文章编号:1000-7032(2022)05-0745-18

# 基于二维材料的快速响应金属-半导体-金属 结构光电探测器研究进展

何嘉玉1,陈克强2,冀 婷1\*,石林林1,冯 琳1,

李国辉1,郝玉英1,张 晗3\*,崔艳霞1\*

(1. 太原理工大学物理与光电工程学院,山西太原 030024;

2. 中国地质大学(武汉)材料与化学学院,湖北 武汉 430074; 3. 深圳大学 微纳光电子学研究院,广东 深圳 518060)

**摘要**:快速响应光电探测器在光通信、高速摄影、生物医学成像等领域有广泛的需求。目前,市场上应用的 快速响应光电探测器大多基于硅、砷化镓等传统的无机半导体材料,但是其制作工艺复杂、成本较高,并且机 械灵活性差。以石墨烯、二硫化钼为代表的二维材料具有独特的层状结构以及良好的光学、电学、热学和机 械特性,是制备光电探测器的理想材料。尤其是部分二维材料所拥有的超高载流子迁移率特性,十分适用于 研制快速响应光电探测器。近年来,一系列基于二维材料的金属-半导体-金属结构光电探测器(Metal-semiconductor-metal photodetectors, MSM-PDs)被陆续报道,很多具有1μs以下的快速响应特性。本文以基于二维 材料的快速响应 MSM-PDs 为主题进行综述。首先介绍了 MSM-PDs 中的基本结构及工作原理,深入剖析了决 定其响应速度的主要因素。随后介绍了石墨烯、过渡金属硫化物、黑磷、二维钙钛矿、三元硒氧铋等二维材料 的分子结构、光学、电学等特性,并对各类二维材料在 MSM-PDs 的应用进行对比。然后分类介绍了响应速度 在1μs以下的欧姆接触型、肖特基接触型以及基于表面等离激元效应二维材料 MSM-PDs 的研究进展。最后 总结全文,并对二维材料在快速响应光电探测器中的应用前景及发展趋势进行了展望。

关键 词:光电探测器;快速响应;二维材料;石墨烯;过渡金属硫化物;黑磷;二维钙钛矿;金属-半导体-金属

中图分类号: TN304; 0482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20220024

## Research Progress of Fast Response 2D Material Photodetectors with Metal-semiconductor-metal Structure

HE Jia-yu<sup>1</sup>, CHEN Ke-qiang<sup>2</sup>, JI Ting<sup>1\*</sup>, SHI Lin-lin<sup>1</sup>, FENG Lin<sup>1</sup>, LI Guo-hui<sup>1</sup>, HAO Yu-ying<sup>1</sup>, ZHANG Han<sup>3\*</sup>, CUI Yan-xia<sup>1\*</sup>

(1. College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. College of Materials and Chemistry, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

3. Institute of Micro/Nano Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

\* Corresponding Authors, E-mail; jiting@ tyut. edu. cn; hzhang@ szu. edu. cn; yanxiacui@ tyut. edu. cn

Abstract: Fast response photodetectors are widely used in optical communication, high-speed

收稿日期: 2022-01-23;修订日期: 2022-02-11

基金项目:国家自然科学基金(6192060,61775156,61805172,61905173,62174117);山西省重点研发国际合作项目(201803D421044);山西省 自然科学基金(201901D211115);霍英东教育基金会高等院校青年教师基金(20171402210001);山西省高等学校科技成果转化培 育项目(2020CC013);目梁市高层次科技人才引进专项项目(Rc2020207);山西省平台与基地专项(201805D131012-3)资助项目 Supported by National Natural Science Foundation of China(61922060,61775156,61805172,61905173,62174117); Key Research and Development International Cooperation Projects of Shanxi Province(201803D421044); Natural Science Foundation of Shanxi Province(201901D211115); Fok Ying-Tong Education Foundation for Young Teachers in The Higher Education Institutions of China(20171402210001); Transformation and Cultivation Project of Scientific and Technological Achievements in Colleges and Universities of Shanxi Province(2020CC013); Lüliang High-level Scientific and Technological Talents Introduction Special Project(Rc2020207); Shanxi Platform and Base Special Project(201805D131012-3)

photography, biomedical imaging and other fields. Most of the fast response photodetectors used in the market are based on traditional inorganic semiconductor materials such as silicon and gallium arsenide, but their fabrication process is complex, the cost is high, and the mechanical flexibility is poor. Two-dimensional materials, such as graphene and molybdenum disulfide, due to their unique layered structure and good optical, electrical, thermal and mechanical properties, are ideal materials for fabricating photodetectors. In particular, two-dimensional materials with ultra-high carrier mobilities are very suitable for developing fast response photodetectors. In recent years, a series of metalsemiconductor-metal photodetectors (MSM-PDs) based on two-dimensional materials have been reported, and their response time is often less than 1 µs. In this paper, rapid response two-dimensional materials based MSM-PDs are reviewed. Firstly, the basic structure and working principle of MSM-PDs are introduced, and the main factors that determine the response speed of MSM-PD are given. Then, the molecular structure, optical and electrical properties of graphene, transition metal sulfide, black phosphorus, two-dimensional perovskite and other two-dimensional materials are introduced. After that, research progress of Ohmic-contact type, Schottky-contact type and surface plasmon polarization enhanced MSM-PDs with the response time less than 1 µs is given. Finally, we summarize the full text, and prospect the application and development trend of two-dimensional materials in rapid response photodetectors.

Key words: photodetectors; fast response; two-dimensional materials; graphene; transition metal sulfide; black phosphorus; two-dimensional perovskites; metal-semiconductor-metal

## 1引言

光电探测器是一种将光信号转化为电信号的 器件,被广泛应用于导弹制导、环境监测、图像传 感、工业控制、光通信、红外测量等领域<sup>[1-2]</sup>。响 应时间是衡量光电探测器性能的一个重要参数, 它描述了光电探测器随输入光信号变化做出响应 的速度。上升时间和下降时间被定义为光电流从 稳定光电流值的10%(90%)上升(下降)到90% (10%)所需的时间<sup>[3]</sup>。快速响应光电探测器在 光通信、高速摄影、生物医学成像等领域有广泛的 需求。市场上应用的快速响应光电探测器大多基 于硅、砷化镓等传统的无机半导体材料。虽然传 统无机半导体材料具有载流子迁移率高等优点, 可以实现光电探测器的快速响应,但其存在制作 工艺复杂、成本较高并且机械灵活性差等缺点。

随着生产生活的不断发展,人们对于光电探测器在成本、检测速度以及柔韧性、透明性等方面都有了更高的要求<sup>[4]</sup>。以石墨烯、过渡金属硫化物、黑磷为代表的层状结构二维材料不仅具有良好的光学、电学、热学和机械特性<sup>[5]</sup>,而且生产成本较低,在开发低成本、高性能光电探测器方面有着巨大潜力<sup>[6.8]</sup>。值得注意的是,很多二维材料

拥有超高的载流子迁移率,部分二维材料的载流 子迁移率可以达到 10<sup>5</sup> cm<sup>2</sup> · V<sup>-1</sup> · s<sup>-1[9]</sup>,是制备 快速响应光电探测器的理想材料,可满足高速集 成数据通信<sup>[10]</sup>、国家安全、新型生物医学<sup>[11-12]</sup>、太 赫兹成像<sup>[13]</sup>等领域日益增长的需求。近年来,一 系列基于二维材料的光电探测器陆续被报道。这 些二维材料光电探测器的响应速度可以达到微 秒、纳秒甚至皮秒量级<sup>[14-17]</sup>。光电探测器的结构 多样,其中金属-半导体-金属结构光电探测器 (Meal-semiconductor-metal photodetectors, MSM-PDs)<sup>[18-20]</sup>具有响应速度快、响应度高等特性,引 起了人们的广泛关注。此外,它们的制作工艺相 对简单,易于工业化。

本文围绕快速响应二维材料 MSM-PDs 展开 综述。首先,介绍 MSM-PDs 的基本结构与工作原 理,指出影响 MSM-PDs 响应速度的主要因素。接 着,介绍几种用于开发快速响应光电探测器的二 维材料的基本特性,主要包括石墨烯、过渡金属硫 化物、黑磷、二维钙钛矿等。随后,详细介绍响应 速度在 1 μs 以下的欧姆接触型、肖特基接触型以 及基于表面等离激元效应二维材料快速响应 MSM-PDs 的研究进展。最后,对快速响应二维材 料光电探测器未来的发展进行展望。 第5期

## 2 MSM-PDs 基本结构与工作原理

#### 2.1 MSM-PDs 基本结构

MSM-PDs 通常由两个金属半导体接触组成, 可分为平面结构和垂直结构两大类,如图1所示。 在平面结构的 MSM-PDs 中,电极位于半导体层的 同一侧 (图 1(a))。而在垂直结构的器件<sup>[21]</sup>中, 电极位于半导体层的两侧,如图1(b)所示。这两 种结构的器件分别被称为平面 MSM-PDs 和垂直 MSM-PDs。平面 MSM-PDs 制备工艺简单,外量子 效率和响应度较高,但其暗电流较大。在垂直 MSM-PDs 中.器件顶部的金属电极必须足够薄. 以使光能够进入到中间半导体层中。在制备垂直 MSM-PDs 时,有时会添加缓冲层,以保证光吸收 层晶体的质量,同时缓冲层的加入可以降低暗电 流。垂直 MSM-PDs 中电极之间的距离易于控制, 有利于减小器件的寄生电容,同时电极之间的距 离可以更短,从而减小载流子的渡越时间,因此其 响应速度可以更快。



- 图 1 (a)具有叉指电极的平面 MSM-PD 示意图;(b)具 有普通电极的垂直 MSM-PD 示意图。
- Fig. 1 (a) Schematic diagram of the planar MSM-PD with interdigital metal strip electrodes. (b) Schematic diagram of vertical MSM-PD with common metal electrodes.

