



二维半导体红外光电探测器研究进展 (特邀)

许航瑀 王鹏 陈效双 胡伟达

Research progress of two-dimensional semiconductor infrared photodetector (*Invited*)

Xu Hangyu, Wang Peng, Chen Xiaoshuang, Hu Weida

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20211017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Research progress of infrared and terahertz detectors based on two-dimensional materials regulated by photo-hot carrier
红外与激光工程. 2020, 49(1): 0103001–0103001(10) <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0103001>

基于光纤二维材料集成器件的脉冲激光器及外场调控(特邀)

Pulsed laser based on two-dimensional material optical fiber integrated device and external control (*invited*)
红外与激光工程. 2018, 47(8): 803003–0803003(13) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0803003>

基于二维材料非线性效应的多波长超快激光器研究进展(特邀)

Recent advances in multi-wavelength ultrafast lasers based on nonlinear effects of 2D materials (*invited*)
红外与激光工程. 2019, 48(1): 103002–0103002(22) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0103002>

金属无机半导体金属光电探测器的研究进展

Research progress in metal-inorganic semiconductor-metal photodetectors
红外与激光工程. 2020, 49(8): 20201025–1–20201025–19 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201025>

2~4 μm中红外碲化物半导体激光器研究进展 (特邀)

Research progress of 2–4 μm mid-infrared antimonide semiconductor lasers (*Invited*)
红外与激光工程. 2020, 49(12): 20201075–1–20201075–9 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201075>

锗近红外光电探测器制备工艺研究进展

Research progress of technologies for germanium near-infrared photodetectors
红外与激光工程. 2020, 49(1): 0103004–0103004(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0103004>

二维半导体红外光电探测器研究进展 (特邀)

许航瑀^{1,2}, 王 鹏¹, 陈效双¹, 胡伟达¹

(1. 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;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 红外探测在生物医疗、智慧城市、宇宙探索等前沿领域中有着重要的作用。近年来,以二维材料为代表的新型纳尺度半导体并以此形成的具有颠覆性意义的光电探测技术在探测灵敏度、极低暗电流、高工作温度等指标超越了传统薄膜器件的理论极限,是新一代红外光电探测技术有力竞争者之一。文中以局域场调控实现室温高性能光电探测为出发点,介绍了铁电局域场、层间内建电场、面内内建电场调控二维材料光电探测机理与器件实现方法;进一步,针对二维材料其尺寸效应引起的光利用率低或量子效率低的问题,提出了单边异质结和表面等离子激元增强结构的光电性能增强方法;最后列举了二维半导体材料在红外探测器领域的应用探索,展现了新型二维半导体红外探测器的应用潜力与前景,为新一代红外探测器技术提供了新方法和新思路。

关键词: 二维材料; 红外探测器; 局域场; SWaP3

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211017

Research progress of two-dimensional semiconductor infrared photodetector (*Invited*)

Xu Hangyu^{1,2}, Wang Peng¹, Chen Xiaoshuang¹, Hu Weida¹

(1. National Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Infrared detection plays an important role in cutting-edge fields such as biomedicine, smart cities, and space exploration. In recent years, a new type of nanoscale semiconductor represented by two-dimensional materials is one of the candidates for a new generation of infrared photodetection technology. This is due to the fact that some index of two-dimensional materials device have exceeded the theoretical limits of traditional thin-film devices, such as detection sensitivity, ultralow dark current, high working temperature, etc. Two dimensional materials can easily be controlled by local field. In this review, the mechanism of three local fields to achieve high performance at room temperature were introduced in the first part, including ferroelectric local field, the interlayer built-in electric field, and the in-plane built-in electric field. Secondly, we introduced the photoelectric enhancement methods of unilateral depletion heterojunction and surface plasmon structure to solve the problem of low quantum efficiency and low light absorption caused by atomic thin effect of two-dimensional materials. Finally, we showed some applications of two-dimensional materials in infrared photodetection field. The exploration reveals the potential and prospect of the novel two-dimensional semiconductor in the field of infrared photodetection, which provides some new methods and ideas for the new generation infrared detector technology.

Key words: two-dimensional materials; infrared photodetector; local electric field; SWaP3

收稿日期:2020-11-09; 修订日期:2020-12-07

基金项目:国家自然科学基金(61905266);上海市青年科技英才(19YF1454600);中国科学院青年创新促进会资助

0 引言

1800 年英国天文学家 Herschel 利用分光镜和水银温度计首次发现了红外辐射,涂黑的水银温度计成为了历史上第一个红外探测器。从那以后,相继发现了热电效应、光伏现象、光电导现象。但红外探测器在刚开始发展缓慢,直到上个世纪红外光电探测器才逐渐应用于各个领域,出现了 PbS、HgCdTe、量子点、II 类超晶格等红外探测器。现在,红外探测在遥感、通信和生命科学等领域都发挥着至关重要的作用。随着对光电探测需求的提高,技术的发展方向转向了称之为 SWaP3 (小尺寸、低重量、高性能、低功耗和低成本集为一体) 的先进红外焦平面探测技术^[1]。而传统红外探测器受低温制冷的限制,难以实现小型化、便携化。如何突破传统材料的局限,实现室温小型化新型红外探测器是新待解决的问题。

以二维材料为代表的新型纳尺度半导体并以此形成的具有颠覆性意义的光电探测技术在探测灵敏度、极低暗电流、高工作温度等指标超越了传统薄膜器件的理论极限,是新一代红外光电探测技术有力竞争者之一^[2-4]。自石墨烯发现以来,二维材料以其优异的电学、光学特性受到了广泛的关注。石墨烯的载流子迁移率理论值高达 $200\,000\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,有望制备新一代半导体器件^[5]。但是,天然石墨烯的零带隙使其有着较大的暗电流,难以直接应用于光电探测。继石墨烯之后,二维过渡金属硫化物 (TMDs) 这个大家族也被不断地发现和研究。与石墨烯的零带隙不同,TMDs 具有适中的带隙 ($\sim 1\text{ eV}$) 且原子级层状结构使其易于被外电场调控,对于新型光电子器件的制备是个很好的补充^[6-8]。其中,二硫化钼 (MoS_2) 晶体管可以实现高达五个量级的开关比, 1.2 eV 的带隙可以实现对可见光的探测^[9]。但石墨烯零带隙带来的高暗电流和 TMDs 的较宽带隙仍然难以满足红外探测领域的应用需求。以黑磷 (bP)、黑砷磷 (b-AsP) 为代表的窄禁带二维半导体材料被陆续发现,其更窄的禁带宽度和优异的光电特性很好的补充了石墨烯与 TMDs 之间的能隙空白,使得二维材料在中、长波红外探测成为可能^[10-12]。这类新型二维半导体材料层间通过范德华力结合,没有悬挂键,相比于传统体材料降低

了因晶格失配引起的应力、缺陷等不良因素,晶体质量整体较高;同时,这种二维材料具有极高的内禀光电增益 ($10^3\sim 10^8$),室温下可以获得极高的响应率;最重要的是,载流子在纵向输运受限后极易被局域电场调控,在横向输运可以被大幅抑制,且由于器件体积显著降低,与有效传输体积成正比的本征暗电流将大大降低,可获得极低的暗电流^[13-16]。因此,基于二维材料的红外光电探测器有望实现高灵敏度、低噪声、室温工作,是实现红外探测器轻量化、小型化的可行技术路线之一。此外,国际上对于二维材料的定义并不局限于上述以石墨烯、过渡金属硫化物为代表的范德华原子层状材料,而是通常将某一个维度相较于另外两个维度被大幅限制的,具有纳米、原子结构特征的材料体系称为二维材料,这种结构如纳米片、纳米带、纳米膜等。

文中将从三个方面介绍新型二维材料红外探测器的研究进展(如图 1 所示)。首先,介绍了三种局域场调控红外探测方法:(1) 铁电局域场调控的新型红外探测器,是将二维材料与传统铁电极化材料相结合,利用铁电材料的极化保持特性,利用起剩极化产生的极强静电场直接作用在二维材料表面,大幅抑制沟道材料的载流子浓度,实现室温极低暗电流、高灵敏红外光电探测;(2) 原子层间内建电场调控的新型红外探测器,是利用二维材料表面无悬挂键、层间范德华力键合的结构特点,降低传统异质界面及其内部由晶格失配产生的缺陷,有效抑制俄歇复合,实现低暗电流红外探测器;(3) 面内局域电场调控的新型红外探测器,是通过化学掺杂法或构建非对称结构,在材料面内形成载流子浓度的不对称性,以此引入面内局域电场,降低暗电流的同时提升光生载流子的分离效率;其次,针对二维半导体因尺度效应引起的低光吸收率或量子效率的问题,介绍了两种二维光电探测性能增强方法:(1) 单边耗尽范德华异质结构提升光生载流子的分离与收集效率,(2) 基于表面等离子激元的人工微结构光电增强方法;最后,列举了二维材料在红外成像领域的应用探索,并对其现阶段研究意义及其潜在的应用价值进行了展望。

