

基于窄带隙聚合物的高性能可见-近红外光伏探测器

肖标 张敏莉 王洪波 刘继延

High performance visible-near infrared photovoltaic detector based on narrow bandgap polymer

Xiao Biao Zhang Min-Li Wang Hong-Bo Liu Ji-Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 228501 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.228501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.228501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用纳米球提高红外波长上转换探测器效率

Improvement in the efficiency of up-conversion infrared photodetector by nanospheres

物理学报.2017, 66(18): 188501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.188501>

InGaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器中势垒生长温度的研究

Barrier growth temperature of InGaAs/AlGaAs-quantum well infrared photodetector

物理学报.2017, 66(6): 068501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.068501>

含有 AlGaAs 插入层的 InAs/GaAs 三色量子点红外探测器

Three-color InAs/GaAs quantum dot infrared photodetector with AlGaAs inserting layer

物理学报.2016, 65(10): 108502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.108502>

基于高阻 ZnO 薄膜的光电导型紫外探测器

Photoconductive UV detector based on high-resistance ZnO thin film

物理学报.2015, 64(19): 198501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198501>

高速高饱和单行载流子光探测器的设计与分析

Design and analysis of high speed and high saturation uni-traveling-carrier photodetector

物理学报.2014, 63(20): 208502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.208502>

基于窄带隙聚合物的高性能可见-近红外 光伏探测器*

肖标 张敏莉 王洪波[†] 刘继延

(江汉大学, 光电化学材料与器件教育部重点实验室, 武汉 430056)

(2017年6月3日收到; 2017年7月24日收到修改稿)

聚合物光伏探测器是一种极具应用前景的新型光电探测器件. 研究了基于窄带隙聚合物的高性能可见-近红外光伏探测器, 结果表明, 所制备的光伏探测器在可见至近红外光谱范围内具有宽的光谱响应(380—960 nm)、出色的响应度(840 nm时达到380 mA/W)和归一化探测度; 同时, 器件在暗态反偏条件下的能级示意图揭示了器件内平均电场较低是较厚光敏层器件具有低噪声电流的主要原因. 电容-电压与时间周期性响应曲线研究表明聚合物光伏探测器具有快速的响应能力和良好的周期重复性.

关键词: 聚合物光伏探测器, 可见-近红外, 窄带隙聚合物

PACS: 85.60.Gz, 84.60.Jt, 85.65.+h, 07.57.Kp

DOI: 10.7498/aps.66.228501

1 引言

可见-近红外光电探测器是一种广泛应用于数字成像^[1]、光学通信^[2]、生物诊断^[3]、夜视^[4]及环境监测与遥感^[5]等领域的光电转换器件. 由于具有成本低廉、易于制备柔性器件、材料来源广泛等诸多优点, 聚合物光伏探测器受到了学术界的广泛关注^[6-9]. 到目前为止, 基于聚合物体系的光伏型探测器的探测波长已经涵盖了从紫外到近红外的大部分区域^[10,11], 使得聚合物光伏探测器成为一种极具应用前景的新型光电探测器. 2009年, Gong等^[12]报道了光谱响应300—1450 nm的高灵敏度聚合物光伏探测器, 室温下其部分探测性能达到甚至超过了传统无机硅(Si)和镓砷(InGaAs)探测器, 在实验上证明了窄带隙聚合物是一种制备高性能光伏探测器的理想材料^[12]. 聚合物探测器的性能除了受到光敏材料的影响外, 其界面与电极修

饰同样深刻地影响着器件的输出特性. 例如, Lim等^[13]通过采用金属铽(Yb)作为阴极修饰层材料, 大幅降低了聚合物探测器的漏电流(噪声信号), 从而增强了器件的信噪比. Shafian等^[14]发现采用双电子阻挡层可以有效抑制电子从阳极一侧的注入, 有利于提升器件的探测度. Wu等^[15]通过采用倒置式器件结构并优化电荷注入势垒, 成功获得了基于聚合物的高性能可见-近红外光伏探测器. 尽管目前在聚合物光伏探测器方面取得了很多成果, 但是同时具有高探测度、低噪声信号以及快速响应能力的聚合物型光伏探测器却鲜有报道.

