

专题: 二维材料与未来信息器件

二维材料宽谱光电探测器研究进展*

崔月赢¹⁾ 宋俊明¹⁾ 赵伟玮^{1)2)†} 杨昉^{2)‡} 刘宏微^{2)††}倪振华¹⁾ 吕俊鹏¹⁾³⁾

1) (东南大学物理学院, 南京 211189)

2) (南京师范大学物理科学与技术学院, 南京 210023)

3) (东南大学南通海洋高等研究院, 南通 226010)

(2025年6月20日收到; 2025年9月10日收到修改稿)

随着高速成像、航空航天及光通信等领域的快速发展,对覆盖宽光谱范围且具备高性能的光电探测器需求日益迫切.二维材料因其独特的结构维度、可调的电子结构以及优异的载流子输运特性等,被视为宽谱光电探测的理想候选材料.然而,实现兼具高响应度与高速响应的宽谱探测器仍面临诸多挑战.本文首先介绍了二维材料的光电特性基础,包括带隙调控机制与光谱响应范围、载流子输运及复合过程、光吸收特性等,为理解其宽谱探测能力奠定理论基础.随后,系统地梳理了窄带隙二维材料、二维拓扑材料以及二维钙钛矿材料体系在宽谱探测中的研究进展.接下来重点探讨了异质集成、缺陷调控、光场增强以及应变调控等四类提升二维材料光电探测性能的有效途径.最后,对二维材料宽谱光电探测器在高性能、低功耗、多功能化及规模化应用方面的挑战与发展前景进行了展望,指出多种策略的协同集成有望推动新一代宽谱光电探测器的实用化进程.

关键词: 二维材料, 宽谱光电探测, 异质集成, 调控策略**PACS:** 85.60.Gz, 68.55.Ln, 68.65.-k, 73.40.Lq**DOI:** 10.7498/aps.74.20251115**CSTR:** 32037.14.aps.74.20251115

1 引言

在信息感知与智能系统快速演进的背景下,光电探测技术作为连接物理世界与信息处理系统的核心环节,其性能水平直接影响诸如遥感成像、环境监测、生命科学、智能安防、空间通信及量子信息等关键领域的系统精度与应用效率^[1-5].特别是在复杂场景下的目标识别、多模态数据融合以及全天候监测等应用需求不断增长的背景下,具有“宽光谱响应能力”的新型光电探测器成为未来发展的

重要方向.然而,实现高性能宽光谱探测往往需要集成多种功能材料,这不仅增加了光电系统的复杂性和体积,还带来了高昂的制造成本^[6].因此,真正意义上的宽光谱探测器设计远非简单扩展响应波段,而是需要在响应度、响应速度、信噪比、功耗、器件尺寸及集成能力等多个性能维度实现协同优化.传统材料和结构体系往往无法同时满足这些复杂要求,因此迫切需要探索具备结构灵活性、光电性能可调性及高度集成潜力的新型材料平台,以推动宽光谱探测器技术的突破性发展.

二维材料,作为一类由原子层堆叠构成的低维

* 国家重点研发计划(批准号: 2024YFB3211701)、山东大学晶体材料国家重点实验室开放课题(批准号: KF25)、国家自然科学基金(批准号: 62404105, 12274234, T2222011)和东南大学先进海洋研究院科研基金重点项目(批准号: KP20010003)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jianpiao1986@163.com

‡ 通信作者. E-mail: phyyf@mmu.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: phyllhw@njnu.edu.cn

材料体系, 凭借其独特的结构维度与量子限域效应, 展现出一系列优异的光电特性, 包括可调带隙、高载流子迁移率、强光吸收系数和优良的柔性可塑性^[7-10]. 特别是在光谱响应方面, 二维材料能够涵盖从紫外、可见、近红外直至中远红外乃至太赫兹波段, 展现出构建宽光谱探测器的巨大潜力^[7,11-13]. 近年来, 包括石墨烯、黑磷、过渡金属硫族化合物(TMDCs)、拓扑绝缘体、二维钙钛矿等在内的多种二维材料体系被广泛研究, 其高响应度、低噪声、高速度以及灵活器件集成方面的优越性能已初步验证.

此外, 二维材料的高度可设计性使其在构建异质结结构、缺陷调控、应力工程以及与其他维度材料协同集成方面展现出广阔的空间^[6,12], 这为多功能、智能化、可穿戴和自驱动光电探测器的研发提供了新的思路与支撑平台. 通过材料工程与器件物理的交叉创新, 不仅有望突破单一材料性能的瓶颈, 也为实现功能集成化、高稳定性与低能耗的新一代探测器奠定了基础.

然而, 尽管二维材料在宽光谱光电探测领域取得了显著的进展, 仍面临诸如光谱响应连续性不足、响应速度与灵敏度难以兼顾、器件稳定性与一致性控制困难等挑战^[14,15]. 系统地梳理该领域的研究现状、关键机制与性能调控策略, 对于推动相关技术走向实用化具有重要意义. 因此, 本文旨在综述近年来二维材料在宽光谱光电探测器领域的研究进展, 重点分析其光电响应特性、器件设计策略及优化路径, 并探讨未来可能的研究方向与面临的核心挑战, 以期为该领域的深入发展提供理论支持与研究参考.

2 二维材料的光电特性基础

二维材料因其原子级厚度所带来的量子限域效应, 展现出一系列区别于传统体材料的独特光电特性, 为其在宽光谱光电探测中的应用奠定了坚实基础. 理解这些基础物理特性对于材料选择、器件结构设计及性能调控具有重要指导意义.

2.1 带隙调控机制与光谱响应范围

二维材料的带隙特性在其光谱响应范围中起着决定性作用, 是实现宽光谱探测能力的物理基础. 二维材料具有带隙可调性, 进而在不同波段内

表现出优异的光响应能力. 如图 1 所示, 不同类型的二维材料在其单层与块体状态下呈现出各异的能带结构与带隙分布, 决定了其本征的光谱响应范围^[11]. 进一步地, 通过调控层数、应变应力、杂质掺杂、构建异质结或应用外场等方法, 可在单一材料或其复合结构中实现从紫外、可见、近红外、中红外甚至太赫兹波段的连续或跨波段探测. 因此, 带隙工程成为拓展二维材料光谱响应范围的关键路径. 通过构建异质结结构(如石墨烯/TMDCs、黑磷/TMDCs、二维钙钛矿/石墨烯等), 可实现多波段协同响应^[16]; 应力调控可调节带边缘, 实现波长响应的调控^[17,18]; 掺杂或缺陷工程可引入中间能级, 提高对长波光子的吸收效率^[19,20]; 而外场调控则能动态改变二维材料的能带结构与载流子行为, 实现响应窗口动态可调^[21,22].

综上所述, 二维材料的带隙调控机制不仅决定了其本征光谱响应边界, 也为构建跨波段、连续宽光谱响应的高性能光电探测器提供了丰富的物理和结构设计手段, 是当前宽光谱探测技术发展的核心支撑之一.

2.2 载流子输运特性与复合机制

高载流子迁移率是提升光生载流子收集效率与响应速度的关键因素. 在光电探测器中, 光生载流子的输运效率、寿命及其复合行为直接决定了器件的响应速度、信噪比、灵敏度及暗电流水平等关键性能指标. 二维材料由于其独特的晶体结构和极低维度, 展现出一系列与传统体材料显著不同的载流子输运特性.

石墨烯具有极高的载流子迁移率, 通常在 10^4 — 10^5 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 范围内^[23], 适合构建高速光电器件, 其载流子在皮秒(ps)甚至飞秒(fs)尺度内可完成迁移^[24], 极大提升了器件的瞬时响应能力. 相比之下, TMDCs 虽然迁移率(一般在 10 — 100 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ^[25,26])较低, 但在高纯度合成与界面优化条件下仍可获得良好的电荷输运性能^[26,27], 并且具备较高的光生电流增益特性^[26], 适合构建高灵敏探测器. 黑磷在厚度优化条件下的迁移率可达 10^2 — 10^3 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ^[28,29], 结合其带隙可调与各向异性导电特性^[30], 在中红外高性能探测器中具有极大应用前景. 部分研究还表明, 通过低温或栅控等手段, 可进一步提升黑磷迁移率^[31,32], 有助于降低暗电流并增强噪声抑制能力.

