

文章编号: 1000-7032(2022)08-1273-08

Ag纳米线增强硒微米管/聚噻吩自驱动光电探测器性能

陈荣鹏, 冯仕亮, 郑天旭, 于平平*, 姜岩峰

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 自驱动光电探测器能够满足现代光电器件对节能和轻质的需求,但复杂的工艺和较高的成本限制了其进一步发展。本文采用旋涂法将硒微米管(Se-MT)和聚噻吩(PEDOT)制备成Se-MT/PEDOT异质结,其器件在350~700 nm波长下具有良好的光响应,无偏置电压下的响应度为8 mA/W(500 nm)。为了提高器件的光响应度,利用银纳米线(Ag-NW)修饰异质结制备Se-MT/PEDOT/Ag-NW,增强异质结在紫外-可见光区的光吸收并提高器件的光电性能。与Se-MT/PEDOT器件对比,Se-MT/PEDOT/Ag-NW器件在350~700 nm波长下的光电流数值整体上升,特别是在0 V偏压500 nm光照下,器件的响应度提升至65 mA/W(增强800%),开关比增强400%达到552,上升和下降时间明显下降至15 ms和28 ms。这一结果表明Ag-NW改性有机/无机异质结的方法可以应用于高性能光电探测器的制备。

关键词: 异质结; 银纳米线; 自驱动; 光电探测器

中图分类号: O482.31; TN304

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20220078

Ag Nanowires Enhance Performance of Self-powered Photodetector Based on Selenium Microtube/Polythiophene

CHEN Rong-peng, FENG Shi-liang, ZHENG Tian-xu, YU Ping-ping*, JIANG Yan-feng

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

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

Abstract: Self-powered photodetectors can meet the demands of modern optoelectronic devices for energy conservation and lightweight, but the complex process and high cost limit their further development. In this work, Se-MT/PEDOT heterojunction has been prepared by spin-coating with selenium microtube(Se-MT) and polythiophene(PEDOT), which shows a good photoresponse at 350–700 nm and a responsivity of 8 mA/W at 500 nm without bias voltage. To enhance the responsivity, Se-MT/PEDOT/Ag-NW was prepared by adding silver nanowires(Ag-NW) on the surface of Se-MT/PEDOT heterojunction, enhancing the UV-Vis absorption to improve the photoelectric performance of the device. Compared to the Se-MT/PEDOT, the Se-MT/PEDOT/Ag-NW device shows enhanced photocurrent at the wavelength of 350–700 nm, especially under 500 nm illumination at zero bias, 800% improvement in responsivity of 65 mA/W, the on-off ratio up to 552 with 400% enhancement, obvious reduction in response time (rise/decay time of 15/28 ms). This result indicates that the Ag-NW's modification of organic/inorganic heterojunction can be applied to the preparation of high-performance photodetectors.

Key words: heterojunctions; Ag nanowires; self-powered; photodetector

收稿日期: 2022-03-09; 修订日期: 2022-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(51802124); 中国博士后科学基金(2019M651693)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (51802124); The Postdoctoral Science Foundation of China (2019M651693)

1 引 言

光电探测器作为一种可以将光信号转换成电信号的器件,由于其在环境监测、臭氧传感、视频成像、夜视等领域的巨大应用潜力,已经引起了研究人员的广泛关注^[1-4]。传统的光电探测器依靠外部偏置电压来分离器件内部的光生电子和空穴,对于电源的依赖使其在狭小位置的应用受限^[5]。利用 p-n 结、异质结、肖特基结等结构建立内置电场来驱动光生电子和空穴的分离,构筑自驱动光电探测器可以做到在 0 V 下检测光信号^[6-8]。但是目前大多数的自驱动光电探测器为无机-无机型,复杂的加工条件和高昂的生产成本限制了其大规模应用^[9-10],因此,有必要找到一种简便而又低成本的方法制备高性能自驱动光电探测器。

硒(Se)作为一种 p 型无机半导体材料,带隙约为 1.77 eV,熔点为 217 °C,能够在较低的温度下通过蒸发沉积的方式制备微纳米结构,具有低成本、高结晶性能、高响应速率等优点^[11]。Se 基微纳米结构光电探测器的响应速度级别为毫秒级,胡凯等通过气相沉积法制备了 Se 微米管并构建光电探测器,器件的上升和下降时间分别为 0.32 ms 和 23.02 ms^[12]。Sun 等采用气相沉积法制备了 p-Se/Al₂O₃/n-ZnO 纳米棒阵列异质结光电探测器,器件的上升和下降时间分别为 0.9 ms 和 0.3 ms^[13]。陈洪宇等制备了基于一维 p 型 Se 微米线与二维 InSe 纳米片的范德瓦尔斯异质结型广光谱探测器,该器件在 -5 V 偏压下对 460 nm 光源的响应度可以达到 108 mA/W,比纯 Se 探测器提高了 800%^[14]。但是,Se 基微纳米结构光电探测器存在响应度不高等问题,因此需要结合有机半导体质轻、机械柔韧性高和光谱可调节等优点制备有机-无机自驱动光电探测器来解决上述问题。聚乙烯二氧噻吩(PEDOT)作为一种 p 型有机半导体材料,具有导电率高、成本低和稳定性好等优点,经常被用来修饰 ZnO、TiO₂ 和 ZnS 等无机半导体材料^[15-16],在光电探测器上有着广泛的应用。最近,方晓生课题组报道了采用原位聚合法构建的 Se/PANI、Se/PPy 和 Se/PEDOT 异质结型光电探测器,器件在 0 V 偏置电压下的响应度分别为 120, 70, 5.5 mA/W^[17],可见 Se/PEODT 光电探测器的响应度较低,这是因为传统平直型光电探测器共振模式单一,对于入射光的吸收能力较弱。