本文以窄带隙共轭聚合物材料PBDTT-SeDPP^[15]及富勒烯衍生物PC₇₁BM共混物为光敏层, 制备了同时兼具宽光谱响应、高探测度、低噪声信号以及快速响应能力的高性能光伏型光电探测器. 研究表明, 基于所选光敏材料的探测器光谱响应涵盖了全部可见光及部分近红外光谱(380—960 nm), 且具有较快的响应速度. 此外, 器

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2015AA033400)、国家自然科学基金(批准号: 21302232)、湖北省自然科学基金(批准号: 2014CFA098)、中国博士后科学基金(批准号: 2016M600567)、光电化学材料与器件教育部重点实验室(江汉大学)开放课题基金(批准号: JDGD-201608)和欧阳康乐产学研用基金资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: hongbo.wang@jhun.edu.cn

件的噪声暗电流及归一化探测度 (specific detectivity, D^*) 与光敏层的厚度有着紧密的联系. 本文详细讨论了探测器的噪声暗电流与光敏层厚度之间的关联.

2 实验方法

2.1 材料

电子给体材料 PBDTT-SeDPP 按照参考文献合成^[16], 富勒烯衍生物 PC₇₁BM 和空穴传输材料 PEDOT:PSS 分别购自 Solenne BV 和 H.C. Starck Clevios 公司, 实验中所涉及的所有材料均未经进一步纯化.

2.2 器件制备

将图案化的 ITO 透明导电玻璃依次放在丙酮、含有表面活性剂的去离子水、去离子水及异丙醇中各超声清洗 20 min. 烘干后将 ITO 基板用 O₂ 等离子体处理 5 min, 随后在其表面旋涂一层 40 nm 厚的 PEDOT:PSS 作为空穴传输层, 150 °C 加热 15 min 去除薄膜中的残留水分. 在充满氮气的手套箱中将不同厚度的 PBDTT-SeDPP 与 PC₇₁BM 的混合物 (质量比为 1:2, 溶剂为邻二氯苯) 旋涂在 PEDOT:PSS 表面. 刮好电极后将片子转移至蒸镀腔, 在高真空下 (腔室压力小于 10⁻⁴ Pa) 依次蒸镀 5 nm 厚的金属 Ca 和 100 nm 的金属 Al 作为探测器的阴极.

2.3 测试与表征

光响应曲线由量子效率测试系统 (台湾光焱) 在反向偏压条件下获得, 电容测试采用瑞士万通电化学工作站测量, 器件时间响应特性测量的单色光由函数发生器产生高频方波信号驱动红外半导体激光器获得, 数据由数字示波器采集. 电流-电压曲线测量过程中的单色光由太阳光模拟器 (AM1.5G) 经 800 nm 窄通滤光片产生, 使用 Keithley 2400 作为测试源表记录数据.

3 实验结果与讨论

图 1(a) 所示为光伏探测器光敏层电子给体材料 PBDTT-SeDPP 与受体材料 PC₇₁BM 的化学结

构式. 值得注意的是, PBDTT-SeDPP 是一种能量转换效率超过 7% 的高效窄带隙太阳能电池给体材料^[16], 它的薄膜吸收从可见光区一直延伸至近红外, 是一种具有宽光谱响应的共轭光电材料. 通常, 当具有特定波长的光作用于器件时, 光敏层中的电子给体材料首先被光激发产生光生载流子, 在器件的内建电场 (由电极功函数之差产生) 和外加电场的共同作用下, 器件中的光生载流子通过电子传输层和空穴传输层分别被阴极和阳极搜集到外电路, 实现光信号向电信号的转变, 从而完成对光信号的探测. 研究中制备的光伏探测器采用 ITO/PEDOT:PSS/光敏层/Ca/Al 的结构, 如图 1(b) 所示. 选用 Ca 作为电子抽取层是因为它具有较低的功函数, 能和光敏层形成良好的欧姆接触, 有利于电子的抽取^[17].

