文章编号: 1007 - 4252(2022) 04 - 0004 - 379 DOI: 10.20027/j.gncq.2022.0042

$GaSe/MoS_2$ 垂直范德瓦尔斯异质结构光电探测器性能研究

侯骁洋,唐晓秋,张殿泽,孙建华,刘 娆,布威海丽且·阿卜拉,梁 瑶*
(大连交通大学 材料科学与工程学院,大连 116028)

摘要: 近年来,光电探测器被广泛地应用在成像、传感、光通信、生物技术等领域,人们迫切希望能通过简单的制备方法获得高性能低能耗的光电探测器。本文通过机械剥离的方法制备二维 GaSe、MoS_2和石墨烯,再通过定向转移的方法实现 Au 电极/GaSe/MoS_2/石墨烯堆叠,成功获得了 GaSe/MoS_2垂直范德瓦尔斯异质结构光电探测器。在外加电压为 2 V 时,该光电探测器对 450 nm 光的响应度为 351 mA/W,探测灵敏度为 1.18×10^9 Jones,外量子效率为 97%。受 GaSe 禁带宽度的影响,器件仅对波长小于 620 nm 的光具有较高的响应度。在外加电压为 0 V 时,该光电探测器也具有重复探测 450 nm 光的能力,且响应速度较快,响应时间和恢复时间分别为 0.36 s 和 0.24 s。该光电探测器杰出的性能归功于 II 型垂直范德瓦尔斯异质结构的形成,表明该异质结构在高性能低功耗光电探测器制作上有巨大的应用潜力。

关键词: GaSe; MoS_2; 异质结构; 光电探测器
中图分类号: TB34 **文献标志码:** A

Study on the Performance of $GaSe/MoS_2$ Vertical van der Waals Heterostructure Photodetector

HOU Xiao-yang, TANG Xiao-qiu, ZHANG Dian-ze, SUN Jian-hua, LIU Rao, ABLA Buhliqa, LIANG Yao*
(School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: In recent years, photodetectors have been widely applied to imaging, sensing, optical communication, biotechnology and other fields. It is urgent to fabricate photodetectors with high performance and low energy consumption by a simple preparation method. In this paper, two-dimensional GaSe, MoS_2 and graphene were prepared by the mechanical exfoliation. Then, the GaSe/MoS_2 vertical van der Waals heterostructure photodetector was fabricated by transferring GaSe、MoS_2 and graphene onto the Au electrode in turn. At a bias of 2 V, the photodetector has a responsivity of 351 mA/W to 450 nm light, a detectivity of 1.18×10^9 Jones, and an external quantum efficiency of 97%. Limited by the band-gap of GaSe, the device has a high responsivity

收稿日期: 2022-04-15; **修订日期:** 2022-06-17
基金项目: 辽宁省教育厅面上项目 (JDL2019015) .
作者简介: 侯骁洋(2001-) , 女, 在读本科生 (E-mail: 1151061187@ qq.com) ; 唐晓秋(1997-) , 女, 在读硕士生, 主要研究方向为纳米材料合成及应用 (E-mail: tangxiaoqiu163@ 163.com) . 侯骁洋与唐晓秋并列第一作者.
通信作者: 梁 瑶(1981-) , 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为纳米材料合成及应用 (E-mail: liangyao@ djtu.edu.cn) .

only to the light with wavelength less than 620 nm. At a bias of 0 V, the photodetector also can detect 450 nm light repeatedly, and the response speed is fast. The response time and the recovery time are 0.36 s and 0.24 s, respectively. The outstanding performance of the photodetector is attributed to the type-II vertical van der Waals heterostructure, indicating that the heterostructure has a great potential in the fabrication of high-performance and low-power photodetectors.

