

NPB 阳极缓冲层对反型结构聚合物太阳能电池性能的影响*

龚伟 徐征[†] 赵谔玲 刘晓东 杨倩倩 樊星

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

(2013年9月30日收到; 2013年12月17日收到修改稿)

制备了给体材料为 poly(3-hexylthiophene)(P3HT), 受体材料为 [6, 6]-phenyl-C60-butyric acid methyl ester(PCBM), 器件结构为 ITO/ZnO/P3HT:PCBM/NPB(0, 1, 5, 10, 25 nm)/Ag 的反型体异质结聚合物太阳能电池. 不同厚度的 N, N' -diphenyl- N, N' -bis(1-naphthyl)-1, 1'-biphenyl-4, 4'-diamine(NPB) 阳极缓冲层被用来改善器件性能, 研究了 NPB 阳极缓冲层对器件特性的影响. 研究发现, 1 nm 厚的 NPB 改善了器件的载流子收集效率, 增加了器件的短路电流与开路电压. 当 NPB 缓冲层的厚度达到 25 nm 时, 过厚的 NPB 导致串联电阻增加, 使得器件特性大幅下降. 通过电容-电压测试, 进一步研究了不同厚度 NPB 对器件载流子注入与收集的影响, 1 nm 厚的 NPB 修饰并没有改善器件的载流子注入但是增加了器件对光生载流子的收集效率, 过厚的 NPB 使得自由载流子的复合占据主导. 适合厚度的 NPB 可以作为一种阳极缓冲层材料应用于聚合物太阳能电池提高器件特性.

关键词: 聚合物太阳能电池, 缓冲层, 载流子传输, 电容-电压测试

PACS: 88.40.H-, 84.60.Jt, 84.37.+q, 85.30.-z

DOI: 10.7498/aps.63.078801

1 引言

随着对绿色能源需求的增长, 聚合物太阳能电池已经成为了清洁能源生产的一种选择. 但是相比于硅基的无机太阳能电池, 较低的能量转换效率(PCE)及较差的稳定性制约了其商业化进程. 对活性层与电极之间的界面进行修饰已经成为一种提高器件特性的方法, 界面修饰可以促进载流子的注入与收集, 特别是可以改善活性层与电极的能级匹配. 很多缓冲层材料, 比如 LiF^[1-3], MoO₃^[4,5], V₂O₅^[6], Alq₃^[7], BCP^[8] 等已经被用于聚合物电池的界面修饰中, 这些缓冲层潜在的工作机理一般认为是形成隧穿结从而增加内建电场或者形成界面偶极层从而改变电极的功函数^[9-11]. NPB 作为一

种空穴传输材料已经被广泛应用于有机发光二极管(OLED)^[12-14], 但是在国内外的研究中却很少将其应用于太阳能电池中. 由于 NPB 的能级结构与 MoO₃ 的能级结构类似, 而且 NPB 的蒸镀温度比 MoO₃ 要低, 因此此文中采用 NPB 作为阳极缓冲层材料, 研究其对反型体异质结结构聚合物太阳能电池性能的影响.

电流密度-电压($J-V$)测试已经被广泛用于表征太阳能电池的基本特性参数, 但是 $J-V$ 测试曲线只是提供了有限的有关器件载流子传输机理的信息. 电容是有关器件中电荷积累的物理量, 在双层异质结有机太阳能电池中, 电容-电压($C-V$)测试已经用来表征器件中的电荷积累效应^[15]. 在体异质结结构太阳能电池中, $C-V$ 被用来研究器件内及界面处的电荷积累^[16,17]. 电容与导纳谱也经

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(批准号: 2010CB327704)、教育部博士点基金(批准号:20130009130001)、国家自然科学基金(批准号: 51272022)、教育部博士点基金(批准号: 20120009130005)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-10-0220)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 2012JBZ001)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhengxu@bjtu.edu.cn

常被用来分析有机半导体器件中的载流子传输机理^[18-20]. $C-V$ 测试有望成为一种直接探测体异质结聚合物太阳能电池中电荷传输的新途径. 尽管国内外研究人员在利用 $C-V$ 测试分析太阳能电池工作原理方面做了大量工作, 但是主要集中于分析器件暗条件下的 $C-V$ 特性, 而此文中不仅利用暗条件下的 $C-V$ 特性研究器件工作机理, 而且在此基础上还利用光照条件下的 $C-V$ 曲线研究体异质结结构器件中的载流子收集特性.

