

氧化锌掺铝绒面薄膜在有机光伏电池中的应用

张科 胡子阳 黄利克 徐洁 张京 诸跃进

ZnO:Al textured films for improved performance in organic photovoltaics

Zhang Ke Hu Zi-Yang Huang Li-Ke Xu Jie Zhang Jing Zhu Yue-Jin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 178801 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.178801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.178801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I17>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

物理学报.2014, 63(4): 048801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.048801>

阴极修饰层对 SubPc/C₆₀ 倒置型有机太阳能电池性能的影响

Effect of various cathode modifying layers on the performances of SubPc/C₆₀ based inverted organic solar cells

物理学报.2013, 62(12): 128803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.128803>

梯度掺杂体异质结对有机太阳能电池光电转换效率的影响

Influence of gradient doping on photoelectric conversion efficiency of organic photovoltaic devices

物理学报.2013, 62(8): 088801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.088801>

4,4'-三(N-3-甲基苯基-N-苯基氨基)三苯胺掺杂 MoO_x 作为空穴传输层对有机太阳电池性能的影响

Analysis of organic photovoltaic devices with MoO_x doped 4,4'-tris(N-(3-methylphenyl)-N-phenylamin) triphenylamine as hole transport layer

物理学报.2012, 61(8): 088802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.088802>

基于半经验模型对大面积染料敏化太阳电池性能影响因素的研究

Study of influencing factors for performance of large-scale dye-sensitized solar cells based on the semi-empirical model

物理学报.2012, 61(7): 078801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.078801>

氧化锌掺铝绒面薄膜在有机光伏电池中的应用*

张科 胡子阳[†] 黄利克 徐洁 张京 诸跃进

(宁波大学微电子科学与工程系, 宁波大学宁波市非线性海洋和大气灾害系统协同创新中心, 宁波 315211)

(2015年3月21日收到; 2015年5月5日收到修改稿)

目前有机光伏电池的吸光活性层电学传输特性和光学吸收特性的不匹配是制约其能量转换效率提升的主要原因之一. 通过陷光结构对入射光进行调控, 提高电池对光的约束和俘获能力从而达到“电学薄”和“光学厚”的等效作用, 是解决有机光伏电池电学和光学不匹配的有效手段. 本文采用湿法刻蚀技术获得了系列时间梯度的绒面氧化锌掺铝薄膜, 并将其作为有机光伏电池的入射陷光电极, 显著增强了电池的光学吸收. 研究发现, 当使用浓度0.5%的稀HCL腐蚀30 s后的氧化锌掺铝薄膜作为入射电极后, 电池的光电性能和效率显著增强. 基于此绒面电极电池的电流密度比平面结构的电池提高了8.17%, 效率改善了11.29%. 通过对绒面电极表面的修饰处理, 实现了电极与光活性层之间良好的界面接触, 从而减小了对电池的开路电压和填充因子的影响.

关键词: 有机光伏电池, 绒面电极, 氧化锌掺铝薄膜, 湿法刻蚀

PACS: 88.40.jr, 88.40.hj, 07.79.Cz, 07.60.Rd

DOI: 10.7498/aps.64.178801

1 引言

有机光伏电池具有成本低, 重量轻, 生产工艺简单, 可采用湿法大面积制备与柔性衬底兼容等特点, 有机电池已经成为近年来的研究热点^[1-3]. 有机电池活性层的厚度一般在100—200 nm左右, 而激子的扩散长度却只有10 nm左右, 激子的扩散长度远远低于活性层的厚度^[4,5]. 增加活性层厚度能提高入射光的利用率和激子收益, 但过厚的活性层将导致激子和载流子的复合概率增大, 电池的电学性能反而下降; 而减小活性层厚度虽然有利于激子解离和载流子的收集, 但电池对光的吸收会相应的下降, 从而造成电池效率下降. 由此可见, 有机光伏电池的吸光活性层的电学传输特性和光学吸收特性的不匹配是制约其效率提升的主要原因之一. 通过陷光结构对入射光波进行调控, 提升电池对光的约束和俘获能力从而达到“电学薄”和“光学厚”的等效作用, 是解决有机光伏电池电学和光学不匹

配的有效手段. 因此, 在制备有机光伏器件的过程中必须考虑光学性能和电学性能的匹配问题. 在不增加光活性层厚度的前提下, 采用陷光结构设计, 延长光在活性层中的光程或调节光场分布是兼顾电池光学和电学性能的有效解决方案.

