Research Progress of Mid-Infrared Photodetectors Based on Two-Dimensional Materials*

BING Dan[1*], CUI Yueying[2], SONG Junming[2], ZHAO Weiwei[2]
(1.Department of Fundamental Education, Nanjing Tech University Pujiang Institute, Nanjing Jiangsu 211222, China;
2.School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu 210023, China)

Abstract: High performance mid-infrared photodetectors play an irreplaceable role in optical communications, security surveillance, and biomedical imaging. In recent years, with continuous technological advances, two-dimensional (2D) materials have demonstrated tremendous potential for mid-infrared photodetection. Owing to their unique physical properties, such as tunable bandgaps and excellent electrical and optical characteristics, 2D materials exhibit outstanding performance in mid-infrared photodetectors. Significant progress has been made in the development of mid-infrared photodetectors based on 2D materials in recent years. The latest research achievements in this field are systematically reviewed, with a focus on the application progress of 2D materials in mid-infrared photodetection and future development trends.

Key words: mid-infrared photodetectors; optoelectronic devices; two dimensional materials; graphene; two dimensional heterostructures
EEACC: 4250; 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.001

二维材料中红外光电探测器研究进展*

邴 单[1*], 崔月赢[2], 宋俊明[2], 赵伟玮[2]
(1.南京工业大学浦江学院基础教学部, 江苏 南京 211222; 2.南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 高性能中红外光电探测器在光通信、安全监控、生物医学成像等领域具有不可替代的重要作用。近年来, 随着技术的不断进步, 二维材料在中红外光电探测应用中展现出了巨大的潜力。二维材料凭借其独特的物理特性, 如可调节的带隙、优异的电学和光学性质, 使其在中红外波段的光电探测器中表现出卓越的性能。近年来, 基于二维材料的中红外光电探测器研究取得了快速进展。系统总结了该领域的最新研究成果, 重点探讨了二维材料在中红外光电探测中的应用进展和未来发展趋势。

关键词: 中红外光电探测器; 光电器件; 二维材料; 石墨烯; 二维异质结构
中图分类号: TN215; TP212.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0721-07

中红外光谱区域是指 2 μm 至 25 μm 的光谱区域, 涵盖了多种气体、液体和固体分子振动和转动的特征“指纹”光谱和三个大气透射窗口(2.0 μm~2.5 μm、3.5 μm~5.0 μm 和 8.0 μm~14.0 μm)[1-3]。中红外光电探测器是一类专门用于探测中红外光的电子器件, 广泛应用于多个领域, 涵盖从温度监测到复杂的气体分析及环境监测。这是因为中红外波段的光波主要来自物体的热辐射, 尤其是在室温或更高温度下, 物体释放的主要能量集中于该波段。这使得中红外探测器能够以非接触方式精确感知热源, 成为低可见度环境下成像和分析的重要工具, 如在夜间监控、恶劣天气条件下的导航、国防安全以及医疗诊断中的热成像等场景中都有重要应用[4-7]。当前使用的中红外探测器材料包括碲镉汞(HgCdTe)、锑化铟(InSb)和硅基探测器等[8-9]。这些材料虽然已经在中红外探测器件中占据主导地位, 但它们面临一系列技术瓶颈。首先, 传统探测器制造成本较高, 工艺复杂, 通常需要在低温环境下工作[9]。其次, 传统材料的响应速度相对较慢, 灵敏度也有限, 尤其是在对精度要求更高的场景下, 这种性能不足变得尤为突出[9-10]。因此, 研究人员一直在探索新型材料, 以突破这些技术局限。

为了解决这些问题, 二维材料的引入为中红外光电探测器的发展注入了新的活力。自石墨烯发现

项目来源: 2024 年江苏本科高校“理工类公共基础课程教学改革研究”专项课题项目(2024LGJK061); 山东大学晶体材料国家重点实验室开放课题(KF25)
收稿日期: 2026-01-12 **修改日期**: 2026-02-26

以来,二维材料因其独特的物理和化学特性,吸引了广泛的关注。石墨烯、过渡金属硫化物(如二硒化铂 $PtSe_2$、二碲化钼 $MoTe_2$)等二维材料,凭借其在光电领域的优势,如可调节的带隙、极高的载流子迁移率、原子级超薄结构等,在光电探测器中展现出广阔的应用潜力[2,11-13]。这些材料能够在室温下实现高效的光电转换,解决了传统材料在常温下性能下降的问题。此外,二维材料的灵活性和可调节性使得探测器能够覆盖多个光谱范围,进一步提高了探测的灵敏度和响应速度,满足了高精度检测的需求[14]。随着二维材料合成和制备技术的进步,基于这些材料的红外探测器在多个前沿领域展示了巨大的应用前景。例如,在低功耗器件、柔性电子器件和高度集成化的光电系统中,二维材料展现出不可替代的优势,它们不仅能够显著降低功耗,还能够实现探测器的小型化和集成化,特别是在便携设备中具备广泛的应用可能性[15-16]。此外,二维材料与传统材料的结合,也为开发性能更优异的中红外探测器提供了新的思路[17-18]。因此,随着对二维材料性能理解的深入及其大规模应用技术的成熟,二维材料有望推动中红外光电探测器从实验室阶段走向实际应用,进一步革新红外探测技术。

