

## 基于光热载流子调控的二维材料红外与太赫兹探测器研究进展

朱久泰<sup>1,2</sup>, 郭万龙<sup>1</sup>, 刘 锋<sup>2</sup>, 王 林<sup>1</sup>, 陈效双<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200080; 2. 上海师范大学 数理学院, 上海 200080)

**摘 要:** 红外和太赫兹具有非常广阔的应用前景, 在光谱学、成像、无线通信和遥感等领域发挥着越来越重要的作用。但是, 由于红外、太赫兹波段的光子能量低, 相关的探测遇到很大困难, 所以实现高灵敏、高速和高稳定性的红外太赫兹探测是一个具有挑战性的工作。二维材料由于其高迁移率、带隙可调 and 表面悬挂键少等特点为红外太赫兹探测提供了新的机遇。基于光热载流子调控的二维材料红外、太赫兹探测器的发展方兴未艾。文中主要介绍了目前基于光热载流子调控的红外、太赫兹探测器的最新研究进展, 将从材料、器件结构、响应波段和响应机理等方面展开。

**关键词:** 探测器; 红外; 太赫兹; 二维材料; 光热载流子

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0103001

## Research progress of infrared and terahertz detectors based on two-dimensional materials regulated by photo-hot carrier

Zhu Jiutai<sup>1,2</sup>, Guo Wanlong<sup>1</sup>, Liu Feng<sup>2</sup>, Wang Lin<sup>1</sup>, Chen Xiaoshuang<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200080, China;

2. Mathematics & Science College, Shanghai Normal University, Shanghai 200080, China)

**Abstract:** Due to myriad applications, infrared and terahertz are playing an important role in the fields of spectroscopy, imaging, wireless communication and remote sensing. However, be limited by the low photon energy in the infrared terahertz band, the detection encounters great difficulties, so it is a anenormous challenge to realize infrared and terahertz detection with high sensitivity, high speed and high stability. Two-dimensional materials offer new opportunities for infrared and terahertz detection due to their high mobility, adjustable band gap, and few surface dangling bonds. The development of two-dimensional material infrared and terahertz detectors regulated by photo-hot carrier is in the ascendant. This paper mainly introduced the latest research progress of infrared and terahertz detectors based on photo-hot carrier regulation. This article will expand on materials, device structures, response bands, and response mechanisms.

**Key words:** detector; infrared; terahertz; two-dimensional materials; photo-hot carrier

收稿日期: 2019-10-05; 修订日期: 2019-11-15

基金项目: 国家重点研究发展计划(2018YFA0306200); 国家自然科学基金(91850208, 61521005)

作者简介: 朱久泰(1995-), 男, 硕士生, 主要从事红外太赫兹探测器件的设计与制作方面的研究。Email: zhujiutai@163.com

导师简介: 王林(1985-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事太赫兹光电子学方面的研究。Email: wanglin@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

红外波段位于可见光和微波之间,波长范围是 $0.76\sim 1\,000\ \mu\text{m}$ ,其中波长在 $100\sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 部分(频率对应范围是 $3\sim 0.3\ \text{THz}$ )被称为甚远红外,也称太赫兹或亚毫米波。红外波段在红外成像、远程激光通信、空间遥感、深空探测等领域应用广泛<sup>[1-5]</sup>。太赫兹的应用研究尚处于起步阶段,在太赫兹时域光谱、太赫兹成像、太赫兹通信等领域显示出强大的应用潜力。

红外和太赫兹探测技术是红外太赫兹技术发展应用的瓶颈之一,也是当前的热点研究领域,受到了广泛关注。但是,因为红外太赫兹的光子能量低,所以采用传统的带内,带间跃迁的方法暗电流比较大,容易受到热噪声的干扰;采用传统的热探测的方法响应速度比较慢,往往需要低温工作条件。所以研究新的探测理论和制备高响应、高速、高稳定性的红外太赫兹探测器就成为了太赫兹技术应用的突破口。

二维材料(石墨烯,二硫化钼,黑磷和硒化铋等)具有载流子迁移率高、带隙可调、光谱响应范围大、表面悬挂键少的诸多优势,受到了人们的青睐,是红外太赫兹探测领域的重要的候选材料,为响应的研发提供了新的平台。光热载流子调控是增加光电转化效率,提高探测灵敏度的重要手段,因此,基于光热载流子调控的二维材料红外太赫兹探测器的出现为红外太赫兹技术领域的研究注入了新的活力。文中将从响应机理、沟道材料、器件结构等方面总结相关的研究进展和展望未来可能的发展方向。

## 1 理论基础

### 1.1 光热载流子探测

与传统的热探测不同,光热载流子辅助的红外太赫兹探测,是指载流子在红外太赫兹的激励下由最初的平衡态变成非平衡态,这时,载流子的能级是离散的,符合费米-狄拉克分布。当载流子被加“热”以后,会通过器件的不对称结构实现沟道与不同波段的入射辐射的耦合,从而使光热载流子发生定向移动并最终产生光信号。

光热载流子的激发有两种情况,第一种是光直接激发<sup>[6]</sup>,另外一种就是等离子激元来诱导产生<sup>[7]</sup>。其中等离子体共振可局域性的增强金属表面的光吸收,并引

起光热载流子的产生与转移,显著地提高了光热载流子的产生及利用率。近年来,基于等离子激元诱导光热载流子已广泛应用于红外太赫兹探测器中<sup>[8-9]</sup>。

### 1.2 热载流子的激发与收集

表面等离子激元是金属表面电子与光子相互作用时产生的集体振荡行为。等离子激元共振具有高效耦合、强吸收以及局域近场增强的特点,其衰减可以激发热载流子。对于局域的等离子激元,其诱导产生的光热载流子部分会与结构中的其他电子以及声子相互作用,并最终转化为焦耳热应用于局部加热。有研究表明,当等离子激元衰变为热电子-空穴后,光热载流子会被转移到邻近的半导体或分子中。其转移效率取决于光热载流子与其他电子以及声子的散射和弛豫之间的竞争。被转移的光热载流子形成光生电流,实现光信号的探测。在金半接触,入射光子可以激发光热载流子越过金属与半导体之间的肖特基势垒实现光电转换,并不受半导体禁带宽度的限制。光热载流子的能量分布以及动量分布会对光热载流子的转移收集效率产生重要影响,为了优化光热载流子器件的探测效率,必须综合考虑等离子激元材料结构、尺寸,以及载流子寿命等多方面因素。

