

非对称接触诱导的自供电MAPbBr₃光电探测器

李庆宇, 刘 铭*

哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2021年11月23日; 录用日期: 2021年12月22日; 发布日期: 2021年12月29日

摘 要

半导体单晶由于内部具有低的缺陷密度、高的迁移率, 而被认为是制备光电器件的优选材料。从应用的角度考虑, 如果一个光电探测器可以无需外部供电即可工作, 它将具有节能、器件小型化等优点, 因此受到了研究者的广泛关注。本研究工作中, 以一种有机-无机杂化的钙钛矿单晶作为光吸收层, 利用两种具有不同功函数的金属作为电极, 从而导致两个电极与单晶接触的界面处实现了一个非对称的肖特基势垒, 最终在该器件中实现了自驱动的工作模式。该自驱动的光电探测器在520 nm处的响应度高达0.39 A·W⁻¹, 器件具有快速的响应时间(上升沿: 9 μs, 下降沿: 864 μs)。本工作为下一步开发高性能的自驱动光电探测器提供了一个科学指导和实验基础。

关键词

钙钛矿, MAPbBr₃单晶, 自供电, 光电探测器

Asymmetrically Contact-Induced Self-Powered MAPbBr₃ Photodetector

Qingyu Li, Ming Liu*

School of Physics and Electrical Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Nov. 23rd, 2021; accepted: Dec. 22nd, 2021; published: Dec. 29th, 2021

Abstract

Semiconductor single crystal is considered as the preferred material for photoelectric devices due to its low defect density and high mobility. From the perspective of application, if a photodetector

*通讯作者。

can work without an external power supply, it will have the advantages of energy saving and device miniaturization, so it has been widely concerned by researchers. In this work, an organic-inorganic hybrid perovskite single crystal is used as the light absorption layer, and two metals with different work functions are used as the electrodes, resulting in the realization of an asymmetric Schottky barrier at the interface between the two electrodes and the single crystal. Finally, the self-driven operation mode is realized in the device. The self-driven photodetector has a high responsivity of $0.39 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$ at 520 nm and a fast response time (rising edge: 9 μs , falling edge: 864 μs). This work provides the scientific guidance and experimental basis for the development of high-performance self-driven photodetectors.

Keywords

Perovskite, MAPbBr₃ Single Crystal, Self-Powered, Photodetector

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光电探测器(PD)是一类可探测光信号,并将其转换为电信号的器件。它已被广泛地应用于成像,环境监测,空间通讯和勘探等领域。[1]从应用的角度考虑,如果一个光电探测器无需外部供电即能工作,也称为自驱动光电探测器,它将具有节能、器件小型化等优点,从而具有广泛的应用前景,特别适用于有毒有害的极端场合。经过多年的发展,自驱动的光电探测器已经取得了长足的进步。[2]研究者们已经利用光伏效应,通过肖特基结构,异质结构和pn结等器件结构实现了自驱动的光电探测器。[3]这些器件结构相对复杂,不便于与先进的集成电路集成,从而制约了它们的发展。金属-半导体-金属(MSM)器件结构是一种平面器件结构,它的制备工艺简单,便于与集成电路集成,因而受到了研究者的广泛关注。[4]如果能以金属-半导体-金属器件结构来实现自驱动的光电探测器,将具有更加广泛的应用前景。其中非对称电极调制技术是一种有效的方式,它通过不同功函数金属电极引入内建电场,可在无需施加外部偏压的情况下实现光生电子对的分离与提取,即自供电探测模式。另外,由非对称电极驱动的自供电PD还具有长时间工作的优点。[5]

近年来,有机-无机杂化钙钛矿材料因其具有禁带宽度可调、载流子迁移率高、载流子扩散长度长、光吸收系数高、激子结合能低、缺陷密度低、可溶液加工等优点,而在光伏太阳能电池和发光二极管领域大放异彩, [6] [7]并被尝试作为光吸收层,来制备光电探测器,并实现了高的光电性能。[8]因此,这类有机-无机杂化钙钛矿材料被认为是制备高性能光电探测器的优选材料。作为钙钛矿家族的主要成员,MAPbBr₃钙钛矿半导体材料在光电器件中表现出优异的性能。近年来,MAPbBr₃钙钛矿光电探测器主要以多晶薄膜及块状单晶的表现形式实现,它们可以将光信号转换为电信号,是光电子系统的关键组成部分。[9]然而,钙钛矿薄膜虽然可以通过一些基于溶液处理的简便工艺来大规模制备,但多晶钙钛矿薄膜具有大量晶界和缺陷,其作为载流子的捕获和复合中心,从而降低了载流子的分离效率,缩短了载流子的寿命。[9]此外,由于晶界与缺陷极易吸附空气中的水氧,导致多晶薄膜具有空气环境不稳定因素。相比之下,缺陷浓度低、晶界少的单晶钙钛矿具有更高的载流子迁移率和载流子寿命,在空气中也更稳定。