针对这一问题,可以通过在光电探测器中引入局域表面等离子体共振(LSPR)效应^[18]来增强器件对于入射光的吸收能力,增大器件表面的局部电场,使器件产生更多的光生电子和空穴。银、金和铝等贵金属均可以引起 LSPR 效应,但由于能带间的电子跃迁行为以及自由载流子在输运过程中发生的各种散射现象,金属将会产生部分耗损,在可见光范围内,金属银的耗损最小^[19]。金属银纳米结构的电子云振荡频率与可见光的频率相匹配,满足 LSPR 效应所需要入射光的频率和金属纳米结构整体振动的频率一致的要求。李露颖等报道了在可见光范围内采用银纳米颗粒修饰二硫化钼(MoS₂)并构成光电探测器,响应度提升了 470% 达到 2.97×10⁴ A/W^[20]。证明了在可见光范围内通过使用银纳米结构来修饰光电器件,可以有效地提升器件的光电特性。Se/PEODT 光电探测器的工作范围为 300~700 nm^[17],满足上述使用金属银纳米结构激发 LSPR 的条件,因此可以借助 LSPR 效应来进一步提升 Se/PEODT 光电探测器的响应度。

基于此,本文采用化学气相沉积法制备了高结晶的 Se 微米管(Se-MT),并且通过旋涂法制备了 Se-MT/PEDOT 异质结,同时在异质结表面修饰银纳米线(Ag-NW)来激发 LSPR 效应,分别得到了 Se-MT/PEDOT、Se-MT/PEDOT/Ag-NW 光电探测器,具有 350~700 nm 的宽光谱检测范围以及自驱动能力。这为有机-无机自驱动光电探测器的进一步研制和开发提供了重要的实验依据和材料基础。

2 实 验

2.1 样品制备

Se-MT 由化学气相沉积法制备。取适量 Se 粉(99.999%)放置在石英舟中,将石英舟放置在水平管式炉的中心温区。将经过丙酮、乙醇、去离子水预处理并清洗吹干后的 Si/SiO₂ 片(2 cm×1 cm)放置在距石英舟右侧 20 cm 处。先向水平管式炉中通入 500 mL/min 高纯氮气 20 min 来排尽炉中的空气,之后将气体流速改至 200 mL/min 进行 Se-MT 的生长。生长温度为 300 °C,生长时间为 5 h,沉积完毕之后冷却至室温,即可在 Si/SiO₂ 片得到 Se-MT。

Ag-NW 利用多元醇还原法制备。将硝酸银(0.2 mol/L)和聚乙烯吡咯烷酮(0.5 mol/L)依次

加入 10 mL 乙二醇溶液中,磁力搅拌 15 min 后将溶液转移至 50 mL 水热反应釜中,加热至 200 °C,反应时间为 2 h。将所得产物用去离子水和乙醇离心洗涤数次,去除上层溶液后,将底部产物重新溶于乙醇备用。

Se-MT/PEDOT 异质结通过旋涂法制备。在玻璃上选取单个 Se-MT 使用钢固定一侧并用 3M 胶带覆盖,之后将 PEDOT 溶液滴在 Se-MT 的另一侧以 2 000 r/min 的速率旋涂 2 min,随后放入温度为 60 °C 的烘箱内处理 5 min 即可得到 Se-MT/PEDOT 异质结。胶带覆盖部分 Se-MT/PEDOT,采用旋涂法加入 Ag-NW 溶液,旋涂速率为 1 500 r/min,旋涂时间为 2 min,60 °C 下烘烤 10 min 即可得到 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 异质结。最后,去除 3M 胶带并采用钢分别固定 Se-MT/PEDOT 和 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 端制备光电探测器。

2.2 样品表征

样品的形貌和结构由扫描电子显微镜(SEM, Zeiss s-4800)、X射线衍射仪(XRD, Bruker D8-A25)和拉曼光谱仪(LabRam-1B, 632.8 nm)表征。器件的光电性能和光谱响应特性由基于氙灯、单色仪、斩波器、锁相放大器、Keithley 4200 半导体的测试系统表征。