#### 2.2 MSM-PDs 工作原理

金属电极与半导体材料之间形成的接触包括 肖特基接触和欧姆接触两种。对于 MSM-PDs,当 金属-半导体界面的一边形成欧姆接触,另一边形 成肖特基接触时,构成金属-半导体二极管型光电 探测器<sup>[22]</sup>,它们具有单向导通特性。鉴于二维材 料 MSM-PDs 大多具有对称的接触特性,本文不对 具有二极管特性的 MSM-PDs 进行详细介绍。而 具有对称接触的 MSM-PDs 主要包括肖特基接触 型 MSM-PDs 和欧姆接触型 MSM-PDs,我们将介 绍这两种类型 MSM-PDs 在暗态以及亮态下的工 作原理。

## 2.2.1 肖特基接触型 MSM-PDs 暗态电流电压 特性

肖特基接触型 MSM-PDs 在金属-半导体界面 的两边形成了肖特基接触,由两个背靠背的金属-半导体肖特基二极管组成<sup>[23]</sup>。与二极管型光电 探测器(5.2 × 10<sup>-3</sup> A)<sup>[22]</sup>相比,肖特基接触型 MSM-PDs 具有更低的暗电流(6.4 × 10<sup>-13</sup> A)<sup>[24]</sup>, 这是因为两个肖特基势垒比一个肖特基势垒对电 流的阻碍更大。

1971 年, Sze 等<sup>[25]</sup> 解释了肖特基接触型 MSM-PDs 在无光照条件下的基本工作原理。例 如,N型硅的肖特基接触型 MSM-PDs 可等效于两 个具有肖特基接触的二极管,如图 2(a)所示。该 器件的半导体区包括两个肖特基结的耗尽区和一



- 图 2 (a) ~ (e) MSM 结构在不同偏压下的能带图;(f) ~
  (j) 相应的电场分布图。(a)、(f) V = 0 V;(b)、(g)
  V < V<sub>RT</sub>;(c)、(h) V = V<sub>RT</sub>;(d)、(i) V = V<sub>FB</sub>;(e)、(j)
  V<sub>FB</sub> ≤ V ≤ V<sub>B</sub>。
- Fig. 2 Energy band((a) (e)) and electric field distribution ((f) - (j)) diagrams of a typical MSM structure. (a), (f) V = 0 V. (b), (g)  $V < V_{\text{RT}}$ . (c), (h)  $V = V_{\text{RT}}$ . (d), (i)  $V = V_{\text{FB}}$ . (e), (j)  $V_{\text{FB}} \leq V \leq V_{\text{B}}$ .

段用平坦能带表示的中性区,其中中性区的载流 子浓度高于耗尽区。假设肖特基结两端的电子势 垒高度不同,分别用 $\phi_1$ 和 $\phi_2$ 表示,它们的电场方 向相反。左边肖特基结形成的电场方向从右向 左,右边肖特基结形成的电场方向从左向右。这 两个电场的分布如图 2(f)所示,相应耗尽区的宽 度分别用 $W_1$ 和 $W_2$ 表示。

当施加不同的偏压时,器件的工作方式不同。 图 2(b)、(g)分别给出了该器件在小反向偏压下 的能带结构和电场分布。此时,左边肖特基结的 耗尽区变宽,而右边肖特基结的耗尽区变窄。随 着反向偏压的增大,左边肖特基结的耗尽区宽度 继续增大,而右边肖特基结的耗尽区宽度继续减 小。当施加的偏压达到阈值电压(V<sub>RT</sub>)时,左边 肖特基结与右边肖特基结的耗尽区相接,如图 2(h)所示。此时,两个耗尽区接触处的电场为 零,图 2(c)为其能带结构。

当进一步增大反向偏压时,阻挡空穴进入右侧电极的势垒不断降低,导致暗电流升高,直至右侧的耗尽区完全消失,如图 2(d)所示,半导体最右侧的能带变平坦。相应的偏压被定义为平带电压(V<sub>FB</sub>)。可见,此时整个器件都在反向偏压下工作,耗尽区的宽度等于两个金属电极之间的间距。在从右向左方向的电场下,强度从右到左线性增加,如图 2(i)所示。

当外加偏压进一步增大时,由于镜像力的作用,空穴势垒只会缓慢减小,因此电流增长速度明显慢于 V<sub>RT</sub> < V < V<sub>FB</sub>的情况。进一步增加外加偏压会导致器件击穿,相应的偏压被定义为击穿电压(V<sub>B</sub>)。当 V<sub>FB</sub> < V < V<sub>B</sub>时,器件的能带结构和电场分布分别如图 2(e)、(j)所示。

## 2.2.2 肖特基接触型 MSM-PDs 亮态电流电压 特性

大多数肖特基接触型 MSM-PDs 使用半导体材 料来吸光。当右边肖特基结存在时,如图 2(a)~ (c)所示,位于两个肖特基结中的半导体吸光。 当光子产生的电势与肖特基结内建电势相反时, 两个肖特基结中的光电流向相反的方向移动。当 器件仅包含一个肖特基结(V<sub>FB</sub> < V < V<sub>B</sub>)时,电路 中的光电流只有一个方向,如图 3 所示。一般来 说,实际应用中将外加电压设置为 V<sub>FB</sub> < V < V<sub>B</sub>, 使光生载流子可以不受阻碍地被收集,但这将导 致暗电流升高。为了降低暗电流,人们会在金属 和半导体之间引入一个薄的势全层<sup>[26-27]</sup>。与欧 姆接触型 MSM-PDs 相比,肖特基型 MSM-PDs 增 强了半导体区域内的电场,改善了载流子输运,从 而提高了器件的响应速度<sup>[28]</sup>。此外,大多数肖特 基接触型 MSM-PDs 不存在光电流增益,因为来自 外部电路的电子注入由于高电子势垒(即 $\phi_1$ )而 被阻挡,如图 3 所示。



- 图 3 当 V<sub>FB</sub> < V < V<sub>B</sub> 时,肖特基接触型 MSM-PDs 在光照下的工作机理。
- Fig. 3 Working mechanism of Schottky-contact type MSM-PDs under illumination when  $V_{\rm FB} < V < V_{\rm R}$
- 2.2.3 欧姆接触型 MSM-PDs 暗态电流电压特性

欧姆接触型 MSM-PDs 中金属电极和半导体 材料之间形成两个背对背的欧姆接触。当载流子 注入密度低于热激发自由载流子密度时,电流-电 压(*I*<sub>a</sub>-*V*)曲线符合欧姆定律。此时,注入载流子 通过介电弛豫重新分布使内部电荷保持中性,因 此背景载流子决定了电导率。当注入载流子浓度 超过背景载流子浓度时,注入载流子不能再通过 热激发自由载流子进行弛豫,它们在电极附近形 成空间电荷,此时通过空间电荷区的电流受到空 间电荷的限制,形成空间电荷限制电流。因此,*I*-*V*曲线遵循 Mott-Gurney 定律(*I* ~ *V*<sup>2</sup>),也称为 Child 法,如图4(a)所示。

然而,半导体通常存在一定数量的体缺陷和 表面缺陷,这些缺陷在能带中形成陷阱态,导致 *I*-*V* 曲线的实际形状发生明显变化<sup>[29-34]</sup>。对于具有 陷阱的半导体,当注入载流子浓度超过体内原有 载流子浓度时,*I*-*V* 曲线首先遵循  $I \sim \theta V^2$  的规律,  $\theta$ 代表由陷阱性质决定的一个因子。然后随着电 压的增加,*I*-*V* 曲线在  $V_{turning}$ 时达到转折点,当超 过  $V_{turning}$ 时,电流急剧增加( $I \sim V^n$ )。当电压低于  $V_{turning}$ 时,部分被俘获的电子和空穴可以离开注入 电极自由漂移,因此注入载流子形成空间电荷的 过程不受影响。当电压超过 V<sub>turning</sub>时,由于大多数陷阱被填充,因此不允许被俘获的载流子离开 注入电极自由漂移,导致载流子的注入被抑制。 换句话说,当电压超过 V<sub>turning</sub>时,因为被俘获的载 流子停留在电极附近,所以严重阻碍了载流子注入,导致电流限制效应放大。一旦所有陷阱都被 填满后,类似于没有陷阱的情况,I-V特性曲线将 继续遵循 Mott-Gurney 定律( $I \sim V^2$ )。



图 4 (a) 欧姆接触型 MSM-PDs 在暗态下的工作机理<sup>[32]</sup>; (b) 欧姆接触型 MSM-PDs 在亮态下的本征和非本征激发示意图。

Fig. 4 (a) Working mechanism of Ohmic-contact type MSM-PDs in the dark<sup>[32]</sup>. (b) The intrinsic and extrinsic excitations for Ohmic-contact type MSM-PDs under illumination.