本研究工作中, 以高质量的有机-无机杂化钙钛矿 MAPbBr_3 单晶作为光吸收层, 以金属 Au 和 Ag 作为电极, 来制备 MSM 器件结构的光电探测器。由于 Au 和 Ag 电极具有不同的功函数, 从而使两个电极的界面处形成了一个非对称肖特基势垒, 肖特基势垒高度与金属的功函数和半导体的电子亲和势密切相关, 电子从半导体的导带最小值移动到接触金属(空穴从价带最大值移动到接触金属), 获得平衡的费米能级, [10]最终导致该器件具有明显的光伏效应, 实现了自驱动的工作模式。该自驱动的光电探测器在 520 nm 处的响应度可达 $0.39 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 器件具有快速的响应时间(上升沿: $9 \mu\text{s}$, 下降沿: $864 \mu\text{s}$)。

2. 实验部分

2.1. 药品

溴化铅(PbBr_2), 甲基溴化铵(MABr), N-N 二甲基甲酰胺(DMF), 二氯甲烷(CH_2Cl_2)。

2.2. MAPbBr_3 单晶的合成

首先将甲基溴化铵(MABr)和溴化铅(PbBr_2)按 1:1 的摩尔比例放入 2 mL 的 N-N 二甲基甲酰胺溶剂中, 在室温下搅拌过夜至完全溶解, 获得 1 M 的生长溶液。然后利用 $0.2 \mu\text{m}$ 聚四氟乙烯过滤器过滤该溶液。将装有此溶液的小瓶置于热盘上, 热盘温度从室温缓慢升至 75°C , 开始析出晶体。生长后, 使用二氯甲烷冲洗单晶并烘干。

2.3. 光电探测器的制备

通过真空热蒸发技术, 利用掩模板在 MAPbBr_3 单晶上沉积约 50 nm 厚的 Ag 电极, 在同一平面内利用掩模板再沉积约 50 nm 厚的 Au 电极, 两电极间的尺寸长宽控制在 $100 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ 。最终获得了非对称金属-半导体-金属结构的 MAPbBr_3 光电探测器。

2.4. 表征方法及测试

用日立 SU70 扫描电子显微镜(SEM)表征 MAPbBr_3 单晶的表面形貌。用 X 射线衍射仪(Rigaku Corporation, D/max-2600/pc)表征样品的结构。用紫外-可见分光光度计和光致发光谱表征单晶的光学特性。利用 Zolix DR800-CUST 表征光电探测器的光响应特性。利用 Keithley 2400 源表和太阳光模拟器表征器件的 $I-V$ 及 $I-t$ 曲线。

3. 结果与讨论

3.1. MAPbBr_3 单晶的表征

图 1(a)展示了 MAPbBr_3 单晶的生长过程。随着温度的逐渐升高, MAPbBr_3 的溶解度降低, 单晶逐步成核并长大。图 1(b)显示了 MAPbBr_3 单晶的 SEM 图像, 从图中可以看到生长的单晶具有非常光滑的表面, 并无明显晶界与孔洞, 初步证明生长的晶体结晶质量较好。图 1(c)展示了 MAPbBr_3 材料的结构特性。可以观察到在 15.2° , 30.4° 和 45.6° 位置存在三个明显的衍射峰, 它们分别对应于 $\text{MAPbBr}_3(001)$, (002) 和 (003) 晶面, [11]表明生长的 MAPbBr_3 材料是单晶结构。图 1(d)为利用紫外-可见分光光度计和光致发光(PL)光谱表征的 MAPbBr_3 单晶的光学特性。图 1(d)插图为 $(ah\nu)^2$ 随光子能量变化的曲线。对曲线的线性部分取切线可得到 MAPbBr_3 单晶的光学带隙为 2.17 eV。光致发光光谱显示 MAPbBr_3 单晶在 543 nm 处有一个尖锐的发光峰, 并且发光峰的半高宽度为 22 nm。这也表明了该单晶具有较少的缺陷密度和良好的结晶特性[12]。

