发光学报
CHINESE JOURNAL OF LUMINESCENCE
中文核心期刊
主管：中国科学院
主办：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
中国物理学会发光分会
主编：申德振

二维WSe_2场效应晶体管光电性能

夏风梁，石凯熙，赵东旭，王云鹏，范翊，李金华

引用本文:
夏风梁, 石凯熙, 赵东旭, 等. 二维WSe_2场效应晶体管光电性能[J]. 发光学报, 2021, 42(2): 257-263.
XIA Feng-liang, SHI Kai-xi, ZHAO Dong-xu, et al. Optoelectronic Performance of 2D WSe_2 Field Effect Transistor[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(2): 257-263.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CJL.20200374

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于蛋清栅绝缘层的高性能C60有机场效应晶体管
High Performance C60 Organic Field-effect Transistors with Albumen as The Gate Dielectric
发光学报. 2014(9): 1104-1108 https://doi.org/10.3788/fgxb20143509.1104

衬底加热和电极修饰对提高有机场效应晶体管性能的影响
Influence of Substrate Heating and Electrodes Modifying on Performance of Organic Field-effect Transistor
发光学报. 2015, 36(5): 521-525 https://doi.org/10.3788/fgxb20153605.0521

PVA栅绝缘层浓度对P3HT有机场效应晶体管性能的影响
Effect of Poly(vinyl alcohol) Gate Dielectric Concentration on Poly(3-hexylthiophene) Based Organic Field Effect Transistor
发光学报. 2014, 35(4): 470-475 https://doi.org/10.3788/fgxb20143504.0470

超薄EuF3电极修饰层对有机场效应晶体管性能的提升
Improvements of Organic Field-effect Transistors by Introducing An EuF3 Ultra-thin Film as Modified Layer Electrode
发光学报. 2014, 35(2): 238-242 https://doi.org/10.3788/fgxb20143502.0238

旋涂速度对制备P3 HT有机场效应晶体管性能的影响
Role of Spinning Speed in Fabrication of Spin-coated P3 HT-based OFETs
发光学报. 2015(8): 941-946 https://doi.org/10.3788/fgxb20153608.0941

文章编号：1000-7032(2021)02-0257-07

二维 WSe_2 场效应晶体管光电性能

夏风梁[1]，石凯熙[1]，赵东旭[2]，王云鹏[2]，范　翊[2]，李金华[1*]
（1. 长春理工大学 理学院，吉林 长春　130022；
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室，吉林 长春　130033）

摘要：自石墨烯被发现以来，随着人们不断的研究和探索，越来越多具有类似结构的二维材料因其优异的光电性质相继被发现和研究。过渡金属硫族化合物(TMDs)因其丰富的物理性质而受到广泛关注。本文研究了三层二硒化钨(WSe_2)纳米片的光电性能。利用范德华力将 WSe_2 转移到 SiO_2/Si 衬底的 Au 电极上，用银浆引出背栅电极，制备了 WSe_2 场效应晶体管，其载流子迁移率为 3.42 $cm^2/(V \cdot s)$。WSe_2 场效应晶体管在 630 nm 波长下探测器响应度为 0.61 A/W，器件的光响应恢复时间为 1 900 ms。

关　键　词：二维半导体材料；过渡金属硫族化物；二硒化钨；光电探测。
中图分类号：TN386　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.37188/CJL.20200374

Optoelectronic Performance of 2D WSe_2 Field Effect Transistor

XIA Feng-liang[1], SHI Kai-xi[1], ZHAO Dong-xu[2], WANG Yun-peng[2], FAN Yi[2], LI Jin-hua[1*]
(1. *School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022, *China*;
2. *State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding Author, E-mail: jhli_cust@edu.com*

Abstract: Since the graphene was found, with the continuous research and exploration by people, more and more two-dimensional materials with similar structures have been discovered and studied successively due to their excellent photoelectrical properties. The widespread attention is paid to the transition metal dichaldogenides(TMDs) due to their rich physical properties. This paper researches the two-dimensional three-layer WSe_2 photoelectric property, and transfers it to the Au electrode of SiO_2/Si substrate by Van Der Waals force. Finally, the silver paste is used to extract the back gate electrode with WSe_2 field effect transistor manufactured, whose carrier mobility is 3.42 $cm^2/(V \cdot s)$. The detector response ratio of the WSe_2 field effect transistor based on the 630 nm wavelength is 0.61 A/W and the light response recovery time is 1 900 ms.

