇总

器件	$V_{oc}/V$	$J_{sc}/mA \cdot cm^{-2}$	FF/%	PCE/%
D120A	0.89	2.54	49.3	1.11
D140A	0.86	3.54	50.1	1.53
D160A	0.86	5.34	64.4	2.96
D160B	0.88	5.10	47.7	2.14
D180A	0.86	4.44	60.2	2.50
D4T	0.85	5.73	65.0	3.17

### 3.2 多温度阶梯退火对器件性能的影响

为了进一步提高器件的性能, 采用温度阶梯退火, 方案如下.

方案二: 多温度阶梯退火 30 min, 即, 对同一样品采用阶梯式温度递升的方式, 在 120 °C  $\rightarrow$  140 °C  $\rightarrow$  160 °C 各个阶梯温度下顺序进行恒温热退火 10 min. 该器件命名为 D4T.

该系列器件的光伏响应特性曲线如图 3 所示, 所测得的光伏响应参数见表 1. 从图 3 中可见, 阶

梯退火的器件 D4T 的  $V_{oc} = 0.85 V$ , 与单一退火器件相似但略低, 但  $J_{sc} = 5.73 mA/cm^2$ ,  $FF = 65%$  和  $PCE = 3.17%$ , 均较之器件 D160A 有明显的提升.

但是由于温度梯度处理的方案二需要经过多次温度退火, 热处理总的时间长度为 30 min, 是单温度处理的方案一的热处理总时间长度 (10 min) 的三倍. 为排除时间因素的影响, 本文进一步设计了方案三进行对比实验.

方案三: 为了与阶梯退火器件进行对比, 选择单一退火中的最佳退火温度 (160 °C, 进行了时间长度为 30 min 的连续恒温退火, 该器件命名为 D160B.

该器件的光伏响应特性曲线示于图 3, 其参数见表 1. 由实验结果可见: 当退火温度为 160 °C 时, 器件性能随退火时间长度的增加而降低,  $V_{oc}$  和  $J_{sc}$  变化不大, 但器件的  $FF$  变化显著, 由 64.4% 降至 47.7%, 将导致  $PCE$  由 2.96% 降至 2.14%. 从这些结果可以看出, 退火时间的延长不能带来器件性能的提升, 阶梯退火对器件产生的积极影响并非由于时间延长引起.

研究表明: 多温度阶梯退火较单一温度退火对器件性能有较大的影响, 可提高器件的光伏输出特性.

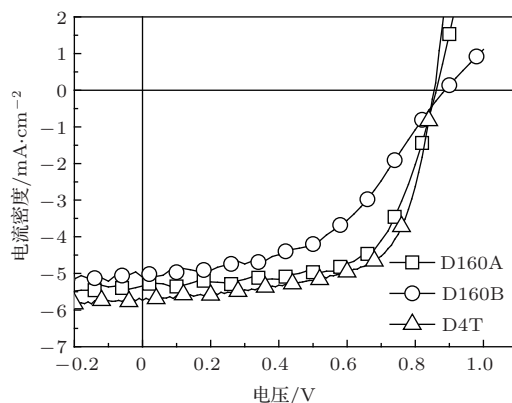


图3 器件在光照下的  $J$ - $V$  特性曲线

### 3.3 器件稳定性的初步研究

在上述研究基础上, 进一步对上述器件的稳定性进行了初步的研究对比, 这些器件均未进行封装.

将器件置于外部环境 (相对湿度 60%  $\pm$  5%, 30 °C  $\pm$  3 °C) 下, 对其  $J$ - $V$  特性曲线进行测定分析, 并研究电池性能随时间变化的规律. 图 4 展示

了器件D160A和器件D4T的 $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF和PCE随时间的变化趋势.

从图4可见, 器件的衰减曲线主要分为两类: 其一, 指数衰减, 并可以分为快速衰减与缓慢衰减两个阶段; 其二, 在所测量的时间范围为线性衰减过程, 如器件D4T的 $J_{sc}$ 和PCE呈线性衰减的趋势.

由于外部测试环境中 $H_2O$ 的影响, 器件的PCE在初始测试阶段均下降较快, 在2 h时间范围, 器件D160A的PCE由2.96%降至1.48%, 器件D4T由3.17%降至1.45%. 这一快速衰退的主要原因是器件内部PEDOT:PSS吸收空气中的水分, 改变了其导电性, 使得器件性能快速衰退. 然而, 仔细观察可以发现, 不同热退火方式的器件的长时间衰减趋势有很大不同. 阶梯退火的器件D4T可以在快速衰减后达到一个相对稳定的水平.