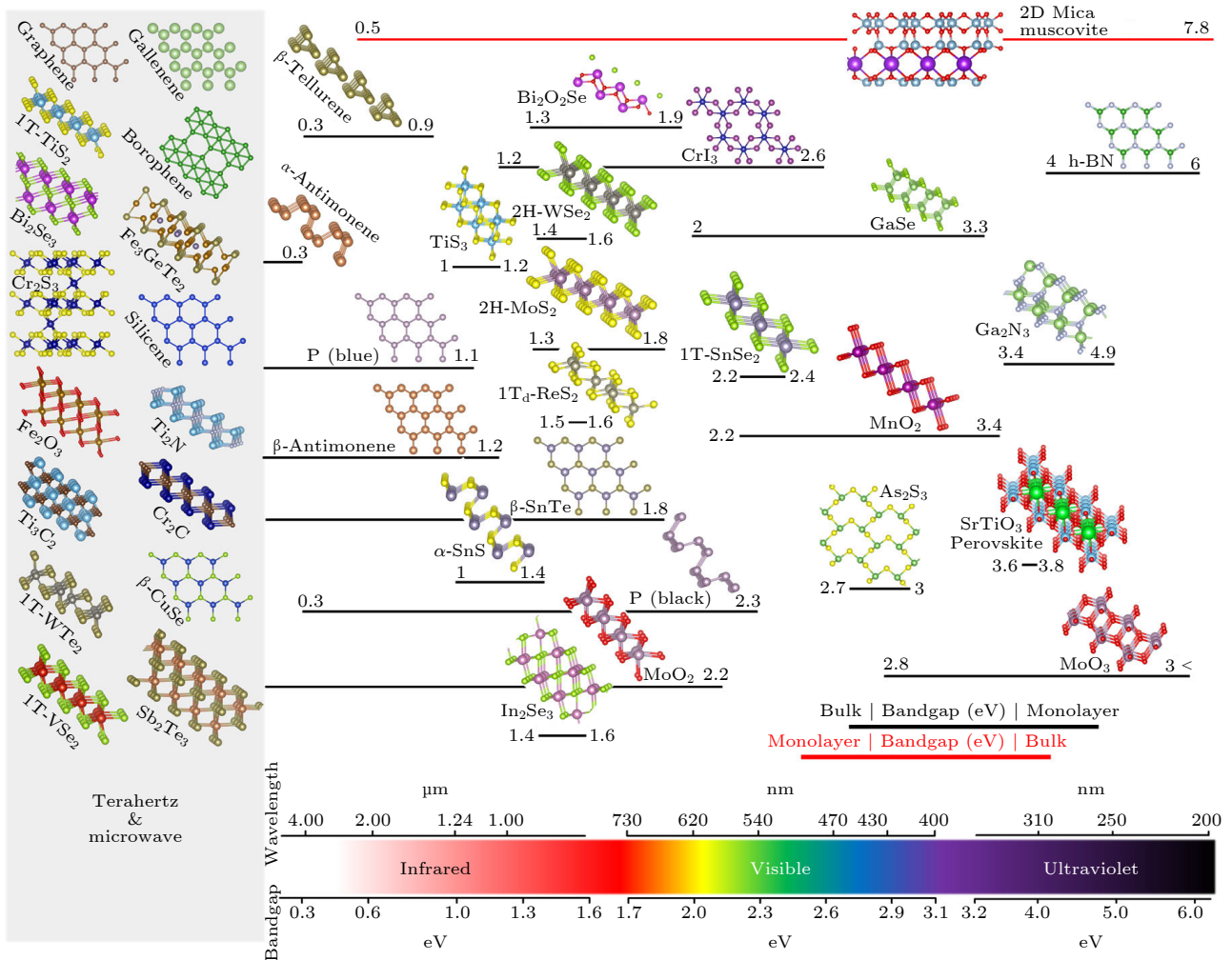


图 1 典型二维材料及其带隙范围^[11]. 图中展示了多种二维材料及其晶体结构的侧视图, 并按带隙大小从左至右排列. 每种材料下方的线条表示其从块体到单层的带隙变化范围. 黑线表示单层带隙大于块体带隙, 红线则表示相反情况. 左侧灰框中为零带隙或近零带隙的金属或半金属材料. 下方带隙/波长坐标轴用于显示各材料对应的光谱响应能力

Fig. 1. Typical 2D materials and their bandgap ranges. Figure shows side views of a variety of 2D materials and their crystal structures, arranged from left to right by bandgap size. The lines below each material indicate the range of bandgap variation from bulk to monolayer. The black line indicates that the monolayer bandgap is larger than the bulk bandgap, and the red line indicates the opposite. The gray box on the left is a metal or semimetal material with zero or near-zero bandgap. The bandgap/wavelength coordinate axis below is used to show the spectral response capability of each material. Reproduced from Ref. [11], with the permission of Springer Nature.

在载流子复合行为方面, 二维材料因表面无悬挂键及界面平整性高, 天然具备较低的界面态密度, 理论上有利于降低非辐射复合率, 提高光生载流子寿命^[33,34]. 然而, 其高表面积特性也导致其极易受到环境因素 (如氧、水分子) 的影响, 吸附层在表面形成杂质态或陷阱中心, 会加剧复合过程并引入额外暗电流路径^[35,36]. 当前常采用界面钝化、缺陷修复、掺杂调控等优化策略来提升器件性能, 这些策略通过降低缺陷态密度与抑制非辐射复合, 延长载流子寿命并改善输运通道, 从而在不增大暗电流的前提下提升响应速度、灵敏度与环境稳定性^[37-39].

2.3 光吸收特性

二维材料的原子层结构虽导致其几何厚度极薄, 但因其强烈的光-物质相互作用, 仍展现出显著的光吸收能力. 单层 TMDCs 如 MoS₂, WS₂ 等在共振波长处具有高激子结合能 (>0.5 eV), 导致其在光谱共振处表现出极高的吸收系数^[40]. 黑磷由于其各向异性带隙^[30], 展现出偏振相关的方向性吸收特性, 可用于开发偏振选择性探测器^[41]. 石墨烯虽因零带隙结构吸收较弱, 但其吸收波段覆盖极广, 适合作为吸收增强结构或透明电极材料^[42,43].

2.4 可调性与易集成

二维材料的可调性不仅体现在电子能带与光吸收特性上,还包括其力学柔性及异质整合能力.不同于传统半导体依赖晶格匹配,二维材料可通过范德瓦耳斯力进行异质整合,无需外延生长即可构建高质量界面^[2,16,44-47].基于此特点,研究人员已实现多种功能复合结构,如图2所示,包括二维-二维(如石墨烯/MoS₂/石墨烯^[48])、二维-三维(如MoS₂/硅^[46,49])、二维-零维(如石墨烯/量子点^[50,51])等多维集成结构,拓展了器件的功能维度与探测光谱范围.

此外,二维材料在柔性电子器件上的应用展现出巨大潜力.其优异的力学柔性、低温制备兼容性以及与塑料基底的适配性,使其可广泛应用于可穿戴系统、智能皮肤、电子视网膜等新兴方向^[16,52].与此同时,与CMOS兼容制程的二维材料(如石墨烯、Bi₂O₂Se等)也被认为是实现片上集成光电探测模块的关键材料.

综上,二维材料在带隙结构、迁移率、光吸收机制与系统兼容性等方面展现出的多重优势,使其成为构建新型宽光谱光电探测器的理想材料体系.深入地理解其基础光电特性,有助于针对不同应用需求进行材料选择与器件结构优化.

3 二维材料宽光谱探测的材料体系

实现宽光谱高性能光电探测器的关键在于材料体系对不同波段光子的有效吸收与电信号转换能力.二维材料因其原子级厚度、可调控的能带结构以及丰富的物理响应机制,逐渐成为实现宽光谱探测的重要候选平台.在此基础上,相关研究已从传统的石墨烯、TMDCs和黑磷等主流二维材料,进一步拓展至诸如拓扑绝缘体、拓扑半金属及二维钙钛矿等新兴体系.本节将围绕典型二维材料的光谱响应特性与器件性能,系统地梳理其在宽光谱探测中的应用基础.