### 1.3 红外与太赫兹探测器性能指标介绍

红外于太赫兹探测器的性能指标是利用器件本身性能参数来体现的,其中最主要的是伏安特性、暗电流、响应时间、量子效率、响应度、噪声等效功率(NEP)和探测效率等。

#### 1.3.1 伏安特性

在器件的两端电极外加偏置电压,电流随着电压的变化而绘制出曲线则为探测器的伏安特性曲线。从伏安特性曲线当中可以大致估算出器件的光探测能力,也可以从伏安特性曲线得到器件的电阻或电导。

#### 1.3.2 暗电流

探测器件一般在没有光照下也会产生电流,这种电流就成为器件的暗电流。一般暗电流的产生是由于器件表面或内部存在晶格缺陷,还有一部分是载流子产生的复合电流或者扩散电流。若要实现高灵敏度的光子探测,必须要降低器件的暗电流,在实验过程中一般采用降低半导体材料的晶格缺陷以及抑制器件表面漏电流来降低器件的暗电流。

1.3.3 响应时间

探测器的响应时间是对器件响应速度的一个定量描述,当入射光照到器件上被探测器吸收时,器件通过光电转换产生稳定的电信号或者光照结束后信号衰减到一定值所需要的时间就是探测器的响应时间。响应时间根据光照的开始与结束可分为上升时间和下降时间。探测器的上升时间一般定义为电信号从稳定值的 10% 上升到 90% 需要的时间,下降时间定义为电信号从稳定值的 90% 下降到 10% 所需要的时间。

1.3.4 量子效率

量子效率是探测器件必须要考虑的性能指标,器件若要达到很高的性能指标,其量子效率必须要高。量子效率的定义为器件每吸收一个光子所产生的空穴电子的个数。它与入射光子能量有关,表达式为:

$$\eta = \frac{I_{ph}/q}{P/h\nu} \quad (1)$$

式中: $I_{ph}$  为器件吸收入射光以后而产生的光电流; $I_{ph}/q$  为器件在单位时间内产生的光电子数; $P$  为器件吸收到的光子能量; $P/h\nu$  为器件在单位时间内吸收的光子数。探测器的量子效率最大为 1,但是实验中制备的器件中的量子效率一般会小于 1,因为不是所有的入射光子都会产生电子空穴对。

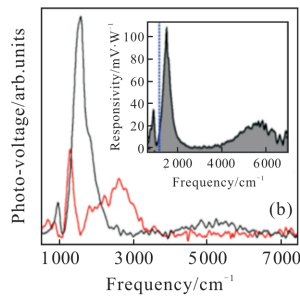
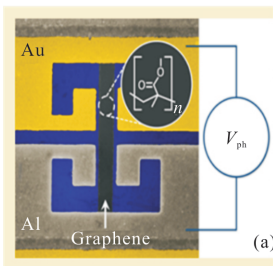
1.3.5 响应度

探测器的响应度一般是指器件吸收入射光产生的光电流与入射光能量的比,可表示为:

$$R = \frac{I_{ph}}{P} \quad (2)$$

公式(1)代入公式(2)可得:

$$R = \frac{\eta q}{h\nu} = \eta \lambda \frac{q}{hc} (A/W) \quad (3)$$



1.3.6 噪声等效功率(NEP)

噪声等效功率也是探测器件的重要参数之一,他表示为当器件的信噪比(SNR)为 1 时光的输入功率。可表示为:

$$NEP = \frac{P_1}{\sqrt{\Delta f}} \quad (4)$$

式中: $P_1$  为当 SNR 等于 1 时所需要入射光功率; $\Delta f$  为带宽。若要器件的光电探测性能得到很好的提升必须要降低。

1.3.7 探测效率

探测效率  $D^*$  是指探测器所能探测到的光子数,其中  $D^*$  可表示为:

$$D^* = RA^{1/2}/(2eI_{dark})^{1/2} \quad (5)$$

式中: $R$  为光响应率; $A$  为器件的有效面积; $e$  为单位电荷; $I_{dark}$  为器件本身的暗电流。探测效率是探测器非常重要的参数,决定了光探测器的探测能力。

2 基于光热载流子调控的红外太赫兹探测器的研究进展

目前,很多二维材料已经被应用于光热载流子调控的红外太赫兹探测器研究中并取得了可喜的成果,比如 BP、Graphene、MoS<sub>2</sub>、Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 等。在这里笔者对该类探测器的结构、性能以及原理进行总结。

2.1 光热载流子调控的红外探测器

2.1.1 石墨烯

石墨烯的带隙为零,载流子迁移率高,响应光谱宽<sup>[10]</sup>。当红外光入射到石墨烯器件时,可以诱导产生光热载流子,进一步调控器件的性能,产生响应信号。基于这种原理研究人员设计了基于石墨烯的谐振腔探测器件(图 1(a)、(b)),该谐振腔可增强石墨烯

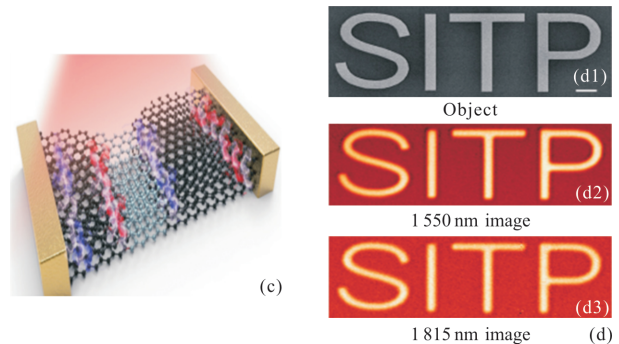


图 1 石墨烯红外探测及其性能原理图<sup>[4,10]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of graphene infrared detector and its performance<sup>[4,10]</sup>

对入射辐射的吸收,并产生等离子体振荡,利用金属材料的非对称接触点可以实现器件对入射波段的耦合,显著地提高了光热载流子的利用率。实验证明这种探测器件具有宽光谱探测性能,其测试结果如图 1(b)所示。

