

# 基于石墨烯-黑砷异质结构宽频段探测器

张力波<sup>1</sup>, 张传胜<sup>2</sup>, 王林<sup>3\*</sup>, 邢怀中<sup>1\*</sup>

(1. 东华大学理学院, 上海 201620;

2. 中国电子科技集团公司第五十研究所, 上海 200331;

3. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 利用定点转移技术, 制备出二维层状材料石墨烯-黑砷范德华异质结构的光电探测器制备, 实现了从可见光-红外-微波的宽频段探测。其中在可见红外光辐射下, 黑砷中产生的光激发电子-空穴对被分离并注入石墨烯, 显著降低了半导体黑砷和金电极之间的势垒, 从而实现了有效的光电流提取; 在微波频段下, 由于两种材料塞贝克系数差异产生光热电效应而激发非平衡载流子, 零偏下形成光电流。研究结果为二维层状材料的带隙工程应用于光子和光电子领域铺平了道路。

**关键词:** 半导体技术; 二维层状材料; 光电探测; 范德华异质结

**中图分类号:** TN385 **文献标识码:** A

## Broadband detector based on graphene-black arsenic heterostructure

ZHANG Li-Bo<sup>1</sup>, ZHANG Chuan-Sheng<sup>2</sup>, WANG Lin<sup>3\*</sup>, XING Huai-Zhong<sup>1\*</sup>

(1. College of Science, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. The 50th Research Institute of China Electronics Technology Group, Shanghai 200331, China;

3. State Key Laboratory for Infrared Physics Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Here, a graphene-black arsenic van der Waals heterostructure is fabricated by the fixed-point transfer technology, realizing the broadband detection from visible light-infrared-microwave. Among them, the photoexcited electron-hole pairs generated in the black arsenic are separated and injected into the graphene under visible and infrared light radiation, which significantly reduces the potential barrier between the semiconductor black arsenic and the gold electrode, thereby realizing effective photocurrent extraction. In the microwave band, due to the difference in the Seebeck coefficient of the two materials, the non-equilibrium carriers are generated due to the photothermoelectric effect, forming the photocurrent under zero bias. The research results paved the way for bandgap engineering of two-dimensional layered materials to be applied to the fields of photonics and optoelectronics.

**Key words:** semiconductor technology, two-dimensional layered materials, photodetection, van der Waals heterojunction

**PACS:** 07. 57. Hm, 73. 40. -c, 85. 60. Gz

## 引言

近年来, 二维层状材料, 如石墨烯、黑磷、过渡金属硫族化合物等, 以其独特的电子和光电子性质而备受相关领域研究者得关注。二维材料的表面

无悬挂键、不受晶格匹配的限制使其具有很大的自由度与同类材料构成范德华异质结。自2004年通过机械剥离得到石墨烯以来, 二维材料由于其理想的物理、化学、(电学和光学)特性逐渐受到来自凝

收稿日期: 2021-06-24, 修回日期: 2021-08-19

基金项目: 上海市自然科学基金(21ZR1402200, 21ZR1473800)

Foundation items: Shanghai Natural Science Foundation Project (21ZR1402200, 21ZR1473800)

作者简介(Biography): 张力波(1994-), 男, 浙江绍兴人, 博士研究生, 主要研究基于二维材料太赫兹探测器. E-mail: libozhang@mail.dhu.edu.cn

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: xinghz@dhu.edu.cn, wanglin@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2021-06-24, Revised date: 2021-08-19