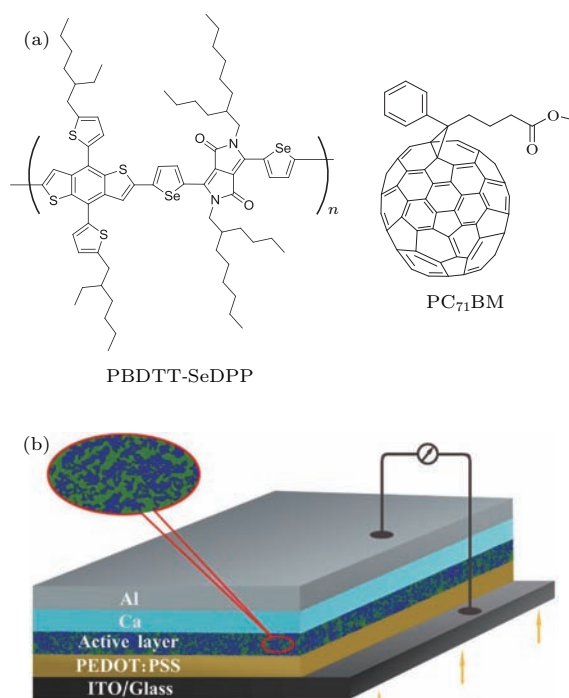


图 1 (网刊彩色) (a) 电子给体材料 PBDTT-SeDPP 与电子受体材料 PC₇₁BM 的化学结构式; (b) 聚合物光伏探测器的结构示意图

Fig. 1. (color online) (a) Chemical structures of PBDTT-SeDPP and PC₇₁BM; (b) diagram of the device configuration used in this work.

制备好器件后, 首先对具有不同光敏层厚度的光伏探测器进行了弱光 (波长为 800 nm, 强度为 0.4 mW/cm²) 和无光照射条件下的电流密度-电压测量, 结果如图 2 所示. 从图中可见, 反向偏压下 (-2 V) 不同厚度器件的光电流数值差别不

大. 光敏层厚度为100, 200和300 nm的器件的光电流密度数值分别为 1.69×10^{-4} , 7.96×10^{-5} 和 6.98×10^{-5} A/cm². 但是, 不同厚度的器件在反向偏压下暗电流却区别明显. 从图中数据可知, 随着光敏层厚度的逐渐增加, 器件的暗电流出现明显的降低. 在-2 V偏压下, 100 nm时器件的暗电流为 1.35×10^{-6} A/cm², 而200和300 nm器件中的暗电流分别为 1.13×10^{-7} 和 2.98×10^{-8} A/cm². 由于暗电流造成的散粒噪声 (shot noise) 是聚合物光伏探测器噪声的主要来源 [6,18], 光敏层厚度增加引起的低暗电流有利于提升器件的信噪比. 同时, 所有器件在非光照条件下均展示出大于 10^5 的高整流比 (± 2 V), 表明器件具有很好的二极管整流特性 [19].