1 基于二维材料的中红外光电探测器

基于二维材料的中红外光电探测器凭借其独特的物理特性,如可调节的带隙、高载流子迁移率和超薄结构,成为中红外光探测领域的新兴研究热点。这类探测器能够在室温下实现高效的光电转换,克服了传统探测器对低温环境的依赖。此外,二维材料的灵活性和宽光谱响应能力,使其在高灵敏度、快速响应等性能指标上具备显著优势。

1.1 二维材料的优势

二维材料在中红外光电探测领域展现出显著的优势,特别是在宽光谱响应、超高载流子迁移率、高灵敏度、室温操作和灵活集成等方面[13,19](图 1),克服了传统探测器高成本和需低温运行的局限性,有望在室温下实现高性能、小尺寸且紧凑的集成红外探测器。具体优势如下:①宽光谱响应:许多二维材料(如石墨烯、黑磷和过渡金属硫化物等)在中远红外波段表现出优异的光谱响应能力[14]。②超高载流子迁移率和高灵敏度:石墨烯等二维材料具有极高的载流子迁移率,能够迅速响应光信号[20-21]。此外,由于二维材料的厚度通常为单原子层或几层原子厚度,它们与入射光的相互作用极为敏感,即使是微量的光子也能引发明显的电信号变化,从而提高探测器的灵敏度。③可调性:许多二维材料的光电性能可通过外部电场、化学掺杂或应力应变进行调控。这种可调性使得探测器能够适应不同应用需求,优化在特定波段的探测能力[22]。④室温操作:与传统中远红外探测器需要低温冷却(如液氮冷却)不同,二维材料在室温下也能实现高效的光电探测[16]。⑤柔性且易集成:二维材料超薄且柔性,通过范德华(van der Waals,vdW)力结合,能够轻松集成到各种柔性电子设备中[15]。⑥低成本制造:二维材料的制备方法相对简单且低成本(如化学气相沉积法、机械剥离法等)[23],相比于传统红外探测材料如碲镉汞,具有更低的制造成本和更大的商业化潜力。这些优势不仅推动了探测技术的发展,也拓宽了光电探测器的应用场景,使二维材料成为未来中远红外光电探测器的重要研究方向和技术突破的关键,具备显著的商业化前景。