在红外光谱区域,探测器件的高分辨率成像有着非常重要的应用,在室温下,基于多层石墨烯的探测器件能够有效的实现红外探测<sup>[4]</sup>。图 1(c)为器件在扫描光电流显微镜下的表征示意图,通过对响应过程中的数值模拟可以得到,图中红蓝部分分别为光伏和光热载流子响应机制所贡献的电流。所以基于

多层石墨烯的探测器件可以实现两种混合机制为主导的光电探测,实现了在波长为 1 550 nm 和 1 815 nm 波段的红外光谱的成像(图 1(d))。

### 2.1.2 黑磷

黑磷是一种层状结构的材料,其直接带隙随层数在 0.3~2 eV 内变化,可以转移到不同的衬底上,其合适的带隙结构有助于抑制暗电流,并在红外波段的入射辐射的照射下产生热载流子,通过器件的光栅结构会产生等离子体振荡耦合,因此可使热载流子发生定向移动,从而能够实现红外光的探测,如图 2 所示。

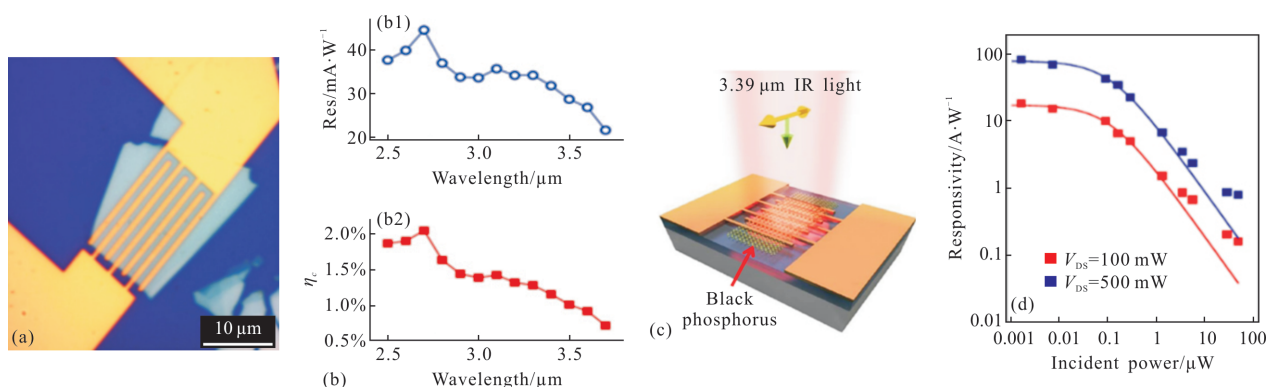


图 2 基于黑磷的红外探测器结构图<sup>[11-12]</sup>

Fig.2 Structure diagram of infrared detector based on black phosphorus<sup>[11-12]</sup>

图 2(a)是一种基于层状黑磷的探测器结构图,黑磷的厚度为 20 nm,器件吸收入射辐射后,通过等离子体振荡诱导出热载流子,并利用光栅结构的耦合产生光生电流,其在波段为 2.5~4.7 μm 范围内都具备探测能力,图 2(c)是一种基于 10 nm 黑磷薄片的光电探测器结构示意图,实验证明该探测器探测波段涵盖了从 532 nm~3.39 μm,使基于黑磷探测器的探测波段达到了中红外波段。其响应率在室温下高达 82 A·W<sup>-1</sup> 并且该器件具有低暗电流和高光电导增益的特点,能够在微瓦级别的中红外光的照射下产生信号。这些优异的探测性能,可以使器件在低功率下的中红外光的环境下工作<sup>[11]</sup>。

### 2.1.3 二硫化钼

过渡金属二硫化物由于其优异的光学以及电学性能近年来备受关注,由于其高的器件开关比以及可调带隙,在光探测器方面有着很大的应用潜力<sup>[13]</sup>。

利用铁电材料制备栅极的二硫化钼晶体管探测器如图 3(a)所示,其中利用聚二乙烯(P(VDF-TrFE))的极化能够在二硫化钼通道中产生极高的静电场,并使少层的二硫化钼通道中的载流子处于耗尽状态,提升了热载流子的利用率,显著地提高了探测器在近红外波段的灵敏度。其测试结果如图 3(b)所示。

实验证明,当等离子激元在二硫化钼和金纳米粒子之间的界面被激发时,二硫化钼的激子大部分被金纳米粒子的局域表面等离子体共振吸收,从而可以使近红外波段的光吸收得到很大的提高<sup>[14]</sup>,极大地提升了热载流子的产生率。为此,研究人员制备了二硫化钼与金纳米粒子的异质结探测器,如图 3(c)所示,其在近红外波段的探测能力明显高于基于纯二硫化钼探测器件,其在不同功率下的测试结果如图 3(d)所示。

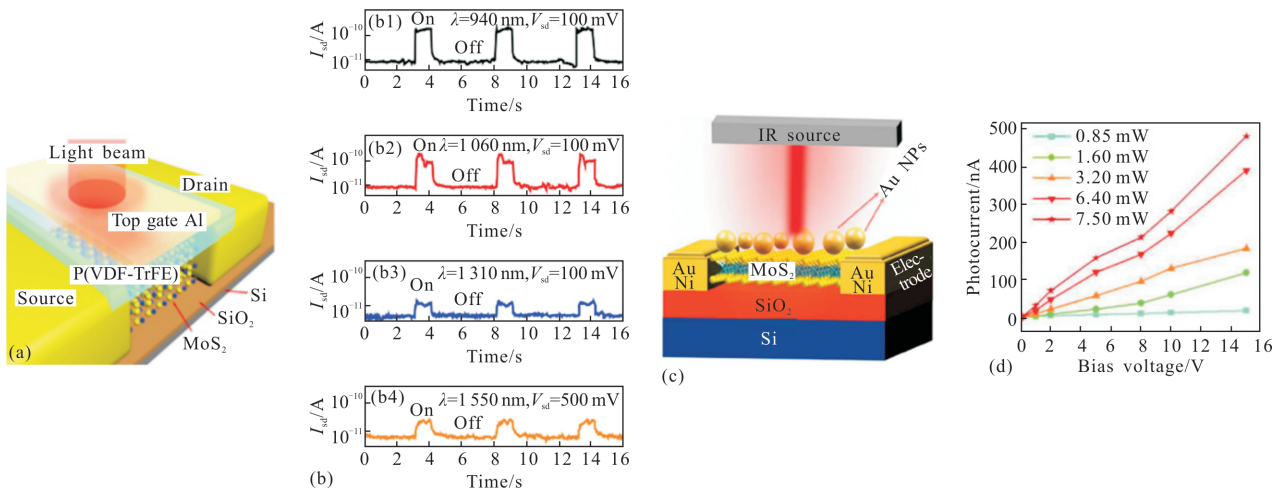


图 3 基于晶体管探测器和异质结的二硫化钼红外探测器性能结构图<sup>[13-14]</sup>

Fig.3 Structure diagram of molybdenum disulfide infrared detector based on transistor and heterojunction<sup>[13-14]</sup>