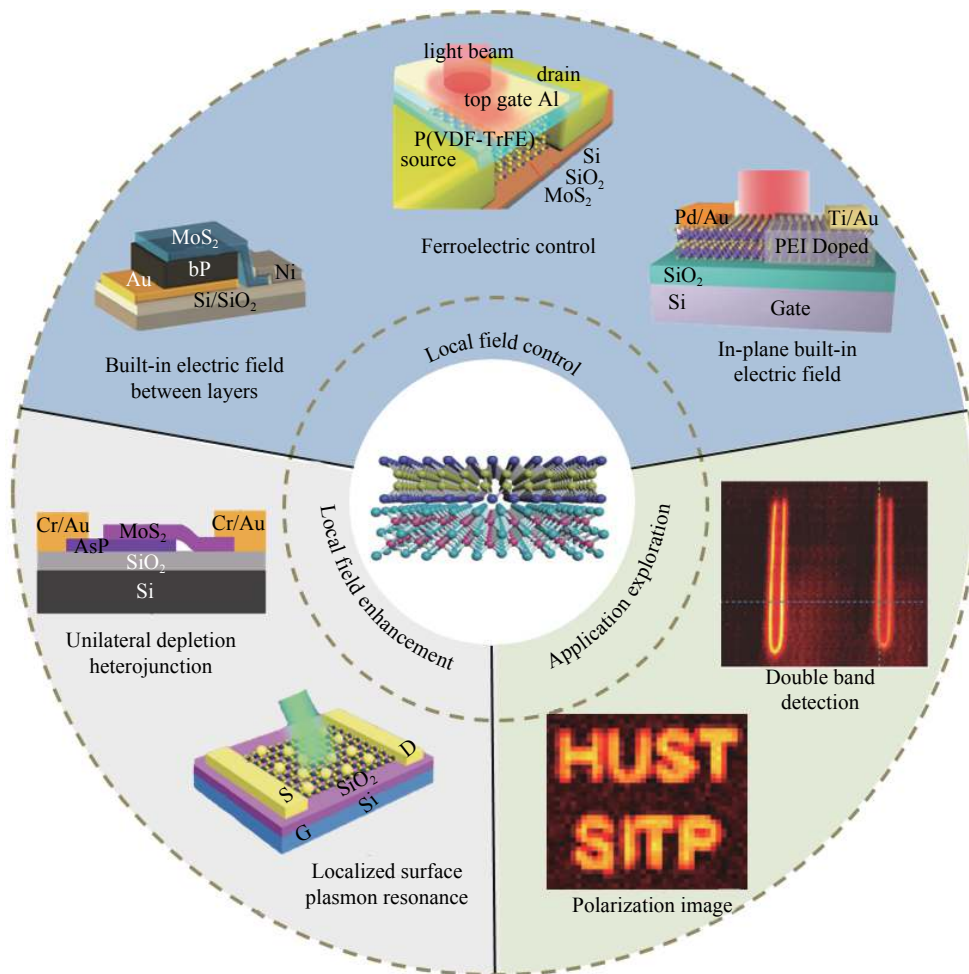


图 1 二维半导体材料红外探测器研究进展

Fig.1 Research progress of two-dimensional semiconductor infrared photodetector

1 局域场调控的新型二维材料红外探测器

1.1 铁电局域场调控

铁电材料是指在一定范围内具有自发极化的材料,极化方向可以在外加偏压的作用下发生反转。当没有外加偏压时,铁电材料由于剩余极化还会维持在极化状态。铁电局域场调控就是利用铁电材料代替栅极中的氧化层,利用极化场来调控器件的沟道性质。王旭东等^[17]利用新型铁电聚合物薄膜,聚偏氟乙烯-三氟乙烯 (P(VDF-TrFE)) 作为栅极实现铁电局域场调控。当施加的电压超过铁电材料的矫顽力电压时,铁电畴的极化方向将保持不变,在外部电压去除时,会产生剩余极化效应,从而产生持续作用于通道的静电场,该电场用于抑制暗电流。图 2(a)、(b)、(c) 分别是 PVDF 极化的三种状态: Fresh (没有极化)、P up (极化方向向上)、P down (极化方向向下)。电流

如图 2(d) 所示,当为 P up 状态时,在极化电场的作用下 n 型 MoS₂ 沟道表现出完全耗尽的状态,电子浓度远小于 Fresh 状态,暗电流被极大地抑制。因此在加光时, Fresh 状态能看到微弱的光响应,而 P up 能看到明显的光响应。PVDF 极化场还可以钝化少层 MoS₂ 表面的陷阱态,进一步改善 MoS₂ 光电晶体管的光电性能,在 635 nm、功率为 1 nW 的激光照射下实现了 2570 A·W⁻¹ 的超高响应率和 2.2×10¹² Jones 的超大比探测率。进一步,王等人通过密度泛函理论计算在不同外加电场下,间接带隙半导体 MoS₂ 带隙随外加电场的变化。并通过实验证明了,在极化场的作用下 MoS₂ 光电晶体管可以探测到 1550 nm 的激光,将探测范围从可见光拓展到了近红外光。

除了由范德华力连接的层状的二维半导体之外,某一个维度相较于另外两个维度被限制的,具有纳米/原子结构特征的新型二维半导体材料,如纳米片、纳

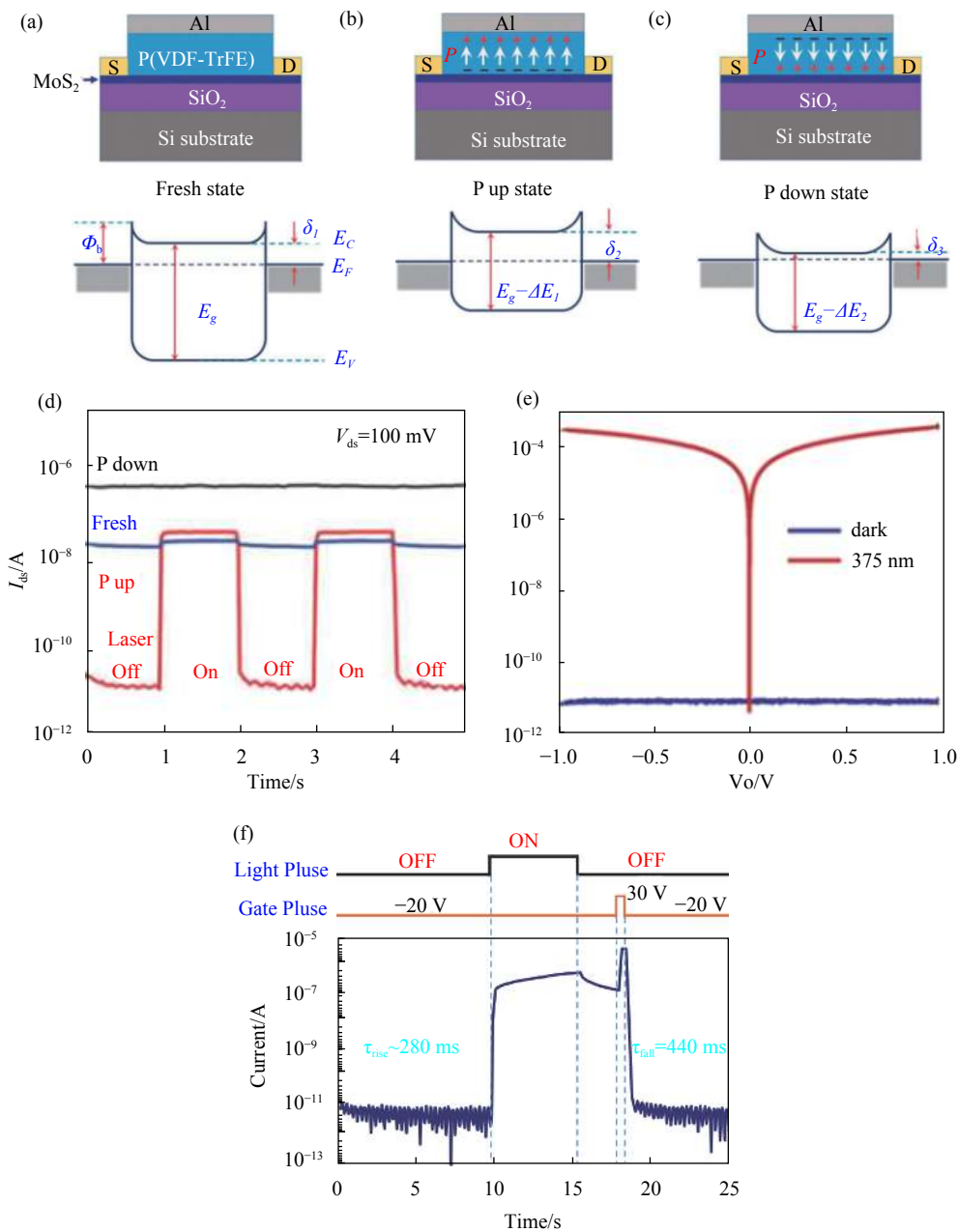


图 2 (a)、(b)、(c) $V_{ds}=0$ 时, 不同铁电极化态器件截面结构和平衡能带图; (d) 不同极化状态下 MoS₂ 的光电流; (e) 对数坐标下 ZnO 转移特性曲线; (f) 铁电局域场增强 ZnO 纳米片光探测器的时间分辨光响应特性