3.1 窄带隙二维材料

一般而言,半导体材料的光吸收截止波长主要由其带隙宽度决定,二者之间成反比.这是因为能量低于带隙的光子(即“带隙以下”光子)无法直接激发价带电子跃迁至导带,从而无法产生光电流.因此,带隙较窄的二维材料天然具备延伸光谱响应至近红外甚至中红外区域的潜力,被广泛认为是构建宽光谱光电探测器的有力候选.常见的窄带隙二维材料包括黑磷、二维碲基材料、贵金属硫族化合物以及某些过渡金属单质化合物等.这些材料通常具

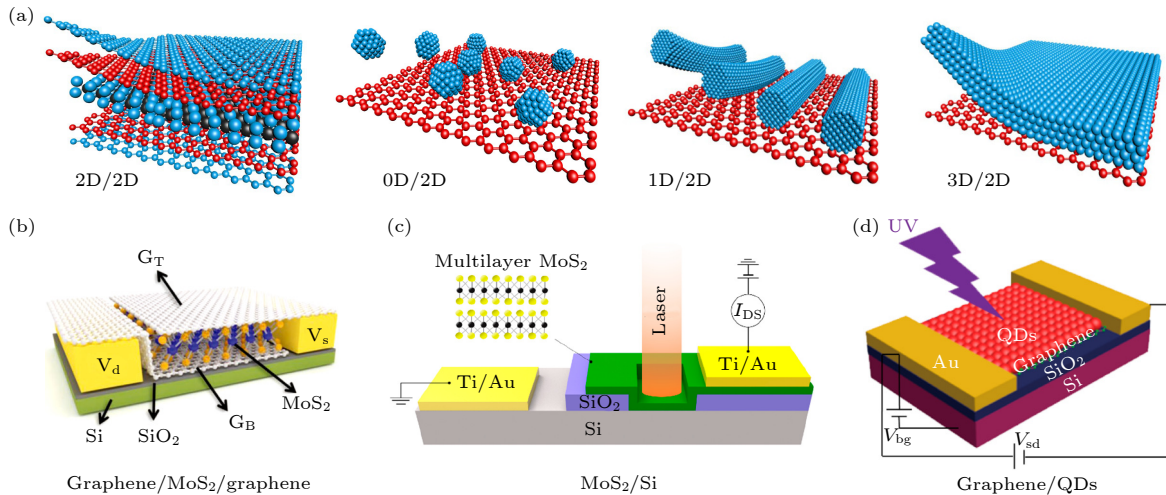


图2 基于二维材料的复合结构示意图以及实例 (a) 二维材料与其他材料复合示意图^[44]; (b) 全二维材料复合结构^[48]; (c) 二维材料与体材料复合结构^[49]; (d) 二维材料与量子点材料复合体系^[50]

Fig. 2. Schematic diagrams of composite structures based on two-dimensional materials and examples: (a) Schematic diagram of two-dimensional materials composited with other materials (Reproduced from Ref. [44], with the permission of Springer Nature); (b) all two-dimensional material composite structure (Reproduced from Ref. [48], with the permission of John Wiley and Sons); (c) two-dimensional material and bulk material composite structure (Reproduced from Ref. [49], with the permission of American Chemical Society); (d) two-dimensional material and quantum dot material composite system (Reproduced from Ref. [50], with the permission of American Chemical Society).

有小于 1 eV 的带隙, 部分甚至可低至 0.3 eV, 可覆盖可见光、近红外、中红外等多个波段, 如下所述.

黑磷是一种天然存在的层状材料, 具有各向异性的晶体结构, 其带隙可通过层数、应变和外场等方式实现有效调控. 如图 3(a) 所示, 黑磷的光谱响应范围不仅可通过其本征层数结构实现调节, 还可通过多种外部手段进一步扩展, 包括杂质掺杂 (如砷、碳)、应变调控 (压应变或拉应变) 以及垂直电场调制等 [53]. 图 3(b) 显示了其带隙随层数变化的趋势 [54]: 从单层约 1.8 eV 降低至块体状态下的 0.3 eV, 从而涵盖可见光至中红外区 (0.68—4.00 μm). 上述多维带隙工程手段为构建响应范围广、性能可调的中远红外探测器提供了材料基础, 使黑磷成为宽谱光电器件中极具前景的候选材料. Xu 等 [55] 报道了一种基于少层黑磷的中红外光电探测器, 实现在 2.5—3.7 μm 波段内的有效光响应, 展现出良好的中红外探测能力. Suess 等 [56] 设计的器件通过利用黑磷在片内的导光特性, 实现了从

近红外至中红外 (1.56—3.75 μm) 波段的宽谱探测. 此外, Chen 等 [57] 进一步揭示了垂直电场对黑磷光电响应行为的调控作用, 将厚度仅为 5 nm 的黑磷探测器的响应范围从 3.7 μm 动态拓展至超过 7.7 μm (图 3(d)), 实现在近中红外波段的宽域可调探测性能. Long 等 [58] 通过引入砷元素制备出黑磷 (b-AsP) 合金材料, 实现了带隙在 0.15—0.30 eV 范围内的连续可调, 从而将探测波长拓展至 8.5 μm (图 3(d) 和图 3(e)). 这些研究充分展示了黑磷在近红外至远红外宽谱探测中的可调性与应用潜力.

二维碲基材料及其衍生体系在宽光谱光电探测领域引起了广泛关注, 因其独特的能带结构和优异的电学性能, 展现出广阔的应用前景. Shen 等 [59] 构建了一种空气稳定型二维碲烯光电探测器, 实现在 520 nm—3.39 μm 波段内的超宽带高增益光电响应, 表现出良好的宽谱探测能力和 37 MHz 的高速响应特性. Amani 等 [60] 则通过溶液法合成出准二维碲纳米片, 构建了短波红外波段 (1.4—

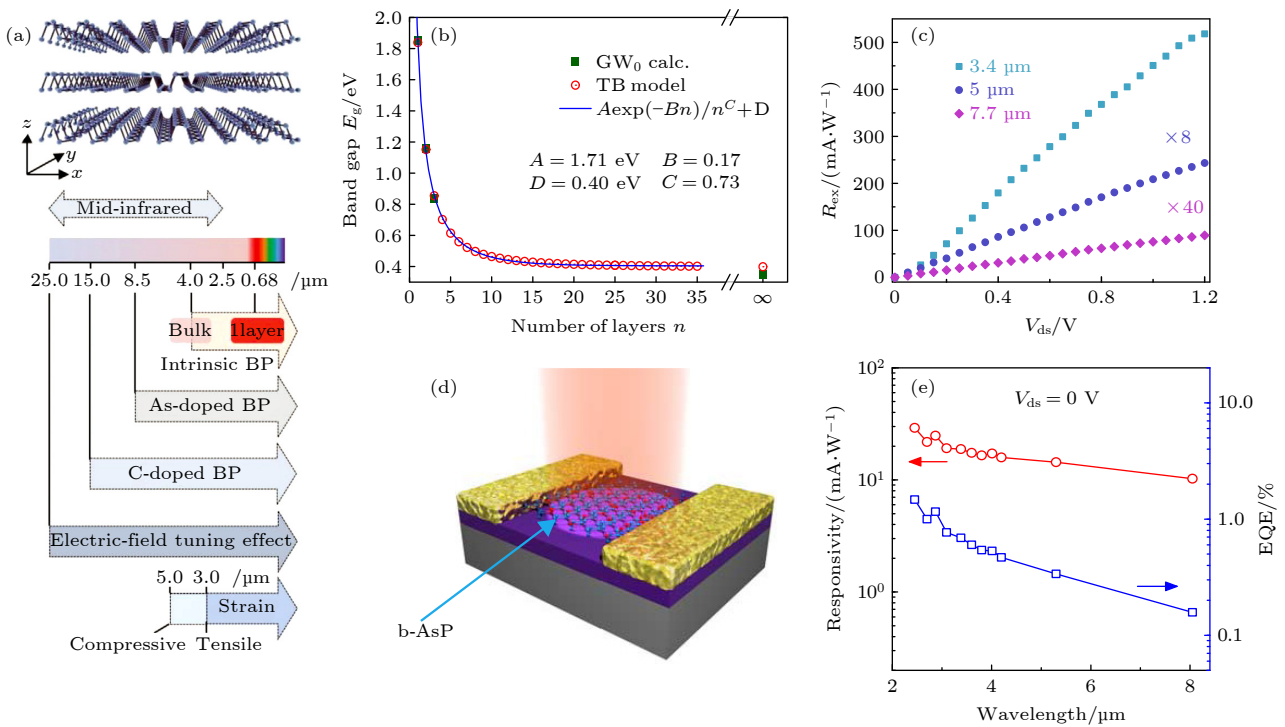


图 3 (a) 黑磷的晶体结构示意图和固有黑磷、砷 (As) 元素掺杂、碳 (C) 元素掺杂以及通过电场和应变调谐的中红外光响应 [53]; (b) 黑磷带隙的层数依赖性 [54]; (c) 黑磷光电探测器的光响应率 [57]; (d), (e) 砷掺杂黑磷光电探测器的示意图以及其光响应度和外量子效率 [58]