Key words: two-dimensional semiconductor materials; transition metal dichaldogenides(TMDs); WSe_2; photoelectric detection

收稿日期：2020-12-07；**修订日期：**2021-01-04
基金项目：教育部“111”创新引智项目(D17017)；吉林省科技发展计划(202002040JC,20200201266JC,20200201271JC)资助项目
Supported by the “111” Project of China (D17017); Developing Project of Science and Technology of Jilin Province (202002040JC,20200201266JC,20200201271JC)

1 引 言

光电探测器在军事和国民经济的各个领域具有广泛应用,主要用于射线测量、光度计量等。作为沟道材料,过渡金属硫族化合物(TMDs)由于在电子学、光子学中的潜在应用,引起了学者们极大的研究兴趣。TMDs 材料具有天然带隙(1 ~2 eV),并且当 TMDs 材料从体材料厚度减少至原子层级厚度时,由于层与层之间的耦合作用和量子限域效应其带隙宽度会逐渐变大[1],从而改变光谱探测范围。

对于无机半导体材料来说,p 型掺杂一直是研究的瓶颈,在实际应用中存在很多难题[2]。而二硒化钨(WSe_2)是一种间接带隙约为 1.2 eV 的半导体材料,与大多数半导体材料不同,WSe_2 可以实现双极性输运,即电子主导和空穴主导的两种输运行为[3]。WSe_2 不仅具有高迁移率、高开关比的优异性能,可以应用于 p 型场效应晶体管;而且它还具有优越的光学特性使其成为光电应用的候选材料[4],其光电探测器的光响应度在可见光范围内为 10^{-1} ~ 10^5 A/ W,响应时间从毫秒到秒[5]。传统 WSe_2 场效应晶体管的常规制备方法是将金属电极材料蒸镀在二维材料表面,然后通过电子束光刻将电极材料刻成固定形状电极。受材料表面特性、电子束光刻深度等器件制备工艺的影响,很难同时实现器件的高响应度及快速的响应速度。例如,WSe_2 场效应晶体管当响应度较高时,响应时间却很长;而当响应时间很短时,响应度却很低[6]。

研究综合性能较高的 WSe_2 场效应晶体管,使其能更广泛地应用于光电探测领域是十分重要的。本研究中采用二维材料定点转移法,利用范德华力将 WSe_2 二维材料转移到沟道为 3 μm 的 Au 叉指电极表面。器件的响应度为 0.61 A/W,响应时间为 1 900 ms。

2 实 验

2.1 样品制备

WSe_2 二维材料:首先使用 3M 胶带从本体晶体(SPI 材料)剥离部分体材料,再使用蓝膜在 3M 胶带上粘取 WSe_2 体材料,然后反复对折蓝膜,破坏层间的范德华力,最终得到 WSe_2 二维材料。再置于氧化层厚度 300 nm 的 SiO_2/Si 衬底上,在烘箱中 60 ℃烘干 20 min,待样品冷却至室温后撕下蓝膜。

WSe_2 场效应晶体管(FET):将剥离的二维材料采用二维材料定点转移法转移到 Au 电极上。

背栅电极:在 SiO_2/Si 衬底 Si 的一面涂覆导电银浆,并将其压在一块 ITO 衬底上,最后将背栅电极用银浆引出。

2.2 样品表征

XRD 图谱测试使用的是 Bruker axs D8 Focus X 射线衍射仪,电压为 40 kV。拉曼光谱和 PL 光谱测量使用的是 LabRAM HR E 拉曼系统,激发波长为 532 nm,激光积分时间为 10 s,积分次数为 3 次,设备的精度为 0.8 cm^{-1},光栅为 2 500 g/mm。电学性能测量使用的仪器为 Keysight B1500A。光响应测试选用氙灯作为激发光源的光谱响应系统,测试 WSe_2 光电探测器在 300 ~ 800 nm 的光谱选择特性。

