



硒纳米花/聚苯胺异质结型宽光谱自驱动探测器的制备及性能

于平平, 段伟, 姜岩峰

引用本文:

于平平, 段伟, 姜岩峰. 硒纳米花/聚苯胺异质结型宽光谱自驱动探测器的制备及性能[J]. *发光学报*, 2020, 41(11): 1391–1396.

YU Ping-ping, DUAN Wei, JIANG Yan-feng. Fabrication and Photoelectric Properties of Self-powered Photodetectors Based on Se Nanoflower/Polyaniline Heterojunctions[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(11): 1391–1396.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200224>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[InSe/Se范德瓦尔斯异质结的可控制备及其高响应度广光谱光电探测器](#)

Controlled Fabrication InSe/Se Van Der Waals Heterojunction for High Responsivity Broadband Photodetectors
发光学报. 2019, 40(11): 1409–1416 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194011.1409>

[基于PBDT-TT-F:PCBM体异质结红光探测器的光电特性](#)

Photovoltaic Characteristics of PBDT-TT-F:PCBM Based Bulk Heterojunction Red Detector
发光学报. 2017, 38(12): 1643–1649 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173812.1643>

[窄带有机光电探测器的优化设计](#)

Optimum Design of Narrowband Organic Photodetectors
发光学报. 2019, 40(2): 224–230 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194002.0224>

[电化学沉积法制备ZnO纳米柱及自驱动紫外探测性能研究](#)

Fabrication of ZnO Nanorods by Electrochemical Deposition and Research on The Self-powered ZnO Ultraviolet Photodetector
发光学报. 2016, 37(5): 591–596 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163705.0591>

[CH₃NH₃PbBr₃表面修饰对SnO₂基光电探测器性能的影响](#)

Effect of Surface Decoration of CH₃NH₃PbBr₃ on Performance of SnO₂-based Photodetector
发光学报. 2019, 40(10): 1261–1266 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194010.1261>

文章编号: 1000-7032(2020)11-1391-06

硒纳米花/聚苯胺异质结型宽光谱 自驱动探测器的制备及性能

于平平^{1,2}, 段 伟¹, 姜岩峰^{1*}

(1. 江南大学 物联网与工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 金洲集团有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 从节能、便携、微型化的角度看, 在无电源供给的情况下能够自驱动的光电探测器更能满足现代电子设备的需求。本文采用原位聚合的方法制备了一种基于 p 型硒纳米花 (Se-f) 和 p 型聚苯胺 (PANI) 的新型异质结结构。Se 纳米花结构的高表面积可以吸收更多的光能量, 有利于空穴电子对的有效分离。PANI 直接沉积于 Se-f 表面形成高质量的异质结, 促进产生内建电场。Se-f/PANI 器件在 300 ~ 700 nm 波长范围内均有良好的光电性能和自驱动特性, 特别是在无偏压 610 nm 光照下具有最高的响应度 ($72.9 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$)、良好的探测度 (1.98×10^{12} Jones) 以及快速的响应速度 (上升时间 8.6 μs , 下降时间 3.24 ms)。这将为今后开发高性能自驱动有机/无机光电器件提供一个好的选择。

关键词: 硒纳米花结构; 聚苯胺; 光电探测器; 自驱动

中图分类号: O482.31; TN304 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20200224

Fabrication and Photoelectric Properties of Self-powered Photodetectors Based on Se Nanoflower/Polyaniline Heterojunctions

YU Ping-ping^{1,2}, DUAN Wei¹, JIANG Yan-feng^{1*}

(1. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Kingland Group Limited Company, Huzhou 313000, China)