此文中, 研究了不同厚度 NPB 对体异质结反型结构聚合物太阳能电池特性的影响, 活性层材料的构成中给体材料为 P3HT, 受体材料为 PCBM, 器件结构为 ITO/ZnO/P3HT:PCBM/NPB(0, 1, 5, 10, 25 nm)/Ag. 实验发现, 经过 1 nm 厚的 NPB 修饰后, 器件的短路电流 (J_{sc}) 及开路电压 (V_{oc}) 都有增加, 当 NPB 修饰层厚度达到 25 nm 时, 出现了“S”形状的 $J-V$ 曲线. 为了进一步探索 NPB 对器件载流子传输特性的影响, 通过 $C-V$ 测试进行了研究.

2 研究方法

所有的器件都制备于 ITO 玻璃衬底上, 使用前用清洗剂、酒精及去离子水依次清洗后用氮气吹干备用. 制备 ZnO 前驱液, 称取 5.495 g 二水合乙酸锌, 溶于 50 mL 乙二醇甲醚中, 加入等浓度的乙醇胺 (1.525 g), 在 60 °C 下, 搅拌 30 min, 得到 0.5 mol/L 稳定透明的溶胶. 将制备好的 ZnO 前驱液以 3000 r·min⁻¹ 旋涂于 ITO 玻璃衬底上, 空气中 360 °C 退火 20 min. 制备 P3HT:PCBM 质量比为 1:1 的混合溶液, 溶液总浓度为 30 mg·mL⁻¹, 溶剂为氯苯. 在手套箱中将 P3HT:PCBM 溶液以 2000 r·min⁻¹ 旋涂于 ITO/ZnO 衬底上, 随后 140 °C 退火 15 min. 不同厚度的 NPB 薄膜通过真空热蒸发沉积于 P3HT:PCBM 之上, 之后蒸镀 Ag 电极 100 nm, 真空度为 3×10^{-4} Pa, 器件有效面积为 0.1 cm².

薄膜的吸收光谱由岛津 UV-3101 型吸收光谱仪测量, 电流密度-电压 ($J-V$) 及电容-电压 ($C-V$) 曲线由 Keithley 4200 半导体测试系统测得. 太阳能模拟器 (ABET Sun 2000) 输出光为标准 AM1.5G 光谱, 光强为 100 mW/cm². 所有测试都是在大气环境和常温下进行的.

3 结果与讨论

器件结构如示意图 1 所示, 其中 ITO 作为阴极, ZnO 作为电子传输与空穴阻挡层, Ag 作为阳极, NPB 被用作阳极缓冲层材料应用于反型 P3HT:PCBM 体异质结聚合物太阳能电池中.

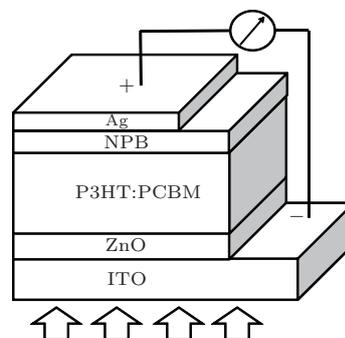


图1 不同厚度 NPB 修饰反型体异质结聚合物太阳能电池的器件结构示意图 (ITO/ZnO/P3HT:PCBM/NPB (0, 1, 5, 10, 25 nm)/Ag)