2.2.4 欧姆接触型 MSM-PDs 亮态电流电压特性 光照下,本征或杂质吸收产生光生载流子,引 起半导体电导率的变化,如图 4(b)所示。光生载 流子在外加电压的作用下作漂移运动,然后被电 极所收集产生光电流。欧姆接触型 MSM-PDs 就 是常见的光电导光电探测器,它的主要优势是内 光电增益高。光电流增益(G)为载流子寿命和渡 越时间之比,如下所示:

$$G = \frac{I_{1}}{I_{p}} = \frac{(\mu_{n} + \mu_{p})\tau\varepsilon}{L} = \tau \left(\frac{1}{t_{n}} + \frac{1}{t_{p}}\right), (1)$$

其中, $I_1$ 为两个电极之间的光电流, $I_p$ 为初始光电 流,L为两个电极之间的距离, $\tau$ 为载流子的寿命, $\varepsilon$ 为光敏材料的内部电场强度, $\mu_n$ 为电子迁移率, $\mu_p$ 为空穴迁移率,电子和空穴通过两个电极的渡越时 间用 $t_n$ 和 $t_p$ 表示。在中等电场强度下,电子具有较 大的迁移率,漂移速度较快,其渡越时间小于载流子 寿命;而空穴具有较小的迁移率,漂移速度较慢,其 渡越时间长于载流子寿命。因此电子被迅速扫出器 件而多余空穴留在器件中。为了保持电中性,外部 电路必须提供额外电子,因此电子在其寿命内被多 次扫出探测器,从而提高光电流增益(>1)。

#### 2.3 影响 MSM-PDs 响应速度的因素

光电探测器的响应速度是其在光通信和高速 图像传感中实际应用的重要参数之一。光电探测 器的响应速度越快,其响应带宽越宽。对于肖特 基接触型 MSM-PDs,影响其响应速度的因素主要 分为两部分:第一是 RC 时间常数;第二是载流子 的渡越时间。而对于欧姆接触型 MSM-PDs,除了 RC 时间常数与载流子渡越时间这两个因素以 外,载流子寿命也会影响器件的响应速度。

MSM-PDs 的响应速度与 RC 时间常数  $\tau_{e}$ 有 关。在如图 5 所示的基本 MSM-PDs 器件结构中,  $W \setminus L \setminus t \to l$ 分别为金属电极的宽度、间距、厚度和 长度, $d \to N$ 分别为有源层的厚度和杂质浓度。 考虑有 n个叉指电极条,则其电极间的总电容为:

$$C = C_0 l W(n - 1), (2)$$

其中 C<sub>0</sub> 为单位面积电容,取

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i}{L}, \qquad (3)$$

其电极总电阻为:



$$R_{\rm s} = \frac{\rho}{n} \frac{l}{tW}, \qquad (4)$$

所以,由总电容电阻引起的 RC 时间常数  $\tau_{e}$ 为:

$$\tau_{\rm e} = R_{\rm s}C = \left(1 - \frac{1}{n}\right)\varepsilon_0\varepsilon_{\rm i}\rho \frac{l^2}{tL},\qquad(5)$$

其次,影响 MSM-PDs 响应速度的第二个因素是载 流子的渡越时间 *τ*<sub>i</sub>:

$$\tau_{i} = \frac{L}{v_{s}}, \qquad (6)$$

其中 v<sub>s</sub>为载流子(电子和空穴)漂移速度。接着 引入下列电子漂移速度 v<sub>n</sub>和空穴漂移速度 v<sub>p</sub>的 近似公式:

$$v_{s} = \frac{\mu_{no}E + v_{ns} (E/E_{0})^{4}}{1 + (E/E_{0})^{4}}, \qquad (7)$$

$$v_{\rm p} = \frac{\mu_{\rm p} E}{1 + \frac{\mu_{\rm po} E}{v}},$$
 (8)

其中 $\mu_{no}$ 和 $\mu_{po}$ 分别为电子、空穴的低场迁移率;  $v_{ns}$ 、 $v_{ps}$ 为电子、空穴的饱和速率; $E_0$ 为临界电场。 在中等电场下,电子的迁移率大于空穴的迁移率, 因此载流子的渡越时间由空穴漂移速度 $v_p$ 决定。 通常载流子的漂移速度总是小于其热运动速度, 当电场足够高时,载流子漂移速度最大也只能接 近于热运动速度。从以上基本方程出发,载流子 的渡越时间受到电场强度、载流子迁移率的影响。 器件电场强度越高、载流子迁移率越高,MSM-PDs 的响应时间越快。对于同一种感光半导体材料, 单晶比多晶缺陷少,晶体质量更高,因此单晶材料 的载流子迁移率通常高于多晶材料的载流子迁移 率,相应的 MSM-PDs 的响应速度也更快。

对于肖特基接触型 MSM-PDs,其响应速度只 与 RC 时间常数  $\tau_{ex}$ 载流子的渡越时间  $\tau_{i}$ 有关,其 总的时间常数  $\tau$  由下列公式给出:

$$\tau = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \varepsilon_0 \varepsilon_i \rho \frac{l^2}{tL} + \frac{L}{v_s}, \qquad (9)$$

可见,载流子渡越时间与叉指电极间距 L 成正比, 间距 L 越近,响应时间越短。而电极间距 L 及电 极厚度 t 与电路 RC 时间常数  $\tau_c$  成反比。电极间 距 L 越小或电极厚度 t 越小, $\tau_c$ 则越大,响应速度 越快。对于垂直结构的器件,两个电极之间的距 离越短,载流子渡越时间越小,响应速度越快。

对于欧姆接触型 MSM-PDs,其响应速度除了 与 RC 时间常数、载流子的渡越时间有关,还与载 流子寿命有关。对于具有增益特性的欧姆接触型 MSM-PDs,其少数载流子寿命远小于渡越时间,因 此器件的总时间常数 7 由 RC 时间常数与少数载 流子寿命共同决定。而随着电场强度的增加,载 流子迁移率会提高,器件增益特性逐渐消失。此 时,器件的响应速度与肖特基接触型 MSM-PDs 的 类似,由 RC 时间常数与载流子渡越时间共同 决定。

## 3 二维材料及其特性

二维材料是一种具有原子级厚度的层状材 料,层之间通过弱的范德华力相互作用连接,在平 面内原子通过离子键或共价键紧密结合在一起。 以石墨烯、过渡金属硫化物、黑磷、二维钙钛矿等 为代表的二维材料具有良好的光学、电学、热学以 及机械特性<sup>[35-40]</sup>。尤其是部分二维材料所拥有 的超高载流子迁移率特性,使其成为一种极具潜 力的光电材料,十分适用于研制快速响应光电探 测器。另外,二维材料的层状结构相对稳定,一定 程度上可以对器件起到保护作用,为研制稳定型 光电探测器提供了新选择。本节将对二维材料的 特性分类进行介绍。

石墨烯是一种由碳原子紧密堆积而成的具有蜂 窝状晶格结构的二维材料。层中的每个碳原子以 sp<sup>2</sup>杂化方式与三个相邻的碳原子以共价键的形式 连接,在分子结构上呈现平面规则的六边形蜂窝结 构;同时,另一个未成键的单电子在垂直于平面的方 向上形成 π键,如图 6(a)所示。这种连接方式决定 了由石墨烯组成的平面六角晶格具有极高的强度和 导热性<sup>[42-44]</sup>,独特的电子价键结构是石墨烯良好导 电性和载流子迁移率的根本原因(电子和空穴迁移 率都超过 10<sup>5</sup> cm<sup>2</sup> · V<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>)<sup>[45-49]</sup>。高载流子迁移 率使得入射光子能够超快地产生电流或电压<sup>[5051]</sup>, 使其成为极具竞争力的快速响应光电探测器材料。 石墨烯可以采用机械剥离法、化学气相沉积法、氧化 还原法等方法制备<sup>[52]</sup>。

除了优良的电学性质之外,石墨烯的光学性 能也非常优秀。在可见光范围内,石墨烯的光反 射很弱。单层的石墨烯能吸收 2.3% 的垂直入射 光<sup>[53]</sup>,在可见光和红外光中都有吸收。石墨烯的 宽吸收窗口特性使其在紫外、可见、短波红外、近 红外、中红外、远红外和太赫兹光谱区均具有响 应。石墨烯光电探测器在高速光通信、互连、太赫 兹检测、成像、遥感、监视和光谱学等方面有广泛 的应用。

过渡金属硫化物的化学式为 $MX_{2}$ ,其中M是 第4~10族的过渡金属元素,X是硫族元素。在 单分子膜中,结构呈 X-M-X 的形式,金属原子夹 在两个硫族原子之间。对于块状材料,相邻层之 间通过弱的范德华力连接。因此可以采用剥离法 制备过渡金属硫化物,也可采用化学气相沉积法 制备大面积过渡金属硫化物。常见的过渡金属硫 化物有二硫化钼(MoS,)、二硫化钨(WS,)等,图 6(b)是 MoS,的结构示意图。过渡金属硫化物在 纳米级光电子学、自旋电子学等领域具有广泛应 用。据 Zhang 等<sup>[54]</sup>计算,过渡金属硫化物载流子 迁移率超过2000 cm<sup>2</sup> · V<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>,这一特性使其 成为制备快速响应光电探测器的热门材料。金属 原子及其配位环境的多样性使得过渡金属硫化物 的能带具有结构多样性。厚度对过渡金属硫化物 的能带结构具有决定性作用,当块状材料厚度减 小为单层或少层时,其与多层材料的电子性能有 很大不同。与石墨烯不同,二维过渡金属硫化物 材料如 MoS,、二硒化钼(MoSe,)、WS,、二硒化钨 (WSe,)、二硫化铼(ReS,),不具有零带隙结构, 并且其带隙大小可随厚度变化而变化。以 MoS, 为例,当厚度从块体减小到单层时,其带隙结构从 间接带隙(1.2 eV)变为直接带隙(1.8 eV)。这