聚态物理、材料科学、纳米技术等领域研究人员的关注,在信息存储、节能减排和光电探测等领域展现出了十分光明的前景。过去十年见证了石墨烯和类石墨烯超薄二维纳米材料的爆炸性研究进展,如六方氮化硼(h-BN)、过渡金属硫族化合物(TMDs)、黑磷(BP)、硅烯和MXenes等<sup>[1-5]</sup>。它们都具有层状结构,厚度仅为单个或几个原子层,而横向尺寸可以达到微米甚至更大。石墨烯是一种单原子级厚的石墨(0.35 nm),是二维晶体形式的碳的同素异形体。它由六边形蜂窝晶格结构组成,同时,由于导带和价带在狄拉克点处接触,即狄拉克点位于布里渊区的边缘,石墨烯没有带隙,其独特的带隙导致电子浓度为 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 时的迁移率超过 $2 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ,具有更好的电子导电性<sup>[6-8]</sup>。但是石墨烯极低的光吸收率(2.3%,单层)和无带隙的能带特征导致其光载流子寿命短;过渡金属硫族化合物(TMDCs)在夹层内普遍具有三明治结构,共价键合其中金属原子位于硫属元素原子的两个平面之间。特别是其中一些是单层蜂窝状结构,进一步细分为不同类型,即具有 $D_{6h}$ 点群对称性的2H结构和具有 $D_{3h}$ 点群对称性的1T结构,即蜂窝(2H)和中心蜂窝(1T)结构。TMDCs具有广泛的电子和光学特性,如厚度相关的直接带隙、自旋谷耦合、电荷密度波相位(CDW)、超导性、拓扑相位和强激子效应等。基于上述特性,TMDCs具有广泛的光电子学、可调谐激子器件和自旋谷激光器等开发利用前景<sup>[9-11]</sup>。而TMDCs由于较大的带隙也限制了其光电探测能力;黑磷(BP)是一种层状正交晶体结构,其相邻的层间通过范德华相互作用单层BP是四个P原子内的褶皱蜂窝结构。BP具有优异的电子特性,例如高达 $10^3 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的高迁移率、各向异性输运和高度可调的厚度相关的直接带隙<sup>[12-14]</sup>。因为BP的直接带隙可以在0.3 eV(体)到2 eV(单层)之间变化,这取决于层数,即其薄膜厚度桥接了石墨烯之间的带隙(零带隙)和TMDC,有望成为从可见光到中红外光电子学作为光电应用的候选者,例如光电探测器、激光器和传感器等。但BP在氧气和水的环境条件下很容易降解,其稳定性仍然是一个主要挑战,这大大限制了黑磷器件的应用能力。

磷作为磷的同一主族元素,黑磷具有与黑磷类似的晶格结构,甚至类似优异的电光学性质<sup>[15-17]</sup>。最近的文献报道表明黑磷的能带结构跟层数相关,即带隙随层数变化,范围从多层的0.3 eV到单层的

1.5 eV变化。层状二维材料黑磷已被预测具有高迁移率(达到 $10^3 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )以及较高的稳定性<sup>[18-20]</sup>。而且考虑到黑磷与厚度相关的带隙,这种材料代表了一种强大的光电检测平台,能够在特定带隙波长范围内实现更高性能,在遥感通信和环境监测中具有潜在应用。因此在本工作中,使用机械剥离法获得石墨烯和黑磷薄片,随后通过定点转移技术制备了石墨烯-黑磷范德华异质结,然后使用微纳加工工艺制作基于异质结构的光电探测器,探究和分析了器件的光电探测性能,结果表明了二维石墨烯-黑磷范德华异质结的探测器,分别在520 nm、638 nm、1 550 nm和7.5 mm波段下实现宽频段响应。

## 1 实验与方法

块状石墨和黑磷材料从2D Materials公司购买获得,借助蓝胶带通过机械剥离方法将其厚度减薄,石墨薄片转移到高阻硅衬底上,而黑磷薄片转移到聚二甲基硅氧烷(PDMS)软性衬底上(见图1(a));再将此片粘附有黑磷薄片的PDMS的背面贴在透明载玻片上,在显微镜下找到合适厚度的材料,借助微精密机械手臂对准硅衬底石墨薄片的角度并使两者接触,迅速加热弱化PDMS的粘性并将黑磷薄片转移到硅衬底上。如图1(b)所示利用法定点转移法获得高质量异质结构。器件制备通过标准的微纳加工工艺,首先在硅衬底上旋涂聚甲基丙烯酸甲酯(4 000 r/s, 40 s),电极图案通过电子束曝光刻画,电子束蒸发设备蒸镀金属,剥离法显现完成石墨烯-黑磷异质结器件制备工艺。采用光学显微镜可以观察整个器件结构示意图(图1(b)),通过原子力显微镜可以表征沟道光敏材料的形貌和厚度。