2.1.4 碲化铋

除了上述材料以外,窄带隙的碲化铋(0.3 eV)也是红外探测器中不错的候选材料<sup>[15]</sup>。由于其带隙比较窄,所以在红外光的照射下能够产生光热载流子,并通过设计材料结构对辐射波段进行耦合调制产生光电流。实验证明,基于二维碲化铋材料的探测器件在波长为 1 456 nm 的辐射下,可以产生明显的光信号(图 4(a)、(b)),为基于光热载流子的红外探测器的研究开辟了一条新的路径。更重要的是在 80 K 温度下,器件的电流开关比达到了 972.5,量子效率高达

2 035%,在恶劣的环境下可以发挥非常重要的作用。随后,碲化铋纳米线也被报道出来,这也是一种很有前途的高性能光敏材料<sup>[16]</sup>。在入射光的照射下,其产生的热载流子能够通过量子限域效应稳定在材料当中而不会溢出,所以能提高热载流子的利用率。在聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)衬底上生长出碲化铋纳米线,然后在材料两端滴上两滴银浆做为电极,制备的器件被证明其探测能力也能延伸到近红外波段(图 4(c)、(d))。由于碲化铋纳米线的对称稳定性以及优异的抗干扰性能,所以是研发高性能、高集成度和

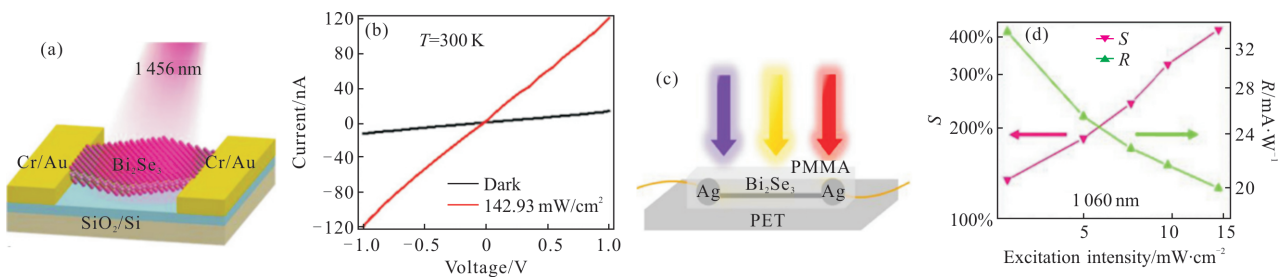


图 4 基于碲化铋的红外探测器结构图<sup>[15,17]</sup>

Fig.4 Structure diagram of infrared detector based on bismuth selenide<sup>[15,17]</sup>

宽光谱探测等的优异的候选材料<sup>[17]</sup>。

2.1.5 二维材料异质结

最近随着二维材料异质结结构制备技术的发展,基于各种二维材料的异质结光探测器件成为了科学家们的研究热点。石墨烯由于其独特的性质在高速和超宽带光电探测器中成为了不错的候选材

料,砷化铟纳米线由于其窄带隙、易于欧姆接触等性能在红外探测器当中也有着非常广阔的应用前景<sup>[18]</sup>。实验证明,利用砷化铟纳米线与石墨烯制备的异质结(图 5(a))能够在红外波段实现较高的开关比( $I_{ON}/I_{OFF}$ ),弥补了石墨烯的光子吸收能力不足的缺陷。图 5(b)显示了器件在波长为 1  $\mu\text{m}$ ,功率密度为

$1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  的红外光照射下的电流以及器件的暗电流测试结果图。相对基于纯石墨烯的探测器,在中红外波段的探测性能提高了五倍左右。

硒化铋与石墨烯制备的异质结,能将探测波段扩宽到  $2.07 \mu\text{m}$ 。图 5(c)中,用离子凝胶制作器件的栅极。当入射光照射到器件当中时,石墨烯和硒化铋

同时受到光激发,其产生的热载流子被有效的分离在了硒化铋和石墨烯中<sup>[19]</sup>。由于电势的不对称性,空穴很容易从硒化铋隧穿到石墨烯中,因此电子留在了硒化铋当中,加上石墨烯本身的高电子迁移率,所以在入射光的照射下,器件通道的热载流子受调制比较灵敏,其响应电流受栅压的调控也比较明显,如

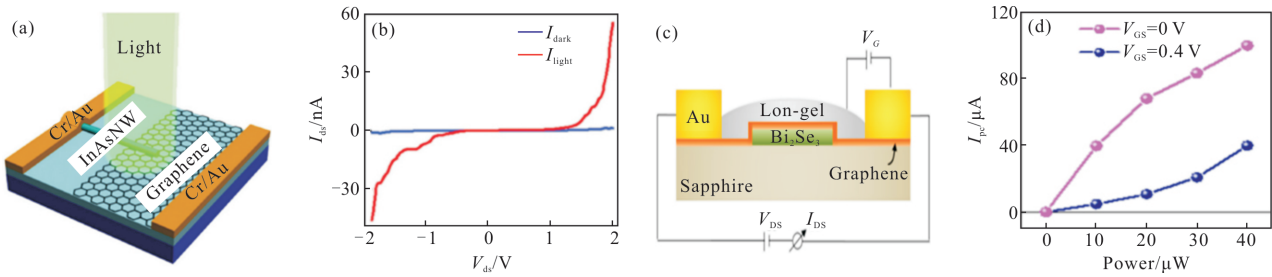


图 5 砷化铟-石墨烯异质结和硒化铋-石墨烯异质结的探测器结构图<sup>[18-19]</sup>

Fig.5 Schematic diagram of detector based on indium arsenide-graphene heterojunction and bismuth selenide-graphene heterojunction<sup>[18-19]</sup>