3.1 NPB 缓冲层对吸收光谱的影响

测试了不同厚度 NPB 缓冲层对 P3HT:PCBM/NPB 薄膜吸收光谱的影响, 薄膜结构为: 石英玻璃/P3HT:PCBM/NPB(0, 1, 5, 10, 25 nm). 从图 2 中可以得到, 1 nm 厚 NPB 对 P3HT:PCBM 薄膜的吸收几乎没有影响. 随着 NPB 修饰层厚度的逐渐增加, 在波长为 300—400 nm 范围内, 薄膜的吸收逐渐增强, 这主要是因为 NPB 的吸收(插图)集中在这段波长范围内. 值得注意的是, 在波长为 500—800 nm 之间, 随着 NPB 厚度的增加, 薄膜的吸收强度出现减小的趋势, 特别是当 NPB 厚度为 25 nm 时, 在这一波长范围内

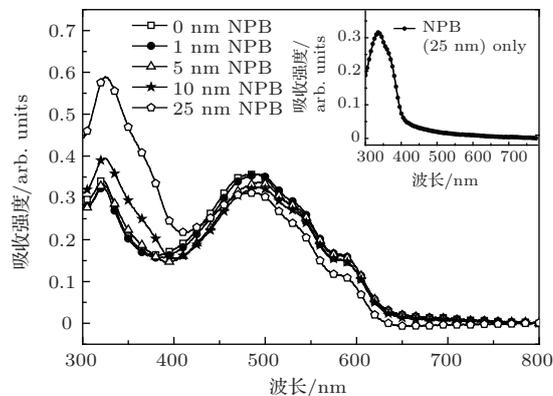


图2 不同厚度 NPB 修饰 P3HT:PCBM 薄膜的吸收光谱图, 薄膜结构为: 石英玻璃/P3HT:PCBM/NPB(0, 1, 5, 10, 25 nm) (其中插图为只有 25 nm 厚 NPB 的吸收光谱)

吸收强度明显下降,引起这种变化的原因有待进一步研究.

3.2 器件的 $J-V$ 特性

测试了不同厚度NPB阳极缓冲层修饰的器件 $J-V$ 特性. 由图3(a)暗特性曲线可以看出,经过1 nm厚的NPB修饰后,器件的暗电流减小.这主要是由于NPB阳极缓冲层会抑制活性层P3HT:PCBM与Ag电极界面处的表面复合,从而减小暗电流.随着NPB厚度的增加,表面复合的抑制效果更加明显,但同时过厚的NPB会增加器件的串联电阻,从而降低器件的特性.特别是当NPB的厚度达到25 nm时,器件的暗电流被明显降低,这是由过厚的NPB大幅增加器件的串联电阻所导致.

从光照条件下的 $J-V$ 曲线可以得到,经过1 nm厚的NPB修饰,相比于没有经过修饰的器件, V_{oc} 和 J_{sc} 都有明显改善.其中 J_{sc} 的增加主要是由于NPB的激子阻挡作用.活性层给体材料P3HT吸收入射光产生激子后,光生激子容易在其与Ag的界面处猝灭,NPB的加入能够有效阻止激子猝灭的发生,相当于增加了器件中的激子总量,从而增加可被外电路收集的光生自由载流子的总数,最后增加短路电流的大小.开路电压的大小主要由给体材料的HOMO(highest occupied molecular orbital)与受体材料的LUMO(lowest unoccupied molecular orbital)之差所决定,但是受很多其他因素影响.首先暗电流的大小可以影响开路电压的大小 [21,22],

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \left(\ln \frac{J_{ph}}{J_s} + 1 \right), \quad (1)$$

其中, k 为波尔兹曼常数, T 为温度, q 为元电荷, n 理想因子, J_{ph} 为光电流, J_s 为反向饱和电流.