Key words: GaSe; MoS_2; Heterostructure; Photodetector

0 引言

近年来,光电探测器被广泛地应用在成像[1-2]、传感[3-4]、光通信[5-6]、生物技术[7]等领域。考虑到目前能源紧缺,降低各类电子器件的能耗,研发高性能低功耗的光电探测器就显得格外重要[8-9]。二维材料由于其独特的光电性质受到广泛关注,相关研究结果展示了其在制备高性能光电探测器上的应用潜力。GaSe 是一种 p 型半导体材料,其体材料具有直接带隙,禁带宽度为 2.0 eV[10]。随层数减少至 7 层以下,GaSe 变为间接带隙材料,且禁带宽度随着层数的减少而增加[11]。单层 GaSe 的厚度约为 0.93 nm[12]。GaSe 展现出了迷人的光电性能,比如低的暗电流[13]、非线性光学行为[14]、独特的自旋物理特性[15]等。MoS_2是一种 n 型半导体材料,其体材料具有间接带隙,禁带宽度为 1.2 eV[16]。随 MoS_2层数减少至单层,会转变成为直接带隙材料,禁带宽度增加到 1.8 eV[17]。单层 MoS_2的厚度约为 0.65 nm[18]。MoS_2具有高的载流子迁移率[18]、高的光电响应度[19]、宽带的光谱响应[20]等优秀的光电性能。

利用两种或两种以上二维材料堆叠可以形成范德瓦尔斯异质结构,通过构建异质结构可以进一步提升二维材料光电探测器的性能[21-22]。二维材料之间存在范德瓦尔斯力,它可以使异质结构更稳定[23]。二维材料的表面没有悬挂键,在构建范德瓦尔斯异质结时不需要考虑晶格匹配问题[24]。同时,垂直范德瓦尔斯异质结能够缩短导电通路,增加光电导增益。自从 Dean 等人[25]在 2010 年首次制备出二维 h-BN/石墨烯垂直异质结构以来,这种基于二维材料的垂直范德瓦尔斯异质结构就一直是研究的热点[26-27]。II 型范德瓦尔斯异质结构能促使光生电子和空穴进行有效分离,使光生载流子寿命显著提升,用其制作光电探测器可有效提高器件的响应度[28]。另外,其在异质结构中还表现出超快的电荷转移[29]、可调谐的层间耦合[30]、高的界面结合电流[31]等优异的性质。因此,通过堆叠 II 型范德瓦尔斯异质结构来制备高性能光电探测器备受研究人员关注[32-33]。二维 GaSe 与 MoS_2可以通过范德瓦尔斯力相结合形成稳定的异质结构,该异质结构为 II 型。GaSe/MoS_2范德瓦尔斯异质结构已展示了其在光电探测上的应用能力[34-35]。通过进一步构建垂直范德瓦尔斯异质结构器件可以进一步缩短导电通路,进一步提升光电探测器的性能。同时,考虑到异质结构具有光生载流子自驱动能力,可用于探索光电探测器的自供电传感能力。

本文通过简单机械剥离法获得二维 GaSe、MoS_2和石墨烯,利用定向转移技术依次转移上述二维材料,在聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)衬底上获得 GaSe/MoS_2垂直范德瓦尔斯异质结构,Au 膜作为底部电极,石墨烯作为顶部透明电极,制成一个典型的 GaSe/MoS_2垂直范德瓦尔斯异质结构光电探测器。器件外加 2 V 电压时,光电探测器对 450 nm 光的响应度为 351 mA/W,探测灵敏度为 1.18×10^9 Jones,外量子效率为 97%。不施加电压时(自功率模式),该光电探测器也能重复地探测 450 nm 光,且响应速度较快,响应时间和恢复时间分别为 0.36 s 和0.24 s。实验结果表明,垂直范德瓦尔斯异质结构为实现高性能低功耗光电探测器提供了更多的机会。

1 实验部分

首先,分别通过光刻、溅射及化学刻蚀技术在 PET 衬底上制作 Au 电极。然后,利用机械剥离技术在聚二甲基硅氧烷(PDMS)衬底上分别获得二维 GaSe、MoS_2和石墨烯。通过定向转移技术分别将 PDMS 衬底上的二维 GaSe、MoS_2和石墨烯转移到 PET 衬底上的适当位置,搭建一个垂直范德瓦尔斯光电探测器,图 1 展示了该器件的构造。考虑到 10 层以下 GaSe 在空气中稳定性较差[36],为了减少氧