* Corresponding Author, E-mail: jiangyf@jiangnan.edu.cn

Abstract: Self-powered photodetectors operating without any power supply are urgently needed in modern optoelectronic devices from the perspective of energy saving, portability and miniaturization. In this work, a novel heterojunction structure based on p-type selenium nanocrystalline flowers (Se-f) and p-type polyaniline (PANI) was prepared by *in-situ* polymerization. The high surface area of Se-f structure can absorb more light energy, which is conducive to the effective separation of hole electron pairs. PANI nanorods are deposited directly on Se-f surfaces to form high-quality heterojunctions, which enhance the generation of hole electron pairs. Se-f/PANI photodetector exhibits good light response in range of 300 – 700 nm under 0 V bias, especially under 610 nm light with the highest responsivity ($72.9 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$), good detection rate (1.98×10^{12} Jones), and fast response (rise time of 8.6 μs and decay time of 3.24 ms). This work will provide a new way for the development of high-performance energy-saving organic/inorganic optoelectronic devices in the future.

Key words: selenium nanocrystalline flowers; polyaniline; photodetectors; self-powered

收稿日期: 2020-07-29; 修订日期: 2020-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(51802124); 江苏省自然科学基金(BK20180626); 中国博士后科学基金(2019M651693)资助项目
Supported by National Natural Science Foundation of China (51802124); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20180626); Postdoctoral Science Foundation of China(2019M651693)

1 引 言

随着科技的飞速发展,自驱动光电探测器越来越多地应用于环境监测、化学和生物传感、视频成像、药物治疗监测等领域,吸引了研究者们进行新型材料和器件的制备和设计^[1-3]。通常,自驱动光电探测器的结构有异质结(p-n, p-p, n-n)和肖特基结,界面结导致的内建电场有利于电子空穴对的快速分离,因此可以在无偏压施加的情况下具有快的响应速度和高的响应度^[4-5]。但是,自驱动光电探测器通常对杂化材料和器件的制备过程有许多要求,导致高成本和工艺复杂等问题,从而限制了实际应用。所以,急需寻找一种成本较低、工艺操作简便的方法制备高质量并且稳定的自驱动光电探测器。

有机/无机复合异质结的协同作用可以增强光电器件的探测器特性,例如有机半导体表现出质轻、柔性、低成本、大面积制备和能带可调的优势,无机半导体固有的光谱响应和良好的本征电子迁移速率高等性能。导电高分子的 π 电子共扼体系容易在外加光照辐射下发生极化,表现出快速的光学响应(10^{-13} s)和三阶非线性光学系数等性能^[6-7]。其中,PANI是一种空穴传输材料,为p型半导体,能够通过掺杂离子的不同或者多少对能带进行调控,可应用在二极管、光电探测器和太阳能电池等方面^[8-10]。PANI本身的光电响应十分微弱,通过与无机半导体复合进行光电测试,如Si、ZnO和TiO₂等^[11-14],均可以增强器件的光电响应。但是,在制备复合材料的过程中,通常是直接混合或者在中性溶液中进行反应,导致导电高分子的部分功能丧失,影响异质结的能带匹配进而降低器件的光探测性能。因此,掺杂态聚苯胺和寻求高质量异质结的有效制备方法是研究自驱动光电探测器的一个重要方向。

无机半导体材料的选取对制备异质结自驱动光电探测器至关重要。Se的带隙大约为1.67 eV,是一种潜力巨大的p型本征半导体材料,具有很好的紫外-可见光光谱探测性能^[15-16]。另外,Se的电导率随着光照急剧变化,在功率密度为 10^{-4} $\mu\text{W} \cdot \mu\text{m}^{-2}$ 的633 nm激光照射下,其电导率从 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 增加到 $0.59 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ^[17-18]。Se微纳米结构的光电探测器的响应速度为毫秒级别,而ZnS、ZnO、MoS₂的速度则是

秒和几十秒^[19-22]。利用气相沉积的方法制备的Se微纳米结构具有低成本、结晶性好、易构筑器件以及响应快等优势。Se纳米结构不会在酸性溶液中降解或被腐蚀发生反应,有利于导电高分子的有效掺杂,调节能级与Se的带隙相匹配,以及增强复合结构的光电性能。