图 5(d)所示。

由图 6(c)、(d)可知,基于氮化硼-黑磷-氮化硼异质结构的三明治探测器可以用于探测超过黑磷截止波长的波段的探测。图 6(d)显示了在器件偏置电压为  $300 \text{ mV}$  时,器件在不同的背压下在  $7.7 \mu\text{m}$  波段中器件的光生电流随着栅压的变化曲线,从图中

可以看出,器件的栅压对光响应信号具有明显的调控效果。并且器件在双重栅压的调控下,与单个栅压的调控大不相同,在这种器件当中,黑磷的能隙与费米能级会随着双重栅压的调控发生改变<sup>[20-21]</sup>,导致更多处于基态的载流子通过吸收入射光的能量发生带间跃迁变为激发态,成为非平衡热载流子。从而增

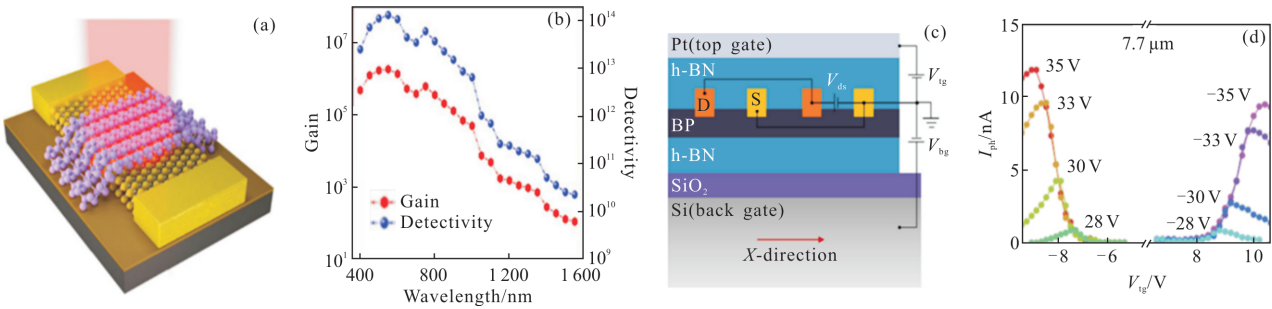


图 6 黑磷-硒化钨异质结与氮化硼-黑磷-氮化硼异质结红外探测器结构图<sup>[22-23]</sup>

Fig.6 Structure diagram of THz detector based on black phosphor-tungstene selenide heterojunction and boron nitride black phosphor-boron nitride heterojunction<sup>[22-23]</sup>

加器件的光电转换率。

黑磷与硒化钨制备的垂直异质结构的光电探测器在红外光的照射下,黑磷通过光激发产生热载流子,并通过异质结产生的内建电场将光产生的热载流子注入到了硒化钨当中,所以改变了器件沟道的

光电导<sup>[23]</sup>。实际上,当光入射深度达到了硒化钨层面时,硒化钨也会在光激发下产生热载流子,在黑磷与硒化钨界面处会产生很多电子-空穴对,进一步增强了界面处的内建电场,因此器件在源漏偏置电压下会产生光响应信号。该器件的光电增益以及探测效

率  $D^*$  如图 6(d)所示。由图 6(d)可知,该器件的探测波段覆盖到了近红外波段,在近红外波段的探测效率达到了  $10^{10}$ , 优于一般的基于二维纯材料的红外探测器<sup>[24]</sup>。

### 2.2 光热载流子调控的太赫兹探测器

二维材料同样可以广泛的应用于太赫兹探测器<sup>[9,25-32]</sup>。近年来,基于光热载流子调控的二维材料的太赫兹探测器陆续报导出来(图 7)。这种器件可以吸收低能光子对材料中的载流子进行加“热”,并通过器件结构的不对称性进行耦合调制,得到光生电流,实现太赫兹探测。由于实现光电转化的是载流子而不是晶格,所以探测器的响应速度大,灵敏度高,是太赫兹探测领域有显著的优势。

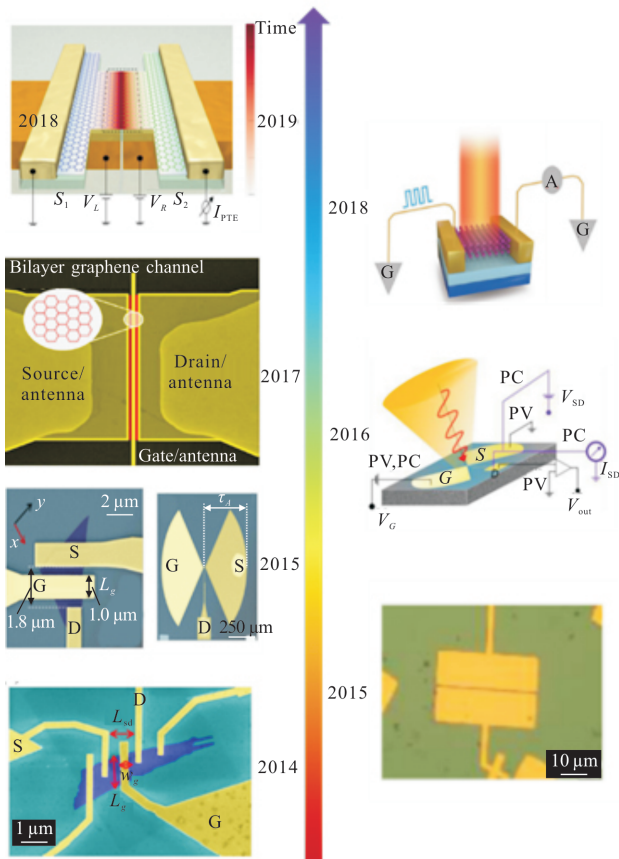


图 7 近年来基于光热载流子的太赫兹探测器研究成果<sup>[9,25-31]</sup>

Fig.7 Recent research results of terahertz detectors based on photo-hot carriers<sup>[9,25-31]</sup>