化对器件性能的影响，构建异质结构时选用了较厚的 GaSe，并将其放置于 MoS_2 的下面从而减少其暴露在空气中的面积。器件搭建完后，马上对器件的性能进行检测。利用光学显微镜观察器件的构造，通过原子力显微镜（AFM，Bruker Multimode－8）对选用的二维材料进行进一步表征。氙灯作为光源，经过单色仪向外提供波长可调的单色光。入射光的光功率由功率计（Newport Model 843）测量。选用 Keithy 2635B 源表测量光电探测器的性能。

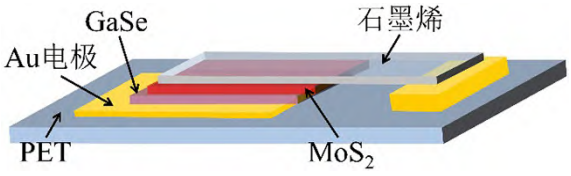

图 1　$GaSe/MoS_2$ 垂直范德瓦尔斯异质结构光电探测器模型图

Fig. 1 Model diagram of $GaSe/MoS_2$ vertical van der Waals heterostructure photodetector

2　分析与讨论

图 2（a）是制备的 $GaSe/MoS_2$ 垂直范德瓦尔斯异质结构光电探测器的实物图。图 2（b）是光电探测器核心功能区的光学显微镜图像，图中分别标出了 Au 电极、GaSe 层、MoS_2 层和石墨烯层。白色三角所标区域导电通路与衬底垂直，证明成功构建了垂直范德瓦尔斯异质结构，光电流主要来源于该区域，是光电探测器的有效测试功能区，经测试该光电探测器的有效面积为 68.5 μm^2。图 2（c）和 2（d）分别为该异质结构中 GaSe 层和 MoS_2 层的原子力显微镜图像，内部插图展示了它们的厚度，分别为 133 nm 和 11 nm。

图 3 展示了基于 $GaSe/MoS_2$ 垂直范德瓦尔斯异质结构光电探测器的光电性能测试结果。在黑暗和在不同光功率密度的 450 nm 波长光照射下，测试光电探测器的 $I-V$ 曲线，结果如图 3（a）所示，可以看到器件对照射的 450 nm 波长光有明显响应。器件外加 2 V 偏压，光电流（照光时器件电流与无光照时电流的差值）与入射光功率密度之间的关系展示在图 3（b）中。光电流近似线性的随入射光功率密度的增加而增大，暗示材料内陷阱态密度较低[37-38]。当入射光功率密度增加，照射到器件有效面积上的光子数增加，产生更多的非平衡载流子，导致通过器件的电流增大。响应度 R、探测灵敏度 D^* 和外量子

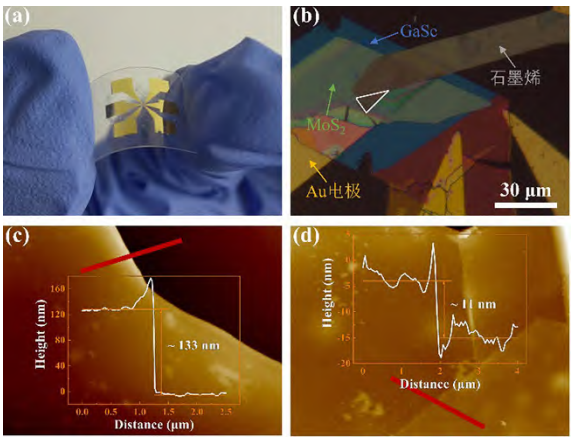

图 2　（a）光电探测器的实物图；（b）光电探测器功能区的光学显微镜图像；（c）器件中 GaSe 层的 AFM 图像，内部插图为红线标注处的高度随位置变化曲线；（d）器件中 MoS_2 层的 AFM 图像，内部插图为红线标注处的高度随位置变化曲线