Fig.2 (a), (b), (c) When $V_{ds}=0$ V, the cross-sectional structure and equilibrium energy band diagram of different ferroelectric polarization state devices; (d) MoS₂ photocurrent in different polarization states; (e) ZnO transfer characteristic curve under numerical coordinates; (f) Time-resolved optical response characteristics of ferroelectric local field enhanced ZnO nanosheet photodetector

米带、纳米膜等也容易被局域场调控, 进而体现优异的光电探测性质。王鹏等^[18]利用 PVDF 的钝化效应, 对二维氧化锌纳米片 (ZnO) 表面陷阱进行改善。纳米 ZnO 是一种禁带宽度为 3.4 eV 的直接带隙半导体, 是最具潜力的紫外光电候选材料之一。但是由于 ZnO 表面存在着大量本征的未填充的陷阱并且难以实现

p 型掺杂, 使得大多数 ZnO 光电探测器载流子迁移率低, 暗电流高, 无法应用到实际。而利用 PVDF 产生局域场调控时, 不仅可以实现完全耗尽多数载流子, 抑制暗电流, 同时钝化陷阱还会增强其光电流, 如图 2(e) 所示, 在对数坐标中获得了超过 10⁷ 的光开关比。该工作的光电导增益有了极大的改善。器件的

光电导增益 (G) 是光电探测器一个重要的评估系数, 它指的是单位时间内收集的载流子数量与吸收的光子数量的比率。可以用如下公式来表示:

$$G = \frac{N_c}{N_{ph}} = \frac{I_{ph}/e}{PA/h\nu} \quad (1)$$

式中: I_{ph} 是光电流; P 是激光功率; A 是器件有效面积; e 是单位电荷; $h\nu$ 是入射光子能量。此器件的 G 高达 1.24×10^6 , 高增益表明此工作中的 ZnO 纳米片可以在弱光下产生高光电流信号。

在 ZnO 纳米片中会出现持续光电导效应, 这是因为 ZnO 晶体中含有丰富的氧缺陷, 会在 ZnO 禁带中形成缺陷能级, 捕获电子和光生电子, 使得 n 型 ZnO 中空穴和被束缚的光生电子难以复合, 继续参与导电, 这会给实际应用带来很大的阻碍。该工作通过改变极化场方向来改善此现象, 如图 2(f) 所示。器件加光时 (OFF 态变到 ON 态), 漏电流迅速上升, 在 10^{-6} A 达到饱和。当光关闭时 (从 ON 态变到 OFF 态), 器件的光电流仍保持在一个较高的水平, 表示发生了光电导持续现象。但是当加一个持续 143 μ s 的 30 V 的脉冲时, PVDF 内的极化场方向发生反转, ZnO 沟道中产生大量载流子, 提高了价带中空穴复合的几率, 从而降低了器件电流, 在一定程度上解决了光电导持续的现象。

1.2 原子层间内建电场调控的二维材料红外探测器

单层二维材料一般由原子间的共价键结合组成, 表面无悬挂键且表面化学键饱和。一类以范德华力结合的多层二维材料可以允许不同材料任意结合而无晶格失配。由此可制备多种基于二维材料的异质结结构, 并通过原子层间内建电场实现垂直方向的电场调控。黑砷磷 (black Arsenic Phosphorus, b-AsP) 有着较小的带隙, 截止波长为 8.5 μ m, 不仅完全覆盖了中长波红外的第一个大气窗口 (3~5 μ m), 还拓展到了长波红外的第二个大气窗口 (8~14 μ m)。龙明生等^[19]通过机械剥离的方式制备了 b-AsP 光电晶体管 (配比为 As : P=0.83 : 0.17), 通过 mapping 测试 (一种器件的电学、光学表征测试), 发现零偏时电流集中于金属与 b-AsP 接触区域附近, 并且不同位置出现了方向相反的电流, 证明同时出现了光伏效应 (PVE) 和光热效应 (PTE)。如图 3(a) 所示, 可以用能带结构解释由 PVE 主导的光电流出现于接触区域附近的现象。为

了探究 PVE 效应和 PTE 效应在光电流产生过程中的比重, 该工作对晶体管的转移特性曲线进行了详细的分析。如图 3(b) 所示, 当栅压 V_g 为 -15 V~15 V 时, 沟道电流与源漏电压同方向, 并且在电荷中性点附近达到最大值, 是明显的 PVE 效应, 此时 b-AsP 与金属形成的肖特基结在光生载流子的产生过程中占主导作用。而当 $V_g > 15$ V 时, 晶体管表现出了非常弱的栅极依赖性, 此时, 热驱动过程主导了光响应。与石墨烯不同, b-AsP 的高电导率和低热导率使得其光电流主要归因于热驱动过程而不是辐射热效应。

在该工作中龙等人进一步通过干法转移的方式实现了 b-AsP/MoS₂ 异质结, 如图 3(c) 所示, 暗电流有了明显的改善, 并展现出整流特性。然后通过 mapping 分析显示光电流产生于结区而不是肖特基结的位置, 证明了结区的形成。异质结的形成使得器件的比探测率进一步得到了提高。比探测率 (D^*) 是红外探测器的一个重要的品质因数, 它决定了探测器可以从噪声中区分出光信号的最小照明光功率。 D^* 可以通过如下方程计算:

$$D^* = \frac{(AB)^{\frac{1}{2}}}{NEP} \quad (2)$$

式中: 噪声等效功率 (NEP) 是噪声电流 (i_n) 和响应率 (R) 的比值; A 是器件的有效面积; B 是器件的带宽。该工作对比了不同红外探测器比探测率, b-AsP/MoS₂ 异质结场效应晶体管在中波的比探测率高于目前商用的锡化铅 (PbSe) 中红外探测器。在 3~5 μ m 范围内一直大于 4.9×10^9 Jones, 即使在 8.05 μ m 的长波光照下, 也有大于 1.06×10^8 Jones 的高比探测率, 这些性能展现了 b-AsP 在中长波红外光电探测器广阔的前景。

二维材料在形成异质结时, 厚度往往会影响结区的性质。这是因为二维材料带隙往往与厚度相关, 黑磷 (black phosphorus, bP) 的带隙随层数增加而减小, 在 0.3 eV~2 eV 进行变化。厚度还会影响吸光率和暗电流, 进一步影响红外探测器的性能。如何设计 pn 结材料的厚度以实现高吸光率与低暗电流的最佳平衡一直是人们研究的热点。Ali 等^[20]通过实验和模拟相结合的方法, 尝试给出一种 bP/MoS₂ 异质结在中波红外探测的最佳厚度配比。如图 3(d) 所示, bP 与 MoS₂ 一般会形成 pn 结, 相比于单一 bP 形成的光电晶体管, pn 结结构可以有效地降低暗电流。