种带隙与可见光和近红外光的光子能量相匹配,因此可以直接用于可见光和近红外光的检测。此外,更高的带隙可以获得更低的暗电流,因此可以实现高开/关比<sup>[55]</sup>。

黑磷由磷原子的波纹六边形晶格组成,原子 层之间依靠范德华力结合在一起,各个原子层之 间相隔约0.5 nm<sup>[56]</sup>,如图6(c)所示。在白磷、黑 磷和无定形红磷中,黑磷是磷元素最稳定的同素 异形体。1914年, Bridgman 等<sup>[58]</sup>第一次制备出 黑磷。这一材料的成功制备对太阳能采集和通信 领域有重大意义[59],弥补了中红外至近红外之间 的带隙空缺。Peng 等<sup>[60-61]</sup> 通过密度泛函理论和 第一性原理计算发现,单层黑磷的带隙通过单轴 应力可实现直接到间接、间接再到直接的转变。 块状黑磷的带隙大小为 0.3 eV,随着层数减少, 黑磷的带隙逐渐增加,单层黑磷的带隙增加至1.7 eV,表明黑磷的能级结构具有可调节特性<sup>[62]</sup>。随 后 Qiao 等<sup>[63]</sup>通过理论证明黑磷的载流子迁移率 高达1000 cm<sup>2</sup> · V<sup>-1</sup> · s<sup>-1[64-65]</sup>,并具有传输各向 异性[64,66]和厚度依赖性。目前基于黑磷光电探 测器的主要问题是采取剥离法制备的黑磷片会快 速降解到环境中(水分、氧气),对器件的稳定性 造成困扰。为了提高效率和降低成本,气相沉积 法也被广泛应用于制备黑磷[67]。



图 6 (a) 石墨烯结构示意图<sup>[41]</sup>;(b) MoS<sub>2</sub>结构示意图<sup>[41]</sup>;(c) 层状黑磷晶体结构<sup>[57]</sup>;(d) 二维层状钙钛矿到三维钙钛 矿结构示意图(n = 1, 2, 3)<sup>[70]</sup>;(e) 二维 Bi, O, Se 结构示意图<sup>[71]</sup>。

Fig. 6 (a) The schematic layered structures of graphene<sup>[41]</sup>. (b) The schematic layered structures of  $MoS_2^{[41]}$ . (c) Layered black phosphorus crystal structure<sup>[57]</sup>. (d) The schematic layered structures of perovskites from 2D to  $3D^{[70]}$ . (e) The schematic layered structures of 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se<sup>[71]</sup>.

矿物 制备该材料<sup>[74]</sup>,且可以通过温度调节层数。

4 基于快速响应二维材料的 MSM-PDs 研究进展

## 4.1 肖特基接触型 MSM-PDs

决定肖特基接触型 MSM-PDs 响应时间的因素分别是 RC 时间常数  $\tau_{o}$ 和载流子的渡越时间  $\tau_{i}$ 。近几年来,研究人员利用不同方法实现了肖特基接触型 MSM-PDs 的快速响应。

首先,减小电极间距可以提高器件的响应速 度。电极间距离越近,载流子渡越时间越短,器件 的响应速度越快。2019年, Maeso等<sup>[75]</sup>将几层 MoS<sub>2</sub>纳米片堆叠制备了具有 Au/MoS<sub>2</sub>/Au 结构 的垂直型 MSM-PD。该器件响应时间为 60 ns,响 应度为 0.11 A·W<sup>-1</sup>。由于器件为垂直结构,电 极之间的距离可以保持在几纳米范围内,从而大 大减少光生载流子的收集时间并提高器件的效 率。这种垂直结构有利于加快器件的响应速度。

其次,晶体质量越高,表面缺陷越少,载流子的渡越时间越短,响应速度越快。例如,2017年, Xu 等<sup>[76]</sup>利用极性溶剂有效去除了化学气相沉积 石墨烯(Fluorine functionalized chemical vapor deposited graphene,FG)中的氟,避免了传统的氧等 离子刻蚀,得到了高质量表面,并制备了结构为平 面结构的 MSM-PD,如图 7(a)所示,器件的响应



Fig. 7 (a) Schematics, optical images, and photographs of a graphene photodetector array with transverse pattern<sup>[76]</sup>. (b) Schematic illustration of the photodetector based on perovskite thin film<sup>[77]</sup>. (c) Rise and fall time of Mo-MoS<sub>2</sub>-Mo photodetector<sup>[77]</sup>. (d) 3D schematic of Mo-MoS<sub>2</sub>-Mo photodetector<sup>[78]</sup>.



钙钛矿是指一类组成结构为 
$$ABX_3$$
 的天然矿物  
质,于 1839 年首次被人类发现,并于 19 世纪由俄罗  
斯矿物科学家 L. A. Perovski 对其命名。二维钙钛  
矿是一种集合了二维材料层状结构和钙钛矿优势的  
半导体材料,其分子通式可表示为 $(RNH_3)_2(A)_{n-1}$ -  
 $B_nX_{3n+1}$ ,其中 RNH<sub>3</sub> 代表长链的有机阳离子, $A$  代表  
短链的有机阳离子, $B$  代表二价金属阳离子, $X$  代表  
卤素阴离子, $n$  代表了两层有机链 RNH<sub>3</sub> 之间金属阳  
离子的数目。当 $n = 1$  时体系为最简单的纯二维钙  
钛矿结构<sup>[68-69]</sup>,当 $n = \infty$  时体系为三维钙钛矿结构,  
如图 6(d)所示。在二维钙钛矿中,无机钙钛矿层  
(阱)和有机间隔层(势垒)交替排列,这种结构可抑  
制暗电流。同时,二维钙钛矿在可见光波段具有较  
强的光吸收能力,吸收系数高达 10<sup>5</sup> cm<sup>-1</sup>。二维钙  
钛矿通常采用溶液法制备,其中包括旋涂法,该方法  
成本低且工艺简单。

**i**如氧铋(Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se)是一种层状氧硒化物,由交 替堆叠的 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和 Se 层组成,层厚为0.61 nm,如 图 6(e)所示。其带隙约为0.8 eV,相对电子有效 质量约 0.14 $m_0^{[72]}$ 。Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的空穴迁移率大于 20 000 cm<sup>2</sup> · V<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>。由于其高的迁移率、良 好的环境稳定性及良好的柔韧性,Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 在未 来的低成本红外成像、高速、柔性光电子器件领域 具有广阔发展前景<sup>[73]</sup>。常见的剥离法不利于制 备少层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se,研究者通常采用化学气相沉积法 时间小于 10 ns。与传统的等离子体刻蚀"硬图案 化"方法相比,这种使用溶剂"软图案化"的方法 使其能够选择性地去氟,得到高质量的表面,对实 现快速响应非常关键。2019年,Han等<sup>[77]</sup>制作了 基于(PA)<sub>2</sub>(FA)Pb<sub>2</sub>I<sub>7</sub>(简称为 EFA,其中 PA 为 正戊基胺,FA 为甲脒)结构为 Au/EFA/Au 的二 维钙钛矿 MSM-PD,如图 7(b)所示。他们首先利 用冷却结晶法获得单晶钙钛矿晶体,然后将该晶 体溶于溶剂中并旋涂形成钙钛矿薄膜,通过原子 力显微镜观察发现,沉积在石英衬底上的低缺陷 红色透明薄膜表面均匀,且没有任何可见的针孔。 该器件的响应时间为 2.54 ns,如图 7(c)所示。 同时,该薄膜显示出平行于 2D 无机钙钛矿层的 完美取向。这种高度取向的薄膜非常有利于载流 子在无机层内的传输,是获得快速响应的关键。

除了上述方法之外,还可以通过半导体与金属电极直接自然成键,近一步减小载流子渡越过程中的阻碍,从而获得高速响应的MSM-PDs。 2017年,Khadka等<sup>[78]</sup>制备了结构为Mo/MoS<sub>2</sub>/Mo的MSM-PDs,如图7(d)所示。其响应时间快至微秒量级。研究者首先通过光刻金属图案,接着采用气相沉积法直接在该图案上生长二维材料,使生长单层至几层的SiO<sub>2</sub>同时与Mo电极自然连接。研究者认为该器件具有优异性能的原因可能是电极和半导体之间自然形成的接触使得金属和半导体之间的隧道势垒减小。这是由于电极和二维材料之间直接成键,而不是依靠传统的范德瓦尔斯键。这种低缺陷有利于载流子的传输和器件的快速响应。

#### 4.2 欧姆接触型 MSM-PDs

影响欧姆接触型 MSM-PDs 响应时间的因素 包括 RC 时间常数  $\tau_{ex}$ 载流子的渡越时间  $\tau_{i}$  以及 载流子寿命,研究者们通过调控这些影响因素,实 现了一系列快速响应欧姆接触型 MSM-PDs。

首先,为了提升 MSM-PD 响应速度,可以采 取降低电极接触电阻、减小器件电容的方法来降 低 $\tau_{o}$ 。例如,2014年,Daniel等<sup>[79]</sup>基于化学气相 沉积法制备了结构为 Ni/Al/Graphene/Ni/Al 的石 墨烯 MSM-PD,其3 dB 响应带宽为43 GHz。该器 件的总电阻低至 187  $\Omega$ ,这种低电阻结构使得器 件的,最终带来了皮秒级的响应速度。