Fig. 2 (a) Photograph of the photodetector; (b) Optical microscope image of the functional region of the photodetector; (c) AFM image of the GaSe layer in the device, the inset is a height profile along the red line; (d) AFM image of the MoS_2 layer in the device, and the inset is the height profile along the red line

效率 EQE 是光电探测器的三个重要指标，它们分别通过以下三个公式计算得出：

$$R = I_{ph}/(PS) \tag{1}$$

$$D^* = (RS^{1/2})/(2qI_d)^{1/2} \tag{2}$$

$$EQE = (Rhc)/(q\lambda) \tag{3}$$

式中：R 是响应度，A/W；I_{ph} 是光电流，A；P 是入射光功率密度，W/m^2；S 是光电探测器有效面积，m^2；D^* 是探测灵敏度，Jones；q 是单位电荷，1.6×10^{-19} C；I_d 是暗电流（无光照电流），A；EQE 是外量子效率，%；h 是普朗克常数，6.626×10^{-34} J·s；c 是光速，3×10^8 m/s；λ 是入射光波长，m。

外加 2 V 电压，在光功率密度为 685 $\mu W/cm^2$ 的 450 nm 波长光照射下，光电探测器的光电流为 165 pA，暗电流为 19 pA，经计算获得器件的响应度为 351 mA/W，探测灵敏度为 1.18×10^9 Jones，外量子效率为 97%。为了进一步测试器件的谱响应，选择入射光波长范围为 310～800 nm，入射光波长每次改变 10 nm 测试一次器件的 $I-V$ 曲线。图 3（c）展示了一些典型波长光照射下器件的 $I-V$ 曲线。经计算得出器件的谱响应，结果如图 3（d）所示。谱响应展示了光电探测器对不同波长光的响应能力。可以看

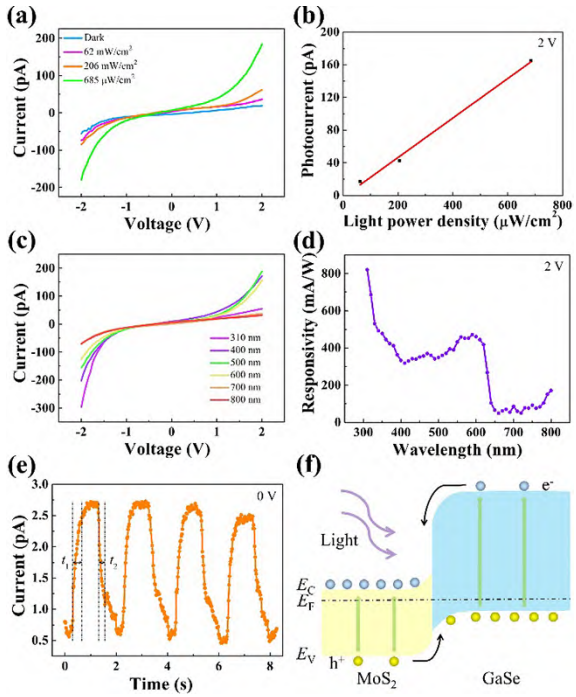

图 3 (a) **在黑暗状态和在不同光功率密度** 450 nm **波长光照射时,光电探测器的** $I-V$ **曲线;** (b) **外加** 2 V **电压时,器件光电流与入射光功率密度的关系;** (c) **不同波长光照下,光电探测器的** $I-V$ **曲线;** (d) **外加** 2 V **电压时,器件的谱响应;** (e) **无外加电压时,开关** 450 nm **的入射光(光功率密度为** 685 μW/cm^2**),光电探测器的** $I-t$ **曲线;** (f) GaSe/MoS_2 **异质结构能带图**