Fig. 3. (a) Schematic diagram of the crystal structure of BP and mid-infrared optical response of pristine BP, arsenic (As) element-doped, carbon (C) element-doped, and electric field and strain-tuned BP (Reproduced from Ref. [53], with the permission of John Wiley and Sons); (b) layer dependence of the bandgap of BP (Reproduced from Ref. [54], with the permission of American Physical Society); (c) photoresponsivity of BP photodetector (Reproduced from Ref. [57], with the permission of Springer Nature); (d), (e) schematic diagram of arsenic-doped BP photodetector and its photoresponsivity and EQE (Reproduced from Ref. [58], with the permission of the authors).

3.4 μm) 的光电探测器, 并借助光学腔增强手段显著提升了器件性能, 在 1.7 μm 波长下实现了 13 A/W 的响应度和 2×10^9 Jones 的比探测率. 此外, Niu 等^[61]报道了一种基于 EuSbTe_3 的新型宽谱探测器, 在无需低温冷却的条件下实现了从紫外到太赫兹波段的直接光响应, 其在 532 nm 和 118.8 μm 波长下分别实现了约 $150 \text{ pW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 和 $0.6 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的低噪声等效功率, 进一步拓展了二维层状碲化物在极端光谱范围探测中的应用边界. 这些研究成果充分地展示了碲基层状材料在构建高性能、超宽谱光电探测器方面的重要潜力, 为实现从可见光到太赫兹波段的一体化探测提供了材料基础与设计范式.

除常规 TMDCs 外, 近年来贵金属硫族化物 (如 PtSe_2 , PdSe_2 等) 及部分过渡金属单质化合物 (如 InSe , In_2Se_3 , SnSe 和 SnSSe 等) 因其独特的能带结构与优异的光电性能, 成为宽谱光电探测领域的研究热点. Liang 等^[62]基于 PdSe_2 构建的光电探测器实现了从可见光 (532 nm) 到中红外 ($> 4 \mu\text{m}$) 的宽带响应, 并表现出高响应度、偏振敏感性与栅控调节能力; 同时, 多层 PdSe_2 还具备 1600 nm 至 8 μm 范围内的宽光吸收能力 (图 4(a)). Feng 等^[63]首次报道了基于化学气相沉积 (CVD) 法生长的 2D In_2Se_3 的高性能刚性及柔性光电探测器, 器件在 254—700 nm 范围内实现紫外至可见

光的稳定响应 (图 4(b)), 且柔性器件在多次弯折下仍保持稳定光响应, 展现出其在柔性宽带光电器件中的应用潜力. 此外, Zhang 等^[64]采用外延磁控溅射方法制备大面积 SnS 薄膜, 构建了高性能宽谱光电探测器 (图 4(c)), 得益于光电导-辐射热 (bolometric) 耦合效应所形成的双机制工作模式, 探测器在 405—1920 nm 范围内实现宽谱响应, 响应度高达 95.5 A/W, 比探测率达 7.8×10^{11} Jones, 且具备优异的环境稳定性, 展现出 SnS 材料在高灵敏宽带探测中的应用潜力.

3.2 二维拓扑绝缘体与拓扑半金属

近年来, 拓扑半金属与拓扑绝缘体因其独特的电子拓扑结构和强自旋轨道耦合效应^[65,66], 逐渐成为宽谱光电探测领域的重要候选材料. 图 5(a) 和图 5(b) 展示了其能带结构, 拓扑绝缘体拥有能带内部的拓扑保护表面态^[65], 能够在维持体态绝缘特性的同时提供稳健的表面载流子通道, 适用于低噪声、中红外波段光响应; 而拓扑半金属则在其能带结构中存在无能隙的线性交叉点^[65], 支持从可见光至太赫兹的超宽谱响应 (图 5(d)), 特别在热激发或光驱动条件下展现出独特的光电转换行为. 这些材料体系不仅扩展了传统半导体光探测器的响应边界, 也为构建新型低能耗、高带宽、多功能光电器件提供了新的物理平台与设计思路.

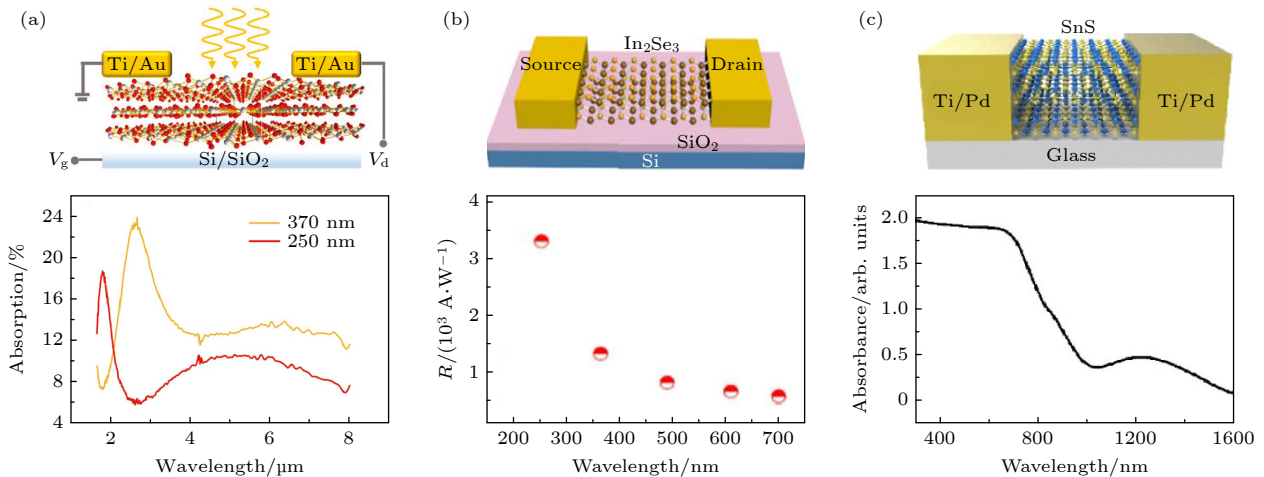


图 4 (a) PdSe_2 光电探测器的结构示意图以及多层 PdSe_2 的吸收光谱^[62]; (b) In_2Se_3 光电探测器的结构示意图及其在不同波长下的响应度^[63]; (c) SnS 光电探测器的结构示意图以及 SnS 薄膜的吸收光谱^[64]

Fig. 4. (a) Schematic diagram of the PdSe_2 photodetector structure and absorption spectrum of multilayer PdSe_2 (Reproduced from Ref. [62], with the permission of John Wiley and Sons); (b) schematic diagram of the In_2Se_3 photodetector structure and its responsivity R at different wavelengths (Reproduced from Ref. [63], with the permission of IOP Publishing); (c) schematic diagram of the SnS photodetector structure and absorption spectrum of SnS film (Reproduced from Ref. [64], with the permission of IOP Publishing).

二维拓扑绝缘体具有可控能带结构与稳定的量子自旋霍尔态, 按发展阶段可分为三代, 其中第二代 (如 Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 等) 因其窄带隙与结构简单成为目前研究的主流方向^[67]. 近年来, 基于这类材料构建的光电探测器已在紫外至中红外波段展现出良好的宽谱响应性能. 如图 5(c) 所示, 不同拓扑绝缘体材料的带隙分布覆盖多个光谱区间, 为宽带光电探测提供了丰富的材料选择. Sharma 等^[69]研制的 Bi_2Te_3 纳米片和纳米线器件在紫外至近红外波段均表现出优良响应性能, 其中纳米片在 1550 nm 处响应度高达约 74 A/W. Jiang 等^[70]则基于分子束外延生长的 SnTe 薄膜构建光电导型探测器, 实现在 405 nm—3.8 μm 波段内的稳定快速光响应, 并在 2003 nm 处获得 3.75 A/W 的高响应度, 进一步展现了第三代拓扑晶体绝缘体在中红外宽谱探测中的应用潜力.