基于此,本文采用低温化学气相沉积法制备了Se纳米花,并实现了快速响应和高灵敏度的宽光谱光电探测器。在酸性溶液中通过原位沉积方法将高度掺杂的PANI直接生长在Se纳米花表面,构筑有机/无机p-p异质结Se-f/PANI,得到了具有自驱动性能的宽光谱响应探测器。这为有机/无机异质结型光电探测器的进一步研究奠定了部分实验基础,并提供了研究方向。

2 实 验

2.1 样品制备

Se纳米花由化学气相沉积法制备。适量硒粉(99.999%)放于石英舟中,将石英舟放在管式炉的保温区,同时将预处理(氢氟酸、丙酮、乙醇和去离子水清洗)的Si片(1 cm × 2 cm)垂直放置在距离硒粉20 cm处。先以300 mL/min的流量通入管式炉高纯氩气30 min,排净管式炉内空气,之后调整通气速率为200 mL/min进行硒纳米花的生长。升温到300 °C保持600 min,升温速率设置为5 °C/min,沉积结束后自然冷却至室温,即制备出Se-f。金属钢作为电极固定在Se-f两端制备光探测器件。

Se-f/PANI异质结通过酸性溶液原位法制备。将生长有Se纳米花的Si片的一半放入10 mL含有苯胺单体的0.1 mol/L硫酸溶液中静置1 h,确保充分吸附,并将含有22.82 mg的过硫酸铵的10 mL 0.1 mol/L硫酸溶液快速加入上述溶液中进行混合。两种溶液均保持在低温状态,反应时间为24 h,然后用去离子水多次冲洗并在60 °C烘干即可获得Se-f/PANI异质结。最后,将金属钢分别固定于Se-f和Se-f/PANI端作为电极形成光电探测器。

2.2 样品表征

样品形貌和结构由扫描电子显微镜(SEM, Zeiss s-4800)和X射线衍射仪(XRD, Bruker D8-A25)表征。器件的光电性能通过基于Keithley 4200搭建的半导体测试系统表征。瞬态响应时

间是用 355 nm 的 Nd: YAG 脉冲激光激发, 通过数字示波器 (Tektronix DPO 5140b) 配合一个 1 GΩ 电阻记录器件的响应时间。

3 结果与讨论

图 1(a) 是化学气相沉积生长的 Se 纳米花的扫描电镜图, 从图中看出 Se 的纳米结构呈现花状, 并由更小的纳米棒组成且均匀地沉积在硅片上, 该花状结构的光照面积增大有利于接受更多的光照辐射。图 1(b) 是 Se-f/PANI 的扫描电镜图片, 可明显看出沉积 PANI 后的形貌差异。从图 1(c) 中能清晰地看出 PANI 均匀地包覆于 Se-f 的表面, 仍呈现花状形貌。沉积的 PANI 是纳米棒, 如图 1(d) 所示。

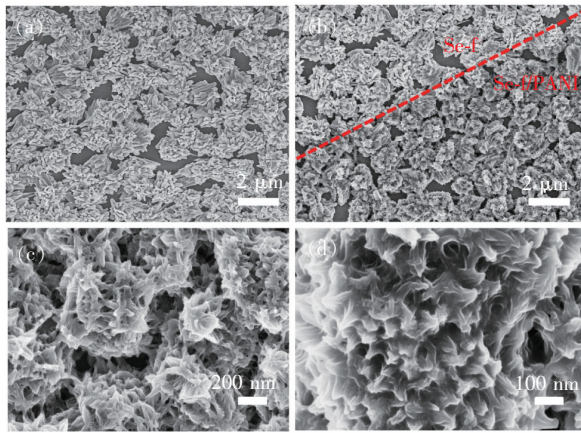


图 1 (a) Se-f 的 SEM 图; (b) ~ (d) Se-f/PANI 在不同放大倍率下的 SEM 图。

Fig. 1 SEM images of Se-f (a) and Se-f/PANI heterojunction ((b) - (d)) at different magnification