目前为止, 研究人员设计了多种陷光结构. 金属纳米粒子陷光结构利用光散射原理可对入射光的光程增加数十倍, 从而增强光的吸收^[6]. 国内外利用陷光结构改善有机电池的效率取得了很大的进展. 在金属光栅电极陷光结构中, 如果顶部和底部均为光栅结构, 局域表面等离子共振、表面等离子激元、法布里-珀罗共振和导波模式会同时发生作用对光进行吸收和约束^[7-10]. 光子晶体陷光结构也被认为是先进光管理的一个研究方向, Ko等制作出光子晶体结构型的有机光伏电池的效率提高了大约70%^[11]. Chen等制作的周期性光栅结构的有机电池中, 电流密度从7.07 mA/cm²增加到了10.76 mA/cm²^[12]. Lee等利用商业阳极氧化铝模板进行纳米压印制备了陷光结构的有机电池, 效率

* 国家自然科学基金(批准号: 11304170, 11374168, 51302137)、浙江省自然科学基金(批准号: LQ13F050007)、浙江省教育厅(批准号: Y201326905)、宁波市自然科学基金(批准号: 2013A610033)和宁波大学王宽诚基金资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: huziyang@nbu.edu.cn

增加了25.85%^[13]. 此外通过降低电池的光学反射和利用表面等离子共振效应可极大地增加活性层的本征吸收, 从而改善有机电池的量子效率^[14,15]. 目前商业化氧化锌掺铝(AZO)绒面陷光电极在硅基薄膜电池中已得到了广泛的应用^[16-18]. 绒面AZO的表面均方根粗糙度(RMS)可达数百纳米, 并且可以通过简单的湿法刻蚀或者直接制绒的工艺得到织构化的表面, 然而在有机电池中并没有得到很好应用. 研究者们担心粗糙的电极表面会影响到后续沉积薄膜的过程, 而薄膜的厚度分布不均匀容易引起电池短路. RMS过高的绒面电极将会引起界面缺陷态的增加, 导致电池性能下降.

本文采用湿法刻蚀技术获得了系列时间梯度的绒面AZO薄膜, 通过对绒面电极表面进行修饰, 实现了电极和活性层之间的良好界面接触, 从而保证了在不损失开路电压和填充因子的前提下增强了对吸收光的有效利用, 获得了比平面电极的电池性能更高的陷光电池. 通过对AZO薄膜修饰前后的光学特性, 形貌特征的对比, 以及对电池整体性能参数的分析, 解释了电池性能改善的原因.

2 实验

整个有机光伏器件的制备过程如下: 前电极选用珠海凯为(kaivo)电子元器件公司生产的AZO薄膜. 先将切割好的AZO玻璃(2.9 cm × 2.9 cm)分别用去离子水、酒精和异丙醇超声清洗15 min, 并烘干. 然后使用浓度为0.5%的稀HCL刻蚀AZO玻璃, 时间分别为0 s, 10 s, 20 s, 30 s, 40 s. AZO玻璃刻蚀完后再进行清洗并干燥. 在旋涂空穴传输层PEDOT:PSS (CLEVIOS P VP AI 4083)之前, 进行15 min紫外臭氧处理. 旋涂PEDOT:PSS时, 先低速后高速, 转速和时间分别为1000转10 s和4000转30 s. 旋涂完后在140 °C加热板上加热15 min. P3HT与PCBM按10 : 8的比例配制活性层溶液, 并采用700转10 s的旋涂方法涂在PEDOT:PSS上. 随后将旋涂完的样品放入镀膜机中, 在 4.5×10^{-4} Pa的真空条件下蒸镀LiF和Al电极. 器件的结构如下: AZO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al, 其陷光结构示意图如图1所示.

透射光谱、吸收光谱和反射光谱用紫外可见近红外分光光度计(Cary 5000, Agilent, 美国)进行测试. 原子力显微镜(Multimode 8,

Bruker, 德国)和扫描电子显微镜(SU-70, Hitachi, 日本)用来观察AZO, AZO/PEDOT:PSS, AZO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM的表面形貌. *J-V*曲线通过太阳光模拟器(91192 A, Newport, 美国)在AM 1.5(100 mW/cm²), 温度为25 °C的环境下进行测试获得, 量子效率由仪器(2936-C, Newport, 美国)测量得到.