根据费米能级附近的能带简并性质, 拓扑半金属可细分为狄拉克半金属 (石墨烯、 PtTe_2 和 PdTe_2 等)、外尔半金属 ($\text{T}_d\text{-WTe}_2$, $\text{T}_d\text{-MoTe}_2$ 和 NbIrTe_4 等) 和节点线半金属 (CuSi_2 , AlB_4 等, 大多数属于三维体系)^[71], 近年来因其在低能耗与高速宽谱探

测中的独特优势而备受关注. 石墨烯作为典型的狄拉克半金属, 尽管具备从紫外至太赫兹的宽谱吸收潜力, 但由于其本征吸收率较低, 通常需借助异质结构设计以提升探测效率^[72]. Dong 等^[73]构建的 PtTe_2 光电探测器阵列在 0.02—0.3 THz 范围内实现高效宽带响应, 具备约 4.7 μs 的快速响应速度、47 $\text{pW}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 的高灵敏度以及高分辨的太赫兹成像能力, 展示了其在大面积太赫兹探测领域的应用潜力. Yang 等^[74]则利用分子束外延技术在柔性云母基底上生长出厘米级 type-II 外尔半金属 $\text{T}_d\text{-MoTe}_2$ 薄膜, 构建了无需天线的自驱动柔性探测器, 在 325 nm—2.52 THz 范围内实现室温宽谱响应, 进一步推动了可穿戴宽带光电器件的发展.

相关研究成果的主要器件参数可见表 1, 涵盖了不同二维拓扑材料及其异质结构在宽光谱探测中的代表性性能指标, 进一步印证了该类材料在构建高性能宽谱光电探测器方面的广阔潜力.

3.3 二维钙钛矿

二维钙钛矿材料具有典型的 ABX_3 构型晶体结构 (图 6(a)), 其中 A 通常为有机分子或碱金属

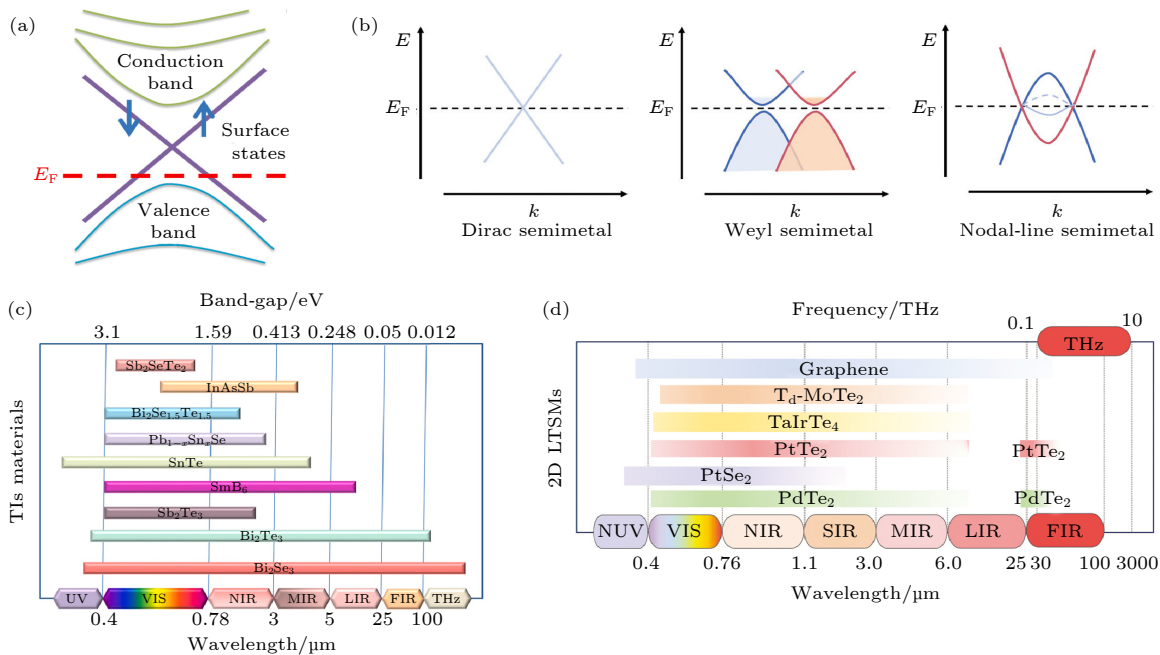


图 5 (a), (b) 拓扑绝缘体^[67]和拓扑半金属 (狄拉克半金属、外尔半金属和节点线半金属)^[68]的能带结构示意图; (c) 各种拓扑绝缘体的带隙值及其相应的检测范围^[67]; (d) 部分二维层状拓扑半金属的检测范围^[68]

Fig. 5. (a), (b) Schematic diagrams of energy band structures of topological insulator (Reproduced from Ref. [67], with the permission of Elsevier) and topological semimetals (Dirac semimetal, Weyl semimetal, and nodal line semimetal) (Reproduced from Ref. [68], with the permission of John Wiley and Sons); (c) bandgap values of various topological insulators (TI) and their corresponding detection ranges (Reproduced from Ref. [67], with the permission of Elsevier); (d) detection ranges of some 2D layered topological semimetals (LTSM) (Reproduced from Ref. [68], with the permission of John Wiley and Sons).

表 1 二维拓扑材料及其异质结构的光电性能
Table 1. Optoelectronic properties of two-dimensional topological materials and their heterostructures.

材料	探测波长	比探测率	响应度	参考文献
	λ/nm	D^*/Jones	$R/(\text{A}\cdot\text{W}^{-1})$	
Bi_2Te_3	325—1500	3.8×10^9	74	[69]
SnTe	405—3800	—	3.75	[70]
$\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$	375—2000	1.14×10^{12}	0.21	[75]
SnTe/Si	254—1550	8.4×10^{12}	0.128	[76]
$\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Si}$	370—118000	2.5×10^{11}	11	[77]
Graphene/ $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{GaAs}$	405—4500	3.1×10^{12}	0.67	[78]
PtTe_2	0.02—0.3 THz	—	1.98	[73]
$\text{T}_d\text{-MoTe}_2$	325 nm—2.52 THz	—	3.8×10^{-3}	[74]
TaIrTe_4	0.1—10 THz	—	18	[79]
$\text{NbIrTe}_4/\text{Graphene}$	0.02—0.3 THz	—	264.6 V/W	[80]
$\text{TaIrTe}_4/\text{WSe}_2$	405—808	3.09×10^{12}	9.1	[81]