图 2(a) 是 Se-f、Se-f/PANI 的 XRD 图, 从图中可知, Se-f 很好地对应了 XRD 标准卡 JCPDS No. 65-1876 的峰位 (晶格参数 $a = b = 0.4364$ nm 和 $c = 0.4959$ nm), 由此可以得出产物为 t-Se 晶体结构^[23]。Se-f/PANI 复合材料具有和 Se-f 相似的衍射峰, 但 (100) 和 (011) 面衍射峰相对强度减小, 这是由于 PANI 包覆的结果。从图 2(b) 中看出, PANI 的结晶性不高, 导致了异质结中 PANI 的出峰位置并不明显, 这也证实了原位聚合不会影响 Se-f 的结晶性能, 从而不影响 Se-f 的光电性能。

接下来, 利用金属钢制备金属电极-半导体-金属电极结构的光电器件, 如图 3 中插图所示, 对 Se 纳米花器件和 Se-f/PANI 器件的 $I-V$ 特性进行

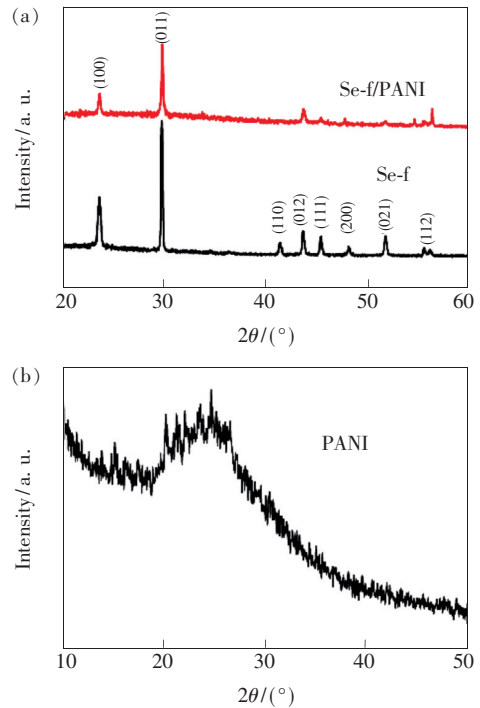


图 2 (a) Se-f 和 Se-f/PANI 的 XRD 图; (b) PANI 的 XRD 图。

Fig. 2 (a) XRD patterns of Se-f and Se-f/PANI. (b) XRD pattern of PANI.

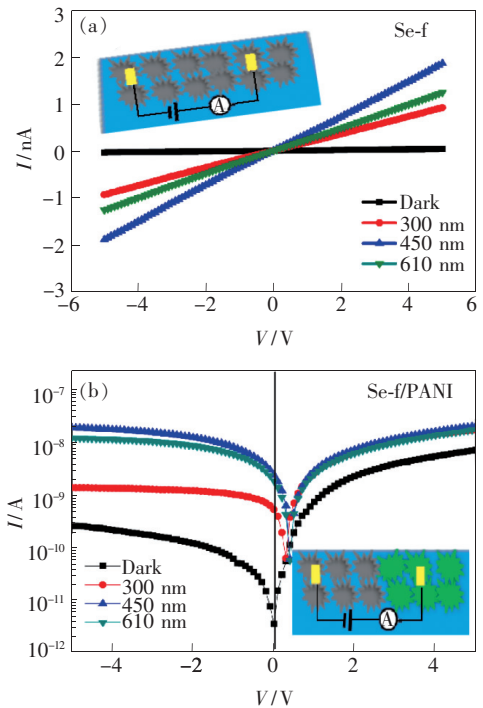


图 3 Se-f(a) 和 Se-f/PANI(b) 器件在暗条件及 300, 450, 610 nm 光照下的 $I-V$ 特性曲线, 插图为器件的示意图。

Fig. 3 $I-V$ characteristics of Se-f (a) and Se-f/PANI (b) photodetectors under dark and different light illumination. Insert is the illustration of the device.