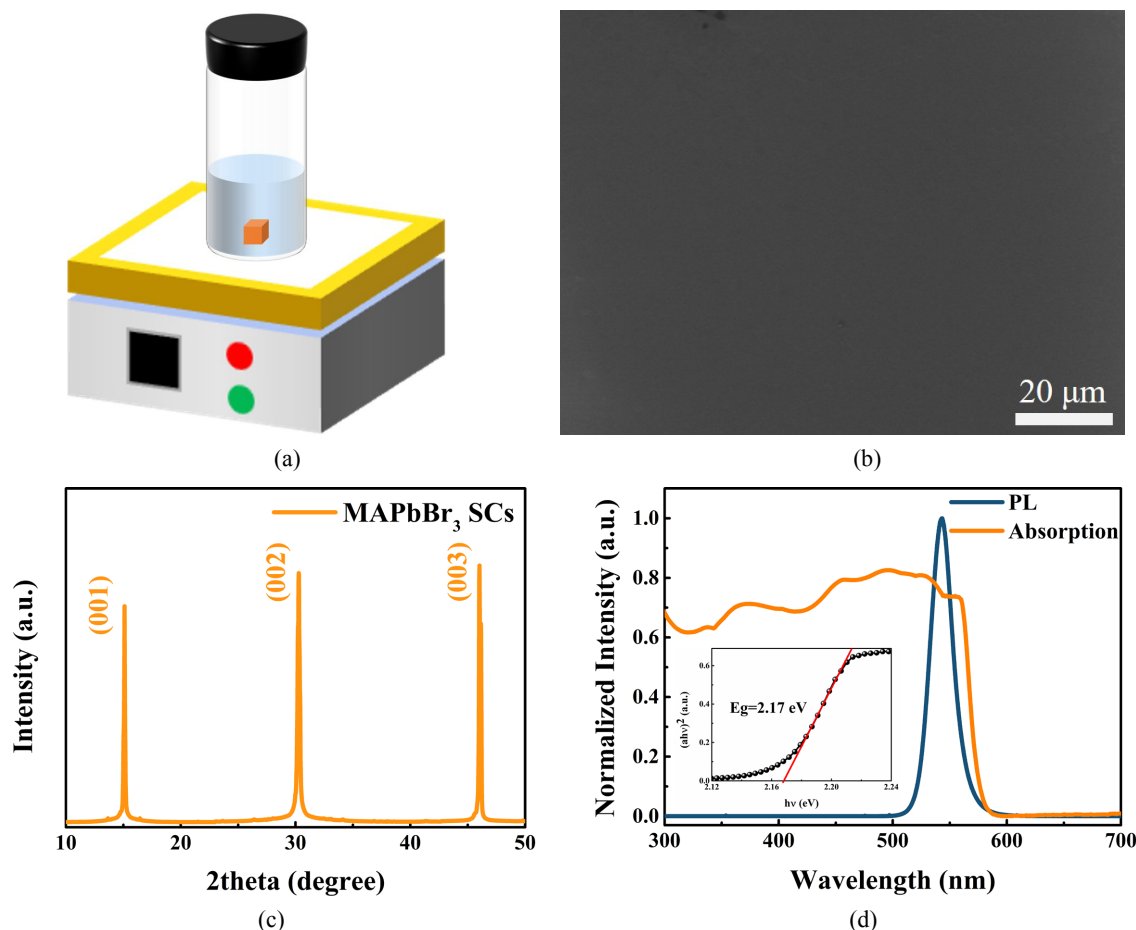


Figure 1. (a) Schematic illustration of MAPbBr₃ single crystal growth; (b) Top-view SEM images of MAPbBr₃ single crystal surface; (c) XRD pattern of MAPbBr₃ single crystal; (d) Absorption spectrum and photoluminescence spectrum of MAPbBr₃ single crystal

图 1. (a) MAPbBr₃ 单晶生长示意图; (b) MAPbBr₃ 单晶表面的 SEM 图像; (c) MAPbBr₃ 单晶的 XRD 图; (d) MAPbBr₃ 单晶的吸收光谱和光致发光光谱