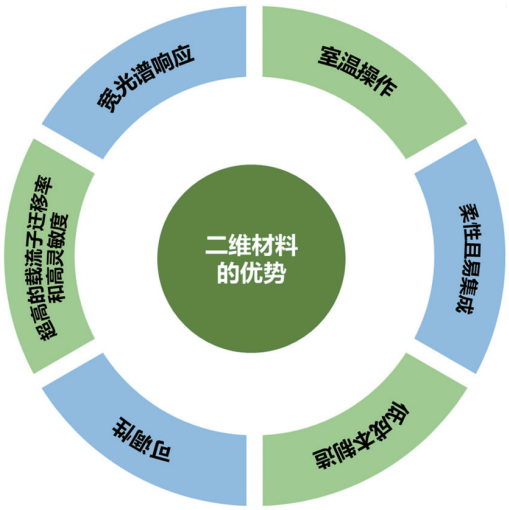


图 1 二维材料的优势

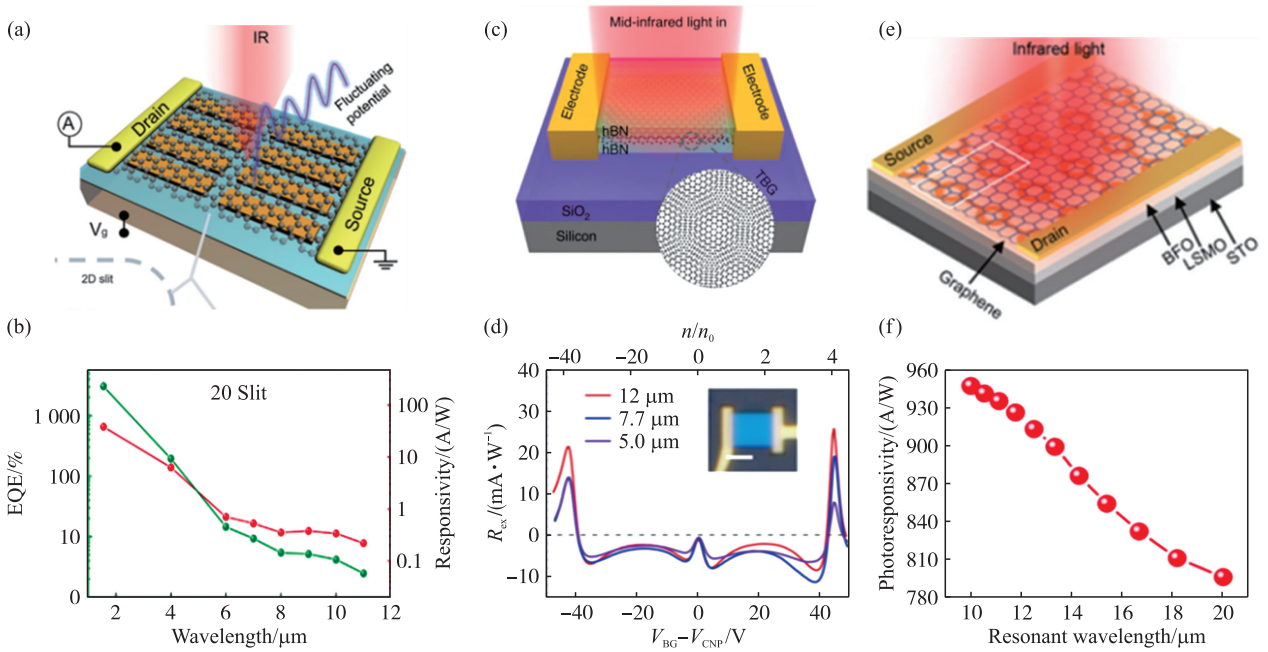
1.2 二维材料在中远红外光电探测中的应用

1.2.1 石墨烯

自 2004 年被发现以来,石墨烯凭借其独特的物理和化学特性,已经在多个领域展现出重要应用,尤其是在光电探测器领域。由于其超高迁移率、可调节的光学特性以及独特的光电响应,石墨烯成为了二维材料中备受关注的候选者,在光电器件,特别是光电探测器中显示出了广泛的应用潜力[24]。然而,石墨烯基光电探测器的应用仍面临一些挑战。由于石墨烯具有零带隙的电子结构,其固有的光吸收较弱,这导致探测器在工作时产生较大的暗电流和噪声,从而限制了设备的整体性能[17,24]。在过去的几年中,研究人员通过广泛的探索和创新设计,提出了多种优化方案,开发出基于石墨烯的多种结构形式的中红外光电探测器,取得了显著进展。

基于石墨烯的红外光电探测器具有宽检测波段和可调光谱响应的独特优势。研究表明,将二维势阱引入单层石墨烯光电探测器后,器件可在室温下实现从近红外到中红外波长(1.55 μm~11 μm)的宽带探测,响应度高达 0.2 A/W~38 A/W,同时保持较高的外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)(图 2(a)、图 2(b))[25]。对于小扭曲角(<2°)的双层石墨烯,超晶格诱导的带隙形成及其边缘态密度增强,使其在 5 μm 至 12 μm 的中红外区域表现出强光响应,在 12 μm 处达到 26 mA/W 的外部峰值响应度(图 2(c)、图 2(d))。此外,通过扭转角可有效调控超晶格诱导的带隙,从而实现对光响应强度的可控调节[26]。在探测能力增强方面,利用铁电超畴对石墨烯等离激元进行调谐的策略,实现了 10 μm~20 μm 范围内的响应度为 796 mA/W~947 mA/W(图 2(e)、图 2(f))[27]。另一项研究表明,引入Ⅱ型超晶格作为光敏剂可显著提高石墨烯光电探测器的光响应性,在长波红外范围内实现 1 500 倍的增强[28]。

石墨烯的多功能性使其成为开发先进红外传感技术的关键材料,虽然石墨烯的低固有吸光度带来了挑战,但正在进行的研究仍在继续探索混合结构和创新设计,以提高其在红外检测应用中的性能。随着技术的不断进步,石墨烯基探测器的性能和效率显著提升,在多个应用领域展现出广阔的前景。



(a)具有可配置全电介质表面的石墨烯光电探测器示意图[25];(b)在不同波长下测得的石墨烯/二维狭缝结构器件的响应度和 EQE[25];(c)h-BN 封装的扭转双层石墨烯器件示意图[26];(d)扭转双层石墨烯器件在 5.0 μm、7.7 μm 和 12 μm 光照射下的红外光响应[26];(e)铁电超畴控制的石墨烯表面等离极化激元的中红外光电探测器示意图[27];(f)室温下器件的光响应度与谐振波长的关系[27]。