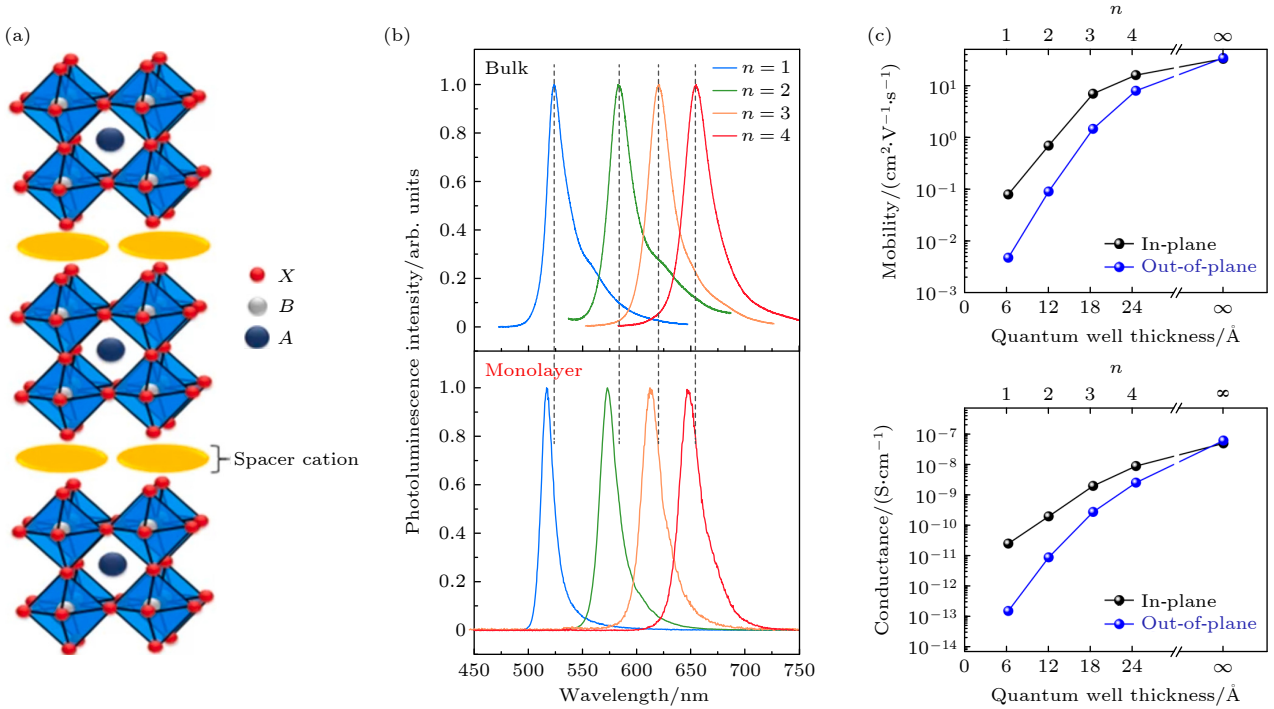


图 6 (a) 二维钙钛矿的结构示意图 [82]; (b), (c) 在钙钛矿材料 $(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{NH}_3)_2(\text{CH}_3\text{NH}_3)_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ 中, 通过改变 Pb 的含量 (n) 可以调控其带隙大小 [83]; (c) 钙钛矿材料 $(\text{C}_4\text{H}_9\text{NH}_3)_n(\text{CH}_3\text{NH}_3)_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ 的迁移率和电导随量子阱厚度的变化, 表明其潜在的高光电转换效率 [84]

Fig. 6. (a) Schematic diagram of the structure of two-dimensional perovskite (Reproduced from Ref. [82], with the permission of Elsevier); (b), (c) in perovskite material $(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{NH}_3)_2(\text{CH}_3\text{NH}_3)_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$, the bandgap can be tuned by varying the Pb content (n) (Reproduced from Ref. [83], with the permission of Springer Nature); (c) mobility and conductance of perovskite material $(\text{C}_4\text{H}_9\text{NH}_3)_n(\text{CH}_3\text{NH}_3)_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$ as a function of quantum well thickness, demonstrating its potential for high photoelectric conversion efficiency (Reproduced from Ref. [84], with the permission of American Chemical Society).

离子, B 为过渡金属离子, X 为卤素离子, 这种层状结构不仅决定了其能带特性, 也为带隙调控提供了可能性 [82]. 在这一结构基础上, 二维钙钛矿材料展现出可调带隙 (图 6(b)) 和出色的电荷载流子性能 (图 6(c)) 等优异光电特性 [83,84], 并在宽光谱光

电探测中展现出广阔应用前景. 然而, 目前相关研究仍处于起步阶段, 亟需进一步探索其在不同波段和器件架构中的潜力.

Zha 等 [85] 基于 $\text{DI}(\text{BA})_2\text{PbI}_4/\text{CsPb}(\text{Br}_x/\text{I}_{1-x})_3$ 异质结构构建光电探测器, 实现了 457—600 nm 的

稳定宽谱响应. Liu 等^[86]将 N 型硅与准二维钙钛矿 $\text{BA}_2\text{MA}_3\text{Pb}_4\text{I}_{13}$ 有机结合, 充分发挥钙钛矿在紫外-可见光区与硅在近红外区的高吸收优势, 获得了 350—808 nm 的宽带响应, 并在 450 nm 处获得 23.72 A/W 的高响应度和 2.1×10^{10} Jones 的高比探测率. Wei 等^[87]构建的准二维钙钛矿/IGZO 异质结光电晶体管在 457—1064 nm 范围内实现宽带响应, 并兼具优异稳定性与柔性, 为高灵敏宽谱探测器提供了新思路. 此外, 通过将二维钙钛矿与石墨烯、TMDCs 等材料构建异质结构, 亦可进一步拓展其光谱响应并增强器件稳定性^[88]. 总体来看, 二维钙钛矿在紫外至近红外的宽谱探测中已展现出优异的性能和多样的器件实现路径, 但其中红外及更长波段的响应机制、稳定性提升策略以及与其他低维材料的协同效应, 仍有待深入地研究与优化.

4 器件结构与性能优化策略

在二维材料光电探测器的研究中, 合理的器件结构设计及性能优化策略对于实现宽光谱、高灵敏度、快速响应等综合性能至关重要. 通过材料异质集成、缺陷调控、光场增强和应变调控等方法, 可以在保证二维材料本征优势的同时, 进一步实现对光谱响应范围、灵敏度及功能维度的进一步提升. 因此, 结合材料本征性能与结构层级设计, 已成为提升宽谱探测器性能的核心策略. 本节将从几种典型的结构与性能优化策略展开介绍.

4.1 异质集成策略

得益于独特的范德瓦耳斯堆叠特性, 二维材料可与不同维度的材料灵活组装成异质结构. 通过界面能带工程实现能级匹配、借助载流子调控优化传输效率, 并利用结构设计增强光吸收, 这一策略已成为构建高性能、宽光谱光电探测器的重要途径. 不同维度的组合在能带匹配、载流子输运路径及光-物质相互作用方面各具特色, 为器件在响应波段、灵敏度、响应速度及柔性适配等方面提供了多样化的优化途径. 以下将分别介绍各类异质结构的典型研究成果与性能表现.

首先, 在全二维异质结构中, 不同类型的二维材料(如石墨烯、TMDCs、黑磷等)通过范德瓦耳斯力接触形成原子级平整界面, 既保留了各自的优

异本征性能, 又可通过能带对接实现跨波段协同响应, 从而显著地拓展光谱探测范围并提升器件性能. Xue 等^[89]报道了二维 $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ 范德瓦耳斯异质结的层间光响应特性, 这两种材料形成了 type-II 能带排列(图 7(a)), 有利于光生载流子的分离与传输. 通过合理的栅控与偏压调节, 器件实现了覆盖 532—1550 nm 的高灵敏宽谱探测, 在 1550 nm 电信波段的光响应度可达 127 mA/W. Ahn 等^[90]构建了在 405—1310 nm 波段具有宽谱响应的二维 $\text{MoTe}_2/\text{ReS}_2$ 范德瓦耳斯异质结光电二极管, 其清晰的 type-II 能带排列(图 7(b))能够有效地促进界面载流子的分离与传输. 该器件在 638 nm 的红光照射下响应度达到 0.54 A/W, 同时具备高整流比 (10^4)、优异的线性度 ($\alpha = 0.94$) 以及超过 100 kHz 的快速光开关能力. 此外, 得益于 ReS_2 非对称晶体结构, 器件还具备线偏振光探测功能^[90], 为二维范德瓦耳斯异质结构在多功能宽谱光电器件中的应用提供了新的思路. Tsai 等^[91]设计了一种将石墨烯与交替条带超结构 $\text{WS}_2\text{-WSe}_2$ 光敏层相结合的器件架构(图 7(c)), 其中 $n^+\text{-WS}_2$ 与 $p^+\text{-WSe}_2$ 条带在石墨烯中形成交替的电子与空穴传输通道, 有效地解决了响应度与响应速度间的权衡问题. 该结构实现了覆盖 405—3000 nm 的宽谱探测, 在光照下获得高达 1.7×10^7 mA/W 的响应度和 3—4 μs 的响应时间^[91], 展示了通过超结构光栅效应实现高响应与快速响应的独特光栅调制探测机制.