3.2. MAPbBr₃ PD 性能研究

图 2(a) 为利用两种功函数不同的 Au 和 Ag 电极制作的非对称金属-半导体-金属结构的光电探测器的器件示意图 (Au/MAPbBr₃/Ag)。图 2(b) 展示了该器件在暗态和光照下 (AM 1.5G 100 mW/cm²) 的电流-电压 (I - V) 特性曲线。可以清晰地看到, 器件在正向和反向偏压下的 I - V 曲线存在着不对称性。这主要是因为 Au 和 Ag 的功函数分别为 5.1 eV 和 4.26 eV, 证实这两种金属的功函数差异, 将使得两个金属与 MAPbBr₃ 的界面处形成两个不相同的肖特基势垒高度, 从而导致了非对称的肖特基势垒, 最终导致了器件的非对称 I - V 特性曲线。^[5] 同时可以看到, 在 3 V 偏压下, 器件的暗电流为 16.7 nA, 光电流为 9.25 μA, 光暗电流比为 5.54×10^2 。正是由于两个电极界面处的非对称肖特基势垒高度, 器件表现出了明显的光生伏特效应的, 在太阳光照射下, 器件的开路电压 (V_{OC}) 为 0.37 V, 短路电流 (I_{SC}) 为 1.1 μA。光电探测器的稳定性是探测器应用的一个关键参数。图 2(c) 显示了该器件的光响应随时间变化的曲线, 可以清晰地看到, 器件的光电流随着光照的开启和关闭分别迅速增大到稳定值和迅速恢复到暗态的电流值, 这表明 MSM PD 具有稳定的开/关特性。在零偏压下器件的暗电流低至约 1.3 nA, 而光电流高达约 0.56 μA, 光暗电流比约为 4.3×10^2 。此外, 可以发现光响应强烈依赖于施加的工作偏压, 光电流随着电压的增加而单调增

加, 这可以归因于, 在强电场的作用下, 大幅提升了光生电子和空穴分离和收集效率。[13] 图 2(d)展示了器件在连续光暗循环下的稳定性测试, 器件显示了良好的稳定性。

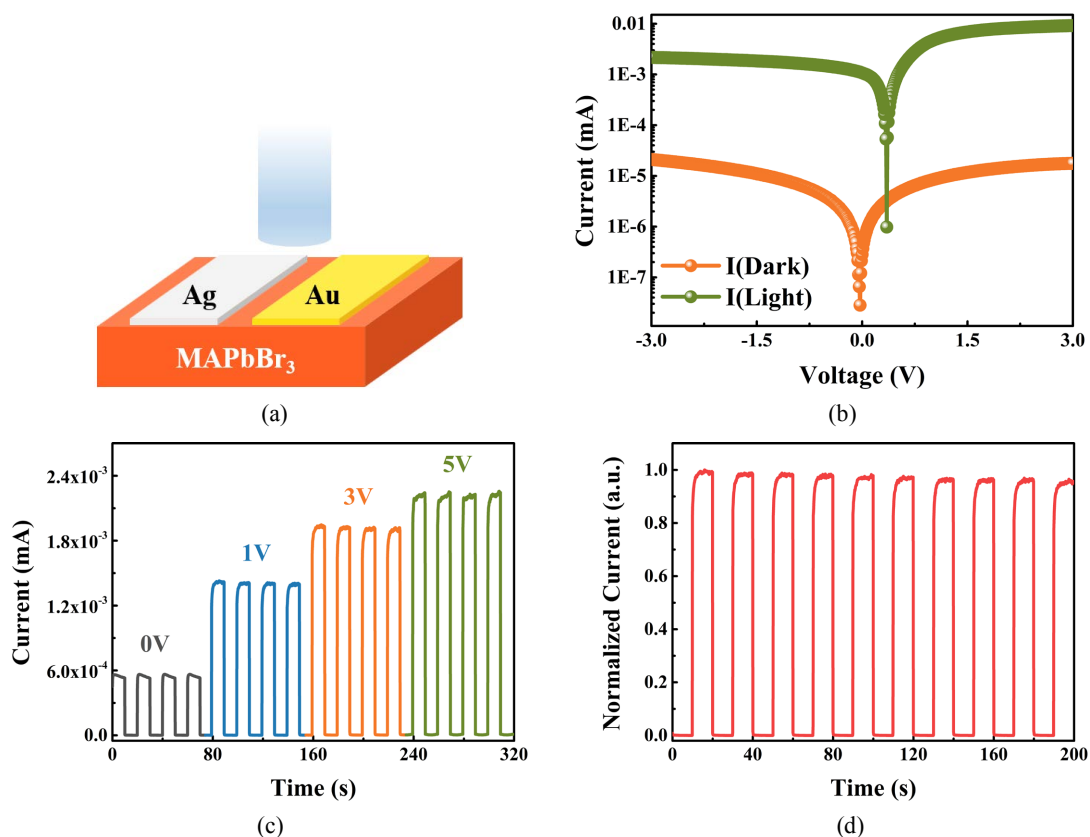


Figure 2. (a) Schematic diagram of asymmetrical MAPbBr₃ photodetector; (b) I - V characteristic curves for asymmetric MAPbBr₃ photodetectors in dark and under a solar simulator (AM 1.5G 100 mW/cm²); (c) The time dependent photoresponse of the photodetector by turning the light on and off under different bias; (d) The time dependent photoresponse of the photodetector under periodically switched light illumination