3 结果与讨论

3.1 WSe_2 的结构及形貌表征

由图 1(a)中可以看到剥离下的材料主要分为两种颜色:白色和紫色(蓝色为蓝膜残余)。二维材料体系中,根据层数一般定义 2 ~5 层为少层、

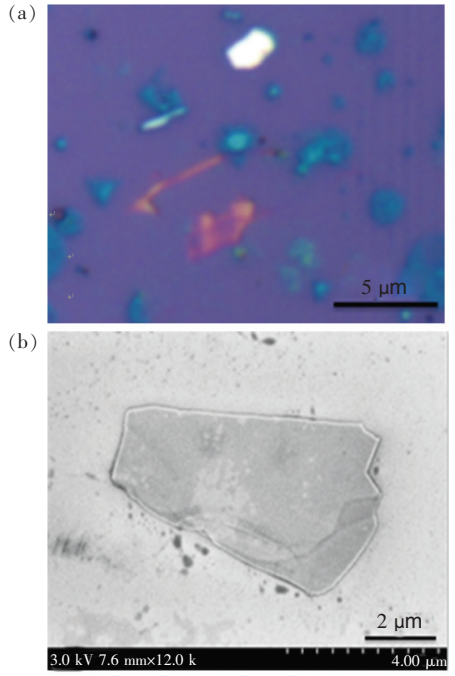

图 1 少层 WSe_2 光学显微镜图像(a)及扫描电镜图像(b)

Fig. 1 Optical microscope image(a) and scanning electron microscope image(b) of WSe_2 in a few layers

6～10 层为多层。通常二维材料可以通过光学显微镜观察剥离的 WSe_2 材料的颜色初步判断材料的层数规模。较亮的白色材料为多层或体材料 WSe_2，而紫色材料为少层 WSe_2 二维材料。扫描电镜结果(图 1(b))显示少层 WSe_2 二维材料宽度约为 5 μm。

通过原子力显微镜测量结果可以观察到 WSe_2 形貌，其表面较均匀，并结合材料高度剖面图计算出材料与衬底间的厚度差为 1.97 nm(图 2(a))。理论计算单层材料厚度为 0.64 nm，可以判断出制备的 WSe_2 二维材料厚度为 3 层。X 射线衍射图(图 2(b))显示，其与六方晶系 WSe_2 的

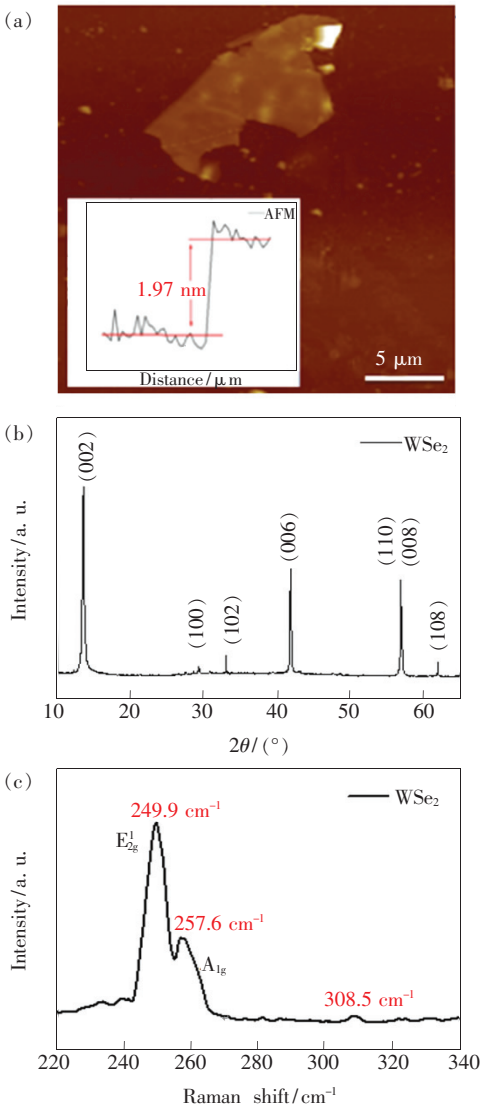

图 2　WSe_2 二维材料的原子力显微镜图(a)、XRD 图谱(b)及拉曼光谱(c)。

Fig. 2　Atomic force micrograph(a), XRD atlas(b) and Raman spectrum(c) of WSe_2 two-dimensional materials.