其次,通过提高载流子传输速度也可达到缩 短载流子渡越时间的目的。提高载流子传输速度

的方法有:使用高载流子迁移率的材料、建立器件 的内部电场、减少载流子传输界面的陷阱、提高载 流子传输界面的质量等。二维材料凭借其超高的 载流子迁移率成为了制备快速响应 MSM-PDs 的 理想材料。2018年, Yin 等<sup>[71]</sup>利用化学气相沉 积法制备了具有 2 × 10<sup>4</sup> cm<sup>2</sup> · V<sup>-1</sup> · s<sup>-1[71]</sup> 高迁 移率的 Bi, O, Se, 并制备了结构为 Ti/Au/Bi, O, Se/ Ti/Au的 MSM-PD,获得了1 ps 的超快响应速度。 这种高迁移率材料使光载流子快速漂移出金属/ Bi,O,Se结,光生载流子在器件中的收集时间减 少,提高了响应速度。此外,该器件在1200 nm 处显示出 65 A · W<sup>-1</sup>的响应度,如此优异的性能 表明 Bi,O,Se 是一种有潜力的红外光电探测器 材料。2021年, Chen等<sup>[80]</sup>在云母基底上生长 Bi,O,Se 纳米片,并制备了从红外到太赫兹波段 结构为 Cr/Au/Bi,O,Se/Cr/Au 的 MSM-PD。该器 件在太赫兹波段的响应时间为 476 ns,器件结构 如图 8(a) 所示。

与肖特基接触 MSM-PDs 相同,通过建立内建 电场也能够提升欧姆接触型二维材料 MSM-PDs 的快速响应性能。例如,2013年,Gan等<sup>[81]</sup>制 备了结构为 Au/Graphene/Au 的集成波导型 MSM-PDs,其响应速度达到皮秒量级。在零偏 置电压下,该器件沿着金属/石墨烯边界产生两 个光电流很高的区域,这表明在金属电极-石墨 烯界面附近形成了内建电场,这些内部电场可 以加速载流子的传输速度,使器件有超过 20 GHz 的响应带宽。

提高界面质量、减少界面陷阱,也是加快 MSM-PDs响应时间的一种方法。杂化石墨烯光 电导探测器已经实现了优异的光响应,但是由于 界面处被俘获的载流子寿命长,其响应速度急剧 下降。2017年,Tao等<sup>[82]</sup>通过将大面积原子级厚 度 MoS<sub>2</sub>薄膜嵌入到杂化石墨烯光电导光电探测 器中,制备了结构为 Au/MoS<sub>2</sub>/Graphene/Au 的 MSM-PD,如图 8(b)所示。该器件的响应速度达 到了 17 ns,如图 8(c)所示。在该器件中,MoS<sub>2</sub> 薄膜不仅用作隧道层,而且还可以钝化表面,降低 缺陷态密度,将响应速度提高了三个量级。2019 年,Xu 等<sup>[83]</sup>利用降温结晶法生长了高质量的 (PA)<sub>2</sub>(G) Pb<sub>2</sub>I<sub>7</sub>(其中 PA = n-戊基氨基,G = 胍 基)的晶体,并制备了基于(PA)<sub>2</sub>(G) Pb<sub>2</sub>I<sub>7</sub>的二 维钙钛矿晶体的光电探测器。优异的晶体表面质



- 图 8 (a) Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 光电探测器示意图<sup>[80]</sup>;(b)杂化石墨烯光电探测器结构示意图<sup>[82]</sup>;(c)杂化石墨烯光电探测器响应时 间的上升沿<sup>[82]</sup>;(d)平面阵列光电探测器的瞬态光电流<sup>[83]</sup>;(e)(PA)<sub>2</sub>(G)Pb<sub>2</sub>I<sub>7</sub>的二维钙钛矿结构示意图<sup>[83]</sup>;(f) 石墨烯光电探测器结构示意图<sup>[84]</sup>。
- Fig. 8 (a) Schematic of the  $Bi_2O_2Se$  photodetector<sup>[80]</sup>. (b) Structure diagram of hybrid graphene photodetector<sup>[82]</sup>. (c) The rising edge of the response time of the hybrid graphene photodetector<sup>[82]</sup>. (d) Transient photocurrent traces of the planar array photodetector<sup>[83]</sup>. (e) The 2D bilayered perovskite structure of  $(PA)_2(G)Pb_2I_7^{[83]}$ . (f) Structure diagram of graphene photodetector<sup>[84]</sup>.

量使该器件的响应时间快至 3.1 ns,如图 8(d)所示。该晶体引入了大尺寸的 G 阳离子,合成了新的钙钛矿双层排列,如图 8(e)所示。以上两种 MSM-PDs 所采用的高质量薄膜材料都为载流子的快速漂移提供了有利条件。

最后,与肖特基接触型 MSM-PDs 不同的是, 影响欧姆接触型 MSM-PDs 响应时间的因素还有 载流子寿命。二维材料与常规半导体相比,其载 流子寿命很短(几十皮秒)。早在 2011 年,Urich 等<sup>[84]</sup>制备了结构为 Ti/Au/Graphene/Ti/Au 的 MSM-PD,如图 8(f)所示,其最短响应时间为 2.1 ps。研究者认为在载流子离开石墨烯/金属界面 区域之前,很大一部分光生载流子已经复合。在 高迁移率器件中,载流子渡越时间可能变得与复 合时间一样小,甚至更小,并且内部量子效率可能 达到 100%。所以,光生载流子的短寿命导致基 于石墨烯 MSM-PDs 的固有响应时间短。同样, 2015年,Wang等<sup>[85]</sup>报道了由于 MoS<sub>2</sub>电子、空穴 和激子的寿命短,结构为 Au/Cr/MoS<sub>2</sub>/Au/Cr 的 MSM-PD 的固有响应时间短至 3 ps。2017年, Youngblood 等<sup>[86]</sup>研究了氮化硼钝化黑磷光电探 测器的固有响应时间。他们的研究表明小偏压下 器件的响应速度由光生载流子的寿命决定,当偏 压增大时,载流子寿命减小。研究者使用超快泵 浦探针测量器件的响应时间为 380 ps。此外,研 究者采用氮化硼对器件进行封装,氮化硼既能钝 化又能提供高质量的衬底,这对减少响应时间也 有帮助。

## 4.3 基于表面等离激元效应的 MSM-PDs

在光电探测器中引入表面等离激元共振效应

可以增强局域电场,增加器件对入射光的吸收,产 生更多的空穴和电子,并促进载流子向电极的传 输,从而提高器件的响应度,同时缩短载流子的渡 越时间,提高器件的响应速度。金、银、铂等贵金 属材料均能满足激发表面等离激元共振效应的条 件<sup>[88-94]</sup>。例如,2017年,Chen等<sup>[87]</sup>将三角形的金 纳米颗粒引入石墨烯光电探测器中,如图9(a)所 示。由于表面等离激元效应增强了光吸收,器件 的光电流和响应度均提高了近10倍,在1550 nm 处的响应度达到83 A·W<sup>-1</sup>。同时,该器件上升



- 图 9 (a)加入金纳米颗粒的石墨烯光电探测器示意图<sup>[87]</sup>;(b)石墨烯光电探测器瞬态响应<sup>[87]</sup>;(c)加入铂纳米颗粒的 石墨烯/硅光电探测器结构示意图<sup>[88]</sup>;(d)532 nm 激光照射下石墨烯/硅光电探测器的瞬态响应<sup>[88]</sup>;(e)表面等离 激元波导集成石墨烯光电探测器三维示意图<sup>[89]</sup>;(f)石墨烯-等离激元集成光电探测器示意图<sup>[90]</sup>。
- Fig. 9 (a) Schematic diagram of graphene photodetector with Au nanoparticles<sup>[87]</sup>. (b) Transient response of graphene photodetector<sup>[87]</sup>. (c) Schematic diagram of graphene/Si photodetector with Pt nanoparticles<sup>[88]</sup>. (d) Transient response of graphene/Si photodetectors under 532 nm laser illuminating<sup>[88]</sup>. (e) Three-dimensional schematic of the plasmonic enhanced waveguide-integrated graphene photodetector<sup>[89]</sup>. (f) Schematic diagram of graphene-plasmon integrated photodetector<sup>[90]</sup>.

时间小于 600 ns,如图 9(b)所示,原因是石墨烯 与硅异质结之间形成的内建电场加速了电子与空 穴的分离,加快了器件的响应速度。2018 年,Hu 等<sup>[88]</sup>将铂纳米颗粒引入石墨烯/硅光电探测器 中,器件结构如图 9(c)所示。由于光吸收及内建 电场的增强,器件的响应度提高了一个量级,达到 1.68×10<sup>7</sup> A·W<sup>-1</sup>。同时,由于有效的载流子抽 取及界面处低的陷阱态密度,器件的响应时间达 到 180 ns,如图 9(d)所示。

此外,表面等离激元效应也被用于波导型光 电探测器中,在提高响应度的同时,保持器件的高 速响应。2018年,Ma等<sup>[89]</sup>将阵列型蝶形金属纳 米结构引入波导型石墨烯光电探测器中,器件结 构如图9(e)所示。该器件具有0.5A·W<sup>-1</sup>的响 应度和超过110 GHz的带宽。金属纳米颗粒激发 了表面等离激元效应,增强了面内电场强度,增强 了光吸收,改变了石墨烯层内的电导率,从而提高 了响应度。在该器件中,光生载流子的漂移路径 非常短,从而使得器件的响应带宽很宽。2019 年,Ding等<sup>[90]</sup>报道了一种基于表面等离激元的超 小型波导缝隙石墨烯 MSM-PD,该器件具有超过 110 GHz的带宽和 0.36 A·W<sup>-1</sup>的响应度。表面 等离激元波导缝隙由两个不对称的 Au(90 nm)/ Pd 和 Au(90 nm)/Ti 金属电极组成,电极之间的 距离为 120 nm,如此短的距离使得光生载流子的 漂移路径很短,如图 9(f)所示。在该器件中,表 面等离激元效应将光局域在纳米尺度内,增强了 石墨烯与光的相互作用,提高了响应度。另外,在 120 nm 的整个沟道内都存在内建电场,因此光生 载流子可以有效分离,进一步提高了响应度,同时 提高了器件的响应速度。