3 结果与讨论

图 1(a)是利用化学气相沉积法生成的 Se-MT 的扫描电子显微镜(SEM)图,可见表面光滑的六方 Se-MT,Se-MT 的宽度大约 4 μm ,长度可达数十至数百微米,从图 1(a)插图可见 Se-MT 为空心结构。旋涂 PEDOT 后的 Se-MT/PEDOT 异质结如图 1(b)所示,可见在 Se-MT 表面覆盖了一层 PEDOT 颗粒。将直径 30 nm 和长度大于 10 μm 的纯 Ag-NW(图 1(c))修饰在 Se-MT/PEDOT 异质结表面得到 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 异质结,如图 1(d)所示,从图 1(d)插图可见 Ag-NW 的厚度约为 50 nm。

图 2 是 Ag-NW、Se-MT、Se-MT/PEDOT、Se-MT/PEDOT/Ag-NW 的紫外-可见吸收光谱。Se-MT 在 700 nm 处吸收下降,对应禁带带隙为 1.77 eV,加入 PEDOT 后增强了异质结在 650~750 nm 处的光吸收。Se-MT/PEDOT/Ag-NW 在 353 nm 和 378 nm 处的吸收增强,分别对应 Ag-NW 的纵向等离子体共振和横向等离子体共振,在 600~750 nm 处的吸收增强,导致 Se-MT 的截止边不够明显,说明 Ag-NW 的加入可以增强异质结的光吸收,产生较多

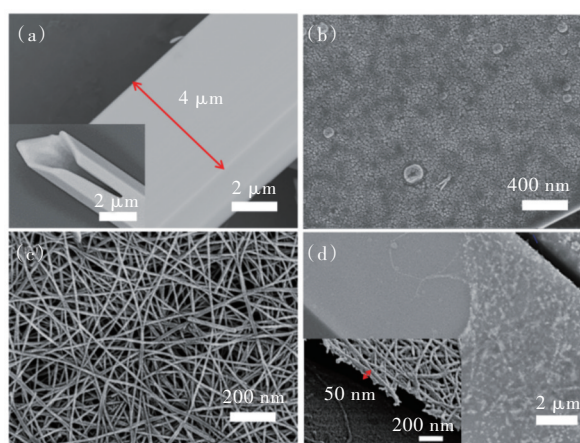


图 1 Se-MT (a)、Se-MT/PEDOT (b)、Ag-NW (c) 和 Se-MT/PEDOT/Ag-NW (d) 的 SEM 图。插图是 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 的截面图。

Fig.1 SEM images of Se-MT (a), Se-MT/PEDOT (b), Ag-NW (c) and Se-MT/PEDOT/Ag-NW (d). Inset is the cross-section image of Se-MT/PEDOT/Ag-NW.

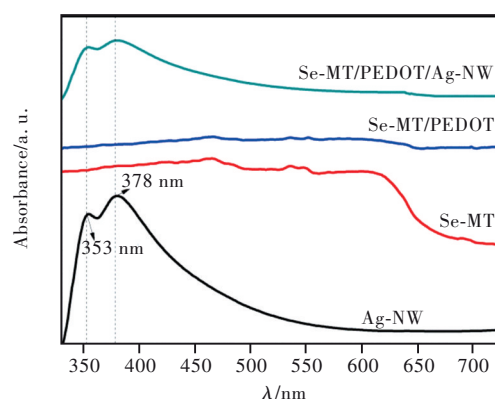


图 2 Ag-NW、Se-MT、Se-MT/PEDOT、Se-MT/PEDOT/Ag-NW 的紫外-可见吸收光谱。

Fig.2 UV-Vis absorption spectroscopy of Ag-NW, Se-MT, Se-MT/PEDOT and Se-MT/PEDOT/Ag-NW.

的光生载流子。

图 3(a)是 Se-MT、Se-MT/PEDOT、Se-MT/PEDOT/Ag-NW 的 XRD 图。从图中可以看出 Se-MT 衍射峰——对应 JCPDS 标准卡片库中的 No. 65-1876 的峰位(晶格参数为 $a=b=0.4364\text{ nm}$, $c=0.4959\text{ nm}$),证明得到的产物为 t-Se^[21]。相比于 Se-MT, Se-MT/PEDOT 复合材料由于 PEDOT 材料包裹导致(110)、(102)面的结晶性下降,从而衍射峰不明显。从 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 的 XRD 图谱中可以看到(111)面和(200)面的衍射峰(晶格参数为 $a=3.81\text{ nm}$ 和 $b=4.43\text{ nm}$),这与 JCPDS 标准卡片库中的 No. 04-0783 的结果吻合,因此可以证明 Ag-NW 的存在^[22]。图 3(b)是 Se-MT、Se-MT/PEDOT、

Se-MT/PEDOT/Ag-NW 的拉曼图谱。在 Se-MT/PEDOT 的拉曼图谱中可见 236.6 cm^{-1} 处属于 Se 的特征峰^[23], $1\,438\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,510\text{ cm}^{-1}$ 处属于 PEDOT 的共振峰^[24], 证明 Se-MT/PEDOT 异质结制备成功。Se-MT/PEDOT/Ag-NW 在 $800, 1\,100, 1\,438\text{ cm}^{-1}$ 的拉曼峰强度增强, 这是由于 Ag-NW 的引入使得表面电磁场增强, 进而增强了拉曼散射效应, 导致拉曼信号增大^[25], 表明 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 异质结制备成功。