Fig. 3 (a) $I-V$ curves of the photodetector in the dark and under the illumination of 450 nm light with different power densities; (b) Photocurrent versus light power density at a bias of 2 V; (c) $I-V$ curves of the photodetector under the illumination of light with different wavelengths; (d) Spectral responsivity of the device at 2 V; (e) $I-t$ curve of the photodetector by turning on and off 450 nm light (with a light power density of 685 μW/cm^2) at 0 V; (f) Energy band diagram of the GaSe/MoS_2 heterostructure

到,当入射光波长大于 620 nm **时,器件的响应度随入射光波长的增加而迅速下降,这是由于入射光波长大于** 620 nm **时,入射光子能量不足以将** GaSe **价带内的电子激发到导带,导致器件内光生载流子数目明显减少,器件的响应度迅速下降。如图** 3(e) **所示,在无外加电压时,器件处于自功率状态,光电探测器也具有可重复的光探测能力。响应时间和恢复时间分别定义为开光时电流值从光电流值的** 10% **上升至** 90% **所用的时间和关光时电流值从光电流值的** 90% **下降至** 10% **所用的时间。由此得出该光电探测器的响应时间和恢复时间分别为** 0.36 s **和** 0.24 s。

表 1 **展示了该光电探测器与已报道的光电探测器性能对比的结果,说明** GaSe/MoS_2 **垂直范德瓦尔斯异质结构光电探测器具有高的性能。该光电探测器的高性能可归因于以下两个原因: 第一,垂直范德瓦尔斯异质结构的形成,它能缩短导电通路,增加光电探测器的光电导增益; 第二,**GaSe/MoS_2 **范德瓦尔斯异质结构为** II **型异质结构,其能带结构如图** 3(f) **所示。由于** GaSe **和** MoS_2 **的费米能级不同,**n **型** MoS_2 **中的电子扩散进入** p **型的** GaSe**,而** GaSe **中的空穴扩散流入** MoS_2 **中,最终在** GaSe **和** MoS_2 **的界面附近形成一个内建电场。照光时,入射光在** GaSe **和** MoS_2 **内产生本征激发,获得非平衡载流子,非平衡电子在异质结构内建电场的作用下更多的流向** MoS_2**,非平衡空穴流向** GaSe**,导致两种非平衡载流子被有效地分离,延长非平衡载流子的寿命,增加器件的光电导增益,提高了光电探测器的性能。另外,由于异质结附近的内建电场具有驱动光生载流子的能力,因此器件产生了自供电探测能力。**

表 1 **光电探测器性能对比结果**

Table1 Comparison of the performances of photodetectors

器件	响应度 mA/W	自供电探测能力	参考文献
GaSe/MoS_2	~340	有	[35]
MoS_2/CdTe	36.6	无	[39]
MoS_2/p-Si	10.4	无	[40]
MoS_2/graphene	12.3	无	[41]
GaSe/MoS_2	351	有	本文

3 结论

本文通过非常简单的二维材料机械转移方法制备了基于 GaSe/MoS_2 **垂直范德瓦尔斯异质结构的高性能自供电光电探测器。在外加** 2 V **电压,入射光波长为** 450 nm**,光功率密度为** 685 μW/cm^2**时,该光电探测器的响应度为** 351 mA/W**,探测灵敏度为**1.18×10^9 Jones**,外量子效率为** 97%**。在外加电压为** 0 V **时,该光电探测器也能重复地探测光,且响应速度较快,响应时间和恢复时间分别为** 0.36 s **和**0.24 s**。这**

些杰出的光电性能归因于 II 型垂直范德瓦尔斯异质结构的形成。本工作结果表明 II 型垂直范德瓦尔斯异质结构在构建高性能自供电光电探测器上有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] Miao J, Song B, Xu Z, et al. Single Pixel Black Phosphorus Photodetector for Near-Infrared Imaging [J]. Small, 2018, 14(2): 1702082.