测试。图 3(a) 是 Se-f 的 I - V 特性曲线, 在暗条件和光照波长 300, 450, 610 nm 照射下, 光电流发生明显变化, 证明 Se-f 有良好的光响应。 I - V 曲线的对称性说明电极和 Se-f 具有良好的欧姆接触。图 3(b) 是 Se-f/PANI 器件的 I - V 特性曲线, 暗电流曲线经过原点, 而 300 ~ 610 nm 的光电流曲线均偏向正电压方向, 这是因为 Se-f 和 PANI 的 p-p 异质结导致内建电场, 从而使器件可以在无偏压情况下工作, 实现自驱动特性。

器件的光电流变化情况可以从 I - t 曲线看出, 在不同波长光照下器件具有较高的稳定性和快速响应的优点。图 4(a) 是 Se-f/PANI 器件在 0 V 偏压、波长 300, 450, 610 nm 光照下的 I - t 曲线, 其光电流分别为 0.8, 2.1, 1.8 nA, 暗电流为 3.4 pA, 计算可得光暗电流比值 (I_{ph}/I_d) 分别为 235, 618, 529。器件的响应速度以及确定的上升和下降时间通过瞬态响应测试, 如图 4(b) 所示。一般器件的上升时间定义为光电流从 10% 上升到 90% 所需的时间, 下降时间为光电流从 90% 下降到 10% 所需的时间。从图中得出 Se-f/PANI 器件在 0 V

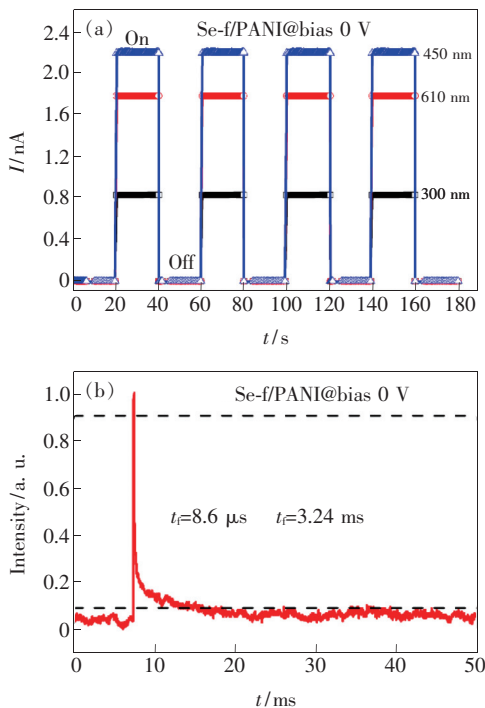


图 4 Se-f/PANI 器件在 0 V 偏压及 300, 450, 610 nm 光照下的 I - t 曲线 (a) 和瞬态响应 (b)。

Fig. 4 (a) I - t characteristics of Se-f/PANI photodetector under 300, 450, 610 nm light illumination at 0 V. (b) Pulse response of Se-f/PANI photodetector under 0 V.