进一步分析第一方案制备的器件D160A性能随时间衰减的趋势, 可以发现: 器件的 $V_{oc}$ 随时间变化较小; 器件的 $J_{sc}$ 呈指数衰减的趋势, 初始阶段快速衰减, 80 h左右衰减到1/10, 虽然随后衰减速率趋于缓慢, 但仅维持很低的水平; FF的衰减也分为两个阶段, 快速衰减后, 相对稳定在20%以上;

PCE呈指数衰减的趋势, 与 $J_{sc}$ 相似, 在初始阶段衰减幅度较大, 在80 h左右下降到1/10.

相比之下, 第二方案制备的器件D4T较之D160A要相对稳定. 从实验结果可见, 器件D4T随时间变化的衰减速率较慢. 各个性能参数指标在前100 h有所衰减, 随之达到一个相对稳定的平衡值. 这与单一温度恒温退火的器件性能有着很大的区别. 即, 多温度阶梯退火所得器件的稳定性较单一温度退火要高. 这是一个非常重要的发现.

虽然有机聚合物太阳能电池的稳定性越来越受到关注, 但是对影响稳定性的因素, 以及导致稳定性下降的机制仍然是众说纷纭. 目前普遍接受的原因有: PEDOT:PSS吸收环境中的 $H_2O$ 可以改变其导电性能, 同时PEDOT:PSS本身的酸性腐蚀了ITO使得ITO表面析出离子扩散到活性层内<sup>[22]</sup>, 上述这些因素改变了ITO功函数和器件内部的内建电场; 金属电极中的金属原子或修饰层的离子扩散到活性层内;  $O_2$ 的引入使得P3HT发生如图5所示的反应<sup>[20,23]</sup>, 降低了其激子的传输速率并增加了陷阱密度<sup>[24]</sup>, 而对于富勒烯,  $O_2$ 的引入减少了电子浓度<sup>[25,26]</sup>.