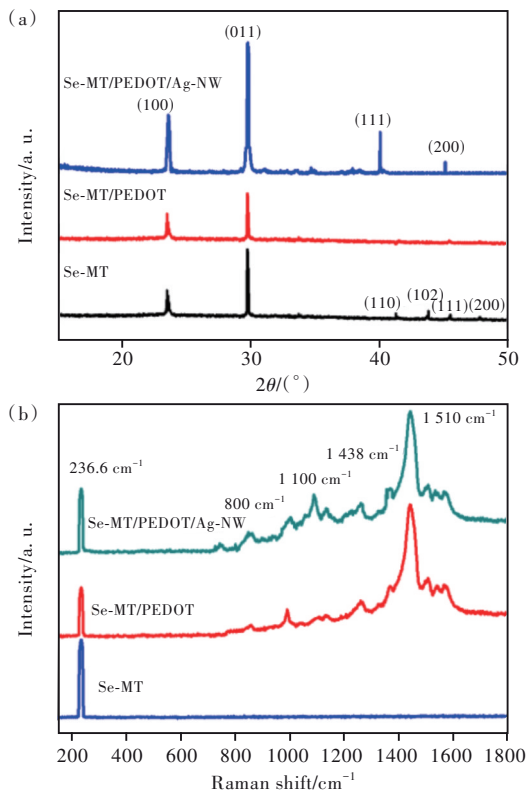


图3 Se-MT、Se-MT/PEDOT 和 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 的 XRD 图(a)和拉曼图谱(b)。

Fig.3 XRD patterns (a) and Raman spectra (b) of Se-MT, Se-MT/PEDOT and Se-MT/PEDOT/Ag-NW.

为了研究器件的光电性能, 使用金属钢作为电极(如图 4(a)所示), 制备了 Se-MT/PEDOT 和 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 光电探测器, 器件示意图如图 4(b)~(c)中的插图所示, 并对器件进行了 I - V 特性测试。从图 4(b)可见, Se-MT/PEDOT 在暗态和波长 368 nm (0.505 mW/cm^2), 500 nm (0.668 mW/cm^2), 600 nm (0.546 mW/cm^2) 光照射下, 光电流发生明显变化, 其中 500 nm 光照下器件的开路电压约为 0.4 V 。图 4(c)是 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 的 I - V 特性曲线, 可见加入 Ag-NW 后器件在 500 nm 光照射下的开路电压增大至 0.6 V , 整流效果明

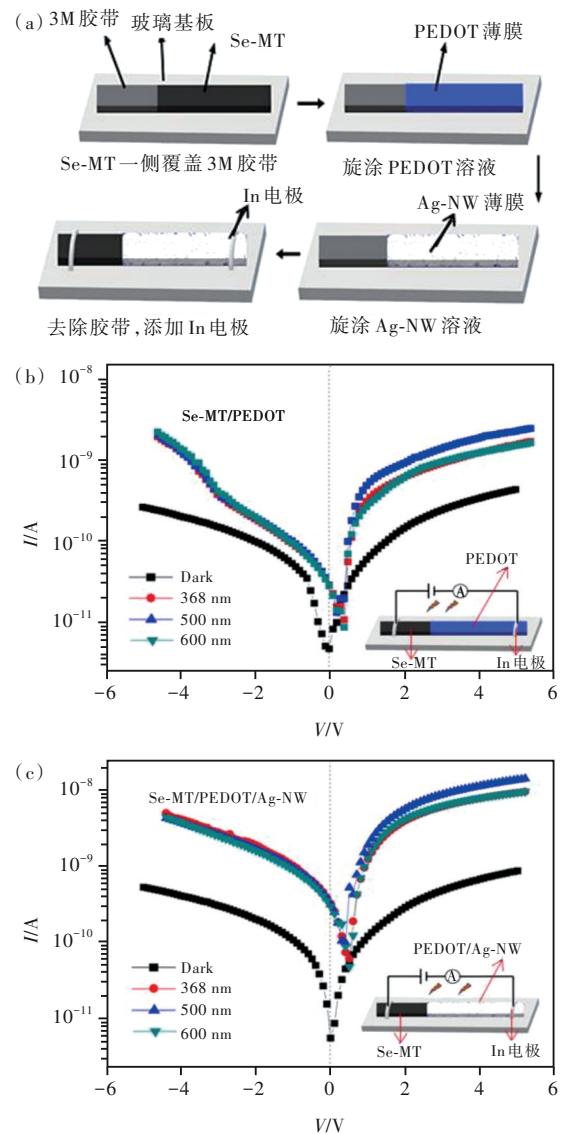


图4 (a) 器件制备流程图; Se-MT/PEDOT (b) 和 Se-MT/PEDOT/Ag-NW (c) 器件在暗条件及 $368, 500, 600\text{ nm}$ 光照下的 I - V 特性曲线, 插图为器件示意图。

Fig.4 (a) Device fabrication flowchart. I - V characteristics of Se-MT/PEDOT (b) and Se-MT/PEDOT/Ag-NW (c) photodetectors under dark and different light illumination. Insert is the illustration of the device.