偏压下的上升时间为 8.6 μ s, 下降时间是 3.24 ms, 比 Se/MAPbCl₃ (2.1 s/150 ms)^[23] 和 Sb₂S₃/Spiro-OMeTAD (<25 ms)^[24] 器件的响应更快速, 表明 Se-f/PANI 器件可以实现自驱动, 具有快速响应的优异性能。

为确定 Se-f/PANI 器件的光响应度, 可由公式 (1) 计算:

$$R_{\lambda} = \frac{I_{ph} - I_d}{P_{\lambda} S}, \quad (1)$$

其中, P_{λ} 是入射光源的功率, S 是器件被光照射到的有效面积 ($5.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$), λ 是入射光的波长。探测度是光电探测器的另一重要参数, 其公式如下:

$$D^* = \frac{R_{\lambda}}{(2qJ_d)^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

其中 q 是基本电荷量, J_d 是暗电流密度。图 5(a) 是 Se-f/PANI 器件的响应度和探测度曲线, 在 0 V 偏压 610 nm 光照下响应度最高为 72.9 $\text{mA} \cdot \text{W}^{-1}$, 在 450 nm 和 300 nm 处的响应度分别为 39.7 $\text{mA} \cdot \text{W}^{-1}$

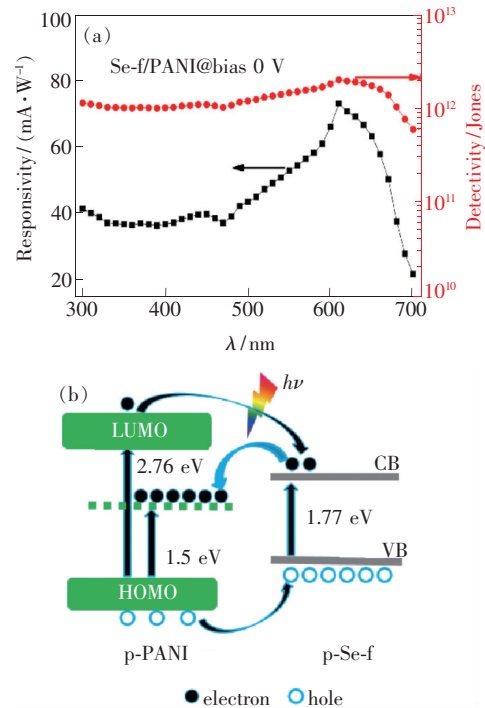


图 5 (a) Se-f/PANI 器件在 0 V 偏压下的响应度和探测度曲线; (b) 能带示意图。

Fig. 5 (a) Spectra responsivity and detectivity characteristics of Se-f/PANI photodetector at 0 V. (b) Schematic illustration of energy levels of Se-f/PANI heterojunction.

和 $41.4 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ 。远高于报道的石墨烯光电器件的数据,也可以和有机/无机复合的器件相媲美^[24-27]。Se/PANI 在 610 nm 光照下探测度最高达 1.98×10^{12} Jones, 在 450 nm 和 300 nm 的探测度分别为 1.08×10^{12} Jones 和 1.12×10^{12} Jones, 高于有机光伏材料/Si 形成 p-n 结的探测度 ($(0.06 \sim 0.45) \times 10^{11}$ Jones)^[11,15,28]。

综合以上实验结果,结合图 5(b) Se-f/PANI 的能带图,对复合物器件的自驱动特性和光响应进行解释。PANI 的聚合过程和掺杂浓度对其能带有很大的影响,PANI 的能带为 $2.76 \text{ eV}^{[6]}$, 而 Se-f 的能带为 $1.77 \text{ eV}^{[15]}$, 形成了 p-p 异质结。如图所示 Se/PANI 为 I 型能带图,但由于掺杂态 PANI 存在杂质能级对应带隙为 $1.5 \text{ eV}^{[6]}$, 则杂质能级 1.5 eV 和 Se 微米管的 1.77 eV 形成 II 型能带图。当光照射时,PANI 中的电子从最高占据分子轨道 (HOMO, π) 激发至最低未占分子轨道 (LUMO, π^*), S-f 中产生电子空穴对,电子由价带向导带跃迁。由于 Se-f 的价带 (VB) 位置高于 PANI 的 HOMO, 所以空穴从 PANI 向 Se-f 跃迁, 经过 Se-f 后跃迁到 PANI 的 LUMO。产生的电子空穴对被 p-p 异质结的内建电场快速分离,进而