图 2. (a) 非对称结构的 MAPbBr₃ 光电探测器的示意图; (b) 在黑暗和光照下 (AM 1.5G 100 mW/cm²) 测量的非对称结构 MAPbBr₃ 光电探测器的 I - V 特性曲线; (c) 在不同偏压下, 通过打开和关闭光, 光电探测器的光响应随时间的变化; (d) 在周期性开关光照射下, 光电探测器的时间相关光响应

通过光谱响应度(R)来评估光电探测器对光信号的响应效率, 同时比较了具有对称电极与非对称电极在相同的工作电压下的响应度。图 3(a)展示了两组器件在 0 V 偏压下的光谱响应特性曲线。可以看到, 器件在 520 nm 处的峰值响应度达到了 $0.39 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 。响应截止波长位于 560 nm 处, 与 MAPbBr₃ 的吸收光谱相对应(图 1(d)), 而对称 Au / Au 电极器件在 0 V 下没有响应, 这充分证明了器件的自驱动模式是由非对称结构产生的。两组器件在 1 V 工作偏压下的光响应如图 3(b)所示, 对称电极 Au/MAPbBr₃/Au 器件的峰值响应度为 $0.49 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 而非对称电极 Au/MAPbBr₃/Ag 器件的峰值响应度达到了 $1.21 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 。此外, 响应时间是表征光电探测器性能的另一个重要参数, 它决定了光电探测器跟踪快速变化的光信号的能力, 如图 3(c), 图 3(d)所示。我们使用脉冲宽度为 5 ns 脉冲激光器($\lambda = 355 \text{ nm}$, 激光能量: 3 mJ)作为激发源, 以及高灵敏度的示波器, 测试了非对称 Au/MAPbBr₃/Ag 器件的响应时间。对于光电探测器, 光响应时间定义为稳定输出信号从脉冲峰值的 10% 上升到 90% 定义为上升时间 τ_r , 并从脉冲峰值的 90% 下降到 10% 定义为下降时间 τ_d 。[14] 因此, 在 0 V 偏置下器件的上升和下降时间分别约为 9/864 μs 。此外, 我们制作的光电探测器响应度可与同材料不同结构的 PD 相媲美甚至更好, 如表 1 所示[15] [16] [17] [18]。