[2] Tran H, Pham T, Margetis J, et al. Si-Based GeSn Photodetectors toward Mid-Infrared Imaging Applications [J]. ACS Photonics, 2019, 6(11): 2807-2815.

[3] So H, Park W. Attachable freezing-delayed surfaces for ultraviolet sensing using GaN photodetector at low temperature in air [J]. Applied Surface Science, 2019, 473(11): 261-265.

[4] Mishra M, Gundimeda A, Garg T, et al. ZnO/GaN heterojunction based self-powered photodetectors: Influence of interfacial states on UV sensing [J]. Applied Surface Science, 2019, 478(1): 1081-1089.

[5] Xiong D, Deng W, Tian G, et al. Piezo-phototronic enhanced serrate-structured ZnO-based heterojunction photodetector for optical communication [J]. Nanoscale, 2019, 11(6): 3021-3027.

[6] Yang M, Han Q, Liu X, et al. Ultrahigh Stability 3D TI Bi_2Se_3/MoO_3 Thin Film Heterojunction Infrared Photodetector at Optical Communication Waveband [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(12): 1909659.

[7] Liu S, Zhang X D, Gu X, et al. Photodetectors based on two dimensional materials for biomedical application [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2019, 143: 111617.

[8] Han X, Wen P, Zhang L, et al. A Polarization-Sensitive Self-Powered Photodetector Based on a p-WSe_2/TaIrTe4/n-MoS_2 van der Waals Heterojunction [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(51): 61544-61554.

[9] Wan Z, Mu H, Dong Z, et al. Self-powered $MoSe_2$/ZnO heterojunction photodetectors with current rectification effect and broadband detection [J]. Materials & Design, 2021, 212: 110185.

[10] Rybkovskiy D V, Arutyunyan N R, Orekhov A S, et al. Size-induced effects in gallium selenide electronic structure: The influence of interlayer interactions [J]. Physical Review B, 2011, 84(8): 085314.

[11] Li X, Lin M W, Puretzky A A, et al. Controlled vapor phase growth of single crystalline, two-dimensional GaSe crystals with high photoresponse [J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 5497.

[12] Hu P, Wen Z, Wang L, et al. Synthesis of Few-Layer GaSe Nanosheets for High Performance Photodetectors [J]. ACS Nano, 2012, 6(7): 5988-5994.

[13] Huang H, Wang P, Gao Y, et al. Highly sensitive phototransistor based on GaSe nanosheets [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(14): 143112.

[14] Allakhverdiev K R, Yetis Mö, Özbek S, et al. Effective nonlinear GaSe crystal. Optical properties and applications [J]. Laser Physics, 2009, 19(5): 1092-1104.

[15] Tang Y, Xie W, Mandal K C, et al. Optical and spin polarization dynamics in GaSe nanoslabs [J]. Physical Review B, 2015, 91(19): 195429.

[16] Kuc A, Zibouche N, Heine T. Influence of quantum confinement on the electronic structure of the transition metal sulfide TS2 [J]. Physical Review B, 2011, 83(24): 245213.

[17] Mak K F, Lee C, Hone J, et al. Atomically thin MoS_2: a new direct-gap semiconductor [J]. Physical Review Letters, 2010, 105(13): 136805.

[18] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, et al. Single-layer MoS_2 transistors [J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(3): 147-150.

[19] Tang W, Liu C, Wang L, et al. MoS_2 nanosheet photodetectors with ultrafast response [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(15): 153502.

[20] Xie Y, Zhang B, Wang S, et al. Ultrabroadband MoS_2 Photodetector with Spectral Response from 445 to 2717 nm [J]. Advanced Materials, 2017, 29(17): 1605972.

[21] 徐　铖，马锡英. 范德瓦尔斯异质结的研究进展 [J]. 微纳电子技术，2017，54(10)：664-670+676.

[22] 刘江涛. 范德瓦尔斯异质结光电特性研究 [D]. 中国矿业大学，2020.