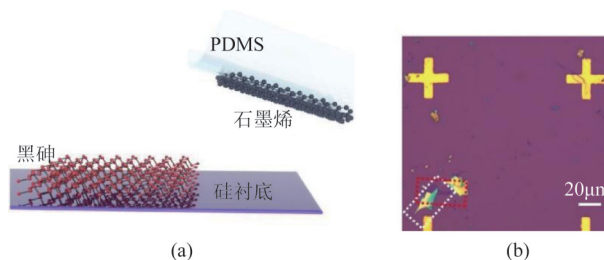


图1 异质结构示意图(a)定点转移技术,(b)异质结构光学显微镜

Fig. 1 Schematic diagram of heterogeneous structure (a) Fixed-point transfer technology, (b) optical micrograph of heterostructure structure

## 2 结果与讨论

首先为了探究石墨烯-黑砷异质结器件的可见-近红外波段室温探测能力,一束通过物镜的单色激光聚焦到器件沟道,器件结构示意图如图2(a)所示,沟道长度为 $5\ \mu\text{m}$ ,宽度为 $5\ \mu\text{m}$ 。图2(b-d)显示了在不同波长(520 nm、638 nm和1 550 nm)的激光辐射下和黑暗条件下的线性输出特性曲线,具有一个很大的 $I_{\text{photo}}/I_{\text{dark}}$ 比,其中入射光功率变化下的数据被很好得记录下来并进行比较,沟道接触电阻大概为 $1.5\times 10^4\ \Omega$ 。以下所有测试实验都在室温环境下。我们发现该异质结在可见光到近红外的宽波长范围内可以在零偏下观察到稳定的光响应波形(所有光功率都调整到1 mW,激光输出的占空比为50%),其中光电流 $I_{\text{photo}}=I_{\text{ds}}-I_{\text{dark}}$ (图2(e))。如此大的光电流响应归因于多层黑砷材料具有较强的光吸收率,并且在异质结区电子-空穴对分离所产生的较多的光生载流子。作为评判光电探测器的性能指标就是响应率( $R$ )和探测率( $D^*$ ),分别反映了探测器光电转化的灵敏度和探测最小光信号的能力。在此三个频段下,我们分别计算了最大光响应率 $R_A=I_{\text{photo}}/PS$ ,其中 $I_{\text{photo}}$ 为探测器的光电流值, $P$

是入射激光的功率密度( $520\ \text{nm}: 10^3\ \text{W cm}^{-2}$ ;  $638\ \text{nm}: 6\times 10^3\ \text{W cm}^{-2}$ ;  $1\ 550\ \text{nm}: 2\times 10^3\ \text{W cm}^{-2}$ ), $S$ 为器件有效的光辐射面积( $25\ \mu\text{m}^2$ )。通过计算获得零偏下的三个波段最大光响应率分别是 $20\ \text{mA W}^{-1}$ 、 $6.7\ \text{mA W}^{-1}$ 和 $10.6\ \text{mA W}^{-1}$ 。探测率计算公式如下: $D^*=(R_A/\sqrt{S})/I_{\text{dark}}$ ,其中 $I_{\text{dark}}$ 是光探测器的暗电流。通过计算三个波段的探测率分别为 $6.4\times 10^8\ \text{Jones}$ 、 $2.2\times 10^7\ \text{Jones}$ 和 $3.4\times 10^7\ \text{Jones}$ 。响应时间是另一个评估光电探测器的重要参数,其中具体度量参数可分为上升响应时间和下降响应时间。上升时间被定义为光响应从峰值的10%上升到90%的时间,下降时间被定义为光响应衰减从峰值的90%到10%的时间。利用示波器来采集实时的零偏光电流随时间变化,在1 Hz调制频率1550 nm激光辐射下,归功于载流子快速捕获和复合,器件的上升/下降时间分别是0.1 ms(图2(f)),快于常规基于二维材料的光探测器<sup>[21-23]</sup>。综上所述,我们的异质结器件在可见近红外表现出良好的性能。