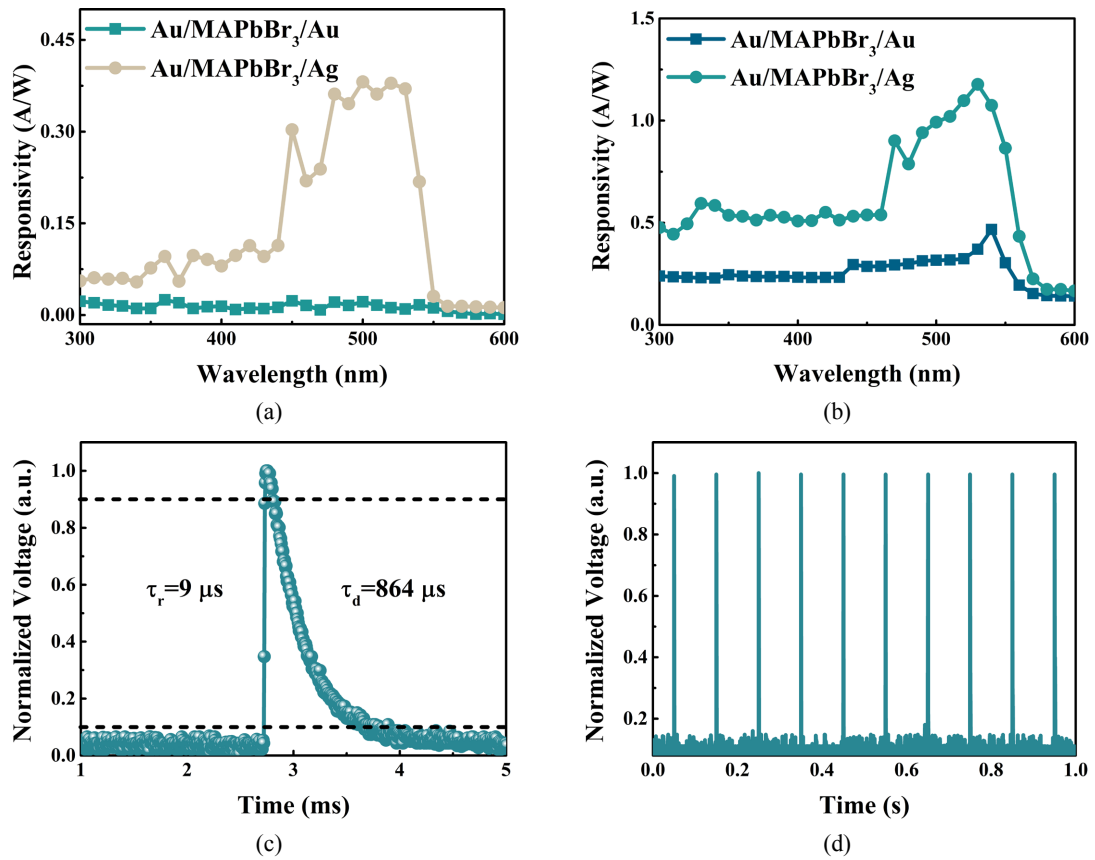


Figure 3. (a) and (b) are the responsivity of Au/MAPbBr₃/Au devices with symmetric electrodes and Au/MAPbBr₃/Ag devices with asymmetric electrodes under 0 V and 1 V operating bias voltages, respectively. (c) and (d) When light is irradiated on the device, the time-resolved response of the Au/MAPbBr₃/Ag device when a 0 V bias is applied

图 3. (a)和(b)分别为对称电极 Au/MAPbBr₃/Au 器件以及非对称电极 Au/MAPbBr₃/Ag 器件在 0 V 和 1 V 工作偏压下的光响应。(c)和(d)当光照射在器件上时, Au/MAPbBr₃/Ag 器件在施加 0 V 偏置时的时间分辨响应

Table 1. Responsivity comparison of PD based on MAPbBr₃ single crystal and thin film with different device structures
表 1. 基于 MAPbBr₃ 单晶、薄膜的不同器件结构的 PD 的响应度比较

材料结构	器件结构	工作偏压(V)	响应度(A/W)	参考文献
MAPbBr ₃ 单晶	Pt/MAPbBr ₃ /Pt	2	0.058	15
MAPbBr ₃ 单晶	Au/MAPbBr ₃ /Au	10	0.08	16
MAPbBr ₃ 单晶	Au/Cr/MAPbBr ₃ /Cr/Au	20	0.1	17
MAPbBr ₃ 薄膜	ITO/MAPbBr ₃ /Cu	0	0.26	18
MAPbBr ₃ 单晶	Au/MAPbBr ₃ /Ag	0	0.39	本工作

通过该器件的能带示意图(图 4), 我们来进一步分析 Au/MAPbBr₃/Ag 光电探测器自供电光响应特性的起源。在该非对称电极结构的光电探测器中, 两个功函数不同的金属与半导体材料接触以后, 两个电极与半导体接触的界面处将分别形成两个肖特基势垒, 由于两个金属功函数的不同, 从而形成两个非对称的肖特基势垒, 最终导致一个内建电场存在, 这个电场将有效地分离光生电子和空穴对, 从而对外产生光电流。[19] [20] [21] [22]在我们的实验中, Au 和 Ag 的功函数分别为 5.1 eV 和 4.26 eV。由于 Ag 的功函数小于 Au 的功函数, 电子更倾向于流向 Au 电极, 而空穴更倾向于流向 Ag 电极, 从而形成图 4(a)

的能带结构。当光照射在器件上时, MAPbBr₃ 层中会产生电子-空穴对, 在内建电场的作用下, 电子流向 Ag 电极, 空穴流向 Au 电极, 从而导致了光生载流子的迅速分离, 进而形成光电流。