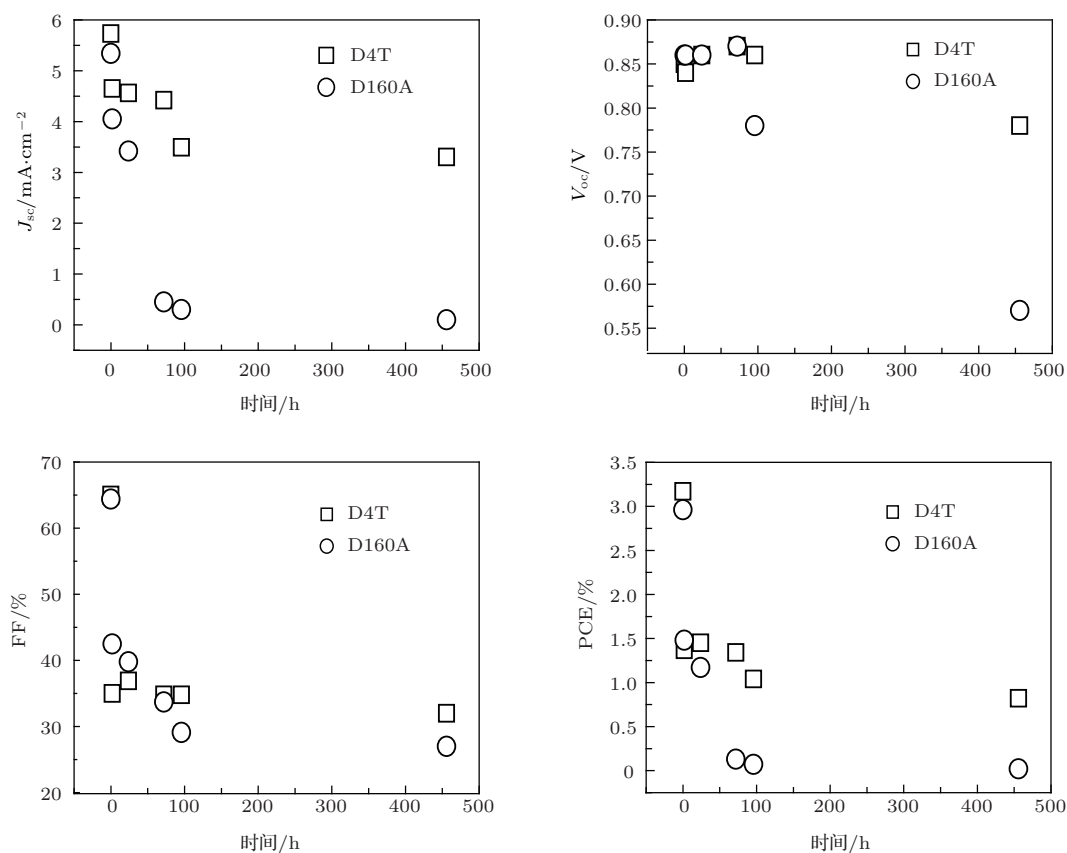


图4 器件D160A和器件D4T的性能衰减趋势

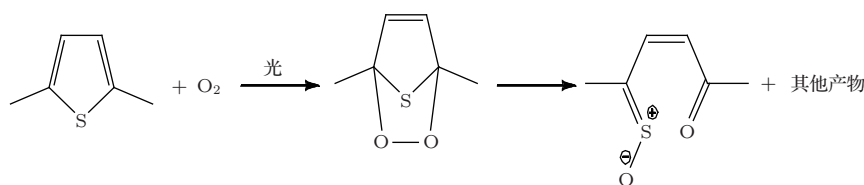


图5 P3HT的氧化反应 [20,23]

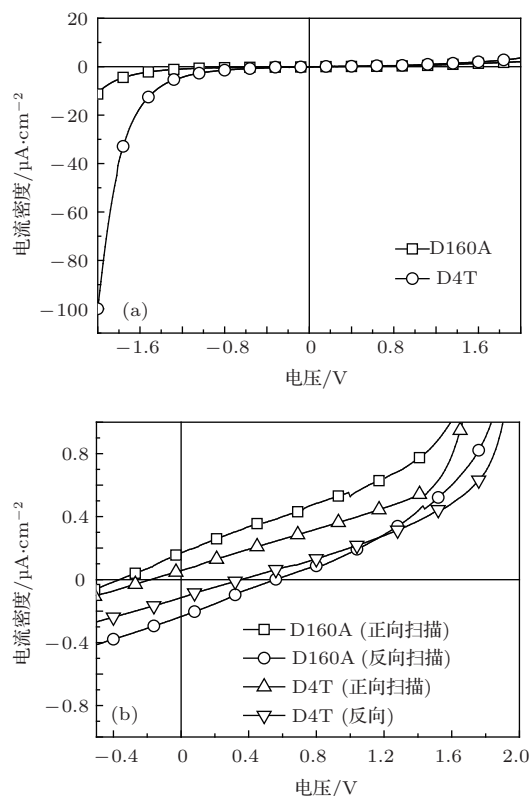
对比器件D160A和器件D4T,它们具有相同的基本结构,二者的主要区别在于器件制备后的温度退火方式不同.为了探究不同的温度退火方式对器件活性层内部究竟产生了什么影响,我们进一步采用电学分析手段,对器件内部的分子的极化状态及电荷分布展开了研究.

首先,将器件D160A和器件D4T放置在外部环境(相对湿度 $60\% \pm 5\%$ ,  $30^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 下加速其衰减速率.一周后,测量两个器件的光照(图6(a))及暗场(图6(b))下的 $J$ - $V$ 特性曲线,实验中特别发现在暗场扫描条件下, $J$ - $V$ 特性曲线发生了显著变化:器件的正反向扫描(forward/reverse sweep)  $J$ - $V$ 特性曲线不能重叠,且均不经过原点;当进行正向扫描时, $J$ - $V$ 曲线向负电压区域漂移,器件D160A在 $-0.36\text{ V}$ 和 $+0.17\ \mu\text{A}$ ,器件D4T在 $-0.18\text{ V}$ 和 $+0.06\ \mu\text{A}$ 与坐标轴相交;而反向扫描时, $J$ - $V$ 曲线向正电压区域漂移,器件D160A在 $+0.56\text{ V}$ 和 $-0.24\ \mu\text{A}$ ,器件D4T在 $+0.36\text{ V}$ 和 $-0.12\ \mu\text{A}$ 与坐标轴相交.不论是正向或者反向扫描,器件D4T的暗场 $J$ - $V$ 特性曲线都要距离原点更近.

从该实验可以看出,不同的退火方式导致器件内部的极化状态产生了显著变化,在器件D160A内部产生了较器件D4T更多的极化电荷.该极化电荷产生的电场( $E_p(t)$ )与施加的外电场( $E_a(t)$ )方向相反.图7对器件衰减后所产生的极化电场与外电场的作用进行了形象化推测,即由于极化电荷的存在,在所施加不同的外加电场下极化电场方向的变化 [20].