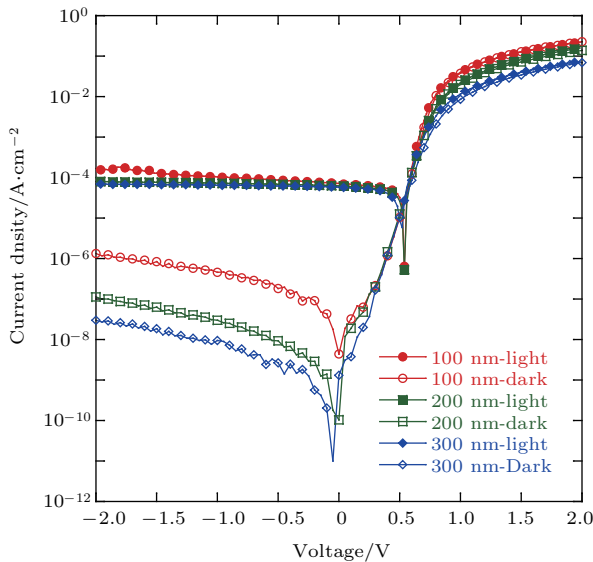


图2 (网刊彩色) 具有不同光敏层厚度的器件在无光照及0.4 mW/cm², 800 nm光照射条件下的光电流密度-电压曲线
Fig. 2. (color online) Current density-voltage characteristics of the devices in the dark and under 0.4 mW/cm², 800 nm monochromatic illumination.

为了获得探测器的光谱响应特性, 测量了不同厚度器件的光响应度 (photoresponsivity) 随波长变化的曲线, 并将相应数据绘制成图3. 由于光伏探测器一般工作在负偏压区, 测试时给器件加上了-0.5 V的电压. 通过图3可以看到, 基于窄带隙聚合物的探测器的光响应谱从可见光区一直延伸至波长为960 nm的近红外光谱区, 如此宽的光谱探测范围应该归功于光敏层给体聚合物的窄光学带隙. 对于具有100 nm厚光敏层的器件来说, 其最大光响应度出现在波长为840 nm附近, 数值达到了380 mA/W, 这一结果甚至优于一维无机In₂Te₃器

件(10 V时的响应度数值为300 mA/W) [20]. 随着光敏层厚度的增加, 200和300 nm器件的最大响应度稍有降低, 分别为303 mA/W和261 mA/W, 这表明较厚器件中载流子的复合损失更为严重.

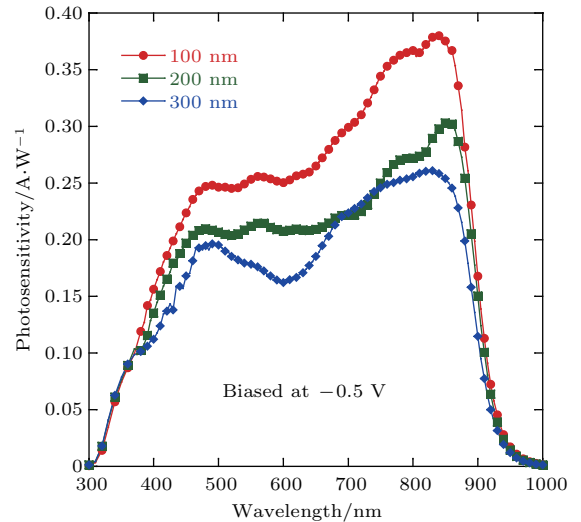


图3 (网刊彩色) -0.5 V偏下器件的光响应度与波长及光敏层厚度的关系
Fig. 3. (color online) Wavelength and thickness dependent photoresponsivity curves under -0.5 V voltage bias.

除了响应度以外, 归一化探测度 D^* 也是评价探测器性能好坏的另一个非常重要的指标. 如前所述, 光伏型聚合物探测器中暗电流造成的散粒噪声是器件中噪声信号的主要来源, D^* 可以通过下式计算:

$$D^* = R / (2eJ_d)^{1/2} = (J_{ph} / L_{light})(2eJ_d)^{1/2}, \quad (1)$$

式中, R 为响应度, e 为电子电量(数值为 1.6×10^{-19} C), J_d 为暗电流密度, J_{ph} 为光生电流密度, L_{light} 为入射光功率. D^* 的物理意义可以理解为1 W辐射功率入射到光敏面积为1 cm²的探测器上时所得的信噪比.