显提升。

为了验证器件在不同波长光照下的光电流变化情况, 对器件进行了 I - t 特性测试。在 0 V 偏置电压下对 Se-MT/PEDOT 和 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 器件使用波长为 $368, 500, 600\text{ nm}$ 的光进行照射。从图 5(a)可见, Se-MT/PEDOT 器件在光照下的电流有明显提升, 当光照移除后, 器件的电流迅速下降到一个较低的水平。 $368, 500, 600\text{ nm}$ 光照射下的光电流分别为 $0.26, 0.46, 0.21\text{ nA}$, 暗电流为 3.4 pA , 计算可得开关比为 $76, 135, 62$ 。相比

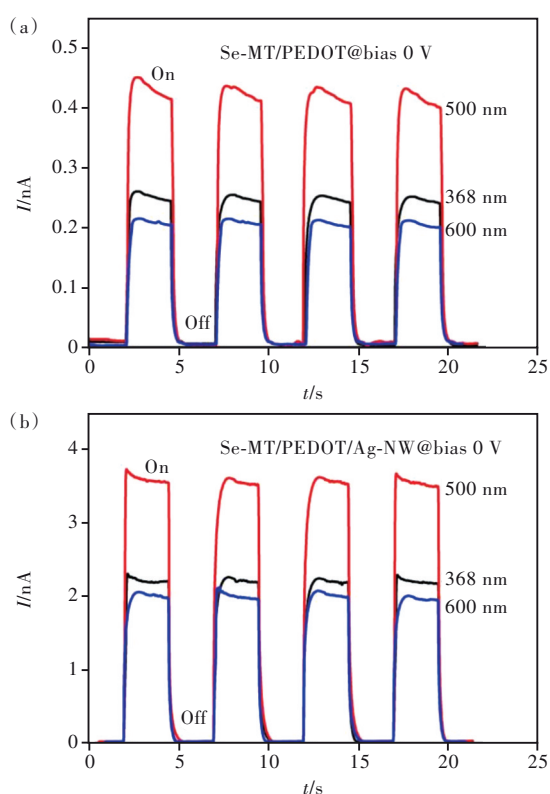


图 5 Se-MT/PEDOT (a) 和 Se-MT/PEDOT/Ag-NW (b) 器件在 0 V 偏压下 368, 500, 600 nm 光照下的 $I-t$ 特性曲线。

Fig.5 $I-t$ characteristics of Se-MT/PEDOT (a) and Se-MT/PEDOT/Ag-NW (b) photodetectors under 368, 500, 600 nm light illumination at 0 V.

于 Se-MT/PEDOT, Se-MT/PEDOT/Ag-NW 器件在 368, 500, 600 nm 光照下的光电流如图 5(b) 所示, 分别提升至 2.2, 3.7, 1.9 nA, 暗电流为 6.7 pA, 开关比提升至 328, 552, 283。一般定义器件在光照下的电流最大值的 10% 增大到 90% 的时间间隔为上升时间, 以移除光照后的器件从电流最大值的 90% 减小到 10% 的时间间隔为下降时间, 从图 6(a) 可以得到 Se-MT/PEDOT 器件在 0 V 偏压、500 nm 光照下的上升/下降时间为 23 ms/59 ms, 而从图 6(b) 可见 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 器件的上升时间和下降时间分别降低至 15 ms 和 38 ms, 表明 Ag-NW 的加入增强了光吸收, 光生载流子增多, 内建电场增大, 等离子体共振效应产生更多的热量加速光生电子空穴对的分离, 提高了光电流, 减少响应时间, 同时降低了光敏区的电容效应, 加快了下降时间, 因此有助于提高器件的开关比和响应速度。