特别需要提出的是,这种器件内部的极化电场的作用仅当器件衰减到其光电性能几乎消失时才能显现,即器件快速衰减后活性层光电性能的减弱,使得器件在暗场下极化电场的作用增强.当外加电场为零时,暗电流曲线的 $J_{sc}$ 大小与极化场强呈正比;当外加电场与极化电场相等时,暗点曲线的电流为零.

由于不同的退火方式会影响器件内部活性层薄膜的形貌,我们可以推测,这种相分离可能改变

图6 (a)光照下器件D160A和器件D4T一周衰减后的 $J$ - $V$ 曲线,电压扫描方式为正向扫描;(b)暗场下器件D160A和器件D4T正、反扫描下的 $J$ - $V$ 曲线

了活性层的结构微观相分离网络结构中的有序结构及其密度,由于聚合物存在多分散性,不可避免地存在不同的结构分布,特别是刚性聚合物,还会产生在相似链节间聚集而成的非周期短程有序结构,不同条件热处理或者退火将对聚集态结构产生影响 [27].由此可以预测,采用多温度阶梯退火,可以将不同尺度及有序性的结构加以重组,并获得更为密集的结构,从而改变了活性层的渗透性,导致活性层的反应性降低.因而可以认为:阶梯温度退火的器件D4T可使得多分散的聚合物材料产生更多的分级有序结构,结构更为致密,致使其稳定性提高,与活性气氛的反应活性降低,从而减少了由于 $\text{O}_2$ 的渗入及反应所产生的极化或离子的数量,即减少了导致P3HT内部反应性掺杂的浓度,以及减弱了器件内部的极化场强.因而,在同样的条件

下,器件的衰减较小,内部极化电荷数量较少,极化电场较小,正反向扫描差异较小.反之,稳定性较差的器件D160A在同样的条件下将会产生更多的极化电荷,极化电场也较高,图6的结果说明了这一点.

上述分析对器件的稳定性及其活性层内部的极化状态建立了联系,并且可以用于检测器件的老化程度.如何通过其他物理化学手段抑制极化场的产生,将有可能带来对器件性能的改善.关于影响器件聚合物太阳能电池稳定性的更为深入的物理机制,目前尚无有说服力的证据.该问题还需大量的研究,这对进一步的器件优化极其重要.

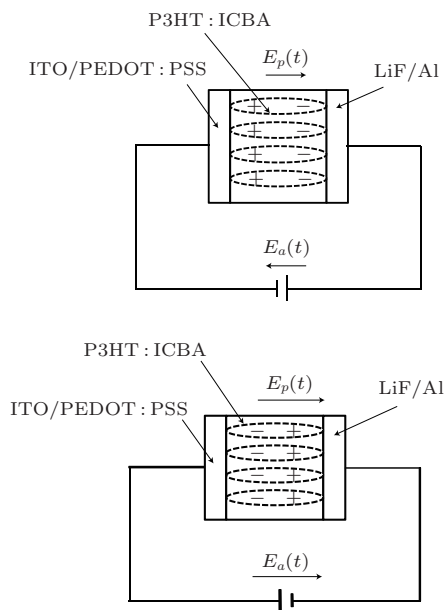


图7 施加不同的外加电场下极化电场方向的变化示意图,  $E_p(t)$  为活性层内部极化电场的方向,  $E_a(t)$  为外加电场的方向

## 4 结 论

本文采用多温度阶梯退火对基于P3HT:ICBA本体异质结聚合物太阳能电池性能及稳定性的影响进行了研究.发现采用多温度阶梯退火比单一温度退火可明显提高器件的性能,更为重要的是,多温度阶梯退火可以提高器件的稳定性.

进一步电学研究发现,对比单一温度退火,采用温度阶梯退火的器件活性层内部由于反应性掺杂而产生的活性层内部偶极子或空间电荷大大减少.从该结果可以推测:温度阶梯退火可以通过聚合物聚集态的分级重组,使得活性层聚合物的相结构更加密集,降低了活性层的反应性.从而降低器

件内部的极化场强,使得器件内建电场能在一段时间内保持稳定,从而使得器件的稳定性提升.