此外, 二维材料还可以与零维、一维和三维材料进行异质集成. Polumati 等^[92]构建的 $\text{ReS}_2/\text{MoS}_2$ 量子点 (QDs)(二维-零维) 异质结光电探测器(图 8(a))利用两种材料的能带差异与功函数差异形成内建电场, 实现了从紫外 (360 nm) 到近红外 (780 nm) 的高效宽谱响应(图 8(b)). 图 8(c) 为该异质结构的能带示意图, 其中 MoS_2 QDs 具备 3.3 eV 的宽带隙, 主要吸收紫外光; 单层 ReS_2 带隙约为 1.4 eV, 能有效吸收可见光并在近红外区仍保持一定响应. 在紫外光照射下, MoS_2 QDs 中产生的光生电子和空穴分别沿导带与价带迁移至 ReS_2 ; 在可见和近红外波段, 光生载流子直接在 ReS_2 中产生并被金属电极高效收集^[92]. 两者的功函数差 (4.84 eV 与 4.16 eV) 不仅促进了载流子在界面的有效分离与传输, 还显著地提升了器件在各波段下的响应度(紫外光 3.3×10^2 A/W、可见光

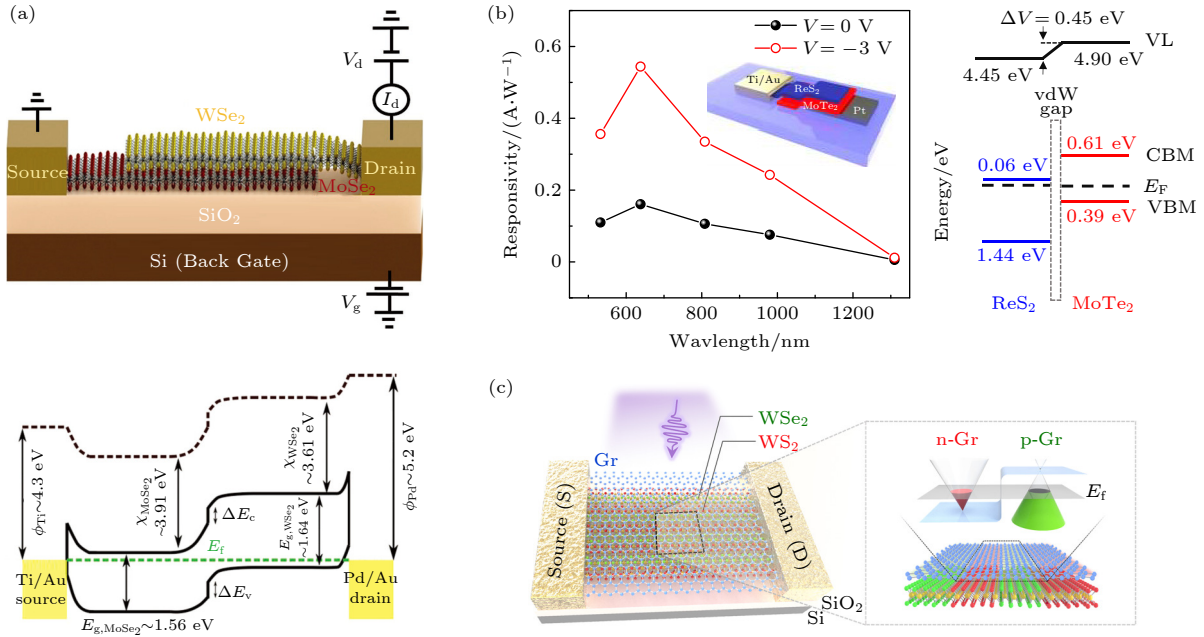


图 7 (a) MoSe₂/WSe₂ 异质结的器件结构与能带结构示意图^[89]; (b) MoTe₂/ReS₂ 异质结构在不同波长下的响应度以及其器件结构与能带结构示意图^[90]; (c) 石墨烯与 WS₂-WSe₂ 超结构的器件结构与能带结构示意图^[91]

Fig. 7. (a) Schematic diagrams of device structure and energy band structure of MoSe₂/WSe₂ heterostructure (Reproduced from Ref. [89], with the permission of John Wiley and Sons); (b) responsivity of MoTe₂/ReS₂ heterostructure at different wavelengths and schematic diagrams of device structure and energy band structure (Reproduced from Ref. [90], with the permission of American Chemical Society); (c) schematic diagrams of device structure and energy band structure of graphene and WS₂-WSe₂ superlattice (Reproduced from Ref. [91], with the permission of American Chemical Society).

5.4×10² A/W、近红外 2.6×10² A/W)。Fu 等^[93] 构建了 PbI₂/Sb₂S₃ 纳米线 (二维/一维) 范德瓦耳斯异质结光电探测器 (图 8(d)), 实现了 400—750 nm 的宽谱响应, 器件在 445 和 730 nm 下分别获得高达 156.3 与 120.4 A/W 的响应度 (图 8(e)), 以及 3.16×10¹³ 与 2.45×10¹² Jones 的高比探测率. 性能提升主要源于缺陷态介导的 type-II 异质结结构, 有效地促进了光生电子-空穴对的分离, 为新型混合范德瓦耳斯异质结的设计与应用提供了新思路. Jain 等^[94] 构建了 MoS₂/GaN(二维/三维) 异质结构 (图 8(f)), 利用 MoS₂ 在可见光区与 GaN 在紫外区的互补吸收特性及界面 type-II 能带排列, 实现了覆盖紫外-近红外波段的高灵敏宽谱探测. 该器件在响应度 (约 10⁴ A/W) 与外量子效率方面显著优于单一 GaN 器件 (图 8(g)), 外量子效率提升约 500%^[94], 为高性能宽谱光电探测器与成像应用提供了新型高效结结构设计思路.

综上所述, 基于二维材料的异质结构光电探测器在宽谱响应和性能提升方面展现出显著优势. 其中, 相当一部分研究聚焦于构建 type-II 能带排列的异质结. 这种能带结构能够在界面处形成内建电场, 有效促进光生电子与空穴的空间分离, 降低复

合率, 从而显著地提升器件的响应度、探测率和光谱覆盖范围^[93-97]. 此外, 不同维度材料的有机结合不仅进一步拓宽了吸收光谱, 还在能带匹配、载流子传输路径和光与物质相互作用等方面实现协同优化, 为实现高灵敏度、宽波段、快速响应及多功能一体化的光电探测器提供了多样化的设计思路与实现途径.

4.2 缺陷调控策略

二维材料的本征缺陷 (如空位、间隙原子和边界缺陷等) 以及外延引入的掺杂缺陷, 都会对其光电性能产生显著的影响^[98]. 通过等离子体处理、化学修饰、离子注入或原子替代等手段, 可以对缺陷的类型与密度进行精确调控, 从而优化载流子复合速率、调节带隙结构, 并增强特定波段的吸收能力^[35,99]. 这种缺陷调控不仅能够改善器件的光响应速度和稳定性, 还可赋予其多功能化响应特性. 在这方面, Wu 等^[100] 构建了超宽带 WS₂/AlO_x/Ge 异质结光电探测器 (图 9(a)), 利用空位缺陷有效地调节 WS₂ 的带隙, 并在界面引入超薄 AlO_x 层实现表面修饰, 结合垂直 n-n 异质结结构设计, 器件在 200 nm—4.6 μm 范围内实现了从深紫外到中波红