为了更好地反映基于二维材料快速响应 MSM -PDs的研究进展,本文列举了一些光电探测 器的性能,如表1所示,其中给出了器件结构、响 应时间、带宽、外量子效率、响应度、探测率等 性能。

表1 基于二维材料的快速响应 MSM-PD	s 1	性能总	结
-----------------------	-----	-----	---

Tab. 1	Summary	of	fast	response	MSM-PDs	based	on	two-dimensional	material	s
--------	---------	----	------	----------	---------	-------	----	-----------------	----------	---

	Device structure	Response speed	Bandwidth/ GHz	EQE/%	$\frac{R}{(\mathbf{A} \cdot \mathbf{W}^{-1})}$	D*/ Jones	Year	Ref.
Graphene	Ti/Au/Graphene/Ti/Au	2.1ps	262	_	_	_	2011	[84]
	Au/Graphene/Au	_	20	_	0.1	_	2013	[81]
	Ni/Al/Graphene/Ni/Al	24 ps	41	_	$1.6 \times 10^{2}$	_	2014	[79]
	Ti/Au/Graphene/Ti/Au	600 ns	_	_	83	$10 \times 10^{8}$	2017	[87]
	Au/MoS2/Graphene/Au	17 ns	—	_	$3 \times 10^{4}$	_	2017	[82]
	Au/Deposited graphene/Au	10 ns	—	_	0.5	$7.4 \times 10^{9}$	2017	[76]
	Au/Graphene/Si/Pt/Au	180 ns	—	> 10 <sup>4</sup>	$1.68 \times 10^{7}$	_	2018	[88]
	Au/Graphene/Au	_	110	_	0.5	_	2018	[89]
	Au/Pd/ Graphene/Au/Pd	—	110	29	0.36	_	2019	[90]
	Au/Cr/MoS <sub>2</sub> /Au/Cr	3 ps	300	_		_	2015	[85]
TMD	Mo/MoS <sub>2</sub> /Mo	1 μs	_	_	15	_	2017	[78]
	Au/MoS <sub>2</sub> /Au	60 ns	5.5 × 10 <sup>-3</sup>	30	0.11	_	2019	[75]
BP	Ti/Au/BP/Ti/Au	380 ps	9	_	_	_	2017	[86]
2D Pervoskite	Au/EFA/Au	2.54 ns	_	_	_	$1.73 \times 10^{14}$	2019	[77]
	Au/Perovskites/Au	3.1 ns	—	_	47	6.3 × 10 <sup>12</sup>	2019	[83]
$\operatorname{Bi}_2\operatorname{O}_2\operatorname{Se}$	${\rm Ti/Au/Bi}_2{\rm O}_2{\rm Se/Ti/Au}$	1 ps	500	—	65	_	2018	[71]
	Cr/Au/Bi <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Se/Cr/Au	476 ns	—	_	58	_	2021	[73]

综上所述,二维材料中的石墨烯、过渡金属硫 化物、黑磷、二维钙钛矿等材料已经被广泛应用在 快速响应的 MSM-PDs 中。二维材料不仅具有独 特的层状结构和优异的电学、光学性能,还具有制 备简单、成本低、应用灵活、结构稳定等优点,是制 备低成本快速响应光电探测器最具竞争力的材 料。本文通过分析 MSM-PDs 的基本结构及其工 作原理,得出决定肖特基接触型 MSM-PDs 光电探 测器响应速度的主要因素为:RC时间常数、载流 子的渡越时间。决定欧姆接触型 MSM-PDs 光电 探测器响应速度的主要因素为:RC时间常数、载 流子的渡越时间以及载流子寿命。近些年来,研 究人员通过提高晶体质量、优化器件结构等手段 制备了一系列基于二维材料的快速响应 MSM-PDs。另外,引入表面等离激元效应也是提高器 件光电性能的一种有效手段。

尽管快速响应二维材料光电探测器具有许多 优异的性能,显示出广阔的应用前景,例如宽带检 测、高灵敏度检测、弱光检测、超快检测、偏振敏感 光检测、高数据速率空间通信、空间分辨光电成 像、太赫兹检测等。然而,二维材料的研究还面临 着诸多挑战。虽然通过机械剥离的方法可以得到 大部分的二维层状材料,但是这种方法制备的样 品横向尺寸较小且效率较低下。通过其他方法例 如液相剥离或者化学气相沉积法可以制备石墨烯 和部分过渡金属硫化物,但样品的层数、边缘形 貌、缺陷密度等参数都较难控制。因此,发展新的 可以大面积制备高质量二维材料的方法迫在眉 睫。另外,二维材料的转移方法也有待进一步 优化。

二维材料的家族还很丰富,尤其像三元二维 硒氧铋材料还有很大的发展空间,其高载流子迁 移率和稳定性使其成为制备快速响应光电探测器 极具竞争力的材料。因此,我们相信这些快速响 应二维材料 MSM-PDs 将在消费电子产品中得到 应用,能够满足在非常高性能的科学设备中的应 用要求。因此,要实现二维材料 MSM-PDs 的广泛 应用,进一步优化二维材料的制备方法及器件结 构,充分发挥二维材料的独特优势,是这一领域未 来发展的方向。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/ CJL.20220024.

## 参考文献:

- [1] CHEN Z, CHENG Z, WANG J, et al. High responsivity, broadband, and fast graphene/silicon photodetector in photoconductor mode [J]. Adv. Opt. Mater., 2015,3(9):1207-1214.
- [2] 李家意,丁一,张卫,等. 基于二维材料及其范德瓦尔斯异质结的光电探测器 [J]. 物理化学学报, 2019,35(10): 1058-1077.

LI J Y, DING Y, ZHANG D W, et al. Photodetectors based on two-dimensional materials and their van der Waals heterostructures [J]. Acta Phys. -Chim. Sinica, 2019,35(10):1058-1077. (in Chinese)

- [ 3 ] WANG F, WANG Z X, YIN L, et al. 2D library beyond graphene and transition metal dichalcogenides: a focus on photode-tection [J]. Chem. Soc. Rev., 2018, 47(16):6296-6341.
- [4] FERRARI A C, BONACCORSO F, FAL'KO V, et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems [J]. Nanoscale, 2015,7(11):4598-4810.
- [ 5 ] WANG X G, LI M M, ZHANG B, et al. Recent progress in organometal halide perovskite photodetectors [J]. Org. Electron., 2018, 52:172-183.
- [6]黄彦民,袁明鉴,李玉良.二维半导体材料与器件——从传统二维光电材料到石墨炔 [J]. 无机化学学报,2017, 33(11):1914-1936.

HUANG Y M, YUAN M J, LI Y L. Two-dimensional semiconducting materials and devices: from traditional two-dimensional optoelectronic materials to graphdyne [J]. Chin. J. Inorg. Chem., 2017,33(11):1914-1936. (in Chinese)

[7]张恒康,冀婷,李国辉,等. 二维材料光电探测器的研究进展 [J]. 半导体技术, 2020,45(1):43-51. ZHANG H K, JI T, LI G H, et al. Research progress of photodetectors based on two-dimensional material [J]. Semicond. Technol., 2020,45(1):43-51. (in Chinese)

- [8] 夏风梁,石凯熙,赵东旭,等. 二维 WSe<sub>2</sub> 场效应晶体管光电性能 [J]. 发光学报, 2021,42(2):257-263.
  XIA F L,SHI K X,ZHAO D X, et al. Optoelectronic performance of 2D WSe<sub>2</sub> field effect transistor [J]. Chin. J. Lumin., 2021,42(2):257-263. (in Chinese)
- [9] WANG Y X, WU W D, ZHAO Z R. Recent progress and remaining challenges of 2D material-based terahertz detectors
  [J]. Infrared Phys. Technol., 2019,102:103024-1-14.
- [10] NIU Y, LI Y, JIN D P, et al. A survey of millimeter wave communications(mm Wave) for 5G: opportunities and challenges
  [J]. Wirel. Netw., 2015,21(8):2657-2676.
- [11] GONG A P, QIU Y T, CHEN X W, et al. Biomedical applications of terahertz technology [J]. Appl. Spectrosc. Rev., 2020,55(5):418-438.
- [12] WANG B, ZHONG S P, ZHANG Z B, et al. Broadband photodetectors based on 2D group IV<sub>A</sub> metal chalcogenides semiconductors [J]. Appl. Mater. Today, 2019, 15:115-138.
- [13] LIU H B, ZHONG H, KARPOWICZ N, et al. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications
  [J]. Proc. IEEE, 2007,95(8):1514-1527.
- [14] DAI M, CHEN H, WANG F, et al. Ultrafast and sensitive self-powered photodetector featuring self-limited depletion region and fully depleted channel with van der Waals contacts [J]. Acs Nano, 2020, 14(7):9098-9106
- [15]杨珏晗,魏钟鸣,牛智川. 基于二维材料异质结的光探测器研究进展 [J]. 人工晶体学报, 2020,49(3):379-397. YANG J H, WEI Z M, NIU Z C. Recent progress on two-dimensional heterostructure based photodetectors [J]. J. Synthet. Cryst., 2020,49(3):379-397. (in Chinese)
- [16] 孟宪成,田賀,安侠,等. 基于二维材料二硒化锡场效应晶体管的光电探测器 [J]. 物理学报, 2020,69(13): 137801-1-7.
   MENG X C, TIAN H, AN X, *et al.* Field effect transistor photodetector based on two dimensional SnSe<sub>2</sub>[J]. *Acta Phys. Sinica*, 2020,69(13):137801-1-7. (in Chinese)
- [17] 徐春燕,南海燕,肖少庆,等. 基于二维半导体材料光电器件的研究进展 [J]. 电子与封装, 2021,21(3):030401-1-15.
  XU C Y, NAN H Y, XIAO S Q, et al. Research progress of photoelectric devices based on 2D semiconductor materials
- [18] SMITH F W, LE H Q, DIADIUK V, et al. Picosecond GaAs-based photoconductive optoelectronic detectors [J]. Appl. Phys. Lett., 1989,54(10):890-890.