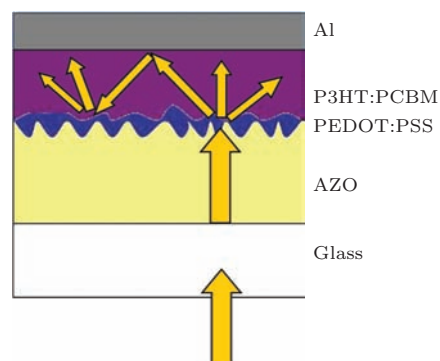


图1 (网刊彩色) 器件的陷光结构示意图

Fig. 1. (color online) Device schematic with light-trapping.

3 结果与讨论

图2显示了不同腐蚀时间下AZO薄膜的SEM图样, 腐蚀时间分别是0 s, 10 s, 20 s, 30 s, 40 s. 随着腐蚀时间的增加, 薄膜表面弹坑的特征尺寸逐渐增大, RMS也随之增大. 经过腐蚀之后的形貌类似于U形弹坑, 没有被腐蚀的表面呈现出微小的V形弹坑, 前期的研究表明U形弹坑表面形貌电极在电池的效率上有着比V形弹坑更好的表现^[19]. 腐蚀10 s的样品表面腐蚀程度很低, 弹坑呈现出小、少、浅的特点. 20 s的样品薄膜腐蚀程度明显加强, 但在弹坑周围仍有薄膜没有完全脱落. 30 s腐蚀的样品表面分布着标准的U形弹坑, 特征尺寸在600 nm左右; 40 s的腐蚀的样品在弹坑表面附着了许多的小洞, 腐蚀程度明显过度. 虽然透射率随着膜厚的降低会增加, 但是薄膜的电阻也随之增加, 电学传输性能将会受到抑制.

腐蚀后的薄膜都具有起伏不平的粗糙表面, 这使得后续沉积的修饰层和有机活性层薄膜呈现出不均匀性, 带来电池活性层与电极的界面接触等问题, 进而影响电池的整体性能. 图3是AZO薄膜腐蚀0 s和30 s后以及旋涂修饰层PEDOT:PSS之后的AFM图. 通过对比AZO薄膜0 s和30 s腐蚀后的图片可以得出与SEM图分析一致的结论: 随着

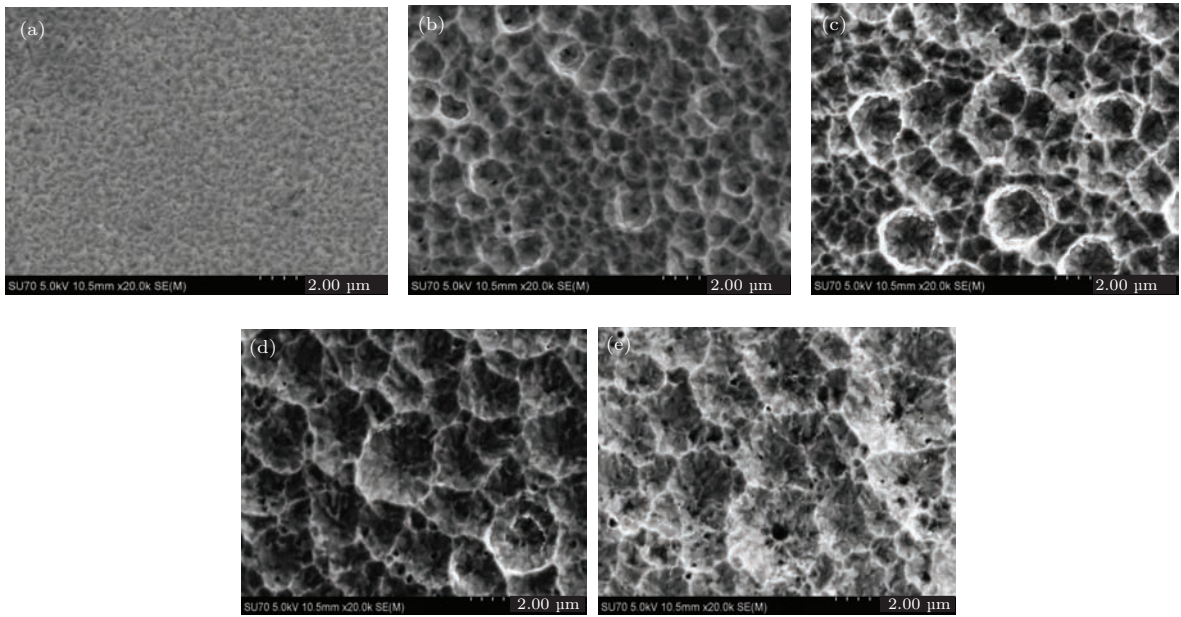


图2 AZO薄膜在不同腐蚀时间下的SEM图 (a) 0 s; (b) 10 s; (c) 20 s; (d) 30 s; (e) 40 s

Fig. 2. SEM images of AZO films etched at different time: (a) 0 s; (b) 10 s; (c) 20 s; (d) 30 s; (e) 40 s.