PDF(#87-2418)标准卡特征峰高度一致，无多余杂峰，且半高宽较窄，可以看出剥离的 WSe_2 二维材料结晶质量非常好，缺陷较少。

SiO_2/Si 衬底上的 WSe_2 拉曼光谱(图 2(c))在 249.9 cm^{-1} 和 257.6 cm^{-1} 处有两个特征峰，分别为 Se 原子和 W 原子面内振动模式(E^1_{2g})和对应的 Se 原子的面外振动模式(A_{1g})。同时在 308 cm^{-1} 附近的位置会出现一个由于层间范德华力引起的活性峰，若为单层 WSe_2 则该峰是失活的。这个范德华力引起的活性峰可以用来快速确认 WSe_2 层数。拉曼光谱中范德华力的活性峰位于 308.5 cm^{-1}，可以判断剥离的 WSe_2 为 3 层，与 AFM 结果相对应[7]。

3.2　WSe_2 的光学特性

单层 WSe_2 发光峰位于 755 nm 附近，而剥离的 WSe_2 发光峰位于 890 nm 附近(图 3)，这是由于随着层数增加，层间耦合作用增大。并且层间的间接跃迁相对于直接跃迁占绝对优势。直接跃迁峰在双层、三层中不明显，从而引起峰位红移，这很好地解释了体材料发光特性是间接跃迁，而单层的是直接跃迁[8]。所以随着层数的减少，WSe_2 薄膜的光学带隙变大。

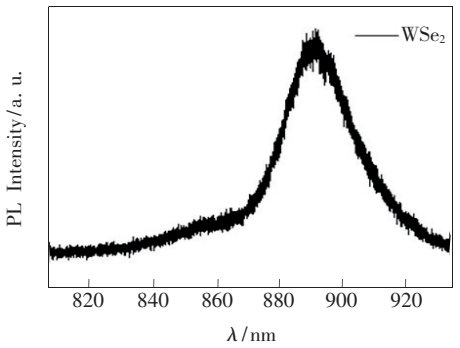

图 3　WSe_2 二维材料的 PL 光谱

Fig. 3　PL spectrum of WSe_2 two-dimensional materials

3.3　WSe_2 的电学特性

WSe_2 场效应晶体管(FET)模型图如图 4(a)、实物图如图 4(b)，其中使用的 WSe_2 沟道材料宽度约为 3 μm。通过观察 Au-WSe_2-Au 的 *I-V* 曲线(图 4(c))的斜率可以判断 WSe_2 与 Au 电极的接触受肖特基势垒影响较小。

输出特性曲线(图 5(a))是指 FET 在特定的栅压(V_{gs})下，源漏电流(I_{ds})随源漏电压(V_{ds})的变化情况，即 I_{ds}-V_{ds} 关系曲线，输出特性曲线可以