为了更好地理解石墨烯-黑砷异质结光电探测器在可见-近红外响应机制,在图3(a)引入了能带示意图,在石墨烯和黑砷界面处可以形成内建电

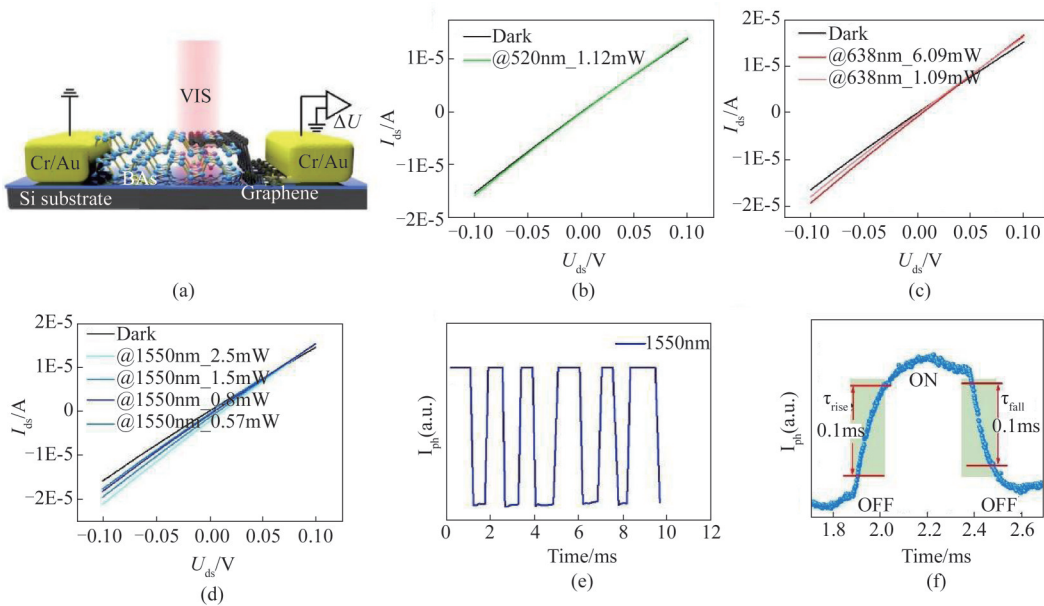


图2 (a)石墨烯-黑砷异质结探测器示意图,(b)漏电流-漏电压特性曲线图在无光条件下(黑线)和520 nm激光照射下(绿线),(c)漏电流-漏电压特性曲线图在无光条件下(黑线)和638 nm激光照射下(红线),(d)漏电流-漏电压特性曲线图在无光条件下(黑线)和1 550 nm激光照射下(蓝线),(e)1 550 nm激光照射下的光响应波形图,(f)响应时间测试。

Fig. 2 (a) Schematic diagram of graphene-black arsenic heterojunction detector, (b) drain-current characteristic curve in the absence of light (black line) and under 520nm laser irradiation (green line), (c) drain-current characteristic curve under the 638nm laser irradiation (red line), (d) drain-current characteristic curve under dark condition (black line) and 1550nm laser irradiation (blue line), (e) optical response waveform diagram under the 1550nm laser irradiation, (f) response time measurement.



场。由于光伏效应,光辐射产生电子跃迁的电子-空穴对被内建电场分离,最终分别被源漏电极收集,产生净光电流。实验上通过提高520 nm入射光的功率,在沟道中对应增加光生载流子的数量,因此光电流的大小随着入射光功率提高也显示了一个线性增强的现象(图3(b)),符合 $I_{ph}$ 与入射功率的关系: $I_{ph}=AP^\alpha$ 。通过拟合得到 $\alpha$ 的值约为0.8,这与理想值1非常接近,表明了这个过程是很高效的电子-空穴对分离和复合。扫描光电流显微镜是显示光电流产生区域的最直观、有效的方法,可以用来验证我们的解释。用520 nm激光的光斑来扫描整个异质结器件表面,记录下了零偏下的光电流分布。图3(c-d)显示了不同功率下光敏区测到的光电流分布,红色部分代表了自发电荷分离的区域,蓝色部分代表了无光电流区域。由此证明了光响应主要由异质结区位置的光伏效应主导。