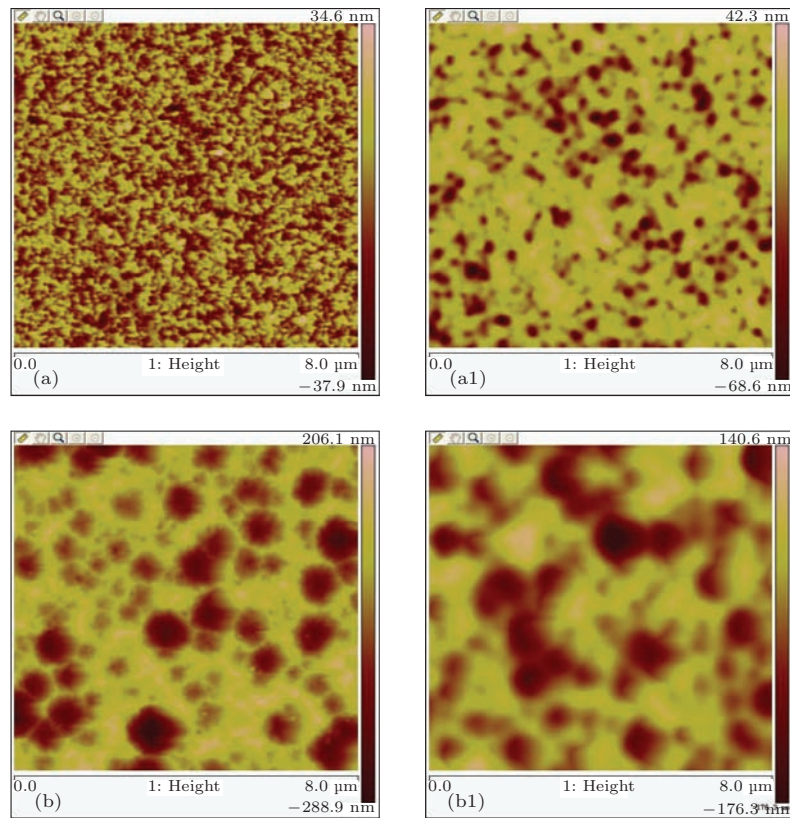


图3 不同腐蚀时间的AZO的AFM图 (a) 0 s和(b) 30 s, 旋涂PEDOT:PSS的AFM图, (a1) 0 s和(b1) 30 s

Fig. 3. AFM images of AZO films etched at different time: (a) 0 s, (b) 30 s, AZO coated with PEDOT:PSS, (a1) 0 s and (b1) 30 s.

腐蚀时间的增加, 弹坑的特征尺寸与RMS逐渐增大, 同一区域面积弹坑数量也越来越少. 从旋涂完PEDOT:PSS的图中可以发现小尺寸弹坑几乎被

填平了, 而一些大尺寸的弹坑依然存在. 我们采用了先低速后高速的匀胶方式使得小弹坑被填平, 大尺寸弹坑得到均匀覆盖. 从NanoScope Analysis分

析软件中可得知没有旋涂 PEDOT:PSS 的 AZO 的 RMS 从 0 s(8.4 nm), 10 s(50.8 nm), 20 s(65.9 nm), 30 s(70.6 nm), 40 s(78.3 nm) 分别降低到旋涂完 PEDOT:PSS 之后的 0 s (5.3 nm), 10 s(33.3 nm), 20 s(37.2 nm), 30 s(50.0 nm), 40 s(57.0 nm). 根据以上数据可知 PEDOT:PSS 对绒面的 AZO 表面起到了良好的修饰作用, 可以防止由于活性层覆盖的不充分引起 AZO 薄膜直接与阴极接触的电流短路现象发生. 弹坑被 PEDOT:PSS 填充的饱和程度决定了 PEDOT:PSS 与 AZO 紧密接触程度. AZO 与 PEDOT:PSS 的接触面积增大, 空穴的传输性能也随之增强.