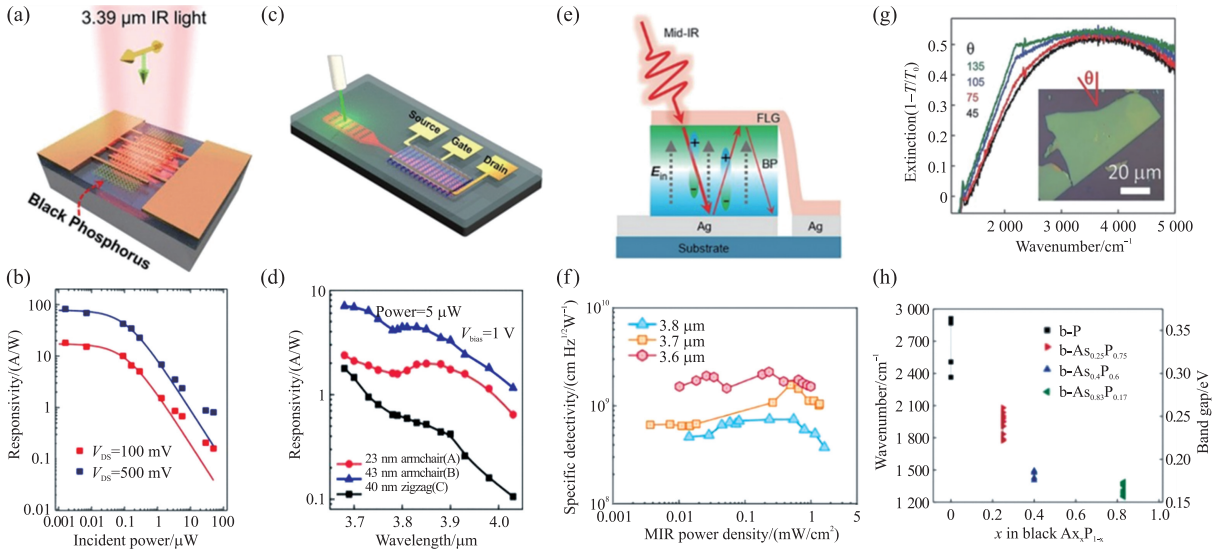
图 2　基于石墨烯的中红外光电探测器及性能。

1.2.2　黑磷和黑磷砷

除石墨烯外,黑磷(BP)也是备受关注的光电探测器材料候选者。黑磷晶体结构中磷原子呈六边形排列,每个磷原子被三个相邻的磷原子包围,形成平面六边形结构。黑磷晶体结构中的磷六元环通过共价键连接,形成二维层状结构,这种层状结构类似于石墨[29]。黑磷的带隙可以通过其层数的调整在 0.3 eV 到 2.0 eV 之间灵活调节[30],适应不同波段的光学需求。黑磷在中远红外波段具有较高的室温载流子迁移率和开/关比,这使其具有高灵敏度、快速响应速度和高效的光吸收效率以及低暗电流等优势,这对于中红外检测非常有利[31]。黑磷已被用作光吸收层,获得具有高内部增益的中红外光电探测器,在 3.39 μm 处的外部响应度高达 82 A/W(图 3(a)、图 3(b))[32]。此外,黑磷具有各向异性载流子迁移率,这意味着它在不同的晶向上具有不同的电学性质,从而在中远红外探测中可以实现对极化光的探测[32]。黑磷薄片的结构灵活性还可以与其他材料集成,制作多功能的异质结器件,绝缘硅(SOI)波导集成黑磷光电探测器利用硅波导和光栅结构中的光学限制来克服黑鳞厚度限制的吸收长度限制,在室温下表现出 3.68 μm 处 23 A/W 的高响应度和小于 1 nW/Hz$^{1/2}$ 的低噪声等效功率(图 3(c)、图 3(d))[33]。图 3(e)、图 3(f)中展示了

一种基于黑磷垂直肖特基结构的室温中红外光电探测器,通过腔增强吸收与电极优化实现高外量子效率(42%)、高探测率(2.2×10^9(cm·$Hz^{1/2}$)/W)及优异偏振敏感特性,为低功耗、高性能且具偏振成像能力的红外探测提供了新思路[34]。此外,有研究表明,通过施加垂直偏压场,黑磷的带隙可以进一步降低至零电子伏特,从而扩展了黑磷在中红外甚至太赫兹(THz)区域的光吸收带[35]。

但黑磷具有不稳定性,暴露在环境中随时间的推移会降解的问题仍需解决。为了提高黑鳞的稳定性,甚至改善其性能,可以采取合金化的手段,例如黑磷砷($B-As_xP_{1-x}$,$x=0-0.83$)。研究表明,砷原子成分最多的合金($B-As_{0.83}P_{0.17}$)的带隙为 0.15 eV,并且仍然保持着非常强的面内各向异性(图 3(g)、图 3(h))[36]。



(a)黑磷中红外光电探测器示意图[32];(b)黑磷中红外光电探测器的响应度数据[32];(c)带有黑磷光电探测器的波导集成片上系统示意图[33];(d)黑磷光电探测器的光谱响应度[33];(e)垂直黑磷肖特基光电探测器示意图[34];(f)在室温下测量黑磷光电二极管在不同波长下的特定探测率随入射光功率密度的变化[34];(g)黑磷砷在不同偏振角下的极化红外吸收光谱[36];(h)黑磷砷合金的带隙分布[36]。