随着技术不断更迭,能实现宽频段探测的光电探测器将在未来应用领域中脱颖而出。探究了基于石墨烯-黑砷异质结器件在微波波段(20~40 GHz)的探测能力。在该波段由于光子能量远小于黑砷材料的带隙(0.3 eV),因此区别于可见-近红外

波段光电转换机制,无法产生电子-空穴对,常规的光伏效应,光电导效应是不适用的。由于石墨烯和黑砷对于微波的吸收能力不同,作为半金属的石墨烯的塞贝克系数的绝对值约在0~10 mV/K,而半导体黑砷的塞贝克系数的绝对值约在上百 mV/K,比石墨烯的高很多,因此在沟道中存在较大的温度梯度,载流子从高温区到低温区扩散,在异质结区形成空间电荷区,引起一个塞贝克系数差(即温差电动势)。零偏时净光电压大小可表示为:

$$U_{ph} = \int_{T_0}^T (S_{As} - S_{gra})dT \approx \int_{T_0}^T S_{As}dT^{[24]} \quad (1)$$

考虑到减少毫米波辐射在衬底上的反射,在器件制备工艺上选择了高阻硅作为衬底。由于微波波长(毫米级)远大于器件沟道(微米级),因此通过特殊的天线结构设计可有效地将光子耦合到亚波长的沟道中,电荷在沟道金属两端聚集,在不超过趋肤效应极限的情况下,沟道中电场会一直随着沟道长度缩短而减弱<sup>[25]</sup>。在测试过程中,我们选择使用Agilent E8257D微波源作为输出源,频段在20~40 GHz、1.1 kHz调制、占空比50%的方波输出。图4(a)显示了异质结器件在20~40 GHz的零偏光响应