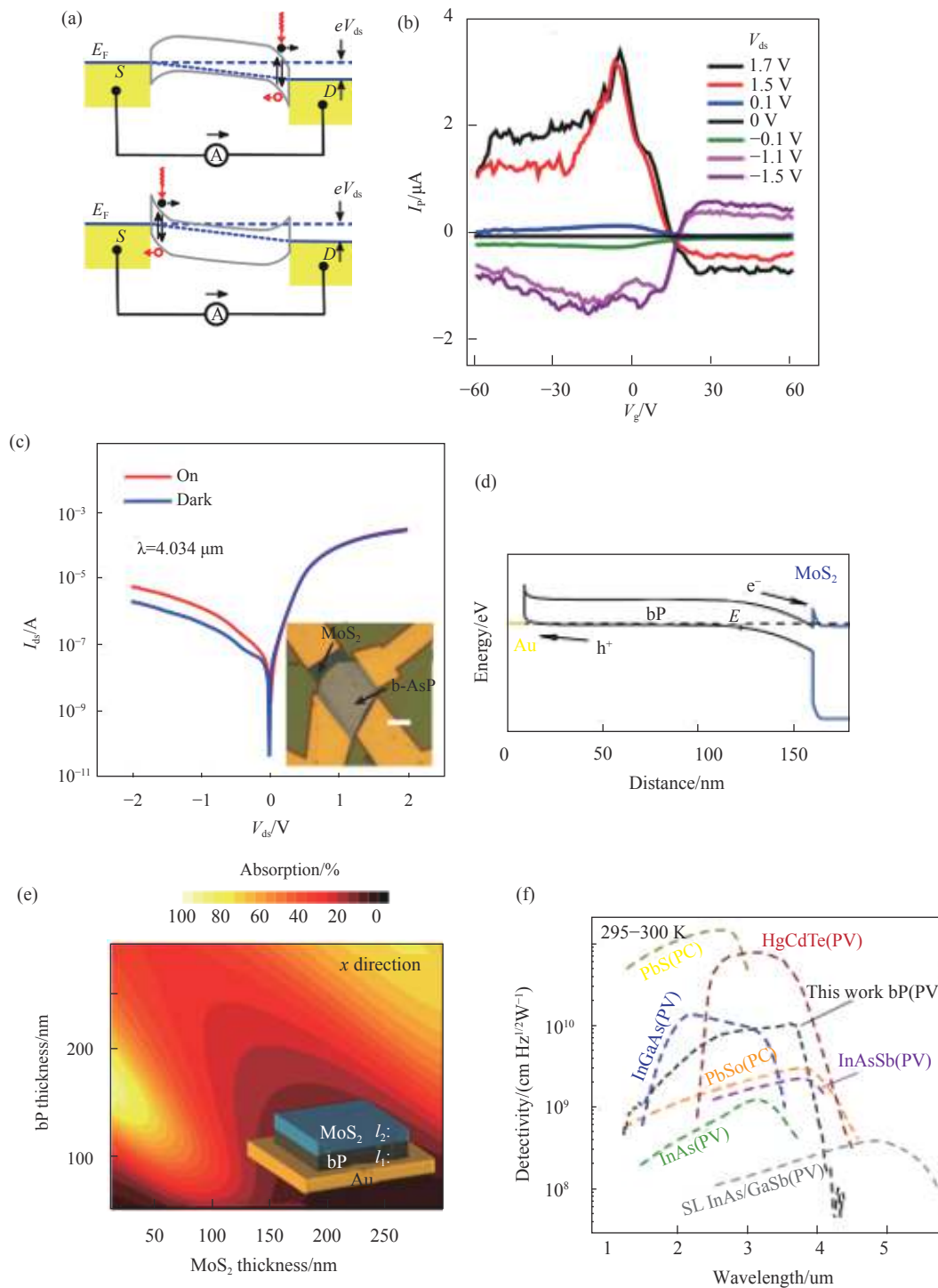


图 3 (a) 不同栅压下器件能带图; (b) 不同偏置下光电流与栅压的关系; (c) b-AsP/MoS₂ 异质结; (d) bP/MoS₂ 能带图; (e) 3 μm 时 bP、MoS₂ 厚度对吸光率的影响; (f) 不同探测器的比探测率与波长的关系

Fig.3 (a) Energy band diagram of devices under different gate voltages; (b) Photocurrent versus gate voltage at various bias voltages.; (c) b-AsP/MoS₂ heterojunction; (d) bP/MoS₂ energy band diagram; (e) The influence of bP and MoS₂ thickness on absorbance at 3 μm ; (f) Wavelength dependence of the specific detectivity (D^*) for different photodetectors

bP 具有各向异性, x 方向 (armchair 方向) 和 y 方向 (zigzag 方向) 原子排布不同导致了其物理性质的

不同。Ali 等通过实验获得了两种原子排布方向下不同波长吸收率的大量数据, 利用传输矩阵进行数据的

拟合,提取 x 与 y 方向描述复折射率的两个参数,折射率 (n) 和衰减系数 (k), 并利用参数进行模拟,得到了如图 3(c) 所示的 bP (x 方向)/MoS₂ 异质结不同厚度的吸收率的变化。由拟合图可知,当 bP 厚度为 170 nm, MoS₂ 厚度为 0 nm 时,此结构的吸光率最强。但为了形成异质结,最佳的厚度应该为 150 nm bP 与 15 nm MoS₂ 形成异质结。这种光学设计,在 $\lambda=3\ \mu\text{m}$ 处,沿 x 方向偏振的 80% 入射光可以被吸收,同时暗电流维持在较低的水平,达到了高吸收率和低暗电流的平衡。进一步,将此工作中的异质结红外探测器与商用红外探测器进行探测率的对比,如图 3(f) 所示,其峰值探测率达到了 1.1×10^{10} Jones ($3.8\ \mu\text{m}$)。虽然无法与碲镉汞最佳性能对比,但碲镉汞需低温制冷,而这种新型二维材料红外探测器可工作于室温,对室温/高温工作的中波红外探测是一个很好的补充。需要注意的是,因为 bP 与 b-AsP 表面存在孤对电子,易于空气中的氧原子反应发生降解,因此如何实现稳定性是进一步的研究重点。

1.3 面内内建电场调控

除了利用堆叠引入的垂直方向内建电场,二维材料还可以通过设计非对称结构来实现面内横向内建电场以调控沟道性质。这种方法可以减少由于金属与材料接触产生的能带杂化和转移过程中的杂质、缺陷等造成的影响。唐祚程等^[21]利用二硒化钨(WSe₂)具有双极性的特点,在同一片薄膜材料中形成高质量面内 pn 结。如图 4(a) 所示,唐等人首先通过电子束光刻技术,在 WSe₂ 样品的部分位置打开窗口,然后将整个样品浸泡在聚乙酰胺(PEI)溶液之中。长链聚合物 PEI 可以包裹在 WSe₂ 上,作为电子供体,从而实现长时间的 n 型掺杂。该工作采用 Pd/Au 作为空穴收集区, Ti/Au 作为电子收集区。如图 4(b) 所示,当无外加栅压时,只有 Pd/Au 一侧与 n 型 WSe₂ 形成肖特基结,光生电子-空穴对在此处分离。而当背栅电压提高时,PEI 浸泡过的部分还是 n 型掺杂,能带变化很小,而没有浸泡过的部分则会由于背栅的影响显现出 p 型半导体的性质。Pd/Au 与 WSe₂ 接触的部分就会由原来的电子收集区变为空穴收集区,形成良好的欧姆接触,而在沟道中间形成强 pn 结,如图 4(c) 所示。在加光时,利用 mapping 测试证明此时电流产生于沟道而不是 Pd/Au 区域。唐进一步对器件的电学性能

进行了表征,在不同的背栅下测量了电流输出特性曲线,在 $V_{\text{gs}}=-40\ \text{V}$ 时获得了最佳整流比。为测得 pn 结的理想因子,在 $V_{\text{gs}}=-40\ \text{V}$ 时,利用 pn 结电流方程对曲线进行拟合:

$$I_{\text{ds}} = I_s \left(e^{\frac{qV}{nkt}} - 1 \right) \quad (3)$$

式中: I_s 是反向饱和电流; k 是玻耳兹曼常数; q 是电子电荷; T 为温度,为 300 K; n 为理想因子, $n=1$ 表示在正向偏置下扩散电流为主导的理想 pn 结器件, $n>1$ 表示复合电流存在,主要为杂质复合电流。计算得到此器件的理想因子 $n=1.66$,比之前所报道的利用 WSe₂ 形成的 pn 结结构更加优异。在光电探测方面,此结构同样展现了优异的性质。由于 pn 结的形成,器件的暗电流维持在一个很低的水平 ($\approx 10^{-13}\ \text{A}$),在 1000 nm 的近红外下也有较明显的响应 ($\approx 10^{-12}\ \text{A}$)。

通过面内成结还可以显著改善器件的功耗。当栅极电压小于阈值电压,且半导体表面仅为弱反型时,相应的漏级电流称为亚阈值电流。亚阈值摆幅(subthreshold swing, SS) 是衡量亚阈值区域电流的一个重要指标,定义为:

$$SS = \frac{dV_G}{d(\log I_D)} \quad (4)$$

由于金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)热离子注入的限制,亚阈值摆幅在室温下不能低于 60 mV/dec。当今器件往小型化、低功耗方向发展,减少 SS 值对于降低器件的待机功率、开关转换功率至关重要。虽然已经有理论证明了通过设计异质结隧穿场效应晶体管可以使 SS 值突破 60 mV/dec,但是由于不同材料表面的缺陷、氧化物、晶格失配等界面问题影响了异质结隧穿场效应晶体管的质量,SS 值难以实现突破。Seungho Kim 等^[22]提出了通过在 bP 面内实现能带调控,进而实现带间隧穿。如图 4(d) 所示,区域 (i) 为厚层 bP,能带较窄,区域 (ii)、(iii) 为单层 bP,区域 (iii) 单层 bP 的上方有一层石墨烯用来调节其能带结构。通过调节 V_{TG} 、 V_{D} 、 V_{BG} 的电压可以实现对三个区域能带结构的分别调控。如图 4(e) 所示,当 V_{BG} 较大时,器件为 on 态,由于区域 (i) 的价带顶高于区域 (ii) 导带底,且能带结构陡峭,会在区域 (i) 与 (ii) 之间发生带间隧穿。价带顶的电子隧穿至导带底,导致器件出现了很大的开态电流。而