为了确定器件光响应工作范围, 对上述光电探测器进行了 350~700 nm 范围光谱测试, 光响应

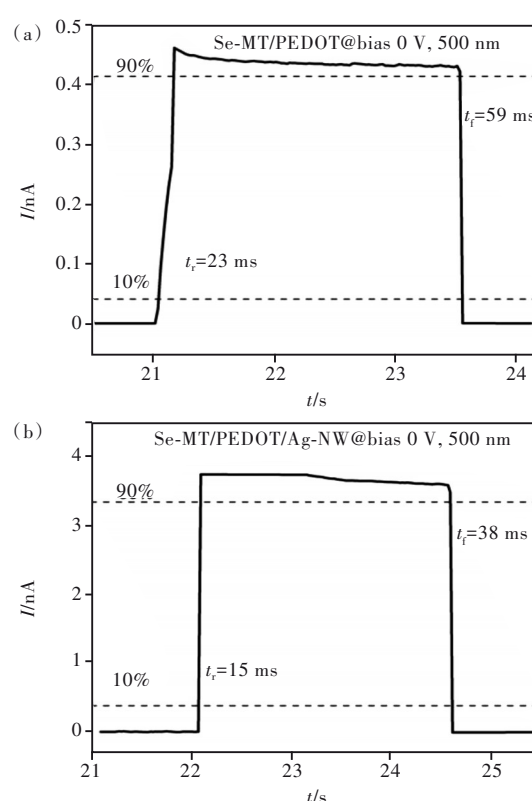


图 6 Se-MT/PEDOT (a) 和 Se-MT/PEDOT/Ag-NW (b) 器件在 0 V 偏压 500 nm 光照下的 $I-t$ 曲线

Fig.6 $I-t$ characteristics of Se-MT/PEDOT (a) and Se-MT/PEDOT/Ag-NW (b) photodetectors under 500 nm light illumination at 0 V

度(R_λ)可由公式(1)计算:

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

其中 I_{ph} 是光电流, I_d 是暗电流, P_λ 是入射光的光功率, S 是器件的有效面积 ($8.45 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$)。

探测度为光电探测器的另一个重要参数, 由公式(2)计算:

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

其中 q 是基本电荷量, J_d 为器件的暗电流密度。图 7(a) 为 Se-MT/PEDOT、Se-MT/PEDOT/Ag-NW 光电探测器在 0 V 偏置电压下的光谱响应曲线。从图中可以看到在 350~700 nm 范围内, 两个器件都具有明显的光响应, 在 500 nm 处达到最大值, 之后逐渐下降, 在 700 nm 处下降到最低点。Se-MT/PEDOT/Ag-NW 器件的响应度相较于 Se-MT/PEDOT 器件整体提升, 响应度峰值由 8 mA/W 提升至 65 mA/W, 高于之前报道的方晓生课题组制备的 Se/PEDOT 异质结光电探测器的响应度 (5.5

mA/W)^[17]。从图 7(b)看出探测度曲线和响应度曲线的趋势相同, Se-MT/PEDOT 和 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 器件的最高探测度在 500 nm 处, 分别是 1.02×10^{11} Jones 和 9.22×10^{11} Jones。结果说明 Ag-NW 的加入有助于提升器件在可见光范围内的响应度和探测度。

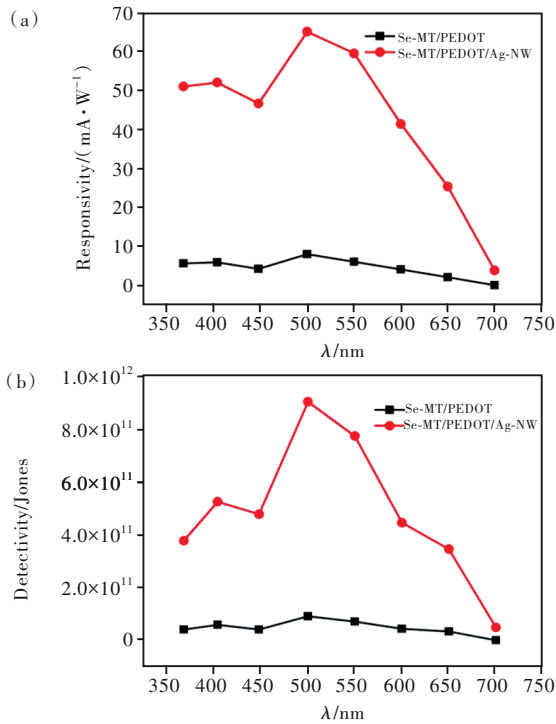


图 7 Se-MT/PEDOT 和 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 器件在 0 V 偏压下的响应度曲线(a)和探测度曲线(b)
Fig.7 Spectra responsivity(a) and detectivity characteristics (b) of Se-MT/PEDOT 和 Se-MT/PEDOT/Ag-NW photodetectors at 0 V

Se-MT/PEDOT/Ag-NW 器件在 0 V 偏压、500 nm 光照下的功率响应变化情况如图 8 所示, 随着入射光功率的不断增强, 器件的光电流也随之增大, 呈现出对入射光功率变化的良好响应。

为研究 Se-MT/PEDOT、Se-MT/PEDOT/Ag-NW 器件的工作原理, 能带匹配示意图如图 9 所示。Se-MT 的电子亲和能为 3.2 eV^[17], 带隙为 1.77 eV^[12]; PEDOT 的电子亲和能为 3.5 eV^[26], 带隙为 2.0 eV^[27], 形成 Se-MT/PEDOT II 型异质结如图 9(a)所示。在光照下, 电子-空穴对主要由纯 Se-MT 的光响应产生, 在 Se-MT/PEDOT II 型异质结的内建电场作用下, 光生电子从 Se 转移到 PEDOT 的最低未占据分子轨道(LUMO)能级被阴极收集, 与此同时 Se 能级 E_c 上的空穴直接被阳极收集, 导致电子空穴对的分离, 减少了复合概率, 实