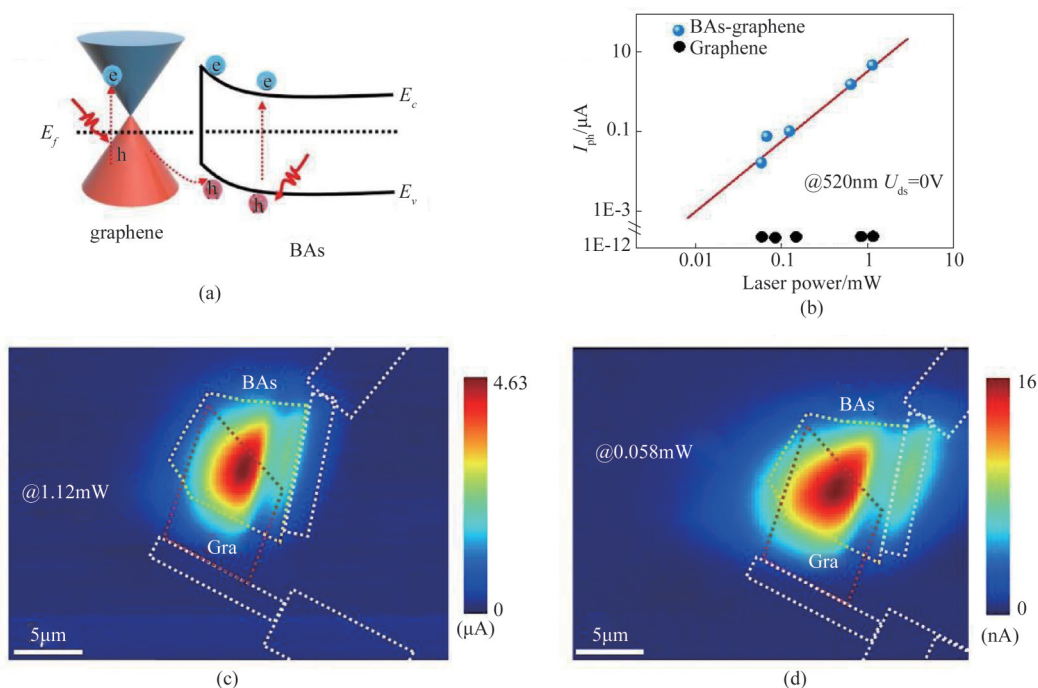


图3 (a)石墨烯-黑砷范德华异质结的能带示意图,(b)石墨烯器件和异质结器件在不同功率的520 nm激光照射下的光响应,(c)在520 nm\_1.12 mW功率的激光照射下的扫描光电流图,(d)在520 nm\_0.058 mW功率的激光照射下的扫描光电流图  
Fig. 3 (a) Energy band diagram of graphene-black arsenic van der Waals heterojunction, (b) photoresponse of graphene devices and heterojunction devices under different powers of 520 nm laser irradiation, (c) laser irradiation at 520 nm\_1.12 mW power The scanning photocurrent diagram below, the inset is the optical micrograph of the heterojunction device, (d) the scanning photocurrent diagram under 520 nm\_0.058 mW laser irradiation.

谱。这种光响应与频率的依赖性本质上源于天线设计结构,通过改变天线的尺寸可以改变共振频率,而修改天线形状结构可以缩短或者加宽频率范围。为了进一步表征器件在毫米波的光电转化的灵敏度,也计算了在此频段的最大响应率  $R_A = I_{\text{photo}} / P S$ ,其中  $I_{\text{photo}}$  为探测器的光电流值,  $P$  是入射激光的功率密度 ( $2.5 \text{ mW cm}^{-2}$ ),  $S$  为器件有效的光辐射面积 ( $S = \lambda^2 / 4 = 0.04 \text{ cm}^2$ )。器件在峰值响应率达到  $6 \text{ mA W}$ 。另一个评估探测器灵敏度的性能指标是噪声等效功率 (NEP):  $\text{NEP} = v_n / R_v$ ,  $v_n$  是噪声谱密度,  $R_v$  是电压响应率。在系统中,主要由焦耳热噪声 ( $N_j$ )、散粒噪声和  $1/f$  噪声<sup>[26-27]</sup>。热噪声由于载流子热运动产生,在计算中可表示为:  $N_j^2 = 4k_b T r$ ; 散粒噪声是探测器在光探测过程中光电子或者光生载流子随机引起的。但是在室温零偏下工作的器件,它的散粒噪声小于热噪声几个量级,因此可以忽略不计; 由于测试的调制频率大于  $1 \text{ kHz}$ , 因此  $1/f$  噪声也可以忽略不计。最终计算得到 NEP 的值是  $0.02 \text{ pW Hz}^{1/2}$ 。动态范围作为长波探测器的重要参数,它描

述的是探测器能够感知的光学功率范围。从图 4 (b) 可以发现我们的器件能探测最小输出功率为  $0.01 \text{ mW}$ , 最大为  $1.6 \text{ mW}$ , 动态范围超过两个数量级。拟合发现, 光电流与功率的关系几乎呈良好的线性关系。归一化后稳定的波形依旧通过示波器采集得到 (图 4 (c)) 以及计算了响应时间, 上升沿和下降沿时间分别是  $5.1 \mu\text{s}$  和  $7.2 \mu\text{s}$ 。综合可知我们的器件在微波频段表现出良好的性能。

### 3 结论

综上, 展示了一种在室温下工作的石墨烯-黑砷异质结光电探测器, 它具有超快的响应速度、较低的噪声水平和从可见-近红外-微波的宽波段响应。同时也清晰地区分了在可见-近红外波段和微波波段的响应机制, 零偏下的室温噪声等效功率低于  $0.02 \text{ pW Hz}^{1/2}$ , 响应时间达到  $5 \mu\text{s}$ 。这个结果表明黑砷作为窄带隙半导体, 具有类似黑磷一样的优异电光学特性, 在光电探测领域有很大的探索前景。同时该异质结构表现出来的优异的宽频段探