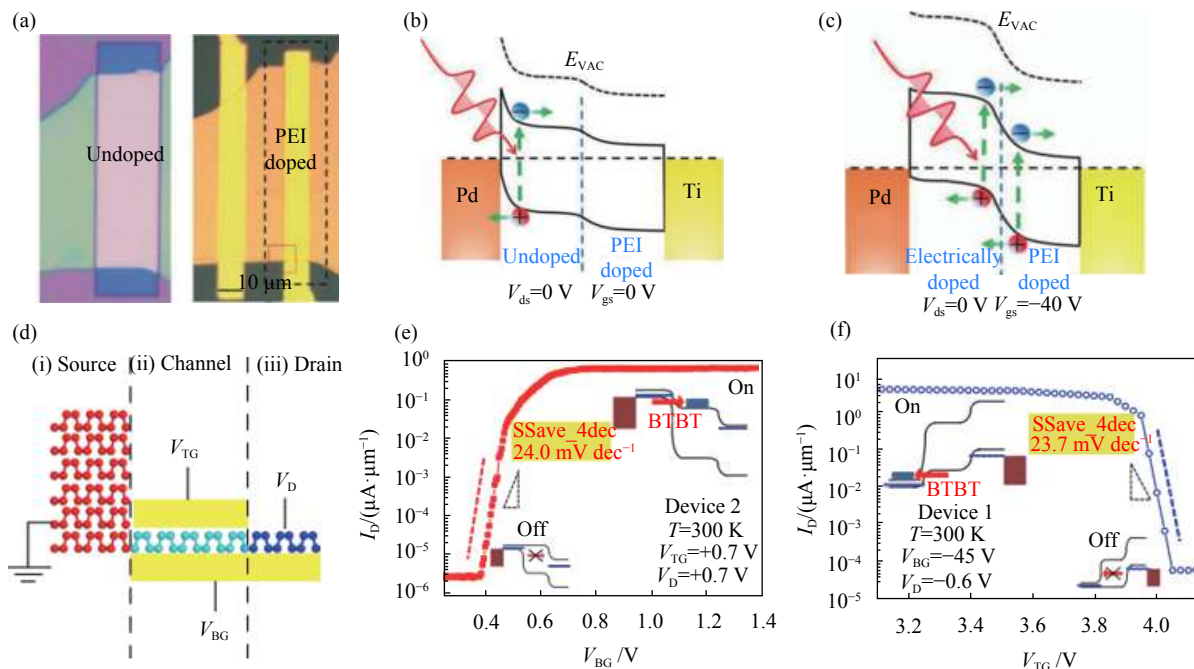


图 4 利用 PEI 实现 WSe₂ 部分掺杂; (b) $V_{gs}=0\text{ V}$ 能带图; (c) $V_{gs}=-40\text{ V}$ 能带图; (d) bP 异质结场效应晶体管结构; (e)、(f) 调节 V_{BG} 和 V_{TG} 以实现器件开启和关断状态

Fig.4 (a) Partial doping of WSe₂ using PEI; (b) $V_{gs}=0\text{ V}$ band diagram; (c) $V_{gs}=-40\text{ V}$ band diagram; (d) Black phosphorus heterojunction field effect transistor structure; (e), (f) Change V_{BG} , V_{TG} to realize the on and off states of the device

当 V_{BG} 较小时, 区域 (i) 与 (ii) 之间能带比较缓和, 不会出现带间隧穿, 电流值维持在较低的水平。其中三角形的斜边是当 SS 值为 60 mV/dec 的斜率, 是理论上 MOSFET 的 SS 的最小值。此器件的亚阈值摆幅明显小于 MOSFET 的最小值, 通过计算达到了 24 mV/dec。与调节 V_{BG} 类似, 调节 V_{TG} 同样可以实现器件的开态和关态, 如图 4(f) 所示。但是此时区域 (iii) 需要在 V_D 的调控下, 使 bP 显现出弱 p 型的性质。此时的 SS 值为 23.7 mV/dec, 同样明显低于 60 mV/dec。两种模式下超低的 SS 值证明此器件可突破 MOSFET 机理的限制, 实现更低功耗工作。

2 二维光电探测性能增强方法

虽然由于二维材料在垂直方向上的量子限域效应, 导带和价带边缘附近态密度会出现尖峰, 增强光吸收率, 但是二维材料的超薄结构还是会限制其光吸收率, 例如单层石墨烯的光吸收率仅有 2.3%。尺度效应限制了二维材料光电器件的量子效率上限, 因此寻求电子态与光子态协同操控的光电探测增强方法, 是新型二维半导体红外探测器重要发展方向之一。

2.1 单边耗尽范德华异质结构

由层间范德华力结合而形成的双边耗尽结, 虽然可以有有效的降低暗电流, 但是由于严重的隧穿辅助界面复合效应和低效接触, 这些二维材料的量子效率依然很低。此外, 在双边耗尽结中, 光生电子和空穴都需要穿过异质界面, 很容易被俘获导致响应速度变慢。吴峰等^[23]利用单边耗尽区的能带设计思路, 选择窄带隙的 AsP 材料作为载流子的选择性接触, 制备了高效的 MoS₂/AsP 异质 pp⁺结光电二极管, 器件图如图 5(a) 所示。薄层 MoS₂ 是典型的 n 型半导体, 但由于杂质诱导或缺陷诱导的掺杂效应, 厚层 MoS₂ 展现出弱 p 型的性质, 能带图如图 5(b) 所示。为证明形成了单边耗尽结, 吴等人测量了器件的输出特性曲线, 如图 5(c) 黑色曲线所示。正常的薄层 MoS₂ 和 AsP 形成的 pn 结, pn 结区内建电场的方向是由 MoS₂ 指向 AsP。而此器件由于 AsP 一侧空穴积累, MoS₂ 侧空穴耗尽, 电场方向是由 AsP 指向 MoS₂, 与图 5(c) 黑色曲线结果一致。当 $V_{ds}<-0.5\text{ V}$, 异质结形成的势垒下降, 空穴容易注入到 MoS₂ 使得器件导通; $-0.5\text{ V}<V_{ds}<0.5\text{ V}$ 时, 肖特基势垒和异质结势垒的影响下,

器件电流呈现非线性特征;当 $V_{ds} > 0.5$ V, 势垒较高, 多数载流子空穴流通受阻, 电流维持在较小水平。吴进一步通过红外光响应再次证明单边耗尽结的产生。pn 结形式的 MoS_2/AsP , 由于导带偏移较小, AsP 中的光生电子很容易穿过异质界面, 从而在这种 pn 结

形式的 MoS_2/AsP 异质结中形成负短路电流, 在 1500 nm 和 2000 nm 都有较明显的响应; 而 p^+p 单边耗尽异质结中, 光生空穴被偏移较大的价带所阻挡, 导致在 1500 nm 已经没有红外响应。利用这一点, 吴再次验证了 p^+p 单边耗尽异质结的形成。

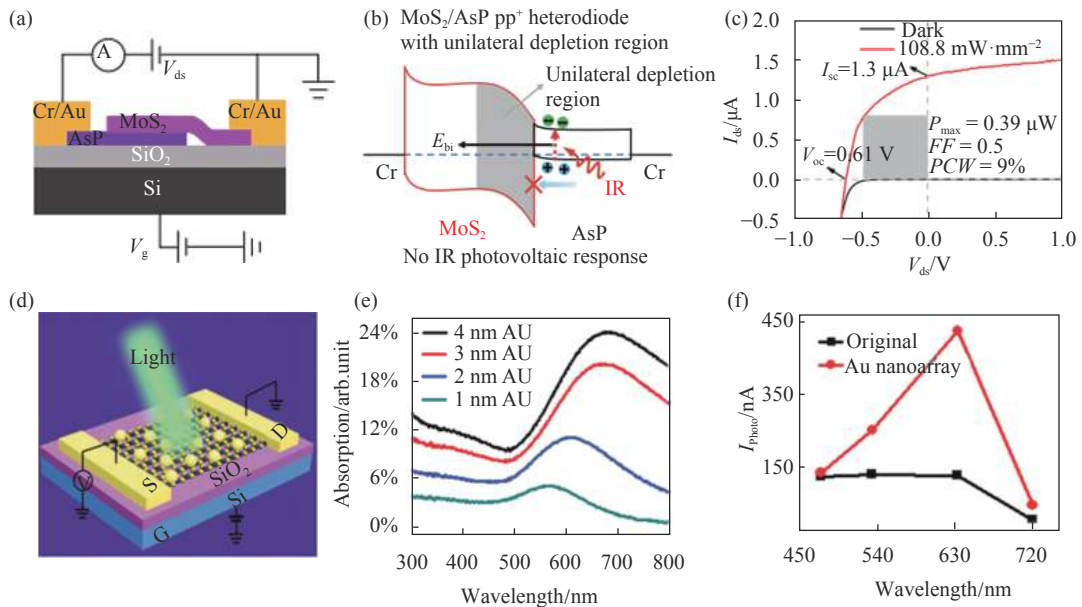


图 5 (a) MoS_2/AsP 器件结构图; (b) MoS_2/AsP 单边异质结能带图; (c) 暗态和 520 nm 光照下响应曲线; (d) 用 Au 纳米颗粒修饰的少层 MoS_2 光电晶体管示意图; (e) 不同纳米尺寸金颗粒对光的吸收; (f) 不同波长下金纳米板修饰后与不加纳米板的少层 MoS_2 光电流