图 3 基于黑磷和黑磷砷的中红外光电探测器及性能

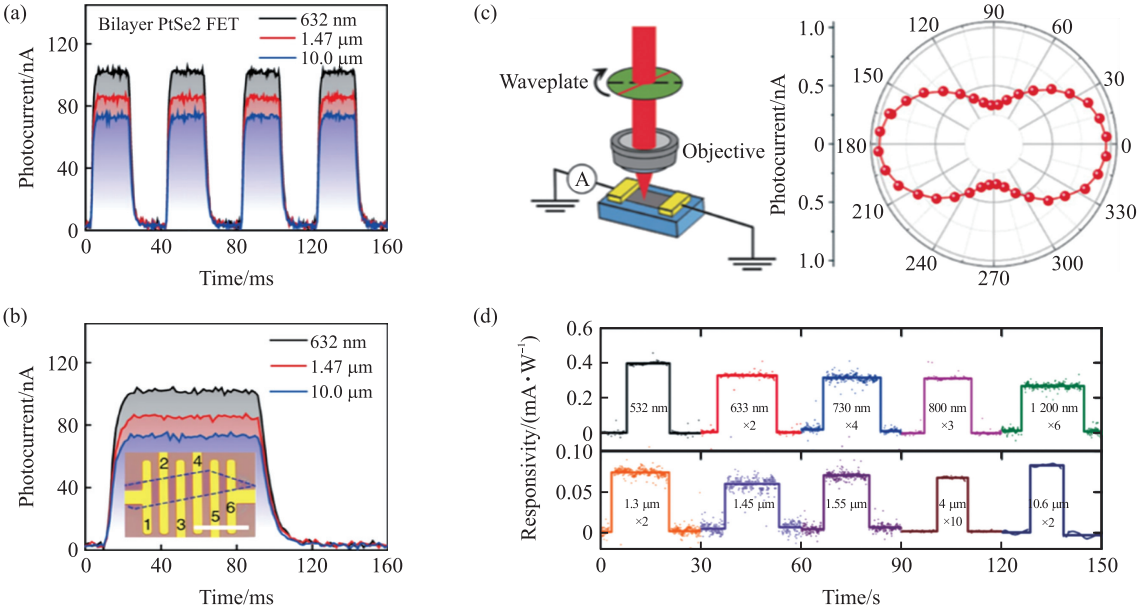
1.2.3 二维过渡金属二硫属化物

二维过渡金属二硫属化物的化学式可以写成MX_2,其中 M 为过渡金属元素,X 为硫族元素(如 S、Se、Te)。大部分二维过渡金属二硫属化物具有较大的带隙,多用于可见与近红外波段探测,但其中部分二维贵金属二硫属化物和 Weyl 半金属材料,如$PtSe_2$、PdS_2、$MoTe_2$等由于其适合中红外光子和光电应用的带隙和高环境稳定性而成为中远红外探测器的候选材料。以$PtSe_2$为例,其带隙可调,随层数可从 0 ~ 1.39 eV 进行调节,其中双层带隙仅有 0.19 eV[37],并且$PtSe_2$具有高载流子迁移率,其理论载流子迁移率可达 4 038 $cm^2/(V\cdot s)$,远高于其他二维过渡金属二硫属化物材料[38]。研究表明,双层$PtSe_2$探测器在中红外区域(λ = 10 μm)具有强光响应,响应度高达 4.5 A/W,并且具有毫秒级的快速响应(图 4(a)、图 4(b))[39]。此外,图 4(c)、图 4(d)展示了Ⅱ型 Weyl 半金属$MoTe_2$的探测性能,可以实现从 532 nm 至 10.6 μm 的宽带响应,并且在较低光子能量激发下的响应更具各向异性,其潜在探测范围可扩展到远红外和太赫兹[40]。从现有研究结果来看,尽管多数二维过渡金属二硫属化物材料主要应用于可见与近红外波段,但以$PtSe_2$、$MoTe_2$等为代表的窄带隙或拓扑特性材料凭借可调带隙和优异输运性能,在中远红外探测中展现出显著优势,为拓展中红外二维光电器件提供了重要材料基础。