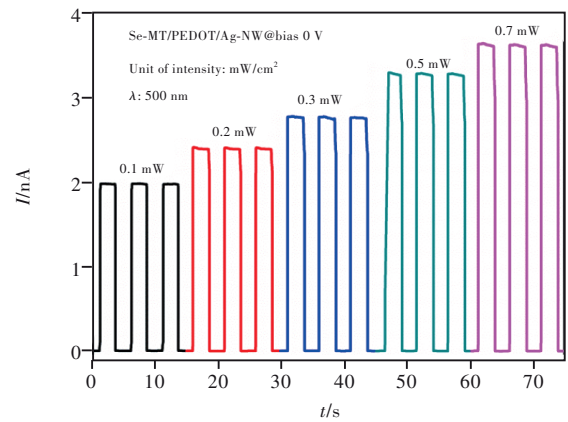


图 8 Se-MT/PEDOT/Ag-NW 器件在 0 V 偏压、不同光强的 500 nm 照射下的 $I-t$ 曲线。
Fig.8 Time-dependent photocurrent response at different light intensities of Se-MT/PEDOT/Ag-NW device at zero bias

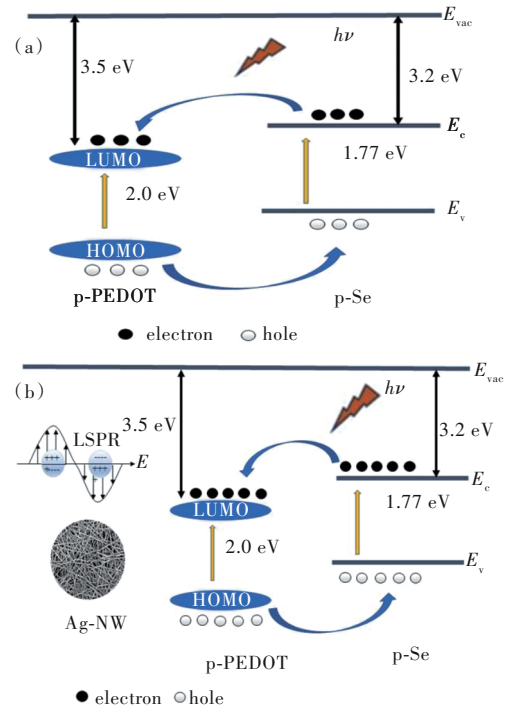


图 9 器件 Se-MT/PEDOT(a) 和 Se-MT/PEDOT/Ag-NW (b) 的能带示意图
Fig.9 Schematic illustration of energy levels of Se-MT/PEDOT(a) and Se-MT/PEDOT/Ag-NW (b) devices

现了器件的自驱动特性。加入 Ag-NW 后, 增强了在 350~500 nm 波长范围内的光吸收, 而且 Ag-NW 和 Se/PEDOT 形成能级匹配如图 9(b)所示, 当入射光照射异质结时, 器件对入射光的吸收能力增强, 光生载流子增多, 在内建电场的作用下光生电子和空穴分离, 从而产生更大的光电流, 提升了器件的光电性能。

4 结 论

本文通过化学气相沉积法制备了高结晶的Se-MT并通过旋涂法制备Se-MT/PEDOT异质结,同时在异质结表面修饰Ag-NW,分别制备了Se-MT/PEDOT、Se-MT/PEDOT/Ag-NW异质结光电探测器。两款光电探测器都具备350~700 nm的宽光谱探测能力;Se-MT/PEDOT/Ag-NW器件相较于Se-MT/PEDOT,在350~700 nm范围内响应度整体提高,响应度峰值从8 mA/W提升至

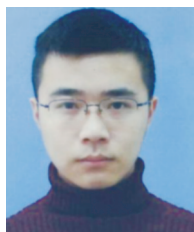
65 mA/W,开关比从135提升至552,上升和下降时间分别从23 ms和59 ms减少到15 ms和28 ms。可见加入Ag-NW可以增强光电探测器在可见光范围内的光电性能。这也为发展高性能有机-无机自驱动光电探测器提供了一种新的解决方案。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishingcn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220078>.

参 考 文 献:

- [1] PARK S H, SU R T, JEONG J, *et al.* 3D printed polymer photodetectors [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(40): 1803980-1-8.
- [2] CHEN S, LOU Z, CHEN D, *et al.* An artificial flexible visual memory system based on an UV-motivated memristor [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(7): 1705400-1-9.
- [3] LI L, CHEN H Y, FANG Z M, *et al.* An electrically modulated single-color/dual-color imaging photodetector [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(24): 1907257-1-9.
- [4] CHOW P C Y, SOMEYA T. Organic photodetectors for next-generation wearable electronics [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(15): 1902045-1-26.
- [5] XIN Y, JIANG J C, LU Y F, *et al.* Self-powered broad spectral photodetector with ultrahigh responsivity and fast response based on Sb₂Se₃/VO₂ heterojunction [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2021, 8(10): 2100058-1-8.
- [6] CHEN H Y, LIU K W, HU L F, *et al.* New concept ultraviolet photodetectors [J]. *Mater. Today*, 2015, 18(9): 493-502.
- [7] MITRA S, PAK Y, XIN B, *et al.* Solar-blind self-powered photodetector using solution-processed amorphous core-shell gallium oxide nanoparticles [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(42): 38921-38928.
- [8] ZHANG H B, ZHANG X J, LIU C, *et al.* High-responsivity, high-detectivity, ultrafast topological insulator Bi₂Se₃/Silicon heterostructure broadband photodetectors [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(5): 5113-5122.
- [9] CAO B, LIU Q H, ZHENG Y L, *et al.* Wafer-scale InN/In₂S₃ core-shell nanorod array for ultrafast self-powered photodetection [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(14): 2110715-1-9.
- [10] HOU Z D, LING C C, XUE X, *et al.* Surface lattice reconstruction enhanced the photoresponse performance of a self-powered ZnO nanorod arrays/Si heterojunction photodetector [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(48): 17440-17449.
- [11] 陈洪宇,王月飞,闫璐,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)
- [12] 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.
- [13] SUN C X, CHEN L, CHANG Y, *et al.* A self-powered UV-visible photodetector based on p-Se/Al₂O₃/n-ZnO nanorod array heterojunction [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2019, 34(5): 560-566.
- [14] 陈洪宇,尚慧明,戴明金,等. 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 [J]. *发光学报*, 2019, 40(11): 1409-1416.
CHEN H Y, SHANG H M, DAI M J, *et al.* Controlled fabrication InSe/Se van der Waals heterojunction for high responsivity broadband photodetectors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(11): 1409-1416. (in Chinese)
- [15] HELIL Z, JAMAL R, NIYAZ M, *et al.* Electrochemical preparation of ZnO/PEDOT-type conducting polymers composites

- for ultraviolet photodetector [J]. *Chemistry Select*, 2021, 6(35): 9427-9434.
- [16] HAN L, LI X R, MA J, *et al.* An *in-situ* synthesized PEDOT:PSS/TiO₂ nanocomposite film by electropolymerization and its enhanced electrochromic properties [J]. *Nanosci. Nanotechnol. Lett.*, 2015, 7(4): 308-313.
- [17] YU P P, HU K, CHEN H Y, *et al.* Novel p-p heterojunctions self-powered broadband photodetectors with ultrafast speed and high responsivity [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(38): 1703166-1-10.
- [18] LIU J, WU Z H, HE Q G, *et al.* Catalytic application and mechanism studies of argentic chloride coupled Ag/Au hollow heterostructures: considering the interface between Ag/Au bimetal [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2019, 14(1): 35.
- [19] 苏宛然, 冯琳, 石林林, 等. 表面等离子体增强型光电探测器研究进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42(7): 1014-1028.
SU W R, FENG L, SHI L L, *et al.* Research progress in surface plasmon enhanced photodetectors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(7): 1014-1028. (in Chinese)
- [20] JING W K, DING N, LI L Y, *et al.* Ag nanoparticles modified large area monolayer MoS₂ phototransistors with high responsivity [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(13): 14565-14574.
- [21] 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 P P, DUAN W, JIANG Y F. Fabrication and photoelectric properties of self-powered photodetectors based on se nano-flower/polyaniline heterojunctions [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(11): 1391-1396. (in Chinese)
- [22] SHKIR M, KHAN M T, ASHRAF I M, *et al.* Rapid microwave-assisted synthesis of Ag-doped PbS nanoparticles for optoelectronic applications [J]. *Ceram. Int.*, 2019, 45(17): 21975-21985.
- [23] QIN J K, QIU G, JIAN J, *et al.* Controlled growth of a large-size 2D selenium nanosheet and its electronic and optoelectronic applications [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(10): 10222-10229.
- [24] ZHANG J T, ZHAO X S. Conducting polymers directly coated on reduced graphene oxide sheets as high-performance supercapacitor electrodes [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2012, 116(9): 5420-5426.
- [25] LIAN X X, LV Y J, SUN H L, *et al.* Effects of Ag contents on the microstructure and SERS performance of self-grown Ag nanoparticles/Mo-Ag alloy films [J]. *Nanotechnol. Rev.*, 2020, 9(1): 751-759.
- [26] HUSSAIN A A, SHARMA B, BARMAN T, *et al.* Self-powered broadband photodetector using plasmonic titanium nitride [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8(6): 4258-4265.
- [27] LIN P, YAN X Q, ZHANG Z, *et al.* Self-powered UV photosensor based on PEDOT:PSS/ZnO micro/nanowire with strain-modulated photoresponse [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2013, 5(9): 3671-3676.



陈荣鹏(1995-),男,江苏盐城人,硕士研究生,2017年于扬州大学获得学士学位,主要从事有机/无机半导体光电探测器的研究。

E-mail: chenrongpeng1995@163.com



于平平(1987-),女,山东济南人,博士,副教授,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