从(1)式可以说明,通常小的暗电流或小的反向饱和电流会得到高的开路电压.由之前所分析,经过1 nm厚NPB修饰后,相比于没有经过NPB修饰的器件,暗电流被减小,由(1)式可推断经过1 nm厚NPB修饰的器件比没有经过NPB修饰的器件开路电压要大,这与实验结果相一致.另外,根据文献报道,缓冲层的加入会形成隧穿结从而增加内建电场或者形成界面偶极层从而改变电极的功函数 [9-11],无论是形成隧穿结或者改变电极功函数,最终的结果都是影响器件的内建电场,而内建

电场的变化趋势与器件开路电压的变化趋势相一致,因此经过1 nm厚NPB修饰后,器件开路电压的变化也是由缓冲层的加入所引起的内建电场变化所影响的.从图3(b)的光特性曲线还可以看到随着NPB修饰层厚度的继续增加,器件的开路电压逐渐减小,这是由于随着NPB厚度的继续增加,器件的串联电阻也会增加,导致一部分的电压在NPB上损耗,从而减小了开路电压.当NPB的厚度达到25 nm时,界面缓冲层过厚,器件中的光生载流子很难穿过缓冲层被外电路收集,导致载流子在器件内的大量复合,出现了“S”形状的 $J-V$ 曲线,最终导致器件特性的大幅降低.

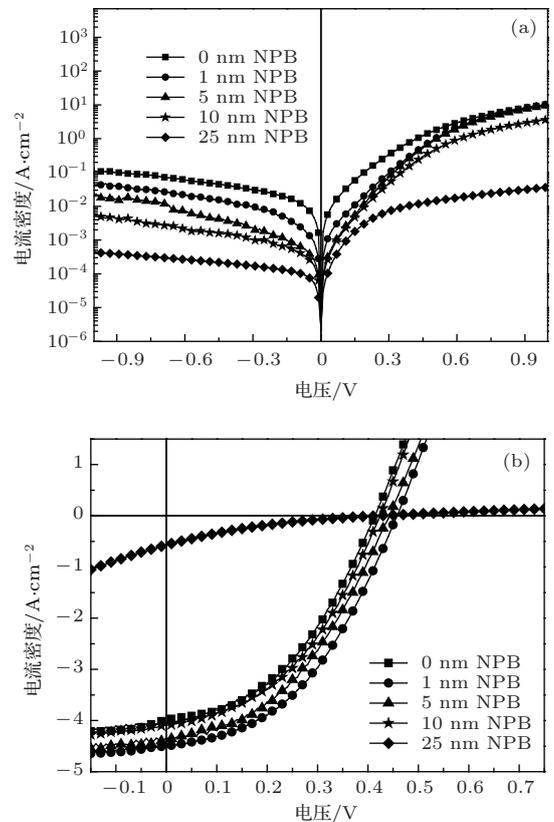


图3 暗条件(a)与光照条件(b)下不同厚度NPB修饰的器件电流密度-电压特性曲线(器件结构为: ITO/ZnO/P3HT:PCBM/NPB(0, 1, 5, 10, 25 nm)/Ag)

3.3 器件的 $C-V$ 特性

为了进一步研究NPB阳极缓冲层对器件电荷传输的影响,测试了暗条件及光照条件下的电容-电压特性曲线.在暗条件下,器件的电容值随电压而变化,可以区分为三个部分 [23]:

1) 在大的反向电压下,器件等效于平行板电容

器, 此时电容-电压特性可以描述为

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}, \quad (2)$$

其中, C 为器件的电容值, A 为器件的有效面积, d 为器件厚度, ϵ_r 为相对介电常数, ϵ_0 为真空介电常数.

2) 在小的反向及低的正偏压范围, 电容服从 Mott-Schottky 表达式

$$C = A \sqrt{\frac{\epsilon_r \epsilon_0 q N_A}{2(V_{bi} - V)}}, \quad (3)$$

其中 N_A 为活性层材料的掺杂浓度, V_{bi} 为器件的内建电场.