被两端电极收到而输出光电流。另外,Se-f 的导带还可能接收一部分来自 PANI 的 LUMO 能级中的电子,在光照下激发至 PANI 的杂质能级,进而转移到 PANI 的 HOMO 能级。因此,Se-f 和 PANI 内建电场可以将产生的电子空穴对进行快速分离,减小复合概率,实现了自驱动宽光谱快速光电响应。

4 结 论

本文成功制备了 Se 纳米花/PANI 的 p-p 异质结型自驱动宽光谱探测器。通过化学气相沉积方法可控制备 Se 纳米花结构,较高的表面积可以吸收更多的光能量,有利于加速分离电子空穴对从而获得良好的光电性能。PANI 直接酸性溶液生长于 Se-f 表面形成纳米棒,得到高质量的异质结构筑内建电场。因此,Se-f/PANI 器件在 0 V 偏压下宽光谱范围内都有良好的光电流变化,特别是 610 nm 光照下具有更高的光响应度 $72.9 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ 、良好的探测度 1.98×10^{12} Jones 和更快速的响应速度 $8.6 \mu\text{s}/3.24 \text{ ms}$, 实现了器件的自驱动光电特性。这为将来有机/无机光电器件的设计和机理研究等提供了一种可行性方案。

参 考 文 献:

- [1] PENG L, HU L F, FANG X S. Energy harvesting for nanostructured self-powered photodetectors [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2014, 24(18): 2591-2610.
- [2] WANG Z L. Self-powered nanosensors and nanosystems [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(2): 280-285.
- [3] HU Y F, ZHANG Y, XU C, et al. Self-powered system with wireless data transmission [J]. *Nano Lett.*, 2011, 11(6): 2572-2577.
- [4] TIAN W, LIU D, CAO F R, et al. Hybrid nanostructures for photodetectors [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, 5(4): 1600468.
- [5] CHEN H Y, LIU H, ZHANG Z M, et al. Nanostructured photodetectors: from ultraviolet to terahertz [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(3): 403-433.
- [6] MCCALL R P, GINDER J M, LENG J M, et al. Spectroscopy and defect states in polyaniline [J]. *Phys. Rev. B*, 1990, 41(8): 5202-5213.
- [7] WANG H L, BAO Z A. Conjugated polymer sorting of semiconducting carbon nanotubes and their electronic applications [J]. *Nano Today*, 2015, 10(6): 737-758.
- [8] BAKER C O, HUANG X W, NELSON W, et al. Polyaniline nanofibers: broadening applications for conducting polymers [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2017, 46(5): 1510-1525.
- [9] ZHAO F, SHI Y, PAN L J, et al. Multifunctional nanostructured conductive polymer gels: synthesis, properties, and applications [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2017, 50(7): 1734-1743.
- [10] HAN J, WANG M G, HU Y M, et al. Conducting polymer-noble metal nanoparticle hybrids: synthesis mechanism application [J]. *Prog. Polym. Sci.*, 2017, 70: 52-91.
- [11] TALIB R A, AHMED N M, MOHAMMAD S M, et al. ZnO nanorods/polyaniline heterojunction onto SiO₂ for photosensor [J]. *J. Nanoelectron. Optoelectron.*, 2018, 13(7): 1034-1040.