#### 2.2.1 基于场效应晶体管结构的太赫兹探测器

场效应晶体管结构的太赫兹探测器件的结构设计对器件沟道中在入射光的照射下光热载流子的产

生与耦合起着至关重要的作用<sup>[33]</sup>。所以在选择合适的材料的前提下,对器件的结构设计可使器件达到更好的探测性能。利用器件结构的不对称性,以及栅压的调控作用,可实现对数天线的器件沟道等离子体波在太赫兹波段的耦合<sup>[34-35]</sup>,激发沟道中的光热载流子并产生定向移动,从而对器件沟道进行整流,可以使基于场效应晶体管的探测器在太赫兹波段实现高灵敏度的探测。

除了器件的高迁移率以外,高的电流开关比也是提高探测器性能的重要指标之一<sup>[36]</sup>,甚至在高效的热电响应中,迁移率相较于开关比只是起到次要作用。太赫兹波段的探测器要求器件具备吸收低能光子,并且通过光热载流子效应、等离子体波整流等转化为电信号的能力。太赫兹波能量比较低,所以基于一般材料的太赫兹探测器沟道在吸收太赫兹光以后,没有足够的能量能够使沟道中的电子从价带直接跃迁到导带。由于黑磷对低能光子的吸收作用以及带隙可调的特性,可以使基于黑磷的探测器在吸收太赫兹辐射以后发生带内跃迁<sup>[36]</sup>,从而激发沟道内的光热载流子并通过器件的不对称结构耦合生成光生电流,实现太赫兹波段的探测(图 8(a)、(b))。

在同一种器件结构中,有掺杂的黑磷薄片具有更高的探测性能及稳定性,在太赫兹探测器件中比基于一般的黑磷器件的响应率也要更大。为此,研究人员制备并测试了基于硒掺杂的黑磷薄片的非对称结构的太赫兹探测器(图 8(a)、(b)),在器件的不对称结构的耦合下产生了热电信号<sup>[17]</sup>,其响应波段达到了 3.4 THz,室温下最高可达到  $3 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$  的响应率,其中最小的 NEP 可达到  $7 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

中国科学院上海技术物理研究所的陈效双、王林团队提出利用电磁操控对石墨烯场效应晶体管中产生的光热载流子进行处理来实现太赫兹探测,利用叉指栅极的耦合可有效的提高器件在长波段当中的光电增益<sup>[37]</sup>。器件结构如图 8(c)所示,叉指结构制备的栅极增强了器件沟道对太赫兹的聚焦作用,所以其在太赫兹波段的响应率比普通的光电导探测器件要高出 5~6 倍(图 8(d))。除此之外,器件的噪声功率达到了  $0.1 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ,开辟了一条利用光热载流子效应实现太赫兹探测的路径。

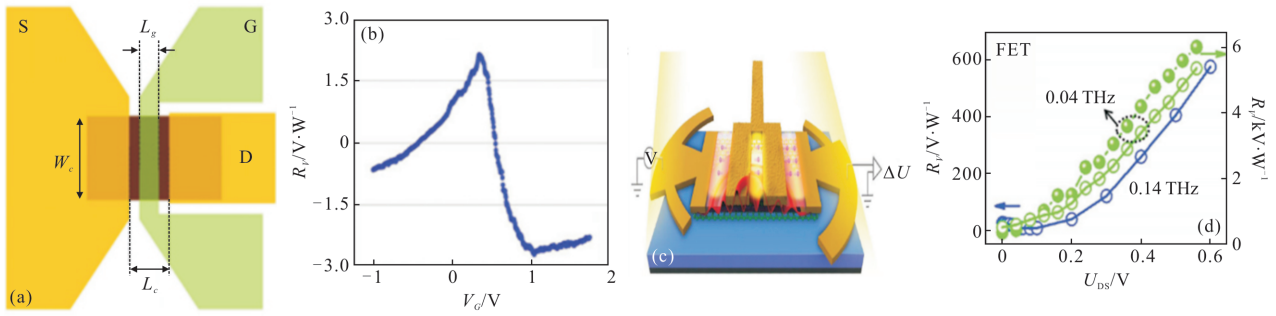


图 8 基于石墨烯和黑磷场效应晶体管的太赫兹探测器以及测试结果<sup>[36-37]</sup>

Fig.8 Terahertz detector based on graphene and black phosphorus field effect transistor and test results<sup>[36-37]</sup>

2.2.2 基于材料异质结构的太赫兹探测器

碳化硅是一种性能优异的宽禁带半导体<sup>[38]</sup>, 基于掺杂的碳化硅与石墨烯的异质结形成的肖特基二极管制备的太赫兹探测器如图 9(a)、(c)所示, 肖特基二极管连接到对数周期天线上。当太赫兹辐射入射到器件上时, 通过天线结构的耦合在器件沟道当中形成大量的热载流子, 并且通过器件的整流使光激发产生的热载流子发生定向移动并最终形成光信号, 其器件在太赫兹波段的响应率如图 9(c)所示。

利用双层石墨烯与氮化硼异质结制备器件, 器

件结构图与原理图如图 9(d)、(e)所示, 双层石墨烯之间夹着一层氮化硼做为器件的阻挡层, 其作用能够有效地抑制暗电流, 并且当器件接收太赫兹辐射以后, 器件沟道中的光生载流子能够有效的透穿通过阻挡层产生光信号, 所以可以使器件在太赫兹波段辐射的照射下产生光生信号, 并能够达到很高的信噪比<sup>[39]</sup>。图 9(f)为器件在波段为 1 THz 辐射的照射下, 不同的背压下器件的响应电流随着源漏偏压的变化图。由于光生电流为皮安级, 所以测试当中环境中的噪声以及太赫兹源功率的波动会对测试结果产