[J]. Electron. Packag., 2021,21(3):030401-1-15. (in Chinese)

- [19] CHEN Y, WILLIAMSON S, BROCK T, et al. 375-GHz-bandwidth photoconductive detector [J]. Appl. Phys. Lett., 1991,59(16):1984-1986.
- [20] WANG X, TIAN W, LIAO M Y, et al. Recent advances in solution-processed inorganic nanofilm photodetectors [J]. Chem. Soc. Rev., 2014,43(5):1400-1422.
- [21] WU K, ZHAN Y H, ZHANG C, et al. Strong and highly asymmetrical optical absorption in conformal metal-semiconductormetal grating system for plasmonic hot-electron photodetection application [J]. Sci. Rep., 2015,5:14304-1-3.
- [22] CHUAH L S, HASSAN Z, HASSAN H A, et al. Barrier height enhanced Gan Schottky diodes using a thin ALN surface layer
  [J]. Int. J. Mod. Phys. B, 2008, 22(29):5167-5173.
- [23] SUGETA T, URISU T, SAKATA S, et al. Metal-semiconductor-metal photodetector for high-speed optoelectronic circuits
  [J]. Jpn. J. Appl. Phys., 1980,19(S1):459-464.
- [24] MUHAMMAD Z, MUNIR T, NASEEM S. Electrical and optical transient behavior of *n*-GaN metal-semiconductor-metal (MSM) photodetector [J]. Energy Environ. Focus, 2013,2(3):222-226.
- [25] SZE S M, COLEMAN D J JR, LOYA A. Current transport in metal-semiconductor-metal(MSM) structures [J]. Solid-State Electron., 1971,14(12):1209-1218.
- [26] SCHUMACHER H, LEBLANC H P, SOOLE J, et al. An investigation of the optoelectronic response of GaAs/InGaAs MSM photodetectors [J]. IEEE Electron Device Lett., 1988,9(11):607-609.
- [27] SOOLE J B D, SCHUMACHER H, ESAGUI R, et al. Waveguide integrated MSM photodetector for the 1.3 µm-1.6 µm wavelength range [C]. Technical Digest., International Electron Devices Meeting, San Francisco, 1988:483-486.

- [28] ZHANG Y P, DENG W, ZHANG X J, et al. In situ integration of squaraine-nanowire-array-based Schottky-type photodetectors with enhanced switching performance [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2013,5(23):12288-12294.
- [29] SHI D, ADINOLFI V, COMIN R, et al. Low trap-state density and long carrier diffusion in organolead trihalide perovskite single crystals [J]. Science, 2015, 347(6221):519-522.
- [30] SAIDAMINOV M I, ABDELHADY A L, MURALI B, et al. High-quality bulk hybrid perovskite single crystals within minutes by inverse temperature crystallization [J]. Nat. Commun., 2015, 6:7586-1-6.
- [31] MACULAN G, SHEIKH A D, ABDELHADY A L, et al. CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbCl<sub>3</sub> single crystals: inverse temperature crystallization and visible-blind UV-photodetector [J]. J. Phys. Chem. Lett., 2015,6(19):3781-3786.
- [32] LIU Y C, SUN J K, YANG Z, et al. 20-mm-large single-crystalline formamidinium-perovskite wafer for mass production of integrated photodetectors [J]. Adv. Opt. Mater., 2016,4(11):1829-1837.
- [33] DUIJNSTEE E A, BALL J M, LE CORRE V M, et al. Toward understanding space-charge limited current measurements on metal halide perovskites [J]. ACS Energy Lett., 2020,5(2):376-384.
- [34] SZE S M, NG K K. Photodetectors and solar cells [M]. SZE S M, NG K K. Physics of Semiconductor Devices. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007;663-742.
- [35]徐新龙,马菁瑶,卢春辉,等.基于二维层状半导体材料的光电极特性及其研究进展[J].西北大学学报(自然科学版), 2020,50(3):360-376.
  XU X L, MA J Y, LU C H, et al. Characteristics of photoelectrode based on two-dimensional layered semiconductor materi-
- [36] 尤凯熹,范涛健,葛颜绮,等. 二维纳米材料黑磷的光电特性研究进展 [J]. 物理学进展, 2018,38(4):163-174.
  YOU K X, FAN T J, GE Y Q, *et al.* The research progress on photoelectric properties of two-dimensional nanomaterial black phosphorus [J]. *Prog. Phys.*, 2018,38(4):163-174. (in Chinese)

als and its research progress [J]. J. Northwest Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2020,50(3):360-376. (in Chinese)

- [37] 马雅婷,程湘爱. 二维过渡金属硫族化合物的自旋-能谷特性研究进展 [J]. 光电技术应用, 2020,35(6):32-35.
  MA Y T, CHENG X A. Spin-valley property of two-dimensional transition metal dichalcogenides [J]. *Electro-Opt. Technol. Appl.*, 2020,35(6):32-35. (in Chinese)
- [38] 张永哲,李松宇,陈小青. 二维材料光子型光电探测器研究进展 [J]. 北京工业大学学报, 2020,46(10): 1149-1166.

ZHANG Y Z, LI S Y, CHEN X Q. Recent progress of two-dimensional material photodetectors based on photoelectronic conversion [J]. J. Beijing Univ. Technol., 2020,46(10):1149-1166. (in Chinese)

- [39] 韩军凯,冯奕钰,李瑀,等. 刺激响应型石墨烯材料的研究新进展 [J]. 功能高分子学报, 2019,32(4):411-420. HAN J K, FENG Y Y, LI Y, *et al.* Recent research progress in stimuli-responsive graphene materials [J]. *J. Funct. Polym.*, 2019,32(4):411-420. (in Chinese)
- [40] LIU J, LIANG Q, ZHAO R, et al. Application of organic-graphene hybrids in high performance photodetectors [J]. Mater. Chem. Front., 2020,4(2):354-368.
- [41] GUERRERO-BERMEA C, RAJUKUMAR L P, DASGUPTA A, et al. Two-dimensional and three-dimensional hybrid assemblies based on graphene oxide and other layered structures: a carbon science perspective [J]. Carbon, 2017,125:437-453.
- [42] 林源为,郭雪峰. 石墨烯表界面化学修饰及其功能调控 [J]. 化学学报, 2014,72(3):277-288.
  LIN Y W, GUO X F. Chemical modification of graphene and its applications [J]. Acta Chim. Sinica, 2014,72(3):277-288. (in Chinese)
- [43] 周琳,张黎明,廖磊,等. 石墨烯的光化学修饰方法 [J]. 化学学报, 2014,72(3):289-300.
  ZHOU L,ZHANG L M,LIAO L, *et al.* Photochemical modification of graphene [J]. *Acta Chim. Sinica*, 2014,72(3): 289-300. (in Chinese)
- [44]张芸秋,梁勇明,周建新. 石墨烯掺杂的研究进展 [J]. 化学学报, 2014,72(3):367-377.
  ZHANG Y Q,LIANG Y M,ZHOU J X. Recent progress of graphene doping [J]. Acta Chim. Sinica, 2014,72(3):367-377. (in Chinese)
- [45] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. Science, 2004, 306(5696):666-669.