图4给出了不同光敏层厚度器件的归一化探测度曲线, 为了便于直观比较, 将响应主要在可见-近红外波段的单晶硅(Si)和近红外的铟镓砷(InGaAs)探测器的归一化探测度曲线示于图4中. 得益于较厚器件具有更低的噪声电流, 光敏层厚度为300 nm的器件的归一化探测度要明显高于200和100 nm的器件, 且在400—860 nm范围内聚合物光伏探测器的探测度非常稳定. 其中, 光敏层厚为100 nm的器件在这个波长区间内的平均 D^* 值

为 6.89×10^{12} Jones, 非常接近单晶硅的归一化探测度. 在 800—900 nm 光谱区间内, 300 与 200 nm 器件的 D^* 明显高于 InGaAs 器件, 但是低于单晶硅, 说明聚合物基光伏探测器在 300—900 nm 的光谱区间内探测能力已经接近经典无机体系. 特别值得注意的是, 图 4 所描绘的 InGaAs 探测器的归一化探测度曲线是将器件冷却至 4.2 K 后获得的 [12]. 相比之下, 聚合物探测器在工作时无需额外使用冷却装置就能获得较高的探测度, 这也是聚合物光伏探测器相比于无机探测器的一个巨大优势. 受到光敏层材料光学带隙的限制, 900 nm 以后, 探测器的探测度数值出现了快速下降. 在保证高归一化探测度和材料稳定性的前提下如何将聚合物光伏探测器的探测范围进一步向红外拓宽是今后研究的重要方向.

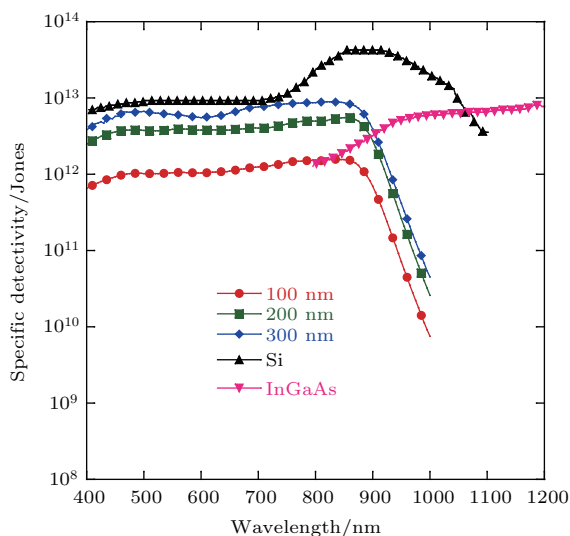


图 4 (网刊彩色) 不同厚度的聚合物光伏探测器、Si 探测器以及 InGaAs 探测器的归一化探测度的波长响应特性, 测试时聚合物器件加 -0.5 V 偏压

Fig. 4. (color online) Specific detectivities of polymer photodetectors, Si photodetector and InGaAs photodetector versus wavelength. The detectivities of the polymer photodetectors were biased at -0.5 V during the test.

为了研究较厚光敏层器件在反向偏压下具有较低暗电流的原因, 绘制了聚合物光伏探测器在暗态反向偏置时的能级示意图, 见图 5. 当聚合物探测器处于暗态反向偏置时 (未被光信号激发), 电子和空穴分别从器件的阳极和阴极被注入到受体的 LUMO 能级 (最低未占有分子轨道) 和给体材料的 HOMO 能级 (最高占有分子轨道). 由于电子从阳极注入到受体 LUMO 能级以及空穴从阴极注入到给体 HOMO 能级需要克服较大的势垒, 被注入的

载流子数目很少, 器件的暗电流较低. 根据 Fowler-Nordheim 电子隧穿理论, 注入器件的电流与器件两端施加的电场强度正相关 [21]. 相同电压下, 具有较厚光敏层的器件内部平均电场强度要低于较薄器件, 因此, 注入具有较厚光敏层器件的暗电流数值要小于具有较薄光敏层的器件.