为了检测旋涂活性层之后的效果, 我们对整个器件的横截面进行了 SEM 表征, 如图 4 所示. 根据以前的报道^[20,21], 微小的空洞容易在电极和活性层接触处出现, 从而引起电池的短路现象. 在器件的 SEM 截面图中, 空气间隙或者孔洞没有被观察到, 虽然出现了薄膜的剥离(薄膜的剥离是样品制备的过程中导致). 因此可以认为活性层薄膜不仅与 PEDOT:PSS 形成了良好界面接触, 而且还有效的覆盖了 PEDOT:PSS 基底表面. 同时我们还发现 30 s 腐蚀的 AZO/PEDOT:PSS 衬底上旋涂活性层 P3HT:PCBM 之后, 活性层的 RMS 进一步下降.

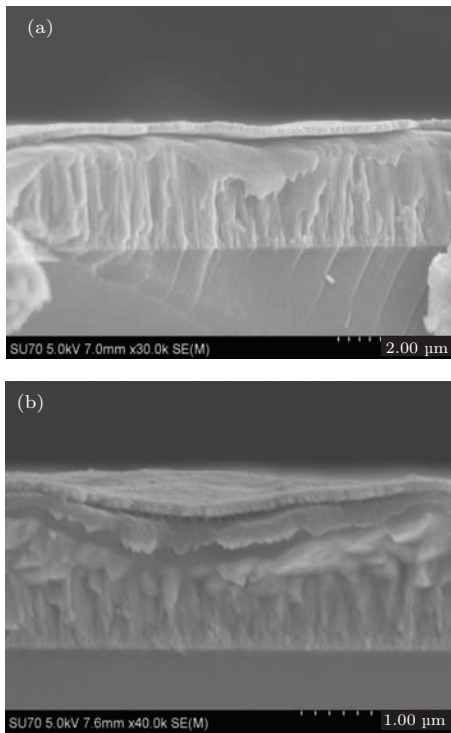


图 4 器件截面的 SEM 图, AZO 电极腐蚀时间分别为: (a) 0 s, (b) 30 s

Fig. 4. SEM cross-section views of cells with etched AZO at different time: (a) 0 s; (b) 30 s.

旋涂在不同腐蚀时间 AZO 上的活性层都呈现出下降的趋势, 我们认为底层的 PEDOT:PSS 对相对更厚的活性层形貌不会产生很大的影响, 而认为活性层的形貌受到制备的旋涂工艺影响更大.

为了验证不同腐蚀时间的 AZO 作为前电极时的陷光能力, 制备了基于系列腐蚀时间的 AZO 薄膜的光伏性能测试, 并将得出的数据进行了对比分析. 表格 1 显示了电池的开路电压 (V_{oc})、电流密度 (J_{sc})、填充因子 (FF) 以及功率转换效率 (PCE). 30 s 腐蚀的 AZO 作为电池的前电极 PCE 最高, 达到了 3.45%, 相比于没有腐蚀的电池效率提高了 11.29%; J_{sc} 为 9.27 mA/cm², 提高了 8.17%. 所有电池的 V_{oc} 几乎是不变的, 因为 V_{oc} 主要由给体材料的 HOMO 能级与受体材料的 LUMO 能级之差决定. 10 s, 20 s, 30 s 腐蚀的 AZO 前电极电池的 J_{sc} , FF 和 PCE 效率都得到了提升, 但是腐蚀时间为 40 s 前电极电池的 FF 和 PCE 下降幅度比较大, 仅有 J_{sc} 持续增加. 可以看到利用腐蚀后的 AZO 作为电池的前电极, 使得电池的 J_{sc} 得到显著的改善, 但是腐蚀后的电极对电池的 FF 有很大的影响; 当腐蚀时间过长时, 电池的 FF 降低, 使得电池的 PCE 不升反降. 我们可从以下分析中找到答案.

表 1 电池的各项性能

Table 1. Performance of solar cells.

腐蚀时间/s	$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	V_{oc}/V	FF/%	PCE/%
0	8.57	0.56	0.64	3.10
10	9.00	0.57	0.66	3.39
20	9.19	0.57	0.66	3.44
30	9.27	0.57	0.65	3.45
40	9.37	0.57	0.53	2.84

从图 5 (a) 中不难发现, 随着腐蚀时间的增加, AZO 的透射率也逐渐增加. 因为随着 AZO 薄膜被腐蚀, 透射率自然会增加. 但过高的透射率是以牺牲增加电阻为代价的, 薄膜电阻会随着腐蚀时间的增加而变大, 对薄膜的光学和电学进行一个最佳的匹配才能够得到电池的最佳效率. 绒面电极作为前电极, 因其具有散射光的能力, 增加光在活性层中的光程, 从而增强光的吸收. Haze 度是衡量散射的一个重要指标. 从图 5 (b) Haze 曲线中可以发现, 没有腐蚀的电极对光几乎没有散射作用, 不同程度腐蚀的电极对光都有散射效果, 且散射效果随着波长的增加逐渐减小, 绒面 AZO 对短