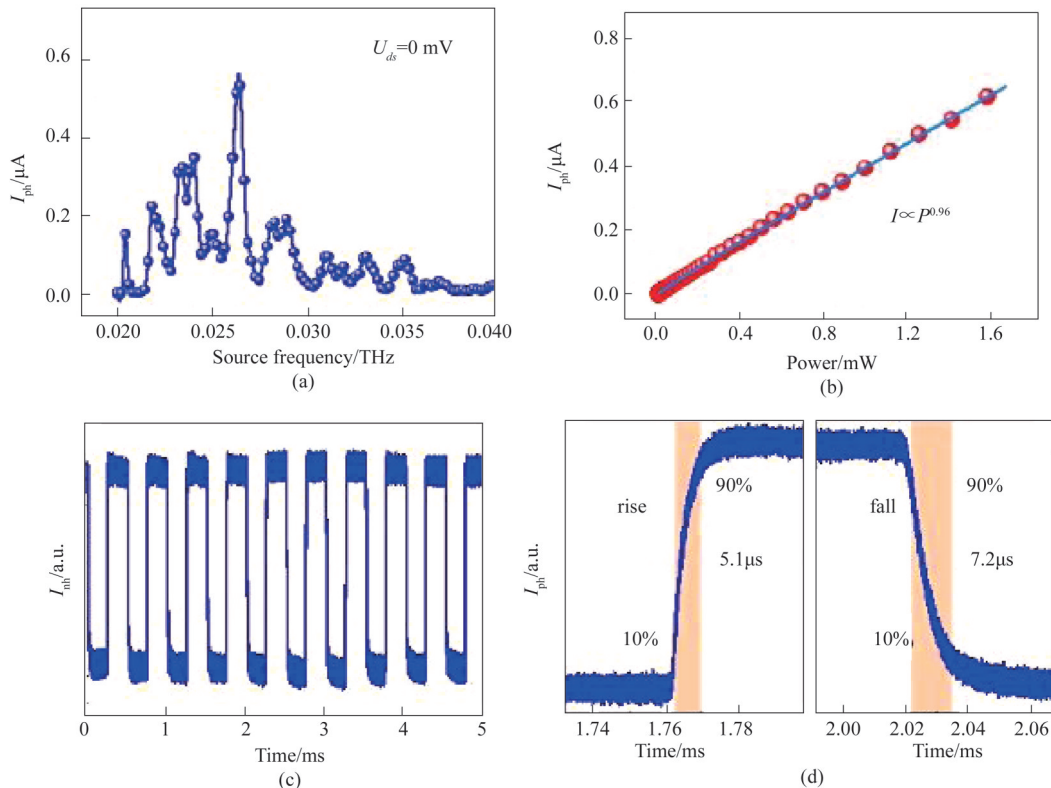


图4 (a) 在  $0.02\text{--}0.04\text{THz}$  频率下异质结器件的光响应变化, (b) 光电流随着不同入射微波光功率照射而变化, (c) 通过示波器记录光电流在  $0.026\text{THz}$  辐射下的归一化光响应波形, (d) 归一化的上升和下降响应时间

Fig. 4 (a) The photoreponse of the heterojunction device under the frequency of  $0.02\text{--}0.04\text{THz}$ , (b) the photocurrent changes with the irradiation of different incident microwave light power, (c) the normalized photocurrent under  $0.026\text{THz}$  radiation is recorded by an oscilloscope A light response waveform, (d) normalized rise and fall response time