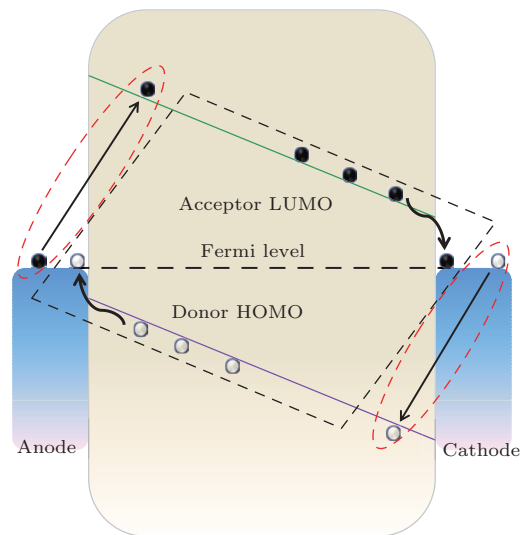


图 5 (网刊彩色) 聚合物光伏探测器在反向偏压模式下的能级示意图

Fig. 5. (color online) The schematic band diagrams of the polymer photodetectors under reverse voltage bias.

为了能快速捕捉光信号, 光探测器一般应该具有较短的响应时间. 由于光伏探测器的响应时间受到器件电容的限制 [22], 首先考察了器件在高频信号 (100 kHz) 下的电容特征, 测试结果如图 6 (a) 所示. 在反向及正向较小偏压下, 100, 200 及 300 nm 器件的电容值均为常数, 表明光敏层处于完全耗尽状态, 这就保证了器件可以快速捕捉到光信号 [23,24]. 对器件进行了时间响应测试, 如图 6 (b) 所示. 从图中可以清晰地看到聚合物光伏探测器的响应信号随着刺激信号的开关周期性地上升与下降, 表明器件具有很好的周期重复性. 同时发现, 不同厚度的器件的时间响应曲线基本重合, 说明它们具有相同的响应时间. 对于这些器件而言, 它们的上升响应时间均小于 $5 \mu\text{s}$, 而下降时间则稍长, 约为 $50 \mu\text{s}$ 左右, 造成器件下降时间稍长的原因一般被认为是由光敏层中缺陷载流子释放导致 [25]. 需要指出的是, 许多无机探测器都未能达到如此高的响应速度, 有些无机体系的响应时间甚至在秒级别 [26—28].

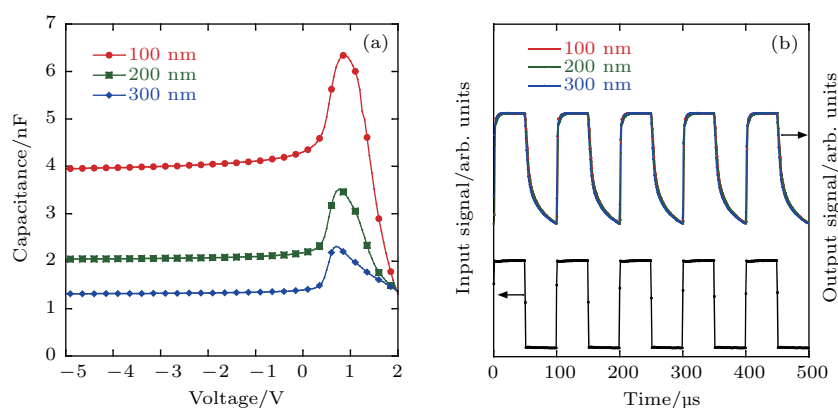


图6 (网刊彩色) (a) 聚合物探测器在 100 kHz 频率下的电容-电压曲线; (b) 100 kHz 调制光刺激下器件的时间响应特性

Fig. 6. (color online) (a) Capacitance-Voltage curves of the polymer photodetectors under the frequency of 100 kHz; (b) time response of the polymer photodetectors under 100 kHz modulated light illumination.

4 结 论

制备并研究了同时兼具宽光谱响应、高响应度与高归一化探测度、快速响应时间的聚合物光伏探测器, 其波长探测范围覆盖了全部可见光区及部分近红外光区(380—960 nm)并具有优异的探测能力和灵敏度. 与现有单晶硅和碲镉汞探测器对比后发现, 在可见光范围内, 制备的聚合物光伏探测器在响应度、归一化探测度、响应时间等关键性指标已经接近经典的无机体系, 展现出聚合物光伏探测器具有较强的应用前景. 美中不足的是, 聚合物探测器在近红外区间内的光探测能力还有待加强. 而且, 聚合物光伏探测器的使用寿命是阻碍其实际应用的一个瓶颈, 从材料的分子设计以及器件的封装角度去改善聚合物光伏探测器的稳定性将是未来发展的重要方向.