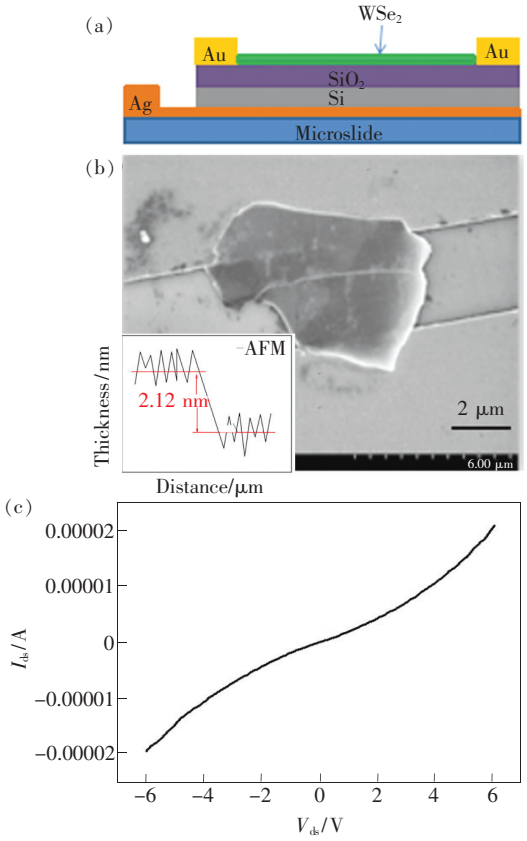

图 4 WSe_2 FET 模型图(a)、实物图(b)及 Au-WSe_2-Au 的 *I-V* 曲线(c)。

Fig. 4 WSe_2 FET diagrammatic figure(a), physical map (B) and Au-WSe_2-Au *I-V* curve(c).

反映出 FET 中沟道材料与器件电极材料的接触情况及栅压对器件的控制情况[9]。转移特性曲线则是指特定的漏极电压下,器件的源漏电流随栅极电压的变化情况,即 I_{ds}-V_{gs}关系曲线[10]。场效应晶体管器件中最重要的参数就是载流子迁移率,其反映了电场作用下的电子(或空穴)在半导体中的迁移能力,即导电能力。其可以通过转移特性曲线(I_{ds}-V_g)计算出来,计算公式为:

$$\mu = \frac{g_m L}{W C_0 V_{ds}}, \tag{1}$$

本实验中沟道长度 $L = 1.8$ μm;宽度 $W = 3$ μm;$V_d = 0.5$ V;g_m为转移曲线斜率(图 5(b)),表示栅极电压对于源漏电流的控制强弱。栅极绝缘层 $C_0 = \varepsilon\varepsilon_0/h$,其中 ε_0 为真空介电常数 8.85×10^{-12} F/m,ε 为 SiO_2 相对介电常数 3.9,h 为 SiO_2 厚度 300 nm。代入以上数据,计算出 WSe_2 场效应晶体管载流子迁移率为 3.42 $cm^2/(V\cdot s)$。根据转移曲线(图 5(c))可以观察出器件的开关比为 10^6。

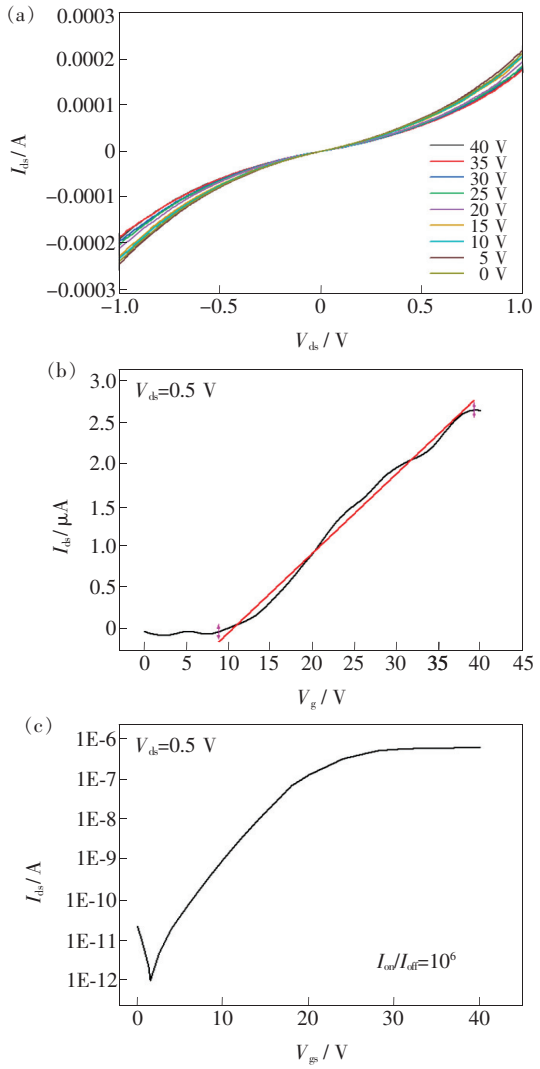

图 5 WSe_2 FET 输出曲线(a)、转移曲线(b)及对数坐标下的转移曲线(c)。

Fig. 5 Output curve(a), transfer curve(b) and transition curve of logarithmic coordinates(c) of WSe_2 FET.