- [46] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene [J]. Nature, 2005, 438(7065):197-200.
- [47] ZHANG Y B, TAN Y W, STORMER H L, et al. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene [J]. Nature, 2005,438(7065):201-204.
- [48] AVOURIS P, CHEN Z H, PEREBEINOS V. Carbon-based electronics [J]. Nat. Nanotechnol., 2007,2(10):605-615.
- [49] GEIM A K, NOVOSELOV K S. The rise of graphene [J]. Nat. Mater., 2007,6(3):183-191.
- [50] XIA F N, MUELLER T, LIN Y M, et al. Ultrafast graphene photodetector [J]. Nat. Nanotechnol., 2009, 4(12): 839-843.
- [51] MUELLER T, XIA F N, AVOURIS P. Graphene photodetectors for high-speed optical communications [J]. Nat. Photonics, 2010,4(5):297-301.
- [52]张伟娜,何伟,张新荔.石墨烯的制备方法及其应用特性 [J].化工新型材料,2010,38(S1):15-18.
  ZHANG W N, HE W, ZHANG X L. Progress in synthese, property and application of graphene [J]. New Chem. Mater., 2010,38(S1):15-18. (in Chinese)
- [53] NAIR R R, BLAKE P, GRIGORENKO A N, et al. Fine structure constant defines visual transparency of graphene [J]. Science, 2008, 320(5881):1308.
- [54] ZHANG W X, HUANG Z S, ZHANG W L, et al. Two-dimensional semiconductors with possible high room temperature mobility [J]. Nano Res., 2014,7(12):1731-1737.
- [55] EDA G, YAMAGUCHI H, VOIRY D, et al. Photoluminescence from chemically exfoliated MoS<sub>2</sub>[J]. Nano Lett., 2011, 11(12):5111-5116.
- [56] ZHANG C D, LIAN J C, YI W, et al. Surface structures of black phosphorus investigated with scanning tunneling microscopy
  [J]. J. Phys. Chem. C, 2009, 113(43): 18823-18826.
- [57] LIU H, NEAL A T, ZHU Z, et al. Phosphorene: an unexplored 2D semiconductor with a high hole mobility [J]. ACS Nano, 2014,8(4):4033-4041.
- [58] BRIDGMAN P W. Two new modifications of phosphorus [J]. J. Am. Chem. Soc., 1914,36(7):1344-1363.
- [59] ZHU Y, XIE Z J, LI J F, et al. From phosphorus to phosphorene: applications in disease theranostics [J]. Coordin. Chem. Rev., 2021,446;214110-1-16.
- [60] 袁振洲,刘丹敏,田楠,等. 二维黑磷的结构、制备和性能 [J]. 化学学报, 2016,74(6):488-497. YUAN Z Z, LIU D M, TIAN N, et al. Structure, preparation and properties of phosphorene [J]. Acta Chim. Sinica, 2016,74(6):488-497. (in Chinese)
- [61] PENG X H, WEI Q, COPPLE A. Strain-engineered direct-indirect band gap transition and its mechanism in two-dimensional phosphorene [J]. Phys. Rev. B, 2014,90(8):085402-1-10.
- [62] LIU H, NEAL A T, ZHU Z, et al. Phosphorene: an unexplored 2D semiconductor with a high hole mobility [J]. ACS Nano, 2014,8(4):4033-4041.
- [63] QIAO J S, KONG X H, HU Z X, et al. High-mobility transport anisotropy and linear dichroism in few-layer black phosphorus [J]. Nat. Commun., 2014,5:4475-1-7.
- [64] WANG X M, JONES A M, SEYLER K L, et al. Highly anisotropic and robust excitons in monolayer black phosphorus [J]. Nat. Nanotechnol., 2015,10(6):517-521.
- [65] LI L K, YU Y J, YE G J, et al. Black phosphorus field-effect transistors [J]. Nat. Nanotechnol., 2014,9(5):372-377.
- [66] LIU Y, RUDEN P P. Temperature-dependent anisotropic charge-carrier mobility limited by ionized impurity scattering in thin-layer black phosphorus [J]. *Phys. Rev.* B, 2017,95(16):165446-1-8.
- [67] 冯凯,冯琳,李国辉,等. 黑磷二维材料制备及其光电子器件研究进展 [J]. 发光学报, 2021,42(11):1686-1700.
  FENG K,FENG L,LI G H, et al. Research progress on fabrication of thin black phosphorus materials and its optoelectronic devices [J]. Chin. J. Lumin., 2021,42(11):1686-1700. (in Chinese)
- [68] 万静. 有机/无机杂化钙钛矿(RNH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>)<sub>m-1</sub> Pb<sub>m</sub>I<sub>3m+1</sub>结构及光电性能的研究 [D]. 杭州:浙江理工大学, 2012.

WAN J. Structure and Optoelectrical Properties of Organic/Inorganic Hybrid Perovskite  $(RNH_3)_2(CH_3NH_3)_{m-1}Pb_mI_{3m+1}$ [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2012. (in Chinese)

- [69] 洪茂椿. 无机-有机复合聚合物:材料研究的一个新领域 [J]. 无机化学学报, 2002,18(1):24-26.
  HONG M C. Inorganic and organic hybride polymers: a new opening for materials research [J]. Chin. J. Inorg. Chem., 2002,18(1):24-26. (in Chinese)
- [70] HE T W, JIANG Y Z, XING X Y, et al. Structured perovskite light absorbers for efficient and stable photovoltaics [J]. Adv. Mater., 2020, 32(26):1903937-1-17.
- [71] YIN J B, TAN Z J, HONG H, et al. Ultrafast and highly sensitive infrared photodetectors based on two-dimensional oxyselenide crystals [J]. Nat. Commun., 2018,9(1):3311-1-7.
- [72] WU J X, YUAN H T, MENG M M, et al. High electron mobility and quantum oscillations in non-encapsulated ultrathin semiconducting Bi, O, Se [J]. Nat. Nanotechnol., 2017, 12(6):530-534.
- [73] CHEN Y F, MA W L, TAN C W, et al. Broadband Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se photodetectors from infrared to terahertz [J]. Adv. Funct. Mater., 2021,31(14):2009554-1-9.
- [74] YANG J, QUHE R G, LI Q H, et al. Sub 10 nm bilayer Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se transistors [J]. Adv. Electron. Mater., 2019, 5(3): 1800720-1-10.
- [75] MAESO D, CASTELLANOS-GOMEZ A, AGRAIT N, et al. Fast yet quantum-efficient few-layer vertical MoS<sub>2</sub> photodetectors [J]. Adv. Electron. Mater., 2019,5(7):1900141-1-6.
- [76] XU Y, ALI A, SHEHZAD K, et al. Solvent-based soft-patterning of graphene lateral heterostructures for broadband highspeed metal-semiconductor-metal photodetectors [J]. Adv. Mater. Technol., 2017,2(2):1600241-1-8.
- [77] HAN S G, YAO Y P, LIU X T, et al. Highly oriented thin films of 2D ruddlesden-popper hybrid perovskite toward superfast response photodetectors [J]. Small, 2019, 15(39):1901194-1-6.
- [78] KHADKA S, WICKRAMASINGHE T E, LINDQUIST M, et al. As-grown two-dimensional MoS<sub>2</sub> based photodetectors with naturally formed contacts [J]. Appl. Phys. Lett., 2017,110(26):261109-1-5.
- [79] SCHALL D, NEUMAIER D, MOHSIN M, et al. 50 Gbit/s photodetectors based on wafer-scale graphene for integrated silicon photonic communication systems [J]. ACS Photon., 2014,1(9):781-784.
- [80] CHEN Y F, MA W L, TAN C W, et al. Broadband Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se photodetectors from infrared to terahertz [J]. Adv. Funct. Mater., 2021,31(14):2009554-1-9.
- [81] GAN X T, SHIUE R J, GAO Y D, et al. Chip-integrated ultrafast graphene photodetector with high responsivity [J]. Nat. Photonics, 2013,7(11):883-887.
- [82] TAO L, CHEN Z F, LI X M, et al. Hybrid graphene tunneling photoconductor with interface engineering towards fast photoresponse and high responsivity [J]. npj 2D Mater. Appl., 2017,1(1):19-1-8.
- [83] XU Z Y, LI Y B, LIU X T, et al. Highly sensitive and ultrafast responding array photodetector based on a newly tailored 2D lead iodide perovskite crystal [J]. Adv. Opt. Mater., 2019,7(11):1900308-1-7.
- [84] URICH A, UNTERRAINER K, MUELLER T. Intrinsic response time of graphene photodetectors [J]. Nano Lett., 2011, 11(7):2804-2808.
- [85] WANG H N, ZHANG C J, CHAN W M, et al. Ultrafast response of monolayer molybdenum disulfide photodetectors [J]. Nat. Commun., 2015, 6:8831-1-6.
- [86] YOUNGBLOOD N,LI M. Ultrafast photocurrent measurements of a black phosphorus photodetector [J]. Appl. Phys. Lett., 2017,110(5):051102-1-5.
- [87] CHEN Z F, LI X M, WANG J Q, et al. Synergistic effects of plasmonics and electron trapping in graphene short-wave infrared photodetectors with ultrahigh responsivity [J]. ACS Nano, 2017, 11(1):430-437.
- [88] HU M, YAN Y C, HUANG K, et al. Performance improvement of graphene/silicon photodetectors using high work function metal nanoparticles with plasma effect [J]. Adv. Opt. Mater., 2018,6(9):1701243-1-7.
- [89] MA P, SALAMIN Y, BAEUERLE B, et al. Plasmonically enhanced graphene photodetector featuring 100 Gbit/s data reception, high responsivity, and compact size [J]. ACS Photon., 2019,6(1):154-161.
- [90] DING Y H, CHENG Z, ZHU X L, et al. Ultra-compact integrated graphene plasmonic photodetector with bandwidth above 110 GHz [J]. Nanophotonics, 2020,9(2):317-325.



**何嘉玉**(1997 -),女,山西长治人, 硕士研究生,2019 年于太原师范学 院获得学士学位,主要从事微纳光 电子探测器的研究。 E-mail: 937530084@ qq. com



**张晗**(1984 -),男,湖北黄冈人,博士, 教授,博士生导师,2011 年于新加坡 南洋理工大学获得博士学位,主要从 事光纤激光器、非线性光学、光纤通信 与电子器件、新型功能材料光电子特 性、基于石墨烯/类硫化钼异质结的高 速光调制器关键技术等方向的研究。 E-mail; hzhang@ szu. edu. cn



**冀婷**(1981 -),女,山西平遥人,博 士,副教授,硕士生导师,2011 年于 复旦大学获得博士学位,主要从事 微纳光子与光电子学领域的研究。 E-mail: jiting@ tyut. edu. cn



**崔艳霞**(1984 -),女,山西吕梁人,博 士,教授,博士生导师,2011 年于南京 理工大学获得博士学位,主要从事微 纳光子与光电子学领域(包括表面等 离激元纳米器件、有机及钙钛矿光电 探测器及钙钛矿激光器等)的研究。 E-mail: yanxiacui@ tyut. edu. cn