波长的光散射效果最强烈, 其中 20 s 的散射效果最好. 从图 5(c) 的 AZO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM 吸收光谱中可以看出绒面电极电池在短波长内的吸收要高于平面结构的电池, 可以证明绒面结构对光的吸收有促进作用. 活性层的吸收光谱并不能够真正的反应完整器件结构中活性层对光的利用, 因为活性层的吸收光谱只是单纯的计算了对入射光的吸收, 而全反射光谱则不仅计算了对入射光的吸收同时也计算了背反 Al 电极反射进入活性层的光. 由于 Al 的反光性能特别好, 因此可以对活性层第一次通过的光进行全反射, 达到多次吸收的效果, 从而再一次加强了活性层对光的吸收. 基于 AZO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al 的结构制备的完整器件, 对器件进行全反射测试(如

图 5(d)). 绒面结构电池的全反射相比平面结构电池的全反射要低; 特别是吸收峰位于 500 nm 左右, 因此进一步证明陷光电极增强了光吸收. 电流不仅受到光吸收效率的影响, 同时会受到激子分离效率、电荷传输、电荷转移效率的影响. 那么绒面电极中的电流增强是不是与电极陷光效应有关? 我们可以进一步分析电池外量子效率(EQE). 以 30 s 腐蚀后的电极电池为例, 在 350—500 nm 波长范围内, 绒面电极电池的 EQE 平均值要明显高于平面电极电池的 EQE 平均值, 400 nm 左右极为明显. 绒面电极电池的光吸收增强范围与 EQE 值增强的范围相吻合, 说明光电流的增加正是得益于绒面电极的光吸收增强效应.