3.4 WSe_2 的光电性能

WSe_2 FET 光电探测器的一个重要参数是响应度 R,即探测器在光照下产生的光电流与入射光光功率的比值,它反映出器件的光电转换能力,单位为 A/W(或 mA/W)。计算公式为:

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{inc}} = \frac{I_{illum} - I_{dark}}{E_{inc}\times A}, \tag{2}$$

其中 I_{illum}和 I_{dark}分别为器件在光照下和无光照时的电流值,I_{ph}为光生电流值,入射光功率 P_{inc}等于入射光强度 E_{inc}与器件有效工作面积 A 的乘积[11]。图 6(a)为器件光电流曲线,经过计算,我们得出三层 WSe_2 薄膜光电晶体管光响应度随光照功率的变化曲线,如图 6(b)所示。

对器件在 1 mW 光照功率照射下、不同栅压

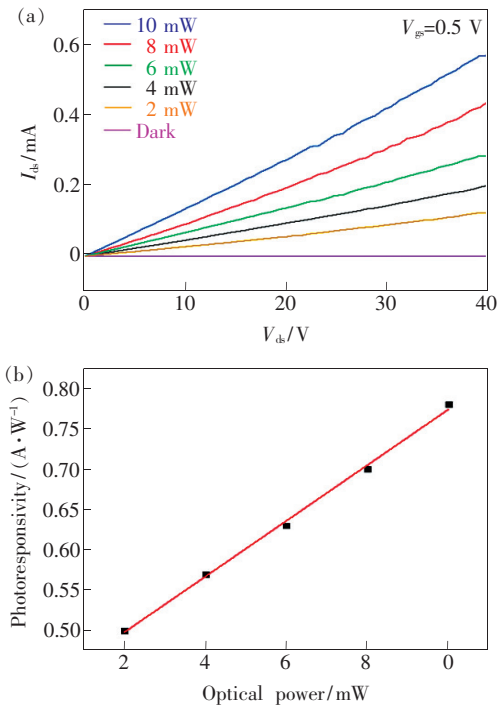

图 6　不同光照功率下 WSe_2 FET 输出特性曲线(a)及光响应度随光照功率变化曲线(b)

Fig. 6　Output characteristic curves(a) and curve of light response varying with the light power(b) of WSe_2 FET as per different light power

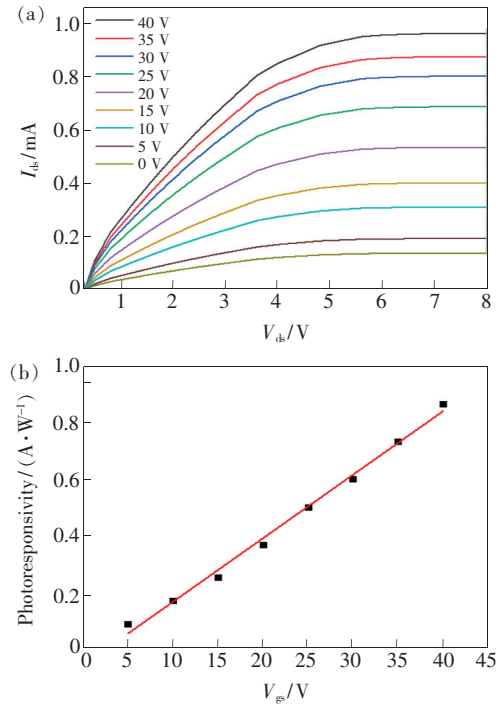

图 7　1 mW 光照下不同栅极电压 WSe_2 FET 输出特性曲线(a)及光响应度随栅极电压变化曲线(b)