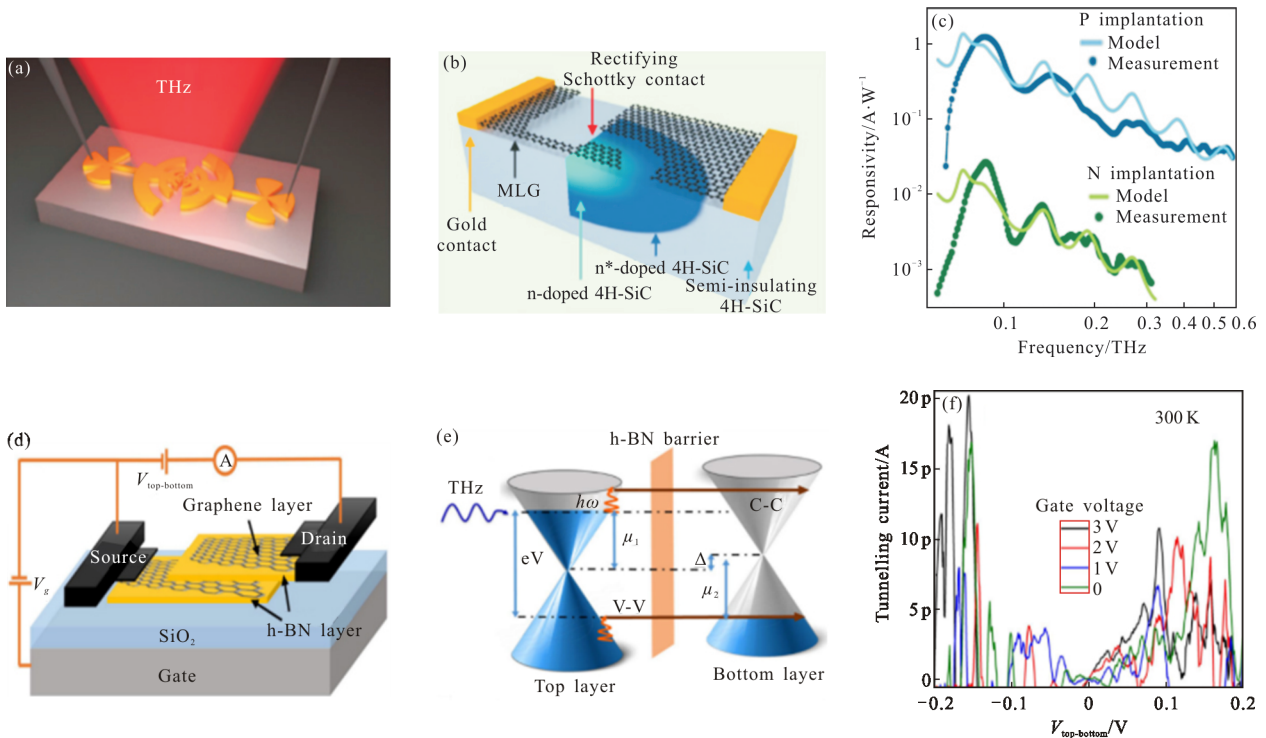


图 9 基于石墨烯-碳化硅异质结以及石墨烯-氮化硼异质结的太赫兹探测器结构示意图、原理图以及测试结果图<sup>[38-39]</sup>

Fig.9 Terahertz detector structure diagram, schematic diagram and test result diagram based on graphene-silicon carbide heterojunction and graphene-boron nitride heterojunction<sup>[38-39]</sup>



生很大的影响,图中显示的几个峰值就是由于这些条件引起的,而并非器件本身产生的噪声。

### 3 总结与展望

文中首先介绍了红外和太赫兹波的应用,紧接着介绍了红外和太赫兹光电探测器的响应原理和性能指标。与热相关的光热载流子效应是指器件在入射光的照射下,能够由于等离子体振荡诱导或者光直接激发非平衡载流子,即光热载流子,然后通过器件不对称结构的耦合使光热载流子发生定向移动并产生电信号。由光热载流子效应产生的光电信号受入射辐射波段的影响相对较小,并且与普通的热探测不同的是其能够达到非常快的响应速度,所以非常适合用于长波红外以及太赫兹波段的探测。文中针对这种探测原理归纳总结出了现有的各种基于石墨烯、黑磷等二维材料的红外太赫兹探测器,并且对探测器的结构、原理以及性能都做了介绍。

但是,目前基于光热载流子效应的红外太赫兹探测器仍然面临着众多的挑战,比如器件稳定性较差、信噪比不高以及光吸收率小等,离器件的大规模使用还有一段距离。

所以笔者认为未来可以从以下几个方面开展工作:

(1) 关于等离子激元以及热载流子的理论与应用还需进一步探索和发展,热载流子在红外与太赫兹波段的探测过程中所发挥的作用以及各种细节还需不断的研究和完善,进一步证实热电子探测在红外与太赫兹波段探测的优势;

(2) 器件的结构还需继续优化,来匹配所探测的波长,从而提高探测器的性能,尤其是基于场效应晶体管的探测器,对栅极结构的优化能够使器件更好的参与对光信号的调控以及探测性能的调控;

(3) 对新的二维材料进行探索,目前最具代表性的二维材料石墨烯以及黑磷虽然具有很大的应用潜力,但是石墨烯的光吸收率低以及黑磷的不稳定性严重限制了这类材料在红外太赫兹波段的应用。所以对不同的二维材料进行无限可能的叠加来创造原子级别的超晶格与异质结构的优势,从而超越单一材料的范围,来突破二维材料在红外太赫兹波段的应用限制。

### 参考文献:

- [1] Wong M H, Giraldo J P, Kwak S Y, et al. Nitroaromatic detection and infrared communication from wild-type plants using plant nanobionics[J]. *Nat Mater*, 2017, 16(2): 264–272.
- [2] Miao J, Song Jinshu, Bo Xu, et al. Single pixel black phosphorus photodetector for near-infrared imaging [J]. *Small*, 2018, 14(2):1702082.
- [3] Ye L, Li Hao, Chen Zefeng, et al. Near-infrared photodetector based on MoS<sub>2</sub>/black phosphorus heterojunction [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(4): 692–699.
- [4] Guo N, Hu Weida, Jiang Tao, et al. High-quality infrared imaging with graphene photodetectors at room temperature [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(35): 16065–16072.
- [5] Zhu Zhengfeng, Zou Yousheng, Hu Weida, et al. Near-infrared plasmonic 2D semimetals for applications in communication and biology [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(11): 1793–1802.
- [6] Li Zhen, Ezhilarasu, Goutham, et al. Indirect band gap emission by hot electron injection in Metal/MoS (2) and Metal/WSe (2) Heterojunctions [J]. *Nano Lett*, 2015, 15(6): 3977–3982.
- [7] Brongersma M L, Halas N J, Nordlander P. Plasmon-induced hot carrier science and technology [J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, 10(1): 25–34.
- [8] Zhong S. Progress in terahertz nondestructive testing: A review [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, 14(3): 273–281.
- [9] Bandurin D A, Svintsov Dmitry, Gayduchenko Igor, et al. Resonant terahertz detection using graphene plasmons[J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 53–92.
- [10] Luxmoore I J, Liu Peter, Li Penglei, et al. Graphene-metamaterial photodetectors for integrated infrared sensing[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(6): 936–941.
- [11] Guo Q, Pospischil Andreas, Bhuiyan Maruf, et al. Black phosphorus mid-infrared photodetectors with high gain [J]. *Nano Lett*, 2016, 16(7): 4648–4655.
- [12] Xu Ming, Gu Yuqian, Peng Ruoming, et al. Black phosphorus mid-infrared photodetectors[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(4): 130.
- [13] Wang Xudong, Wang Peng, Wang Jianlu, et al. Ultrasensitive and broadband MoS<sub>2</sub> photodetector driven by ferroelectrics [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(42): 6575–6581.