3) 在接近或超过内建电场的大正向偏压下, 器件的电容由从两个电极注入的载流子所主导, 这个电容被称作化学电容或者扩散电容.

容值越小. 当电压为正向及在最大电容值对应的电压 (V_{Cmax}) 之前这段范围, 器件的电容值主要受由电极注入的载流子所影响. 器件的暗特性 $J-V$ 曲线反映了器件的载流子注入情况, 由图 3(a) 可以得到, 1 nm 厚 NPB 修饰层的器件暗电流比没有修饰的器件暗电流低, 即 1 nm 厚的 NPB 修饰层没有增加器件的载流子注入, 相反却降低了. 同样, 图 4(a) 中在 0—0.3 V 的范围内, 1 nm 厚的 NPB 修饰后, 器件的电容值比没有修饰的器件电容低, 在这一电压范围内器件的化学电容越低说明载流子注入效率越低. 因此从 $J-V$ 及 $C-V$ 曲线得出结论, NPB 的修饰并没有提高器件的载流子注入. 特别是当 NPB 厚度达到 25 nm, 器件的电容值在整个电压范围都比较低, 形状相对平缓, 说明过厚的 NPB 严重阻碍了空穴从 Ag 电极向活性层材料的注入.

在足够充足的光照条件下, 需要从电容的基本定义微分电容来分析器件的电容-电压特性

$$C = \frac{dQ}{dV}, \quad (4)$$

其中, Q 为器件内积累的电量, V 为外加电压.

根据 (4) 式可知, 器件内积累的电荷数越少, 器件的电容值越小. 如果器件中的光生载流子在复合前能有效地被外电路收集, 器件的电容值将会相对较小. 从图 4(b) 的光特性 $C-V$ 曲线可以看到, 经过 1 nm 厚的 NPB 修饰后, 在 V_{Cmax} 之前的电压范围内器件的电容值相对较低, 说明经过 1 nm 厚的 NPB 修饰器件中的载流子收集效率较高. 如上分析, 文献报道缓冲层的加入会形成隧穿结从而增加内建电场或者形成界面偶极层从而改变电极的功函数^[9-11], 此处 1 nm 厚 NPB 对载流子收集效率的提高可以归因为两点: 首先内建电场的增加有利于光生空穴与电子通过漂移过程向各自电极移动, 从而提高电极对自由载流子的收集; 另外, 界面偶极层的形成改变电极的功函数, 这样会减小电极从活性层收集自由载流子的界面势垒. 值得注意的是, 经过 1 nm 修饰后, 器件 $C-V$ 曲线的 V_{Cmax} 相对于没有 NPB 修饰的器件 V_{Cmax} 有增加, 这一现象与文献 [24] 中报道的结论相符合, 即 V_{Cmax} 的变化趋势与器件开路电压的变化趋势相一致.

当 NPB 修饰层的厚度达到 25 nm 时, 从图 4(b) 中可以看出器件的 $C-V$ 曲线相对平缓. 首先可以看出 25 nm 厚的 NPB 是不利于载流子收集的. 原因是, 在电压为 -1 V 的位置, 器件的外加电