Fig. 7　Output characteristic curves(a) and curve of optical response varying with gate voltage(b) of WSe_2 FET under 1 mW illumination based on different gate voltages

调制下的输出特性曲线变化情况进行测试对比分析，如图 7(a)所示。由图中可以获得器件的漏极电流 I_{ds} 随栅极电压的变化情况，进而通过公式(2)计算出在特定光照功率下器件的光响应度随栅压的变化情况，如图 7(b)所示。器件响应时间主要由沟道材料及光照强度决定。在不改变光照强度及所加源漏电压强度下，器件的光响应时间基本没有变化；而器件光响应度随着栅极电压的增大接近线性增长。实现了在不牺牲器件响应时间的前提下提高器件的光响应度。

选用氙灯为激发光源测试了 300 ~ 800 nm 探测器的光谱探测范围。从响应谱(图 8)可以看出，探测器的响应度在 650 nm 波长下为 0.61 A/W，响应波段为 450 ~ 800 nm，具有可见光区段及近红外区段的宽光谱响应范围。

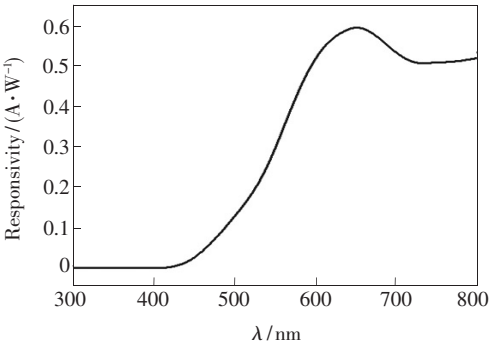

图 8　WSe_2 光电探测器响应谱

Fig. 8　Response spectrum of WSe_2 photodetector

图 9 为 WSe_2 薄膜光电探测器在 532 激光(5 mW)照射下的开关特性测试曲线。测试结果显示，器件的光响应恢复时间为 1 900 ms。由于制备的 FET 所选用的沟道材料为间接带隙的少层 WSe_2 薄膜，相比于直接带隙的单层材料，其光电流的产生及衰减所用的时间有所增长[12]。

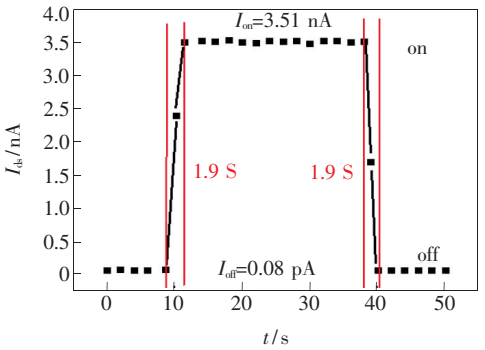

图 9　WSe_2 光电探测器开关性能

Fig. 9　Switching performance of WSe_2 photoelectric detector

表1 WSe_2 场效应晶体管性能对比

Tab. 1 Performance comparison of WSe_2 FET

材料	晶体管性能				参考文献	载流子迁移率/($cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)	器件类型
	响应度/($A \cdot W^{-1}$)	上升时间/ms	下降时间/ms	开关比			
WSe_2	0.171	23	23	10^6	[6]	—	双端
WSe_2	10^5	>5 000	>5 000	10^5	[6]	—	双端
WSe_2	0.003 35	16	32	10^6	[13]	0.22	三端
WSe_2	0.36	930	930	10^6	[14]	—	双端
WSe_2	0.61	1 900	1 900	10^6	本文	3.42	三端

4 结 论

本研究采用定点转移方法制备了基于三层 WSe_2 具有背栅电极的光电晶体管,探究了栅极电压调控下 WSe_2 场效应晶体管的电学性能变化及光响应度的变化。其载流子迁移率为 3.42 $cm^2/(V \cdot s)$。研究了场效应晶体管的光电探测响应度、开关性能及光谱探测范围。综合性能更高的 WSe_2 场效应晶体管有望在可见光波段及近红外波段光电探测领域得到广泛应用。

参 考 文 献:

[1] SHI K X, LI J H, XIAO Y C, *et al.*. High-response, ultrafast-speed, and self-powered photodetection achieved in InP@ZnS-MoS_2 phototransistors with interdigitated Pt electrodes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(28): 31382-31391.