1.2.4 二维异质结构

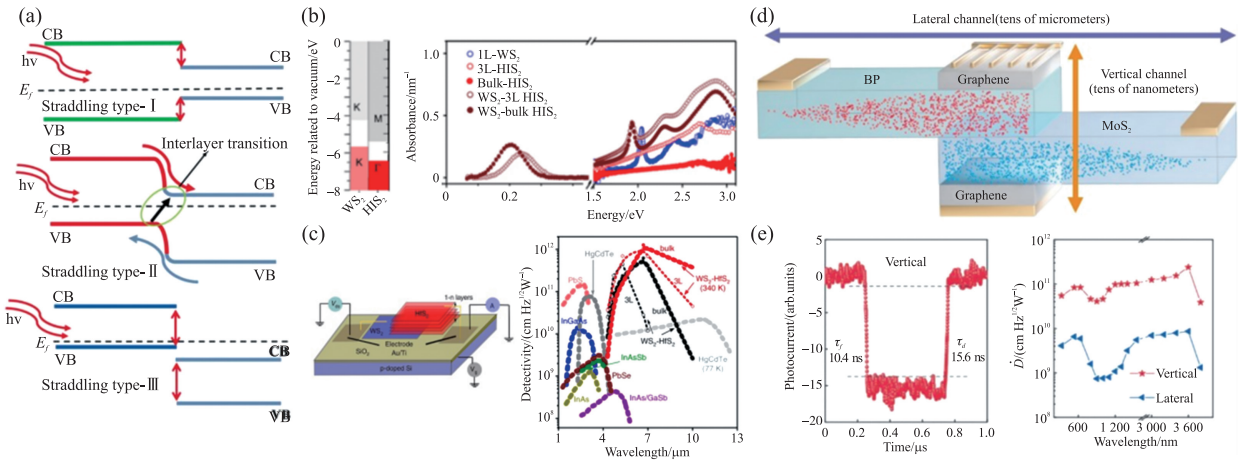
二维材料 vdW 异质结构通过堆叠可以实现具有前所未有的功能和性能的二维原子片,为构建中红外光电器件提供了一个独特的平台。这些 vdW 异质结构的一个特殊优势是二维材料的能带工程,如图 5(a)所示,通过Ⅱ型能带排列可以实现层间激子,使光谱范围超过异质结构中各个二维材料的截止波长[41],因此通过设计异质结的能带结构,可以实现中红外探测。图 5(b)展示了单层二硫化钨(WS_2)和二硫化铪(HfS_2)异质结构的能带图和吸收光谱,该结构通过Ⅱ型能带排列形成层间激子,实现了层间带隙的有效调控,可以实现 4 μm~10 μm 的宽带探测(图 5(c)),在 4.3 μm 处响应度高达 9.5×10^2 A/W[42]。将该异质结耦合到波导上可实现

全光调制，获得了 3.8 μm~5.5 μm 范围内的宽带光响应，最大响应度约为 50 μA/W，并且对波导的传输没有显著影响[43]。Wu 等[44]利用垂直传输通道（石墨烯/黑磷/二硫化钼/石墨烯），将基于二维异质结构的中红外光电探测器（图 5(d)）的探测率和响应速度提升至与商用制冷 HgCdTe 光电探测器相当甚至更优的水平，如图 5(e)所示，其中红外比探测率达到 2.38×10^{11} (cm·Hz$^{1/2}$)/W，并且在 1 550 nm 处响应时间仅为 10.4 ns。由此可见，二维 vdW 异质结构通过能带工程与层间激子调控等手段，实现了突破单一材料截止波长限制的中红外宽带响应，并在响应度、探测率及速度等方面展现出优异性能，为构建高性能中红外光电探测器提供了重要结构设计思路。



(a,b) 双层 $PtSe_2$ 光电探测器的时间分辨光响应[39]；(c) $MoTe_2$ 光电探测器在不同激发波长的室温光响应[40]；(d) 线性偏振相关光子晶体测量装置的示意图以及探测器在 10.6 μm 处线性偏振激发的各向异性光子晶体响应[40]。

图 4　基于二维过渡金属二硫属化物的中红外光电探测器



(a) 三种不同类型的能带排列；(b) WS_2 和 HfS_2 的能带图和吸收光谱[42]；(c) WS_2/HfS_2 器件结构示意图和其比探测率与波长的关系[42]；(d) 异质结器件结构以及光生电荷载流子在垂直和横向通道器件中的扩散过程示意图[44]；(e) 器件在 1550 nm 激光照射下的响应时间以及在不同波长下的比探测率[44]。

图 5　基于二维异质结构的中红外光电探测器

2　总结与展望

综上所述，基于二维材料的中红外探测器虽仍处于前期研发阶段，但其在宽光谱响应、柔性集成及带隙可调等方面展现出的独特优势，已彰显出巨大的应用潜力。然而，要推动该技术进一步发展，目前仍面临一系列核心挑战。在材料与器件层面，二维材料的大面积均匀制备与无损稳定转移技术尚不成熟，转移

工艺引入的界面差异直接导致器件性能一致性难以保证;同时,多数二维材料的本征环境稳定性较差,使得器件长期工作稳定性不足,亟需开发高效、无损的封装策略。在探测波段拓展方面,当前研究仍多集中于近红外区域,主要受限于多数二维材料的本征带隙较宽,难以有效覆盖中红外长波波段。针对上述挑战,研究者正通过探索新型窄带隙材料、构建异质结、优化掺杂和材料生长与组装工艺等策略,进一步提高器件的稳定性、光电转换效率和光谱响应范围,为未来高性能中红外探测器的实现奠定了基础。

未来的研究方向可以集中在以下几个方面:首先,开发带隙更窄、响应范围更广的二维材料,以实现更长波长的中红外探测。其次,优化器件结构,通过引入新型异质结、纳米结构等方法,提高探测器的性能参数如响应度、噪声等。此外,二维材料与传统半导体材料的结合,也是提升器件性能的一个重要方向。最后,二维材料在大规模制备和集成方面的技术进展,也将是推动二维中红外光电探测器从实验室走向实际应用的关键因素。

综上所述,虽然基于二维材料的中红外探测器面临诸多挑战,但随着材料科学和器件技术的进步,二维材料有望在这一领域开辟出全新的应用前景。未来几年,随着技术的成熟,这一领域有望取得突破性进展,从而推动红外探测技术的进一步发展。

参考文献:

[1] Chen H, Gao L, Qin Z, et al. Recent Advances of Low-Dimensional Materials in Mid- and Far-Infrared Photonics [J]. Applied Materials Today, 2020, 21: 100800.