## 参考文献

- [1] Brabec C J, Durrant J R 2008 *MRS. Bull.* **33** 670
- [2] Hoppe H, Sariciftci N S 2006 *J. Mater. Chem.* **16** 45
- [3] Yu H Z, Peng J B, Liu J C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 669 (in Chinese)[於黄忠, 彭俊彪, 刘金成 2009 物理学报 **58** 669]
- [4] Krebs F C 2009 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **93** 465
- [5] Krebs F C, Tromholt T, Jørgensen M 2010 *Nanoscale* **2** 873
- [6] Yang Q Q, Zhao S L, Zhang F J, Yan G, Kong C, Fan X, Zhang Y F, Xu X R 2012 *Chin. Phys. B* **21** 128402
- [7] Verploegen E, Mondal R, Bettinger C J, Sork S, Tongey M F, Bao Z N 2010 *Adv. Funct. Mater.* **20** 3519
- [8] Mihailetschi V D, Xie H X, Boer B D, Koster L J A, Blom P W M 2006 *Adv. Funct. Mater.* **16** 699
- [9] Al-Ibrahim M, Ambacher O 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 201120
- [10] Yang X N, Loos J, Veenstra S C, Verhees W J H, Wienk M M, Kroon J M, Michels M A J, Janssen R A J 2005 *Nano Lett.* **5** 579
- [11] Yang S P, Li N, Li G, Shi J B, Li X W, Fu G S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 014702 (in Chinese)[杨少鹏, 李娜, 李光, 史江波, 李晓苇, 傅广生 2013 物理学报 **62** 014702]
- [12] He Z C, Zhong C M, Su S J, Xu M, Wu H B, Cao Y 2012 *Nat. Photonics* **90** 1
- [13] Li Q, Li H Q, Zhao J, Huang J, Yu J S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 128803 (in Chinese)[李青, 李海强, 赵娟, 黄江, 于军胜 2013 物理学报 **62** 128803]
- [14] Yu H Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 027201 (in Chinese)[於黄忠 2013 物理学报 **62** 027201]
- [15] You J, Dou L, Yoshimura K, Kato T, Ohya K, Moriarty T, Emery K, Chen C C, Gao J, Li G 2013 *Nat. Commun.* **4** 1446
- [16] Yu G, Zhang C, Heeger A J 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 1540
- [17] Hauch J A, Schilinsky P, Choulis S A, Childers R, Biele M, Brabec C J 2008 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **92** 727
- [18] Manceau M, Chambon S, Rivaton A, Gardette J L, Guillerez S, Lemaître N 2010 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **94** 1572
- [19] Betancur R, Maymó M, Elias X, Vuong L T, Martorell J 2011 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95** 735
- [20] Kumar P, Sharma A, Singh D P 2013 *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **21** 950
- [21] Li H, Li Y F, Wang J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 033907
- [22] Gallardo D E, Bertoni C, Dunn S, Gaponik N, Eychmüller A 2007 *Adv. Mater.* **19** 3364
- [23] Matturro M G, Reynolds R P, Kastrop R V, Pictroski C F 1985 *J. Am. Chem. Soc.* **108** 2775
- [24] Schafferhans J, Baumann A, Wagenpfahl A, Deibel C, Dyakonov V 2010 *Org. Electron.* **11** 1693

- [25] Liao H H, Yang C M, Liu C C, Horng S F, Meng H F,  
Shy J T 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 104506  
[26] Chabinyo M L, Stree R A, Northrup J E 2007 *Appl.*

- Phys. Lett.* **90** 123508  
[27] He Z, Davis F J, Olley R H, Mitchell G R 2001 *Polymer*  
**42** 5351

## Effect of multiple temperature-step annealing on the performances of polymer solar cells\*

Sun Kai He Zhi-Qun<sup>†</sup> Liang Chun-Jun

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Institute of Optoelectronic Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

( Received 21 September 2013; revised manuscript received 31 October 2013 )

### Abstract

In the paper, a series of bulk-heterojunction polymer solar cells using poly(3-hexyl-thiophene) (P3HT) as a donor and indene-C60 bisadduct (ICBA) as an acceptor is fabricated. Effect of annealing process on the cell characteristics is investigated. It is found that the cell having a multiple temperature-step annealing can distinctly improve its photovoltaic performance. At the same time the multiple temperature-step annealing process can also significantly improve the life time of the device. The device maintains a stable performance without being encapsulated.

**Keywords:** polymer solar cell, stability, temperature-step annealing, polarization

**PACS:** 88.40.jr, 72.40.+w, 73.61.Wp

**DOI:** 10.7498/aps.63.048801

---

\* Project supported by the International Science and Technology Cooperation Program of China (Grant No. 2008DFA61420), the Fundamental Research Fund for the Central Universities of China (Grant No. 2013JBZ004), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 21174016), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20120009110031).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zhqhe@bjtu.edu.cn](mailto:zhqhe@bjtu.edu.cn)