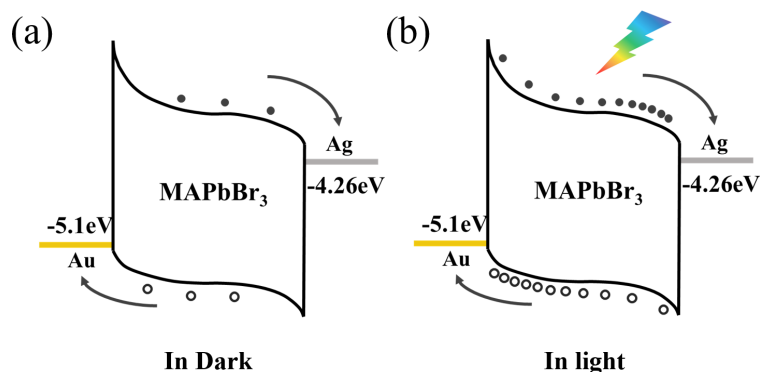


Figure 4. The schematic energy band diagrams for asymmetric MAPbBr₃ PD in the dark and under illumination at 0 V
图 4. 载流子在黑暗和 0 V 照明下传输的能带示意图

4. 结论

综上所述, 我们已利用功函数不同的两个材料, 成功制备了非对称结构的 MAPbBr₃ 单晶光电探测器。两个电极处形成的非对称肖特基势垒高度, 导致了一个内建电场的形成, 从而使该器件具有自驱动的光谱响应特性。在零伏工作偏压下, 器件在 520 nm 处的峰值响应度为 0.39 A·W⁻¹。同时器件还展现了快速的响应时间(上升/下降时间: 9/864 μs)。该研究作为未来设计高性能的自驱动光电探测器提供了理论指导和实验基础。

基金项目

2020 年度黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(项目编号: 2020-KYYWF-0362)。

参考文献

- [1] Tian, W., Zhou, H. and Li, L. (2017) Hybrid Organic-Inorganic Perovskite Photodetectors. *Small*, **13**, Article ID: 1702107. <https://doi.org/10.1002/sml.201702107>
- [2] Wang, S., Zhao, J., Tong, T., Cheng, B., Xiao, Y. and Lei, S. (2019) Bias-Controlled Tunable Electronic Transport with Memory Characteristics in an Individual ZnO Nanowire for Realization of a Self-Driven UV Photodetector with Two Symmetrical Electrodes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 14932-14943. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b00267>
- [3] Bie, Y.Q., Liao, Z.M., Zhang, H.Z., Li, G.R., Ye, Y., Zhou, Y.B., Xu, J., Qin, Z.X., Dai, L. and Yu, D.P. (2011) Self-Powered, Ultrafast, Visible-Blind UV Detection and Optical Logical Operation Based on ZnO/GaN Nanoscale p-n Junctions. *Advanced Materials*, **23**, 649-653. <https://doi.org/10.1002/adma.201003156>
- [4] Zheng, Z.Q., Lu, J., Yao, J., Gao, W., Xiao, Y., Zhang, M. and Li, J. (2020) An Asymmetric Contact Induced Self-Powered 2D In₂S₃ Photodetector towards High-Sensitivity and Fast-Response. *Nanoscale*, **12**, 7196-7205. <https://doi.org/10.1039/D0NR00517G>
- [5] Perumal Veeramalai, C., Yang, S., Zhi, R., Sulaman, M., Saleem, M.I., Cui, Y. and Zou, B. (2020) Solution-Processed, Self-Powered Broadband CH₃NH₃PbI₃ Photodetectors Driven by Asymmetric Electrodes. *Advanced Optical Materials*, **8**, Article ID: 2000215. <https://doi.org/10.1002/adom.202000215>
- [6] Hu, X., Zhang, X., Liang, L., Bao, J., Li, S., Yang, W. and Xie, Y. (2014) High-Performance Flexible Broadband Photodetector Based on Organolead Halide Perovskite. *Advanced Functional Materials*, **24**, 7373-7380. <https://doi.org/10.1002/adfm.201402020>
- [7] Ahmadi, M., Collins, L., Higgins, K., Kim, D., Lukosi, E. and Kalinin, S.V. (2019) Spatially Resolved Carrier Dynamics at MAPbBr₃ Single Crystal-Electrode Interface. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 41551-41560. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b16287>