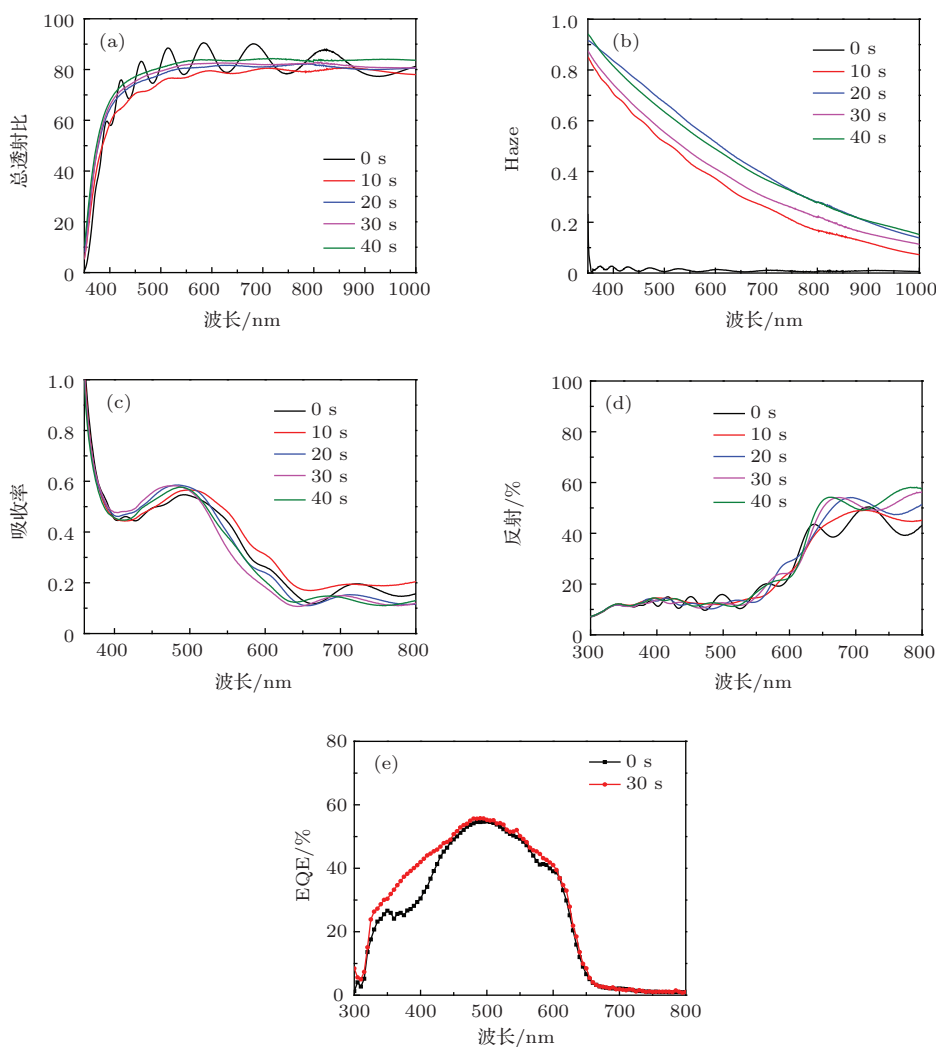


图 5 (网刊彩色) (a) AZO 玻璃的全透射; (b) AZO 玻璃的 Haze; (c) AZO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM 的吸收光谱; (d) 电池的全反射; (e) 电池的量子效率

Fig. 5. (color online) (a) Total transmittance spectra of AZO; (b) Haze of AZO; (c) absorption spectra of AZO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM; (d) total reflection of solar cells; (e) external quantum efficiency for devices.

40 s 腐蚀后的电极电池的电流密度是最高的, 但是效率却是最低的, 主要原因是由于 FF 的严重下降. 电池的 FF 受到激子分离、电荷传输与收集等因素的影响, 但是最终决定 FF 的是器件的串联电阻和并联电阻. 由于本实验中的实验条件都是一致的, 可以排除实验工艺的影响. 我们猜测很可能是由于形貌以及界面接触带来的影响. 从 AZO 的 SEM 图中可以发现 40 s 的样品腐蚀情况比较严重, 在弹坑的底部出现了一些微洞. 经过测试发现 40 s 样品的串联电阻要显著高于其他样品. 由于实验过程中过度腐蚀造成了串联电阻的增大, 从而降低了 FF. 微小的弹坑亦会对界面接触带来的影响, 如果电极、PEDOT:PSS 和活性层三者之间出现微小的空洞, 器件性能也会降低. 另外由于腐蚀时间过长, 弹坑的特征尺寸与比其他类型样品的特种尺寸要大, 且深度更深, 在旋涂 PEDOT:PSS 时会沉积更厚的 PEDOT:PSS, 从理论上来说过厚的 PEDOT:PSS 会影响入射光进入到活性层里, 降低活性层的光学吸收. 在平面结构的电池当中, 空穴传输层的厚度一般为 40 nm 左右, 在绒面电极中, 局部 PEDOT:PSS 的厚度将会远超平面结构中 PEDOT:PSS 的厚度. 过厚的 PEDOT:PSS 沉积在弹坑的底部不仅会降低光学吸收, 同时也会降低电荷的传输效率和电荷的收集效率. 30 s 腐蚀后的 AZO 薄膜电极实现了电池对光学吸收和电学传输的完美匹配, 因此电池的效率最高.

4 结 论

将系列时间梯度腐蚀的具有陷光作用的 AZO 薄膜作为有机光伏电池的前电极, 实现了电池对太阳光谱的吸收增强和有效利用. 电池的反射光谱和外量子效率测试均表明绒面陷光电极能显著提高电池在陷光波段的吸收和利用效率. 电池的光吸收增强波段与测试的 EQE 值增加的波段相吻合, 证明电池电流的增加正是来自于光吸收的增强. 其中腐蚀 30 s 的 AZO 薄膜使得电池电学传输特性和光学吸收特性达到了最佳的匹配, 与平面电极电池相

比, 电池的 J_{sc} 增加了 8.17%, 效率改善了 11.29%. 此方法为进一步增强有机光伏电池对太阳光谱的有效吸收和利用提供一条简单而有效的捷径.