Fig.5 (a) MoS_2/AsP device structure diagram; (b) MoS_2/AsP unilateral heterojunction band diagram; (c) Response curve under dark state and 520 nm laser irradiation; (d) Few layers modified with Au nanoparticles schematic diagram of MoS_2 phototransistor; (e) Absorption of light by gold particles of different nano-sizes; (f) Photocurrent of few layers of MoS_2 modified with gold nanoplates and without nanoplates at different wavelengths

虽然 AsP 的红外响应被抑制, 但是在 520 nm 下 MoS_2 有明显的光响应, 如图 5(c) 红色曲线所示, 此时光生电子-空穴对产生于 MoS_2 沟道中。在单边耗尽结较大的内建电场的的作用下, 光生电子可以自由移动到 AsP 侧被漏极吸收, 同时光生空穴可以被源极吸收, 表现出了明显的光伏响应, 获得了 1.3 μA 的短路电流和 0.61 V 的大开路电压。零偏下, 光电流与暗电流之比超过了 1×10^6 , 展现了超高的信噪比。虽然这种方式会损失小部分能量 (大约 0.25 eV/光子), 但是光生电子-空穴对的复合被极大地抑制了, 从而提高了载流子的收集效率和量子效率。经计算, 此器件的量子效率最高可达到 71%, 功率转换效率也达到了创记录的 9%。由于单边耗尽结降低了界面陷阱的影响, 此器件的响应时间也有了极大地改善, 上升/下降

时间为 9 $\mu\text{s}/5 \mu\text{s}$, 是目前二维光伏探测器最快的响应时间。

2.2 表面等离子激元增强结构

表面等离子激元是指金属表面的自由电子与外界入射电磁波相互作用, 形成电磁振荡模式。若入射光与远小于入射光波长的金属纳米颗粒相互作用, 金属纳米颗粒的表面自由电子将随着光的振动而振荡。当入射光的频率与金属电子集体共振的频率相等时, 光将被强烈的吸收或者散射, 即局域表面等离子激元共振。通过这种设计人工光子结构可以实现对光场流动和分布的操控, 能把入射的行波光场耦合成为局域光场, 在局域范围内聚集入射光的能量。因此通过集成人工光子结构可以实现外界入射电磁波的高效聚焦, 通过减薄吸收层厚度, 缩小光敏元面积进一步降

低器件暗电流。苗金水等^[24]通过设计纳米金颗粒微结构有效的改善了薄层 MoS₂ 的光吸收,如图 5(d) 所示。表面电子振荡和散射使光被捕获在 Au 颗粒的周围,导致局域电场的增强,有效的改善了光吸收,增强光响应。该工作在玻璃上设计了尺寸为 1、2、3、4 nm 的金颗粒,在 300~800 nm 的光范围内,随着尺寸的增加光吸收率增加且吸收曲线发生红移,如图 5(e) 所示,在 680 nm 左右吸收率达到最大,为 24%。入射光为 632 nm 时,光电流是不加金颗粒修饰器件的 2 倍。为了进一步理解此工作中的局域等离子体共振效应,苗设计了规则金纳米板阵列,在 632 nm 激光下获得了 3 倍于不加金纳米板器件的光电流,如图 5(f) 所示。最后苗利用 COMSOL 计算单个金纳米板附近的电场分布,模拟出了入射光波长与等离子体共振强度的函数关系,在 630 nm 附近出现明显的等离子体共振峰,较好的符合了实验结果。

3 应用探索

3.1 二维材料阵列器件与红外成像

多色探测技术由于能获取多波段的信息从而提高复杂环境下的分辨能力而受到了极大的关注,在遥感、矿产勘查、生物医学、救援等领域得到了广泛的应用。其中,双色探测技术一直是国内外研究的重点。在过去的几十年间,通过引入量子点、超晶格等新材料已经在此方面实现了巨大的进步。二维材料优秀的光电性质也使得它也成为具有潜力的双色探测的候选者之一。王鹏等^[25]通过利用分子外延技术(MBE)采用逐层外延的生长方式,在 n 型 GaSb 衬底上直接沉积了晶片尺寸的多层 GaSe,形成垂直异质结结构,实现二维材料双波段探测的阵列结构,如图 6(a) 所示。为了更好地理解垂直异质结的形成,王等人利用第一性原理在 GaSb 衬底上生长二维材料 GaSe 进行模型仿真,并模拟氢原子进行钝化,通过最小化 Hellmann-Feynman 力使 GaSb 和 GaSe 表面松弛。通过计算表明 GaSe 和 GaSb 衬底的电子重合程度可忽略不计,这与测得的 GaSe-GaSb 之间微弱的相互作用力对应。此外,Raman 光谱表示在异质结中存在两种材料的特征峰,表明二维材料异质结通过范德华力相结合。

该工作利用 8 μW 超连续白光作为激发光源进行

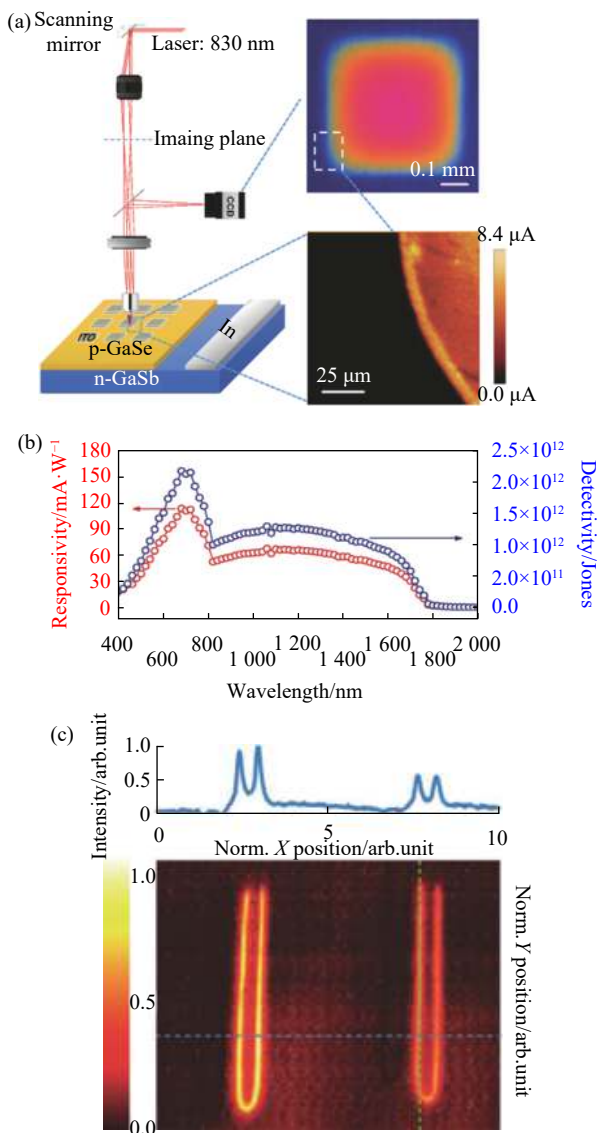


图 6 (a) GaSe/GaSb 垂直异质结面阵; (b) 光谱分辨光响应谱; (c) 异质结双波段成像结果

Fig.6 (a) GaSe/GaSb vertical heterojunction area array; (b) Spectral-resolved light response spectrum; (c) Heterojunction dual-band image

了光谱分布光电流扫描测试,得到了异质结光电探测器响应光谱范围和响应率分布,结果如图 6(b) 所示。由于 GaSb 和 GaSe 都具备高效率吸收的特点,因此在两者共同的吸收区内是光电流的叠加。而在红外区域,由于光子能量小于 GaSe 带隙,光电流全部由 GaSb 产生。接着,为了更好地展现 GaSe-GaSb 在实际应用中的优越性,研究还利用掩膜版设计了间距为 0.5 mm 的周期间距的线列探测器,通过调整阵列中每个单元的信号放大倍数,尽可能的保证每个单元器件的光敏

元响应趋于一致。然后用此异质结器件代替相机的 CCD,通过一维推扫的方式实现对辐射目标 U 形管的成像。最后,该工作进一步证明了此异质结构的双色探测的应用潜力,如图 6(c) 所示。通过分束镜(透射:反射=1:1)将光束分路,利用红外带通滤波片和可见光带通滤波片(两个滤光片光谱隔断点在 780 nm),实现了可见光(左侧)和红外光(右侧)成像。图 6(c) 可以明显的观察到加热的 U 型目标的成像,显示了 GaSe-GaSb 双波段探测的潜力。