- [8] Deng, W., Huang, L., Xu, X., Zhang, X., Jin, X., Lee, S.T. and Jie, J. (2017) Ultrahigh-Responsivity Photodetectors from Perovskite Nanowire Arrays for Sequentially Tunable Spectral Measurement. *Nano Letters*, **17**, 2482-2489. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00166>
- [9] Wu, C.Y., Peng, W., Fang, T., Wang, B., Xie, C., Wang, L., Yang, W.H. and Luo, L.B. (2019) Asymmetric Contact-Induced Self-Driven Perovskite Microwire-Array Photodetectors. *Advanced Electronic Materials*, **2019**, Article ID: 1900135. <https://doi.org/10.1002/aelm.201900135>
- [10] Ding, J., Fang, H.J., Lian, Z.P., Li, J.W., Lyu, Q.R., Wang, L.D., Sun, J.L. and Yan, Q.F. (2016) A Self-Powered Photodetector Based on $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Single Crystal with Asymmetric Electrodes. *CrystEngComm*, **18**, 4405-4411. <https://doi.org/10.1039/C5CE02531A>
- [11] Tang, W., Zhang, J., Ratnasingham, S.R., Liscio, F., Chen, K., Liu, T. and Fenwick, O. (2020) Substitutional Doping of Hybrid Organic-Inorganic Perovskite Crystals for Thermoelectrics. *Journal of Materials Chemistry A*, **8**, 13594-13599. <https://doi.org/10.1039/D0TA03648J>
- [12] He, Y., Matei, L., Jung, H.J., McCall, K.M., Chen, M., Stoumpos, C.C., Liu, Z., Peters, J.A., Chung, D.Y., Wessels, B. W. and Wasielewski, M.R. (2018) High Spectral Resolution of Gamma-Rays at Room Temperature by Perovskite CsPbBr_3 Single Crystal. *Nature Communications*, **9**, Article No. 1609. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04073-3>
- [13] Yu, W.J., Liu, Y., Zhou, H., Yin, A., Li, Z., Huang, Y. and Duan, X. (2013) Highly Efficient Gate-Tunable Photocurrent Generation in Vertical Heterostructures of Layered Materials. *Nature Nanotechnology*, **8**, 952-958. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.219>
- [14] Li, L., Chen, H., Fang, Z., Meng, X., Zuo, C., Lyu, M., *et al.* (2020) An Electrically Modulated Single-Color/Dual-Color Imaging Photodetector. *Advanced Materials*, **32**, Article ID: e1907257. <https://doi.org/10.1002/adma.201907257>
- [15] Cho, Y., Jung, H.R., Kim, Y.S., Kim, Y., Park, J., Yoon, S., Lee, Y., Cheon, M., Jeong, S. and Jo, W. (2021) High Speed Growth of MAPbBr_3 Single Crystals via Low-Temperature Inverting Solubility: Enhancement of Mobility and Trap Density for Photodetector Applications. *Nanoscale*, **13**, 8275-8282. <https://doi.org/10.1039/D1NR01600H>
- [16] 张明静. 大尺寸 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 钙钛矿单晶材料制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津理工大学, 2020: 1-61.
- [17] 王文贞. 探测器用卤化物钙钛矿晶体的生长及其物理性能的研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海大学, 2020: 1-124.
- [18] Bao, C.X., Chen, Z.L., Fang, Y.J., Wei, H.T., Deng, Y.H., Xiao, X., Li, L.L. and Huang, J.S. (2017) Low-Noise and Large-Linear-Dynamic-Range Photodetectors Based on Hybrid-Perovskite Thin-Single-Crystals. *Advanced Materials*, **29**, Article ID: 1703209. <https://doi.org/10.1002/adma.201703209>
- [19] Xu, Q., Shao, W., Li, Y., Zhang, X., Ouyang, X., Liu, J., Liu, B., Wu, Z., Ouyang, X., Tang, X. and Jia, W. (2019) High-Performance Surface Barrier X-Ray Detector Based on Methylammonium Lead Tribromide Single Crystals. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 9679-9684. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b21605>
- [20] Sun, M., Yang, P., Xie, D., Sun, Y., Xu, J., Ren, T. and Zhang, Y. (2018) Self-Powered MoS_2 -PDPP3T Heterotransistor-Based Broadband Photodetectors. *Advanced Electronic Materials*, **5**, Article ID: 1800580. <https://doi.org/10.1002/aelm.201800580>
- [21] Fang, Y., Dong, Q., Shao, Y., Yuan, Y. and Huang, J. (2015) Highly Narrowband Perovskite Single-Crystal Photodetectors Enabled by Surface-Charge Recombination. *Nature Photonics*, **9**, 679-686. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.156>
- [22] Mitra, S., Muhammed, M.M., Alwadai, N., Almalawi, D.R., Xin, B., Pak, Y. and Roqan, I.S. (2020) Optimized Performance III-Nitride-Perovskite-Based Heterojunction Photodetector via Asymmetric Electrode Configuration. *RSC Advances*, **10**, 6092-6097. <https://doi.org/10.1039/C9RA08823G>