[2] CHU Y H, WANG L H, LEE S Y, *et al.*. Atomic scale depletion region at one dimensional $MoSe_2$-WSe_2 heterointerface [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 113(24): 241601-1-4.

[3] ALLAIN A, KIS A. Electron and hole mobilities in single-layer WSe_2 [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(7): 7180-7185.

[4] ZHAO W J, GHORANNEVIS Z, CHU L Q, *et al.*. Evolution of electronic structure in atomically thin sheets of WS_2 and WSe_2 [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(1): 791-797.

[5] JO S H, LEE H W, SHIM J, *et al.*. Highly efficient infrared photodetection in a gate controllable van der Waals heterojunction with staggered bandgap alignment [J]. *Adv. Sci.*, 2018, 5(4): 1700423-1-9.

[6] ZHANG W J, CHIU M H, CHEN C H, *et al.*. Role of metal contacts in high-performance phototransistors based on WSe_2 monolayers [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(8): 8653-8661.

[7] SHIMATANI M, OGAWA S, FUKUSHIMA S, *et al.*. Enhanced photogating via pyroelectric effect induced by insulator layer for high-responsivity long-wavelength infrared graphene-based photodetectors operating at room temperature [J]. *Appl. Phys. Express*, 2019, 12(2): 025001-1-5.

[8] WU Z T, LUO Z Z, SHEN Y T, *et al.*. Defects as a factor limiting carrier mobility in WSe_2: a spectroscopic investigation [J]. *Nano Res.*, 2016, 9(12): 3622-3631.

[9] 王晓东,颜伟,李兆峰,等. 平面天线在场效应晶体管太赫兹探测器中的应用 [J]. 中国光学, 2020, 13(1): 1-13.
WANG X D, YAN W, LI Z F, *et al.*. Application of planar antenna in field-effect transistor terahertz detectors [J]. *Chin. Opt.*, 2020, 13(1): 1-13. (in Chinese)

[10] WEN R C, WEI A X, TAO L L, *et al.*. Hydrothermal synthesis of WSe_2 films and their application in high-performance photodetectors [J]. *Appl. Phys.* A, 2018, 124(9): 634-1-8.

[11] 苟昌华,武明珠,郭永林,等. 未退火 InGaZnO 作为缓冲层的 InGaZnO 薄膜晶体管性能研究 [J]. 液晶与显示, 2015, 30(4): 602-607.
GOU C H, WU M Z, GUO Y L, *et al.*. Effects of using InGaZnO without annealing as buffer layer on the performance of InGaZnO thin film transistors [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2015, 30(4): 602-607. (in Chinese)

[12] 焦洋,张新安,翟俊霞,等. 沟道层厚度对室温制备的 In_2O_3 薄膜晶体管器件性能的影响 [J]. 发光学报, 2013, 34

(3):324-328.

JIAO Y,ZHANG X A,ZHAI J X,*et al*.. Effect of channel layer thickness on the device characteristics of room temperature fabricated In_2O_3 thin-film transistors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013,34(3):324-328. (in Chinese)

[13] HONG J T,WANG M C,JIANG J,*et al*.. Optoelectronic performance of multilayer WSe_2 transistors enhanced by defect engineering [J]. *Appl. Phys. Express*, 2020,13(6):061004.

[14] HU C,DONG D D,YANG X K,*et al*.. Synergistic effect of hybrid PbS quantum dots/2D-WSe_2 toward high performance and broadband phototransistors [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017,327(2):1603605-1-8.

夏风梁(1995 -),男,黑龙江黑河人,硕士研究生,2018 年于黑龙江科技大学获得学士学位,主要从事半导体微纳米结构探测器件的研究。

E-mail: 1172323231@qq.com

李金华(1977 -),女,吉林柳河人,博士,教授,博士研究生导师,2006 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事纳米光电功能材料与器件的研究。

E-mail: jhli_cust@edu.com