- [12] CÁRDENAS J R, DE VASCONCELOS E A, DE AZEVEDO W M, *et al.*. A conducting polymer-silicon heterojunction as a new ultraviolet photodetector [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, 255(3):688-690.
- [13] ZHENG L X, YU P P, HU K, *et al.*. Scalable-production, self-powered TiO₂ nanowell-organic hybrid UV photodetectors with tunable performances [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8(49):33924-33932.
- [14] MOJTABAVI E A, NASIRIAN S. Flexible self-powered ultraviolet-visible photodetector based on polyaniline-titanium dioxide heterostructures; the study of the rearrangement of layers [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, 492:189-198.
- [15] HU K, CHEN H Y, JIANG M M, *et al.*. Broadband photoresponse enhancement of a high-performance *t*-Se microtube photodetector by plasmonic metallic nanoparticles [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26(36):6641-6648.
- [16] JU H Y, PARK D, KIM J. Organic acid-assisted chemical transformation of SnSe bulk crystals into Se nanowires and the influence on thermoelectric behaviors [J]. *J. Alloys Compd.*, 2018, 732:436-442.
- [17] GATES B, MAYERS B, CATTLE B, *et al.*. Synthesis and characterization of uniform nanowires of trigonal selenium [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2002, 12(3):219-227.
- [18] LIU P, MA Y R, CAI W W, *et al.*. Photoconductivity of single-crystalline selenium nanotubes [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(20):205704-1-5.
- [19] FANG X S, BANDO Y, LIAO M Y, *et al.*. An efficient way to assemble ZnS nanobelts as ultraviolet-light sensors with enhanced photocurrent and stability [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2010, 20(3):500-508.
- [20] FANG X S, ZHAI T Y, GAUTAM U K, *et al.*. ZnS nanostructures: from synthesis to applications [J]. *Prog. Mater. Sci.*, 2011, 56(2):175-287.
- [21] WEI Y W, TRAN V T, ZHAO C Y, *et al.*. Robust photodetectable paper from chemically exfoliated MoS₂-MoO₃ multilayers [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(24):21445-21453.
- [22] ZHANG Z M, NING Y, FANG X S. From nanofibers to ordered ZnO/NiO heterojunction arrays for self-powered and transparent UV photodetectors [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(2):223-229.
- [23] 陈洪宇, 王月飞, 闫珺, 等. 基于 Se 和有机无机钙钛矿异质结的宽光谱光电探测器制备及其光电特性研究 [J]. *中国光学*, 2019, 12(5):1057-1063.
- CHEN H Y, WANG Y F, YAN J, *et al.*. Fabrication and photoelectric properties of organic-inorganic broad-spectrum photodetectors based on Se microwire/perovskite heterojunction [J]. *Chin. Opt.*, 2019, 12(5):1057-1063. (in Chinese)
- [24] BERA A, DAS MAHAPATRA A, MONDAL S, *et al.*. Sb₂S₃/Spiro-OMeTAD inorganic-organic hybrid p-n junction diode for high performance self-powered photodetector [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8(50):34506-34512.
- [25] WANG H B, CHEN H Y, LI L, *et al.*. High responsivity and high rejection ratio of self-powered solar-blind ultraviolet photodetector based on PEDOT:PSS/ β -Ga₂O₃ organic/inorganic p-n junction [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2019, 10(21):6850-6856.
- [26] SHEN Y W, YAN X Q, SI H N, *et al.*. Improved photoresponse performance of self-powered ZnO/Spiro-MeOTAD heterojunction ultraviolet photodetector by piezo-phototronic effect [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8(9):6137-6143.
- [27] YANG X G, LIU Y, LEI H X, *et al.*. An organic-inorganic broadband photodetector based on a single polyaniline nanowire doped with quantum dots [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(34):15529-15537.
- [28] DENG W, JIE J S, SHANG Q X, *et al.*. Organic nanowire/crystalline silicon p-n heterojunctions for high-sensitivity, broadband photodetectors [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, 7(3):2039-2045.



于平平(1987 -),女,山东济南人,博士,讲师,2014年于东华大学获得博士学位,主要从事有机/无机光电器件和超级电容器的研究。
E-mail: pingpingyu@jiangnan.edu.cn



姜岩峰(1972 -),男,吉林四平人,博士,教授,2000年于兰州大学获得博士学位,主要从事射频集成电路设计与实现,新型电路结构设计与实现的研究。
E-mail: jiangyf@jiangnan.edu.cn