3.2 红外偏振探测与成像

偏振包含了物体方位、粗糙程度等关键信息,偏振红外成像系统对于天文学、生物诊断、国家安全和工业应用的发展具有重要意义。部分二维材料因其各向异性明显,已经展露出了在偏振光成像领域良好的潜力。叶镭等^[26]利用二维晶体碲烯(Te)构造光导性红外探测器,实现了室温中红外偏振成像。Te 烯是一种各向异性窄带隙半导体,在可见光到中红外(0.5~3.0 μm)都有着较强的光-物质相互作用。叶等人利用液相法制备了厚度为 27 nm 的二维材料 Te 烯及其晶体管。在 3.0 μm 波长红外光的辐照下,器件响应

率为 $3.54 \times 10^2 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$,比探测率为 $3.01 \times 10^9 \text{ Jones}$,展现了优异的中波红外探测性能,这得益于 Te 烯的室温高迁移率和短沟道长度。此外,位于 Te 烯晶体内部的缺陷也可以通过带尾光生载流子的浅态来贡献光电导增益。研究还发现在不同栅压下,用不同光功率的光照射,器件在 5.9 eV 的中性点栅压下均可实现最大净光电流,表明了器件的光响应不是由于 photogating 效应而引起的。进一步,该工作对器件在不同偏振方向入射光下的光电流进行了表征,发现即使是光电流最弱的偏振方向(0°和 180°),器件依然有着明显的光电流。在 520 nm 和 1.55 μm 光照下,各向异性比可达到 2.55 和 2.39,并且在 2.3 μm 的光照下,获得了 7.58 的各向异性比,表示此器件拥有在不借助偏振片的情况下实现偏振成像应用的潜力。最后,叶等人进一步研究了 Te 烯红外探测器单元器件的二维扫描成像及其偏振成像。如图 7(a) 所示,照射到光电探测器上的信号近似于线偏振光,通过旋转光电探测器可以收集不同方向的偏振光电流以计算 DoLP 值。

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (5)$$

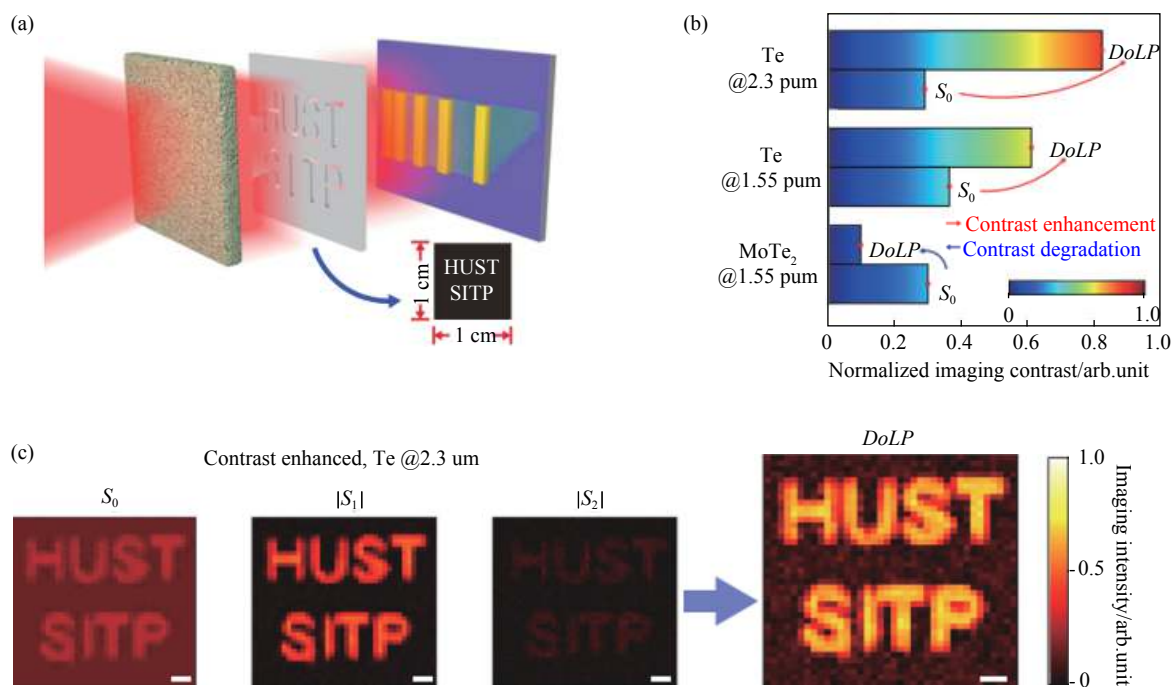


图 7 (a) 成像目标示意图; (b) 波长为 1.55 μm 的光对非偏振 2H-MoTe₂ 器件和 Te 烯光电探测器的 DoLP 成像结果进行比较; (c) 波长为 2.3 μm 光照下 Te 烯光电探测器成像结果

Fig.7 (a) Schematic diagram of imaging target; (b) Comparison of DoLP imaging results of unpolarized 2H-MoTe₂ device and Te photodetector under the light of 1.55 μm wavelength; (c) The imaging results of Te photodetector under the light of 2.3 μm wavelength

$$S_0 = I_{0^\circ}(x, y) + I_{90^\circ}(x, y) \quad (6)$$

$$S_1 = I_{0^\circ}(x, y) - I_{90^\circ}(x, y) \quad (7)$$

$$S_2 = I_{45^\circ}(x, y) - I_{135^\circ}(x, y) \quad (8)$$

式中: $I_\theta(x, y)$ 是指在 θ 角度检测到的极化强度。对于传统焦平面分光计结构, 需要至少四个像素单元来获得 $DoLP$ 的值。意味着一幅 $m \times n$ 的偏振图像, 需要一个 $2m \times 2n$ 的面阵器件。而对于 Te 烯光电探测器, 单像素就足以检测一个 $DoLP$ 的数据, 即仅仅 $m \times n$ 的面阵器件就可以获取 $m \times n$ 的 $DoLP$ 偏振图像。在实际

应用中, 可以通过更少的像素单元来实现传统焦平面分光计结构同样的分辨率, 从而更容易实现更高分辨率的成像。为了显示 Te 烯偏振光电探测器的优势, 将其与无偏振能力的 2H 相 $MoTe_2$ 的偏振成像进行对比, 结果如图 7(b) 所示, Te 烯偏振光电探测器在计算 $DoLP$ 后显示出了更好的对比度。而在 $2.3 \mu m$ 波长, $1 mW$ 的光照射下, 成像结果如图 7(c) 所示, 展现了 Te 烯二维半导体在中波红外的偏振探测能力。

最后, 部分新型二维半导体材料红外探测器领域所取得的前沿进展如表 1 所示。

表 1 二维材料红外探测器性能总结

Tab.1 Summary of performance of two-dimensional material infrared detectors

Materials	Wavelength/nm	$R/A \cdot W^{-1}$	$D^* / Jones$	QE	Time(Rise/down)	Bias/V	Other	Ref.
MoS ₂ /PVDF	500-1550	2570	2.2×10^{12}		1.8 ms/2.0 ms	0.1		[17]
ZnO/PVDF	375	3.8×10^5	4.4×10^{15}		280 ms/440 ms	1		[18]
b-AsP	2400-8050	0.18		6.1%	0.54 ms/0.52 ms	0		[19]
b-AsP/MoS ₂		0.2161	9.2×10^9	11.36%		0		[19]
WSe ₂	500-1000	0.08		20%	200 μs /16 μs	0		[21]
AsP/MoS ₂	520			71%	9 μs /5 μs	0		[23]
MoS ₂	300-800						24% (Absorption)	[24]
GaSe/GaSb	400-1 800	0.115	2.2×10^{12}	50%	32 μs /24 μs	0	Dual-band detection	[25]
Te	520-3000	354	3.01×10^9		48.7 μs /62.7 μs		Polarization imaging	[26]
WSe ₂ (CVD)	500-900	3.5×10^5	1×10^{14}		23 ms	2		[27]
WSe ₂ /SnS ₂	400-900	244	1.29×10^{13}		13 ms/24 ms	-1		[28]
MoS ₂ /b-p	532-1 550	22.3	3.1×10^{11}		15 μs /70 μs	3		[29]
MoS ₂ /Graphene/WSe ₂	400-2400	1×10^4	1×10^{15}		53.6 μs /30.3 μs	1		[30]

4 总结与展望

二维材料发展日新月异, 其在电子、光电子器件方面已经展示出优异的性能, 突破了很多传统材料和物理的极限, 是实现低成本、高性能、柔性可穿戴以及非制冷红外探测器的一条可行的技术路线。一方面, 由于器件体积显著降低, 与器件有效传输体积成正比的本征暗电流将大大降低, 同时载流子被限制在二维面内且极易被局域电场调控, 进一步降低器件暗电流, 因此, 在室温就可实现高信噪比光电探测; 另一方面, 区别于传统体材料, 二维材料层间范德华力结合的特点降低了因晶格失配引起的界面缺陷与表面漏电等, 更易形成高质量 PN 结、异质结构, 为红外光电探测提供了新的思路。