参考文献

- [1] Yang Y, Chen W, Dou L, Chang W H, Duan H S, Bob B, Li G, Yang Y 2015 *Nat. Photonics* **9** 190
- [2] He Z C, Xiao B, Liu F, Wu H B, Yang Y L, Xiao S, Wang C, Russell T P, Cao Y 2015 *Nat. Photonics* **9** 174
- [3] Lin Y Z, Wang J Y, Zhang Z G, Bai H T, Li Y F, Zhu D B, Zhan X W 2015 *Adv. Mater.* **27** 1170
- [4] Zilio S D, Tvingstedt K, Inganäs O 2009 *Microelectron. Eng.* **86** 1150
- [5] Lindquist N C, Luhman W A, Oh S H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 3308
- [6] Atwater H A, Polman A 2010 *Nat. Mater.* **9** 205
- [7] Sefunc M A, Okyay A K, Volkan D H 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 3117
- [8] Shen H H, Maes B 2011 *Opt. Express* **19** A1202
- [9] Abass A, Shen H H, Bienstman P 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 3111
- [10] Ferry V E, Sweatlock L A, Pacifici D 2008 *Nano Lett.* **8** 4391
- [11] Ko D H, Tumbleston J R, Zhang L 2009 *Nano Lett.* **9** 2742
- [12] Chen J Y, Yu M H 2014 *Appl. Mater. Interfaces* **6** 6164
- [13] Lee J H, Kim D W, Jang H, Choi J K, Geng J X, Jung J W, Yoon S C, Jung H T 2009 *Small* **19** 2139
- [14] Chao Y C, Zhan F M, Li H D 2014 *RSC Adv.* **4** 30881
- [15] Chou C H, Chen F C 2014 *Nanoscale* **6** 8444
- [16] Yu X M, Zhao J, Hou G F, Zhang J J, Zhang X D, Zhao Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 120101 (in Chinese) [于晓明, 赵静, 侯国付, 张建军, 张晓丹, 赵颖 2013 物理学报 **62** 120101]
- [17] Hou G F, Xue J M, Yuan Y J, Zhang X D, Sun J, Chen X L, Geng X H, Zhao Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 058403 (in Chinese) [侯国付, 薛俊明, 袁育杰, 张晓丹, 孙建, 陈新亮, 耿新华, 赵颖 2012 物理学报 **61** 058403]
- [18] Wang Y, Zhang X, Bai L, Huang Q, Wei C, Zhao Y 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 263508
- [19] Hu Z Y, Zhang J J, Zhao Y 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 104516
- [20] Niggemann M, Glatthaar M, Gombert A, Hinsch A, Wittwer V 2004 *Thin Solid Films* **619** 451
- [21] Niggemann M, Glatthaar M, Lewer P, Müller C, Wagner J, Gombert A 2006 *Thin Solid Films* **628** 511

ZnO:Al textured films for improved performance in organic photovoltaics*

Zhang Ke Hu Zi-Yang[†] Huang Li-Ke Xu Jie Zhang Jing Zhu Yue-Jin

(Department of Microelectronic Science and Engineering, Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

(Received 21 March 2015; revised manuscript received 5 May 2015)

Abstract

A major issue in organic photovoltaics (OPVs) is the poor mobility and recombination of the photogenerated charge carriers. The active layer has to be kept thin to facilitate charge transport and minimize recombination losses. However, optical losses due to inefficient light absorption in the thin active layers can be considerable in OPVs. Therefore, light trapping schemes are critically important for efficient OPVs. In this paper, high efficient OPVs are demonstrated by introducing randomly nanostructured front electrodes, which are fabricated using commercially available ZnO:Al (AZO) films by means of a wet etching method. The etched AZO front electrode induces strong diffusion and scattering of the incident light, leading to the efficient light trapping within the device and enhancement of light absorption in the active layer. Such a nanostructured electrode can achieve an improved device performance by maintaining simultaneously high open-circuit voltage and fill factor values, while providing excellent short-circuit current enhancement through efficient light trapping. The best device obtained based on the textured electrode shows a 11.29% improvement in short current density and a 8.17% improvement in power conversion efficiency, as compared with the device with a flat electrode. The improvement in PCE is directly correlated with the enhancement of light absorption in the active layer due to the light scattering and trapping effect induced by the randomly nanotextured electrodes, which is confirmed by a haze factor measurement and an external quantum efficiency characterization. The well-established contact interfaces between the etched electrodes and active layers are made, and thus reduce the impact on the open-circuit voltage and fill factor values in OPVs. We thus conclude that the method of light manipulation developed in this paper will provide a promising and practical approach to fabricate high-performance and low-cost OPVs.

Keywords: organic photovoltaics, textured electrodes, ZnO:Al, wet etching

PACS: 88.40.jr, 88.40.hj, 07.79.Cz, 07.60.Rd

DOI: [10.7498/aps.64.178801](https://doi.org/10.7498/aps.64.178801)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11304170, 11374168, 51302137), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LQ13F050007), the Foundation of Zhejiang Educational Commission, China (Grant No. Y201326905), and the Natural Science Foundation of Ningbo City, China (Grant No. 2013A610033). The authors also thank the sponsor by K. C. Wong Magna Fund in Ningbo University.

[†] Corresponding author. E-mail: huziyang@nbu.edu.cn