参考文献

- [1] Michel J, Liu J, Kimerling L C 2010 *Nat. Photon.* **4** 527
- [2] Kahn J M, Barry J R 1997 *Proc. IEEE* **85** 265
- [3] Kim S, Lim Y T, Soltesz E G, Grand A M D, Lee J, Nakayama A, Parker J A, Mihaljevic T, Laurence R G, Dor D M, Cohn L H, Bawendi M G, Frangioni J V 2004 *Nat. Biotechnol.* **22** 93
- [4] Rogalski A, Chrzanowski K 2002 *Opto-Electron. Rev.* **10** 111
- [5] Ettl R, Chao I, Diederich F, Whetten R L 1991 *Nature* **353** 149
- [6] Baeg K J, Binda M, Natali D, Caironi M, Noh Y Y 2013 *Adv. Mater.* **25** 4267
- [7] Hendriks K H, Li W, Wienk M M, Janssen R A J 2014 *J. Am. Chem. Soc.* **136** 12130
- [8] Su Z, Hou F, Wang X, Gao Y, Jin F, Zhang G, Li Y, Zhang L, Chu B, Li W 2015 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7** 2529
- [9] Gao M, Wang W, Li L, Miao J, Zhang F 2017 *Chin. Phys. B* **26** 018201
- [10] Wang X, Wang H, Huang W, Yu J 2014 *Org. Electron.* **15** 3000
- [11] Hu X, Dong Y, Huang F, Gong X, Cao Y 2013 *J. Phys. Chem. C* **117** 6537
- [12] Gong X, Tong M, Xia Y, Cai W, Moon J S, Cao Y, Yu G, Shieh C L, Nilsson B, Heeger A J 2009 *Science* **325** 1665
- [13] Lim S B, Ji C H, Oh I S, Oh S Y 2016 *J. Mater. Chem. C* **4** 4920
- [14] Shafian S, Hwang H, Kim K 2016 *Opt. Express* **24** 25308
- [15] Wu S, Xiao B, Zhao B, He Z, Wu H, Cao Y 2016 *Small* **12** 3374
- [16] Dou L, Chang W H, Gao J, Chen C C, You J B, Yang Y 2013 *Adv. Mater.* **25** 825
- [17] Eo Y S, Rhee H W, Chin B D, Yu G W 2009 *Synth. Met.* **159** 1910
- [18] Xie Y, Gong M, Shastry T A, Lohrman J, Hersam M C, Ren S 2013 *Adv. Mater.* **25** 3433
- [19] He C, Zhong C, Wu H, Yang R, Yang W, Huang F, Bazan G C, Cao Y 2010 *J. Mater. Chem.* **20** 2617
- [20] Wang Z, Safdar M, Jiang C, He J 2012 *Nano Lett.* **12** 4715
- [21] Parker I D 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 1656
- [22] Salamandra L, Susanna G, Penna S, Reale A 2011 *IEEE Photon. Tech. L.* **23** 780
- [23] Wang J B, Li W L, Chu B, Lee C S, Su Z S, Zhang G, Wu S H, Yan F 2011 *Org. Electron.* **12** 34
- [24] Yao Y, Liang Y, Shrotriya V, Xiao S, Yu L, Yang Y 2007 *Adv. Mater.* **19** 3979
- [25] Zhou Y, Wang L, Wang J, Pei J, Cao Y 2008 *Adv. Mater.* **20** 3745
- [26] Konstantatos G, Levina L, Tang J, Fisher A, Sargent E H 2008 *Nano Lett.* **8** 1446
- [27] Lopez-Sanchez O, Lembke D, Kayci M, Radenovic A, Kis A 2013 *Nat. Nanotech.* **8** 497
- [28] Xie X, Kwok S Y, Lu Z, Liu Y, Cao Y, Luo L, Zapfen J A, Bello I, Lee C S, Lee S T, Zhang W 2012 *Nanoscale* **4** 2914