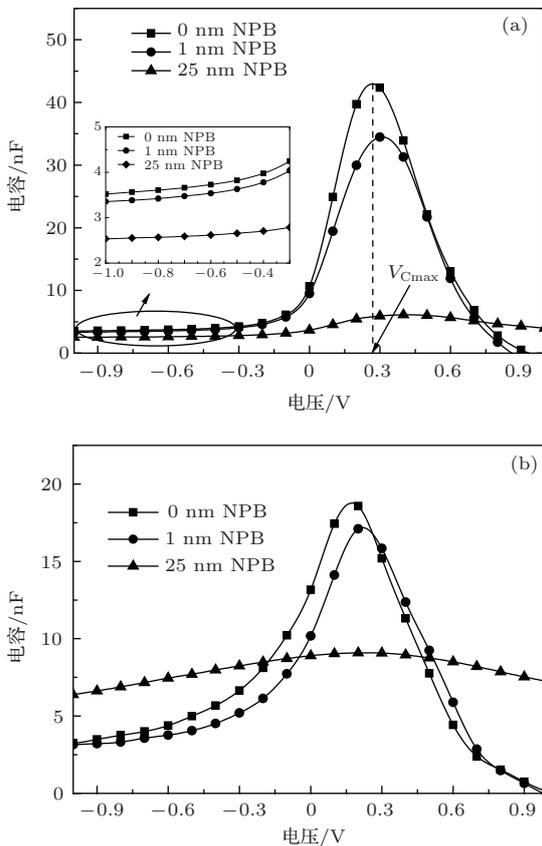


图4 暗条件(a)与光照条件(b)下不同厚度NPB修饰的器件电容-电压特性曲线(器件结构为: I-TO/ZnO/P3HT:PCBM/NPB(0, 1, 5, 10, 25 nm)/Ag, 图(a)中的插图为在-1.0与-0.3 V之间放大的 $C-V$ 特性曲线)

当器件的厚度越厚时, 由 (2) 式可知器件电容值越小, 这与图 4(a) 插图中的实验结果相一致, 在大的反向电压下, 随着 NPB 厚度的增加, 器件的电

场方向与器件内建电场方向相同, 此时的载流子收集效率是最高的, 1 nm 厚 NPB 修饰的器件与没有 NPB 修饰的器件在 -1 V 处有几乎相同的电容值可以证明这一点. 而 25 nm 厚 NPB 修饰的器件电容值明显增高, 说明这个厚度的 NPB 缓冲层不利于载流子的收集. 继续减小反向电压, 没有 NPB 修饰及 1 nm 厚 NPB 修饰的器件电容值开始上升, 说明器件中的载流子收集效率变低, 积累于器件中. 然而 25 nm 厚修饰的器件电容虽然也有缓慢增加, 但是并不明显, 这主要是由于 25 nm 厚 NPB 修饰的器件中载流子复合机理占据了主导作用, 过厚的缓冲层厚度会增加光生载流子的复合.

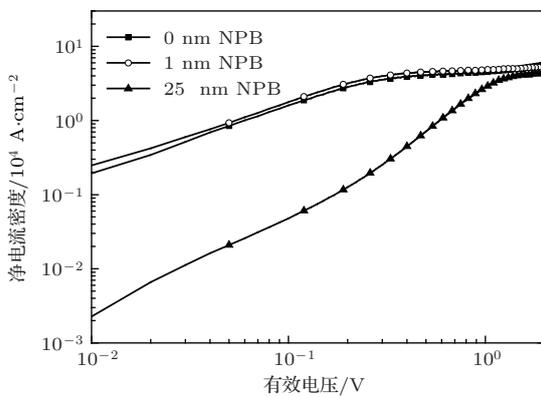


图5 器件的净电流密度-有效电压特性曲线. 净电流密度 J_{ph} 由光电流密度与暗电流密度之差 ($J_L - J_D$) 算得, 有效电压 V_{eff} 由 $V_0 - V$ 算得, 其中 V_0 为 J_{ph} 为零时对应的电压值