新型二维材料的尺寸效应使其易于进行电子操控, 但同时也是导致其吸收率及量子效率低的主要原因, 限制了其在光电探测领域的进一步发展。传统意义上认为, 探测材料太薄不利于光电过程的最大化输出, 材料本身的光信号损失无形中设置了器件量子效率上限。因此, 在传统器件结构设计中需确保足够的吸收层厚度以保证探测效率最大化。在此方面传统薄膜材料较为成熟, 但现有水平仍不能满足业界不断增长的性能需求, 仍在寻求进一步优化, 例如近些年兴起利用人工光子结构引入表面等离激元, 实现光场局域提高量子效率; 但是传统薄膜器件结构较为复杂, 吸收层在器件表面下方几个乃至几十个微米的深度, 使得这种人工光子结构集成的光电探测器增强方

法在具体设计实现中十分困难。幸运的是,二维材料又同时受益于其尺寸效应,只需将光场局域在器件近表面就能使得光信号被探测材料充分吸收并形成较大光信号。在这样的背景下,二维材料的小尺寸效应或纳米级尺寸将成为人工光学调控手段的利好因素。总的来说,基于人工光子结构的光场局域模式(把入射的辐射光场耦合成局域光场)是增强二维半导体光电器件探测灵敏度的有效办法,亦是本领域重要发展方向之一。

此外,国际上对于大面阵、长线列的二维材料红外探测器报道甚少,如何实现高质量大面积二维材料的制备是本领域由简单单元器件向规模阵列化芯片发展亟需解决的现实瓶颈问题。究其原因,二维材料原子级、纳米级的纵向尺度使得在生长和转移过程中难以避免的引入大量界面态缺陷及损伤,使得二维材料难以实现大尺度范围内原子级平整且异质接触差,严重限制了二维材料红外探测器向大规模器件方向的发展。实际上,这不仅仅取决于二维材料生长工艺、装置以及流片工艺,更重要的是需要从基础物理上澄清界面态、缺陷态的形成机制与调控方法,建立可调可控的二维半导体材料与光电探测器件的研制技术,这些是二维半导体红外光电探测领域发展的基石。可以预见的是,基于二维半导体材料的红外探测器技术有望引发电探测技术的跨越发展,突破现有红外光电探测器在低成本、高工作温度、柔性以及高性能方面不能兼顾的现实瓶颈,为新一代红外探测器提供新思路和新方案。

参考文献:

- [1] Hu W D, Li Q, Chen X S. Recent progress on advanced infrared photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(12): 120701. (in Chinese)
胡伟达, 李庆, 陈效双, 等. 具有变革性特征的红外光电探测器[J]. *物理学报*, 2019, 68(12): 120701.
- [2] Long M, Wang P, Fang H, et al. Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(19): 201803807.
- [3] Cai S, Xu X, Yang W, et al. Materials and designs for wearable photodetectors [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(18): 201808138.
- [4] Wang P, Xia H, Li Q, et al. Sensing infrared photons at room temperature: from bulk materials to atomic layers [J]. *Small*, 2019, 15(46): 201904396.
- [5] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, et al. Graphene photonics and optoelectronics [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(9): 611-22.
- [6] Guo N, Xiao L, Gong F, et al. Light-driven WSe₂-ZnO junction field-effect transistors for high-performance photodetection [J]. *Advanced Science*, 2020, 7(1): 201901637.
- [7] Mak K F, Shan J. Photonics and optoelectronics of 2D semiconductor transition metal dichalcogenides [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(4): 216-26.
- [8] Tu L, Cao R, Wang X, et al. Ultrasensitive negative capacitance phototransistors [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): s41467.
- [9] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, et al. Single-layer MoS₂ transistors [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(3): 147-50.
- [10] Wang Y, Wu P, Wang Z, et al. Air-stable low-symmetry narrow-bandgap 2D sulfide niobium for polarization photodetection [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(45): 202005037.
- [11] Shi Z, Cao R, Khan K, et al. Two-dimensional tellurium: progress, challenges, and prospects [J]. *Nano-Micro Letters*, 2020, 12(1): s40820.
- [12] Wang X, Shen H, Chen Y, et al. Multimechanism synergistic photodetectors with ultrabroad spectrum response from 375 nm to 10 μm [J]. *Advanced Science*, 2019, 6(15): 201901050.
- [13] Wang Z, Wang P, Wang F, et al. A noble metal dichalcogenide for high-performance field-effect transistors and broadband photodetectors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(5): 201907945.
- [14] Wu F, Xia H, Sun H, et al. AsP/InSe Van Der Waals tunneling heterojunctions with ultrahigh reverse rectification ratio and high photosensitivity [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(12): 201900314.
- [15] Xu Y, Shi Z, Shi X, et al. Recent progress in black phosphorus and black-phosphorus-analogue materials: properties, synthesis and applications [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(31): 14491-527.
- [16] Luo Man, Wu Feng, Zhang Lili, et al. Detection of polarized light using two-dimensional atomic materials [J]. *Journal of Nantong University (Natural Science Edition)*, 2019, 18(3): 1-10. (in Chinese)
罗曼, 吴峰, 张莉丽, 等. 二维材料偏振响应光电探测[J]. *南通大学学报(自然科学版)*, 2019, 18(3): 1-10.
- [17] Wang X, Wang P, Wang J, et al. Ultrasensitive and broadband MoS₂ photodetector driven by ferroelectrics [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(42): 6575-6581.
- [18] Wang P, Wang Y, Ye L, et al. Ferroelectric localized field-

- enhanced ZnO nanosheet ultraviolet photodetector with high sensitivity and low dark current [J]. *Small*, 2018, 14(22): e180042.
- [19] Long M, Gao A, Wang P, et al. Room temperature high-detectivity mid-infrared photodetectors based on black arsenic phosphorus [J]. *Science Advance*, 2017, 3(6): e1700589.
- [20] Bullock J, Amani M, Cho J, et al. Polarization-resolved black phosphorus/molybdenum disulfide mid-wave infrared photodiodes with high detectivity at room temperature [J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(3): 203-206.
- [21] Tang Y, Wang Z, Wang P, et al. WSe₂ photovoltaic device based on intramolecular p-n junction [J]. *Small*, 2019, 15(12): e1805545.
- [22] Kim S, Myeong G, Shin W, et al. Surface plasmon-enhanced photodetection in few layer MoS₂ phototransistors with Au nanostructure arrays [J]. *Nature Nanotechnology*, 2020: 203-206.
- [23] Wu F, Li Q, Wang P, et al. High efficiency and fast van der Waals hetero-photodiodes with a unilateral depletion region [J]. *Nature Communication*, 2019, 10(1): 4663.
- [24] Miao J, Hu W, Jing Y, et al. Surface plasmon-enhanced photodetection in few layer MoS₂ phototransistors with Au nanostructure arrays [J]. *Small*, 2015, 11(20): 2392-2398.
- [25] Wang P, Liu S, Luo W, et al. Arrayed Van Der Waals broadband detectors for dual-band detection [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(16): 201604439.
- [26] Tong L, Huang X, Wang P, et al. Stable mid-infrared polarization imaging based on quasi-2D tellurium at room temperature [J]. *Nature Communication*, 2020, 11(1): 2308.
- [27] Zhang W, Chiu M H, Chen C H, et al. Role of metal contacts in high-performance phototransistors based on WSe₂ monolayers [J]. *Acs Nano*, 2014, 8(8): 8653-8661.
- [28] Zhou X, Hu X, Zhou S, et al. Tunneling diode based on WSe₂/SnS₂ heterostructure incorporating high detectivity and responsivity [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(7): 201703286.
- [29] Ye L, Li H, Chen Z, et al. Near-infrared photodetector based on MoS₂/black phosphorus heterojunction [J]. *Acs Photonics*, 2016, 3(4): 692-629.
- [30] Long M, Liu E, Wang P, et al. Broadband photovoltaic detectors based on an atomically thin heterostructure [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2254-2259.



第一作者简介：许航瑀 (1997-)，男，2019 年于电子科技大学，获得电子科学与技术专业学士学位，目前在中国科学院上海技术物理研究所攻读微电子学与固体电子学专业硕士学位。主要从事二维半导体材料红外探测器的器件研究，负责黑磷等窄带隙二维半导体光电器件制备以及光电性能调控与表征等工作。



导师简介：王鹏 (1989-)，男，博士，中国科学院青年创新促进会、上海市青年科技英才、国家自然科学基金等项目负责人。2018 年 7 月至今工作于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。主要从事红外探测机理、器件与应用研究，近 5 年发表 SCI 论文 60 余篇。担任 Chinese Physics Letters、Chinese Physics B、《物理学报》和《物理》中国物理学会四刊联合青年编委。