High performance visible-near infrared photovoltaic detector based on narrow bandgap polymer*

Xiao Biao Zhang Min-Li Wang Hong-Bo[†] Liu Ji-Yan

(Key Laboratory of Optoelectronic Chemical Materials and Devices, Ministry of Education, School of Chemical and Environmental Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

(Received 3 June 2017; revised manuscript received 24 July 2017)

Abstract

Polymer-based visible-near infrared photodetectors have attracted considerable attention in the recent years due to their unique advantages of low cost of fabrication, compatibility with lightweight/flexible electronics, and wide material sources. Current researches mainly focus on high performance visible-near infrared photovoltaic detector based on narrow bandgap polymer. Device structure of the photodetector is ITO/PEDOT:PSS/photosensitive layer/Ca/Al. The weak light (0.4 mW/cm^2 , 800 nm) and reverse bias (-2 V) induce insignificant differences in photocurrent among the devices. Current values of $1.69 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$, $7.96 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ and $6.98 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ are obtained with photosensitive layer thickness values of 100 , 200 and 300 nm , respectively. However, the dark current density-voltage characteristics of the detectors with various thickness values of the photosensitive layer show that reverse bias (-2 V) induces significant differences in current among the devices. Current values of $1.35 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, $1.13 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ and $2.98 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ are obtained with photosensitive layer thickness values of 100 nm , 200 nm and 300 nm , respectively. Meanwhile, all detectors possess high rectification ratios over 10^5 ($\pm 2 \text{ V}$), indicating good diode rectification characteristics. Photosensitivity measurements show that detection spectral regions of the detectors are extended from 380 nm to 960 nm . The values of detectivity (D^*) of detectors with various thickness values of photosensitive layers are investigated, and the obtained values of D^* of tested detectors are found to be very stable in a range from 400 nm to 860 nm , and the average D^* value for the 300 nm thick device in this spectral range is as high as 6.89×10^{12} Jones. The latter compares well with values obtained with silicon detectors. In a range from 800 nm to 900 nm , the estimated detectivities of the 300 nm and 200 nm thick detectors are slightly higher than those obtained with InGaAs devices. Through analyzing energy band diagrams of the polymer photodetectors under reverse voltage bias it could be argued that the relatively weak electric field in the thicker device is the origin of the lower noise current density. The capacitance characteristics of polymer based detectors at high frequency (100 kHz) are examined through capacitance-voltage curves, and the resulting data show that capacitances of all devices at reverse and even small positive voltage are constant. This indicates that the device photosensitive layers are fully depleted and fast signal detections are theoretically possible. The time responses of detectors under near-infrared stimulation are also examined. The output signal appears to rise and fall periodically according to the input signal, suggesting a good repeatability. The rise and fall times for the devices are recorded to be $\sim 5 \text{ }\mu\text{s}$ and $\sim 50 \text{ }\mu\text{s}$, indicating that the polymer photodetectors have quick response capabilities.

Keywords: polymer photovoltaic detector, visible-near infrared, narrow bandgap polymer

PACS: 85.60.Gz, 84.60.Jt, 85.65.+h, 07.57.Kp

DOI: 10.7498/aps.66.228501

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2015AA033400), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 21302232), Hubei Natural Science Foundation, China (Grant No. 2014CFA098), China Postdoctoral Science Foundation, China (Grant No. 2016M600567), the Opening Project of Key Laboratory of Optoelectronic Chemical Materials and Devices (Jiangnan University), Ministry of Education of China (Grant No. JDGD-201608) and Ouyang Kangle Innovation Fund for Production-Study-Research-Application.

[†] Corresponding author. E-mail: hongbo.wang@jhun.edu.cn