- [14] Guo Junxiong, Li Shangdong, He Zhenbei, et al. Near-infrared photodetector based on few-layer MoS<sub>2</sub> with sensitivity enhanced by localized surface plasmon resonance [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 483: 1037–1043.
- [15] Wang F, Li Leigang, Huang Wenjuan, et al. Submillimeter 2D Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> Flakes toward high-performance infrared photodetection at optical communication wavelength [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(33): 1802707.
- [16] Sharma A, Bhattacharyya B, Srivastava A K, et al. High performance broadband photodetector using fabricated nanowires of bismuth selenide [J]. *Sci Rep*, 2016: 6.
- [17] Wang Xinran, Dai Guozhan, Liu Biao, et al. Broadband photodetectors based on topological insulator Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> nanowire with enhanced performance by strain modulation effect [J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2019, 114: 113–620.
- [18] Miao Jinshu, Hu Weida, Guo Nan, et al. High-responsivity graphene/InAs nanowire heterojunction near-infrared photodetectors with distinct photocurrent on/off ratios [J]. *Small*, 2015, 11(8): 936–942.
- [19] Kim J, Park Sungjoon, Jang Houk, et al. Highly sensitive, gate-tunable, room-temperature mid-infrared photodetection based on graphene-Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> heterostructure [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(3): 482–488.
- [20] Lin C, Grassi R, Low T, et al. Multilayer black phosphorus as a versatile mid-infrared electro-optic material [J]. *Nano Lett*, 2016, 16(3): 1683–1689.
- [21] Peng R, Khaliji K, Youngblood N, et al. Midinfrared electro-optic modulation in few-layer black phosphorus [J]. *Nano Lett*, 2017, 17(10): 6315–6320.
- [22] Chen X, Lu Xiaobo, Deng Bingchen, et al. Widely tunable black phosphorus mid-infrared photodetector [J]. *Nat Commun*, 2017, 8(1): 16–72.
- [23] Ye Ling, Wang Peng, Luo Wenjin, et al. Highly polarization sensitive infrared photodetector based on black phosphorus-on-WSe<sub>2</sub> photogate vertical heterostructure [J]. *Nano Energy*, 2017, 37: 53–60.
- [24] Xiang Du, Han Cheng, Wu Jing, et al. Surface transfer doping induced effective modulation on ambipolar characteristics of few-layer black phosphorus [J]. *Nat Commun*, 2015, 6: 64–85.
- [25] Spirito D, Coquillat D, De B, et al. High performance bilayer-graphene terahertz detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(6): 061111.
- [26] Tong J, Muthee M, Chen Shooyu, et al. Antenna enhanced graphene THz emitter and detector [J]. *Nano Lett*, 2015, 15(8): 5295–5301.
- [27] Viti L, Coquillat D, Politano A, et al. Plasma-wave terahertz detection mediated by topological insulators surface states [J]. *Nano Lett*, 2016, 16(1): 80–87.
- [28] Viti L, Hu Jin, Coquillat D, et al. Efficient terahertz detection in black-phosphorus nano-transistors with selective and controllable plasma-wave, bolometric and thermoelectric response [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 20474.
- [29] Qin Hua, Liang Shixiong, Li Xiang, et al. Room-temperature, low-impedance and high-sensitivity terahertz direct detector based on bilayer graphene field-effect transistor [J]. *Carbon*, 2016, 116: 760–765.
- [30] Tang Weiwei, Politano A, Guo Cheng, et al. Ultrasensitive room-temperature terahertz direct detection based on a bismuth selenide topological insulator [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(31): 1801786.
- [31] Castilla S, Terres B, Autore M, et al. Fast and sensitive terahertz detection using an antenna-integrated graphene pn junction [J]. *Nano Lett*, 2019, 19(5): 2765–2773.
- [32] El Fatimy A, Schoen, Brongersma M L, et al. Epitaxial graphene quantum dots for high-performance terahertz bolometers [J]. *Nat Nanotechnol*, 2016, 11(4): 335–338.
- [33] Chalabi H, Schoen D, Brongersma M L. Hot-electron photodetection with a plasmonic nanostripe antenna [J]. *Nano Lett*, 2014, 14(3): 1374–1380.
- [34] Vicarelli L, Vitiello M S, Coquillat D, et al. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors [J]. *Nat Mater*, 2012, 11(10): 865–871.
- [35] Viti L, Hu Jin, Coquillat D, et al. Black phosphorus terahertz photodetectors [J]. *Adv Mater*, 2015, 27(37): 5567–5572.
- [36] Viti L, Politano A, Zhang Kai, et al. Thermoelectric terahertz photodetectors based on selenium-doped black phosphorus flakes [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(4): 1995–2002.
- [37] Liu Changlong, Wang Lin, Chen Xiaoshuang, et al. Room-temperature high-gain long-wavelength photodetector via optical-electrical controlling of hot carriers in graphene [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(24): 1800836.
- [38] Schlecht M T, Preu S, Malzer S, et al. An efficient Terahertz rectifier on the graphene/SiC materials platform [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 11205.
- [39] Yadav D, Tombet S B, Watanabe T, et al. Terahertz wave generation and detection in double-graphene layered van der Waals heterostructures [J]. *2D Materials*, 2016, 3(4): 11205.