为了进一步研究不同厚度 NPB 缓冲层对载流子传输与复合的影响, 绘出了净电流密度 J_{ph} 与有效电压 V_{eff} 之间的关系曲线. 净电流密度 J_{ph} 由光电流密度 (J_L) 与暗电流密度 (J_D) 之差算得, 有效电压 V_{eff} 由 $V_0 - V$ 算得, 其中 V_0 为 J_{ph} 为零位置对应的电压值, V 为外加电压^[25]. 在 V_{eff} 为 1.5 V 左右, 不同厚度 NPB 修饰的器件净电流密度达到饱和, 其中经过 1 nm 厚 NPB 修饰与没有经过 NPB 修饰的器件净电流密度几乎相同, 说明两个器件所产生的光生激子被有效解离成自由载流子并且被外电路收集. 当 NPB 修饰厚度达到 25 nm 时, V_{eff} 为 1.5 V 时对应的净电流值相对较小, 说明光生激子的解离或者载流子收集效率不高, 即激子或者载流子复合程度较强. 在小的有效电压范围内 ($V_{eff} < 0.3$ V), 25 nm 厚 NPB 修饰过的器件 J_{ph} 下降幅度明显大于其他器件的 J_{ph} 下降幅度, 这说明 25 nm 厚的 NPB 使得光生激子解离效率大幅降低

或者载流子收集效率明显下降, 也就是说双分子间的载流子复合占据主导^[22,26], 导致器件填充因子降低并且出现“S”形状的 $J-V$ 曲线.

4 结 论

研究了不同厚度 NPB 对反型结构聚合物太阳能电池特性的影响. 1 nm 厚的 NPB 缓冲层增加了器件对光生载流子的收集, 增加了器件的短路电流与开路电压. 过厚的 NPB 大大增加器件串联电阻, 增加器件内自由载流子的复合, 25 nm 厚的 NPB 修饰大幅降低光生激子的解离与自由载流子的收集效率, 大幅降低器件性能. 适当厚度 NPB 缓冲层的作用可以归结为: 1) 缓冲层的加入可以抑制活性层/电极界面处的表面复合; 2) 阻止光生激子在活性层/电极界面的猝灭; 3) 减小了活性层/电极界面的能级势垒, 有利于载流子收集; 4) 有助于提高器件的内建电场, 促进器件内载流子传输. NPB 可以被用作阳极缓冲层材料应用于聚合物太阳能电池, 适当厚度的 NPB 修饰层能够提高器件特性.

参考文献

- [1] Jonsson S K M, Carlegrim E, Zhang F, Salaneck W R, Fahlman M 2005 *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** 3695
- [2] Yook K S, Lee J Y 2010 *J. Ind. Eng. Chem.* **16** 230
- [3] Liu X D, Leeb J Y, Guob L J 2013 *Org. Electron.* **14** 469
- [4] Zhao D W, Tan S T, Ke L, Liu P, Kyaw AKK, Sun X W, Lo G Q, Kwong D L 2010 *Sol. Energy. Mater. Sol. C* **94** 985
- [5] Pan H B, Zuo L J, Fu W F, Fan C C, Andreasen B, Jiang X Q, Norrman K, Krebs F C, Chen H Z 2013 *Org. Electron.* **14** 797
- [6] Shrotriya V, Li G, Yao Y, Chu C-W, Yang Y 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 073508
- [7] Liu X D, Xu Z, Zhang F J, Zhao S L, Zhang T H, Gong W, Song J L, Kong C, Yan G, Xu X R 2010 *Chin. Phys. B* **19** 118601
- [8] Liu X D, Xu Z, Zhang F J, Zhao S L, Zhang T H, Gong W, Yan G, Kong C, Wang Y S, Xu X R 2011 *Chin. Phys. B* **20** 068801
- [9] Cai W Z, Gong X, Cao Y 2010 *Sol. Energy. Mater. Sol. C* **94** 114
- [10] Hung L S, Tang C W, Mason M G 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 152
- [11] Zhang F J, Zhao D W, Zhuo Z L, Wang H, Xu Z, Wang Y S 2010 *Sol. Energy. Mater. Sol. C* **94** 2416
- [12] Li Z F, Wu Z X, Jiao B, Liu P, Wang D D, Hou X 2012 *Chem. Phys. Lett.* **527** 36