[23] Tan C, Cao X, Wu X J, et al. Recent Advances in Ultrathin Two-Dimensional Nanomaterials [J]. Chemical Reviews, 2017, 117(9): 6225-6331.

[24] Liu Y, Weiss N O, Duan X, et al. Van der Waals heterostructures and devices [J]. Nature ReviewsMaterials, 2016, 1(9): 16042.

[25] Dean C R, Young A F, Meric I, et al. Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics [J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(10): 722-726.

[26] Zhou X, Zhou N, Li C, et al. Vertical heterostructures based on $SnSe_2/MoS_2$ for high performance photodetectors [J]. 2D Materials, 2017, 4(2): 025048.

[27] Zheng W, Zheng B, Yan C, et al. Direct Vapor Growth of

2D Vertical Heterostructures with Tunable Band Alignments and Interfacial Charge Transfer Behaviors [J]. Advanced Science, 2019, 6(7): 1802204.

[28] Long R, Prezhdo O V. Quantum Coherence Facilitates Efficient Charge Separation at a $MoS_2/MoSe_2$ van der Waals Junction [J]. Nano Letters, 2016, 16(3): 1996-2003.

[29] Hong X, Kim J, Shi S F, et al. Ultrafast charge transfer in atomically thin MoS_2/WS_2 heterostructures [J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(9): 682-686.

[30] Tongay S, Fan W, Kang J, et al. Tuning interlayer coupling in large-area heterostructures with CVD-grown MoS_2 and WS_2 monolayers [J]. Nano Letters, 2014, 14(6): 3185-3190.

[31] Grundmann M, Karsthof R, von Wenckstern H. Interface recombination current in typeII heterostructure bipolar diodes [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(17): 14785-14789.

[32] Ahmad W, Liu J, Jiang J, et al. Strong Interlayer Transition in Few-Layer InSe/$PdSe_2$ van der Waals Heterostructure for Near-Infrared Photodetection [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(43): 2104143.

[33] Duan J, Chava P, Ghorbani-Asl M, et al. Self-Driven Broadband Photodetectors Based on $MoSe_2/FePS_3$ van der Waals n-p Type-II Heterostructures [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(9): 11927-11936.

[34] Islam A, Lee J, Feng P X-L. Atomic Layer GaSe/MoS_2 van der Waals Heterostructure Photodiodes with Low Noise and Large Dynamic Range [J]. ACS Photonics, 2018, 5(7): 2693-2700.

[35] He Z, Guo J, Li S, et al. GaSe/MoS_2 Heterostructure with Ohmic-Contact Electrodes for Fast, Broadband Photoresponse, and Self-Driven Photodetectors [J]. Advanced Materials Interfaces, 2020, 7(9): 1901848.

[36] Quan S, Wang Y, Liang Y, et al. Interference Effect on-Photoluminescence Intensity in GaSe up to 200 Layers [J]. Journal of Physical Chemistry C, 2020, 124(18): 10185-10191.

[37] Kung S C, van der Veer W E, Yang F, et al. 20 μs photocurrent response from lithographically patterned nanocrystalline cadmium selenide nanowires [J]. Nano Letters, 2010, 10(4): 1481-1485.

[38] Li L, Auer E, Liao M, et al. Deep-ultraviolet solar-blind photoconductivity of individual gallium oxide nanobelts [J]. Nanoscale, 2011, 3(3): 1120-1126.

[39] Wang Y, Huang X, Wu D, et al. Room-temperature near-infrared photodetector based on MoS_2/CdTe p-n heterojucntion with a broadband response up to 1700 nm [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(18): 4861-4865.

[40] Ahmad H, Rashid H, Ismail M. Investigation of structural and optoelectronic properties of n-MoS_2/p-Si sandwiched heterojunction photodetector [J]. Optik, 2019, 198, 163237.

[41] Xu H, Han X, Dai X, et al. High Detectivity and Transparent Few-Layer MoS_2/Glassy-Graphene Heterostructure Photodetectors [J]. Advanced Materials, 2018, 30(13): 1706561.