测性能为之后尝试室温太赫兹波探测奠定了一定基础。

## References

- [1] Li L, Yu Y, Ye G J, *et al.* Black phosphorus field-effect transistors [J]. *Nat Nanotechnol*, 2014, **9**(5):372-377.
- [2] Yin Z Y, Li H, Li H, *et al.* Single-layer MoS<sub>2</sub> phototransistors [J]. *ACS Nano*, 2012, **6**(1):74-80.
- [3] Akinwande D, Petrone N, Hone J. Two-dimensional flexible nanoelectronics [J]. *Nat Commun*, 2014, **5**:5678.
- [4] Ji J, Song X, Liu J, *et al.* Two-dimensional antimonene single crystals grown by van der Waals epitaxy [J]. *Nat Commun*, 2016, **7**:13352.
- [5] Suzuki R, Sakano M, Zhang Y J, *et al.* Valley-dependent spin polarization in bulk MoS<sub>2</sub> with broken inversion symmetry [J]. *Nat Nanotechnol*, 2014, **9**(8):611-617.
- [6] Park C-H, Yang L, Son Y-W, *et al.* Anisotropic behaviours of massless Dirac fermions in graphene under periodic potentials [J]. *Nature Physics*, 2008, **4**(3):213-217.
- [7] Das Sarma S, Adam S, Hwang E H, *et al.* Electronic transport in two-dimensional graphene [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2011, **83**(2):407-470.
- [8] Bonaccorso F, Colombo L, Yu G, *et al.* 2D materials. Graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems for energy conversion and storage [J]. *Science*, 2015, **347**(6217):1246501.
- [9] Mak K F, He K, Lee C, *et al.* Tightly bound trions in monolayer MoS<sub>2</sub> [J]. *Nat Mater*, 2013, **12**(3):207-211.
- [10] Dang C, Guan M, Hussain S, *et al.* Phase transition photodetection in charge density wave tantalum disulfide [J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(9):6725-6731.
- [11] Geremew A K, Rumyantsev S, Kargar F, *et al.* Bias-voltage driven switching of the charge-density-wave and normal metallic phases in 1T-TaS<sub>2</sub> thin-film devices [J]. *ACS Nano*, 2019, **13**(6):7231-7240.
- [12] Han R, Feng S, Sun D-M, *et al.* Properties and photodetector applications of two-dimensional black arsenic phosphorus and black phosphorus [J]. *Science China Information Sciences*, 2021, **64**(4):140402.
- [13] Xu Y, Shi X, Zhang Y, *et al.* Epitaxial nucleation and lateral growth of high-crystalline black phosphorus films on silicon [J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1):1330.
- [14] Miao J, Zhang L, Wang C. Black phosphorus electronic and optoelectronic devices [J]. *2D Materials*, 2019, **6**(3):032003.
- [15] Pumera M, Sofer Z. 2D monoelemental arsenene, antimonene, and bismuthene: Beyond black phosphorus [J]. *Adv Mater*, 2017, **29**(21):1605299.
- [16] Sheng F, Hua C, Cheng M, *et al.* Rashba valleys and quantum Hall states in few-layer black arsenic [J]. *Nature*, 2021, **593**(7857):56-60.
- [17] Kandemir A, Iyikanat F, Sahin H. Monitoring the crystal orientation of black-arsenic via vibrational spectra [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, **7**(5):1228-1236.
- [18] Chen Y, Chen C, Kealhofer R, *et al.* Black arsenic: A layered semiconductor with extreme in-plane anisotropy [J]. *Adv Mater*, 2018, **30**(30):e1800754.
- [19] Zhong M, Xia Q, Pan L, *et al.* Thickness-dependent carrier transport characteristics of a new 2d elemental semiconductor: Black arsenic [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, **28**(43):1802581.
- [20] Gao C, Li R, Zhong M, *et al.* Stability and phase transition of metastable black arsenic under high pressure [J]. *J Phys Chem Lett*, 2020, **11**(1):93-98.
- [21] Lan H Y, Hsieh Y H, Chiao Z Y, *et al.* Gate-tunable plasmon-enhanced photodetection in a monolayer MoS<sub>2</sub> phototransistor with ultrahigh photoresponsivity [J]. *Nano Lett*, 2021, **21**(7):3083-3091.
- [22] Ma Y, Shao X, Li J, *et al.* Electrochemically exfoliated platinum dichalcogenide atomic layers for high-performance air-stable infrared photodetectors [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, **13**(7):8518-8527.
- [23] Xu H, Hao L, Liu H, *et al.* Flexible SnSe photodetectors with ultrabroad spectral response up to 10.6 μm enabled by photobolometric effect [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, **12**(44):49830-49839.
- [24] Gabor N M, Song J C W, Ma Q, *et al.* Hot carrier-assisted intrinsic photoresponse in graphene [J]. *Science*, 2011, **334**(6560):648-652.
- [25] Seo M A, Park H R, Koo S M, *et al.* Terahertz field enhancement by a metallic nano slit operating beyond the skin-depth limit [J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(3):152-156.
- [26] Parmentier F D, Serkovic-Loli L N, Roulleau P, *et al.* Photon-assisted shot noise in graphene in the terahertz range [J]. *Phys Rev Lett*, 2016, **116**(22):227401.
- [27] Balandin A A. Low-frequency 1/f noise in graphene devices [J]. *Nat Nanotechnol*, 2013, **8**(8):549-555.