[2] Fang Y, Ge Y, Wang C, et al. Mid-Infrared Photonics Using 2D Materials: Status and Challenges [J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14(1): 1900098.

[3] Qi L, Xu T, Xing Z, et al. Mid-Infrared Optoelectronic Waveguide Devices with 2D Materials [J]. Advanced Physics Research, 2025, 4(1): 2400079.

[4] Walsh B M, Lee H R, Barnes N P. Mid Infrared Lasers for Remote Sensing Applications[J]. Journal of Luminescence, 2016, 169: 400-405.

[5] Kapany N S, Simms R J. Recent Developments in Infrared Fiber Optics[J]. Infrared Physics, 1965, 5(2): 69-80.

[6] Nishii J, Yamashita T, Yamagishi T, et al. Coherent Infrared Fiber Image Bundle [J]. Applied Physics Letters, 1991, 59(21): 2639-2641.

[7] Ueda T, Yamada K, Sugita T. Measurement of Grinding Temperature of Ceramics Using Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fiber[J]. Journal of Engineering for Industry, 1992, 114(3): 317-322.

[8] Madejczyk P, Gawron W, Sobieski J, et al. MCT Heterostructures for Higher Operating Temperature Infrared Detectors Designed in Poland[J]. Opto-Electronics Review, 2023, 31(special issue): e144551.

[9] Rogalski A. 7-HgCdTe Photodetectors [M]//Tournié E, Cerutti L. Mid-Infrared Optoelectronics: Materials, Devices, and Applications, Cambridge, MA, USA: Woodhead Publishing, 2019: 235-335.

[10] Lei W, Antoszewski J, Faraone L. Progress, Challenges, and Opportunities for HgCdTe Infrared Materials and Detectors [J]. Applied Physics Reviews, 2015, 2(4): 041303.

[11] Ye M, Zha J, Tan C, et al. Graphene-Based Mid-Infrared Photodetectors Using Metamaterials and Related Concepts [J]. Applied Physics Reviews, 2021, 8(3): 031303.

[12] Cheng Z Z, Zhao T, Zeng H B. 2D Material-Based Photodetectors for Infrared Imaging[J]. Small Science, 2022, 2(1): 2100051.

[13] Zhang P, Sun Y, Sun J, et al. Progress in 2D Material-Based Infrared Photodetectors for Intelligent Vision Applications [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(36): 2502072.

[14] Yao J, Yang G. 2D material broadband photodetectors[J]. Nanoscale 2020, 12(2): 454-476.

[15] Dong T, Simões J, Yang Z. Flexible Photodetector Based on 2D Materials: Processing, Architectures, and Applications[J]. Advanced Materials Interfaces, 2020, 7(4): 1901657.

[16] An J, Zhao X, Zhang Y, et al. Perspectives of 2D Materials for Optoelectronic Integration [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(14): 2110119.

[17] Wang Y, Gu Y, Cui A, et al. Fast Uncooled Mid-Wavelength Infrared Photodetectors with Heterostructures of van der Waals on Epitaxial HgCdTe[J]. Advanced Materials, 2022, 34(6): 2107772.

[18] Liu C, Guo J, Yu L, et al. Silicon/2D-Material Photodetectors: From Near-Infrared to Mid-Infrared [J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 123.

[19] Odebowale A A, Berhe A M, Somaweera D, et al. Advances in 2D Photodetectors: Materials, Mechanisms, and Applications Micromachines [J]. Micromachines, 2025, 16(7): 776.

[20] Xu Z H, Tang L, Zhang S W, et al. 2D MoS2/CuPc Heterojunction Based Highly Sensitive Photodetectors Through Ultrafast Charge Transfer [J]. Materials Today Physics, 2020, 15: 100273.

[21] Yoshioka K, Wakamura T, Hashisaka M, et al. Ultrafast Intrinsic Optical-to-Electrical Conversion Dynamics in a Graphene Photodetector [J]. Nature Photonics, 2022, 16(10): 718-723.

[22] Lu J,Deng Z,Ye Q,et al. Promoting the Performance of 2D Material Photodetectors by Dielectric Engineering[J]. Small Methods,2022,6(2):2101046.

[23] Jia L,Wu J,Zhang Y,et al. Fabrication Technologies for the On-Chip Integration of 2D Materials[J]. Small Methods,2022,6(3):2101435.