- [13] Xie G H, Xue Q, Chen P, Tao C, Zhao C M, Lu J H, Gong Z X, Zhang T Y, Huang R, Du H 2010 *Org. Electron.* **11** 407
- [14] Halls M D, Tripp C P, Schlegel H B 2001 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **3** 2131
- [15] Wang J C, Ren X C, Shi S Q, Leung C W, Chan P K L 2011 *Org. Electron.* **12** 880
- [16] Zhao C, Qiao X F, Chen B B, Hu B 2013 *Org. Electron.* **14** 2192
- [17] Chen B B, Qiao X F, Liu C M, Zhao C, Chen H C, Wei K H, Hu B 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 193302
- [18] Shrotriya V, Yang Y 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 054504
- [19] Tsang S W, So S K, Xu J B 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 013706
- [20] Garcia-Belmonte G, Munar A, Barea E M, Bisquert J, Ugarte I, Pacios R 2008 *Org. Electron.* **9** 847
- [21] He C, Zhong C M, Wu H B, Yang R Q, Yang W, Huang F, Bazan G C, Cao Y 2010 *J. Mater. Chem.* **20** 2617
- [22] He Z C, Zhong C M, Huang X, Wong W Y, Wu H B, Chen L W, Su S J, Cao Y 2011 *Adv. Mater.* **23** 4636
- [23] Fabregat-Santiago F, Garcia-Belmonte G, Mora-Seró I, Bisquert, J 2011 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **13** 9083
- [24] Wang M D, Zheng S Z, Wan X, Su Y R, Ke N, Zhao N, Wong K Y, Xu J B 2013 *Sol. Energ. Mater. Sol. C* **108** 17
- [25] Mihailetchi V D, Wildeman J, Blom P W M 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 126602
- [26] Shuttle C G, Hamilton R, O'Regan B C, Nelson J, Durrant J R 2010 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **107** 16448

Effects of NPB anode buffer layer on the performances of inverted bulk heterojunction polymer solar cells*

Gong Wei Xu Zheng[†] Zhao Su-Ling Liu Xiao-Dong Yang Qian-Qian Fan Xing

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

(Received 30 September 2013; revised manuscript received 17 December 2013)

Abstract

Inverted configuration bulk heterojunction polymer solar cells based on ITO/ZnO/P3HT:PCBM/NPB/Ag were fabricated, with the donor material being poly(3-hexylthiophene)(P3HT), and the acceptor material being [6, 6]-phenyl-C60-butyric acid methyl ester(PCBM). *N*, *N'*-diphenyl-*N*, *N'*-bis(1-naphthyl)-1, 1'-biphenyl-4, 4'-diamine(NPB) thin anode buffer layers with different thicknesses, which were used to improve the performances of the devices; and the effects of NPB anode buffer were investigated. The insertion of 1 nm thick NPB improves charge collection of the device, both of the short circuit current and open circuit voltage are enhanced. When the thickness of NPB reaches 25 nm, the series resistances are significantly increased, leading to reduced device performances. Effects of different thicknesses of NPB on charge injection and collection are investigated by capacitance-voltage measurements. NPB with 1 nm thickness improves charge collection of the device but without improving charge injection, and the charge recombination mechanism is dominant if the NPB layer is too thick. NPB thin layer with appropriate thickness could be used to enhance the performances of bulk heterojunction polymer solar cells.

Keywords: polymer solar cells, buffer layer, charge carrier transport, capacitance-voltage measurement

PACS: 88.40.H-, 84.60.Jt, 84.37.+q, 85.30.-z

DOI: 10.7498/aps.63.078801

* Project supported by the National Grand Fundamental Research 973 Program of China (Grant No. 2010CB327704), the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, China (Grant No. 20130009130001), the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51272022), the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(Grant No. 20120009130005), the New Century Excellent Talents in University(Grant No. NCET-10-0220), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(Grant No. 2012JBZ001).

† Corresponding author. E-mail: zhengxu@bjtu.edu.cn