[24] Xia F,Wang H,Xiao D,et al. Two-Dimensional Material Nanophotonics[J]. Nature Photonics,2014,8(12):899-907.

[25] Jiang H,Fu J,Wei J,et al. Synergistic-Potential Engineering Enables High-Efficiency Graphene Photodetectors for Near- to Mid-Infrared Light[J]. Nature Communications,2024,15(1):1225.

[26] Deng B,Ma C,Wang Q,et al. Strong mid-Infrared Photoresponse In Small-Twist-Angle Bilayer Graphene[J]. Nature Photonics,2020,14(9):549-553.

[27] Chen J,Li Y,Cai J,et al. Tuning of Graphene Plasmons by Ferroelectric Superdomain for Mid-Infrared Photodetector with High Responsivity[J]. Japanese Journal of Applied Physics,2023,62(8):085001.

[28] Fukushima S,Shimatani M,Oogawa S. Graphene Infrared Photodetectors Using Type-Ⅱ InAs/InGaSb Superlattices [C]//2023 SPIE Defense+Security,Orlando,FL,USA,2023,12534:125341L.

[29] Gu H,Zhang T,Wang Y,et al. 2D Compounds with Heterolayered Architecture for Infrared Photodetectors[J]. Chemical Science,2024,15(39):15983-16005.

[30] Suess R J,Leong E,Garrett J L,et al. Mid-Infrared Time-Resolved Photoconduction in Black Phosphorus[J]. 2D Materials,2016,3(4):041006.

[31] Cao R,Fan S O,Yin P,et al. Mid-Infrared Optoelectronic Devices Based on Two-Dimensional Materials beyond Graphene:Status and Trends[J]. Nanomaterials,2022,12(13):2260.

[32] Guo Q,Pospischil A,Bhuiyan M,et al. Black Phosphorus Mid-Infrared Photodetectors with High Gain[J]. Nano Letters,2016,16(7):4648-4655.

[33] Huang L,Dong B,Guo X,et al. Waveguide-Integrated Black Phosphorus Photodetector for Mid-Infrared Applications[J]. ACS Nano,2019,13(1):913-921.

[34] Dai M,Zhang X,Hu Y,et al. Vertical Black Phosphorus Photodiodes with High Quantum Efficiency for Mid-Infrared Detection at Room Temperature[J]. Advanced Functional Materials,2025,35(29):2501467.

[35] Roldán R,Castellanos-Gomez A. A New Bandgap Tuning Knob[J]. Nature Photonics,2017,11(7):407-409.

[36] Liu B,Köpf M,Abbas A N,et al. Black Arsenic-Phosphorus:Layered Anisotropic Infrared Semiconductors with Highly Tunable Compositions and Properties[J]. Advanced Materials,2015,27(30):4423-4429.

[37] Cao B,Ye Z,Yang L,et al. Recent Progress in Van der Waals 2D PtSe2[J]. Nanotechnology,2021,32(41):412001.

[38] Huang Z S,Zhang W X,Zhang W L. Computational Search for Two-Dimensional MX2 Semiconductors with Possible High Electron Mobility at Room Temperature Materials[J]. Materials,2016,9(9):716.

[39] Yu X,Yu P,Wu D,et al. Atomically Thin Noble Metal Dichalcogenide:A Broadband Mid-Infrared Semiconductor [J]. Nature Communications,2018,9(1):1545.

[40] Lai J,Liu X,Ma J,et al. Anisotropic Broadband Photoresponse of Layered Type-Ⅱ Weyl Semimetal MoTe2[J]. Advanced Materials,2018,30(22):1707152.

[41] Ahmad W,Pan L,Khan K,et al. Progress and Insight of Van der Waals Heterostructures Containing Interlayer Transition for Near Infrared Photodetectors[J]. Advanced Functional Materials,2023,33(19):2300686.

[42] Lukman S,Ding L,Xu L,et al. High Oscillator Strength Interlayer Excitons in Two-Dimensional Heterostructures for Mid-Infrared Photodetection[J]. Nature Nanotechnology,2020,15(8):675-682.

[43] Edelstein S,Indukuri S R K C,Mazurski N,et al. Waveguide-Integrated Mid-IR Photodetector and All-Optical Modulator Based on Interlayer Excitons Absorption in a WS2/HfS2 Heterostructure[J]. Nanophotonics,2022,11(19):4337-4345.

[44] Wu J,Zhang J,Jiang R,et al. High-Sensitivity,High-Speed,Broadband Mid-Infrared Photodetector Enabled by a van der Waals Heterostructure with a Vertical Transport Channel[J]. Nature Communications 2025,16(1):564.

邴　单(1981-),女,辽宁台安人,博士,副教授,主要从事低维材料的理论和实验研究,bingdan@ njpji.edu.cn;

崔月赢(1998-),女,河南鹤壁人,博士,主要从事低维材料光电探测器的实验研究。