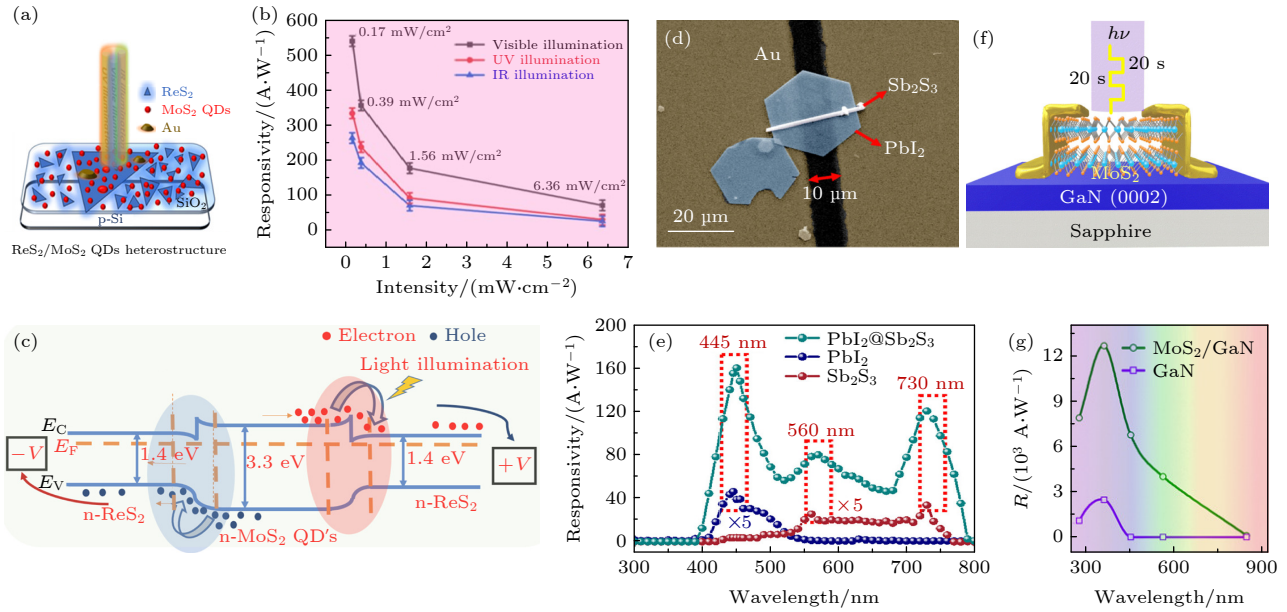


图 8 (a)–(c) ReS₂/MoS₂ 量子点异质结构的示意图及其在不同探测波长下的响应度和能带结构示意图 [92]; (d), (e) PbI₂/Sb₂S₃ 纳米线的器件图及其在不同探测波长下的响应度 [93]; (f), (g) MoS₂/GaN 异质结构的示意图及其在不同探测波长下的响应度 [94]

Fig. 8. (a)–(c) Schematic diagram of ReS₂/MoS₂ quantum dot heterostructure and its responsivity at different detection wavelengths and energy band structure diagram (Reproduced from Ref. [92], with the permission of American Chemical Society); (d), (e) device diagram of PbI₂/Sb₂S₃ nanowires and their responsivity at different detection wavelengths (Reproduced from Ref. [93], with the permission of Royal Society of Chemistry); (f), (g) schematic diagram of MoS₂/GaN heterostructure and its responsivity at different detection wavelengths (Reproduced from Ref. [94], with the permission of American Chemical Society).

外的超宽谱响应, 响应度高达 634.5 mA/W, 比探测率达 4.3×10^{11} Jones, 并具备优异的室温 MWIR 成像能力. 后来, Zhou 等 [101] 制备了二维空位半导体 α -Ga₂Se₃, 其空位结构在带隙中引入中间能级, 从而实现了紫外-可见-近红外超带隙响应 (图 9(b)), 并在 365 nm 处表现出 41.86 A/W 的响应度和 6.69×10^{11} Jones 的比探测率, 验证了利用内禀空位调控能带结构可以有效地拓展二维半导体的光谱响应范围. Sum 等 [102] 则制备了二维 LiInP₂Se₆ 探测器 (图 9(c)), 并揭示其宽带光响应来源于材料中的内禀缺陷. 该器件在 532–1064 nm 波段实现宽谱探测, 表现出 9.48×10^{12} Jones 的高比探测率、 10^2 的开关比以及 10^{-12} A 的超低暗电流, 为缺陷调控实现新一代高性能宽谱光电器件提供了新材料平台. 此外, Peng 等 [103] 通过空气退火在 WSe₂/ReS₂ 与 MoTe₂/ReS₂ 异质结中引入氧缺陷, 实现 n-p 型转变, 显著增强内建电场并降低接触电阻, 从而提升光伏性能. 退火后器件在 785 nm 光照下的比探测率最高达 6×10^{12} Jones, 且具备微秒级快速响应, 展现了氧缺陷调控在 TMDCs 异质结宽谱高速探测中的应用潜力.

综上, 缺陷工程已成为突破二维材料固有局限

制、实现宽谱高灵敏光电探测的重要策略, 为未来多波段融合、低功耗与高速响应的新型光电器件设计提供了坚实基础.

4.3 光场增强策略

光场增强策略旨在通过纳米结构设计或外部光学结构引入局域电磁场增强效应, 提高二维材料对入射光的吸收效率或者拓宽探测波长. 常用方法包括引入纳米结构实现表面等离子共振 [104–106] 和构建光学微腔 [107–109] 等. 这些手段不仅能够弥补二维材料本征吸收截面的不足, 还为实现高灵敏、宽谱与快速光电探测提供了新的物理途径.

Zhang 等 [106] 在 p-MoS₂/n-ZnO 异质结中引入具有局域表面等离子共振效应的金纳米颗粒, 实现了在可见光与紫外波段的同步性能提升 (图 10(a)). 得益于金纳米颗粒与 MoS₂, ZnO 的直接共振耦合, 器件在 532 nm 光照下光电流提升了 14.8 倍, 显著地增强了响应度、外量子效率与比探测率. 同时, 金纳米颗粒在界面处形成的表面耗尽区有助于加速光生电子-空穴对的分离, 使可见光与紫外光下的响应速度均明显提升. 这项研究表明, 通过局域表面等离子共振与多光敏材料的协同作用,

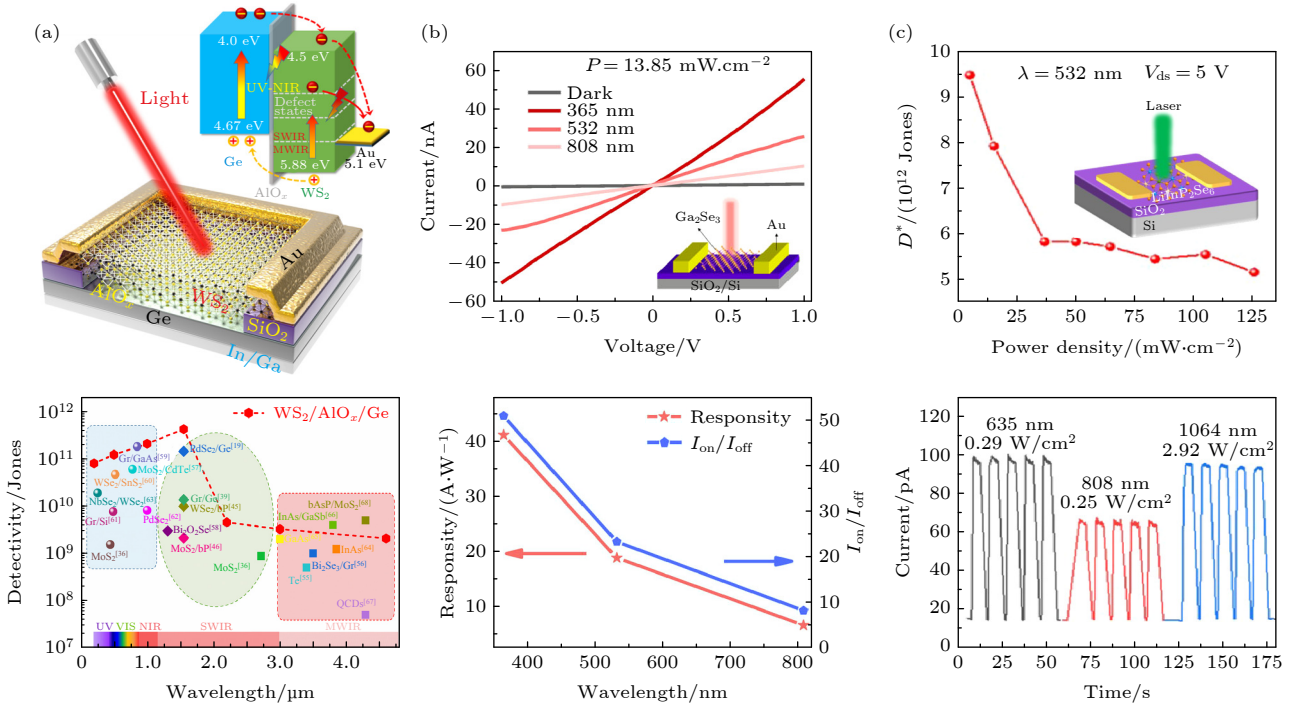


图 9 (a) 超宽带 $\text{WS}_2/\text{AlO}_x/\text{Ge}$ 异质结光电探测器的结构和能带示意图, 以及其在不同波长下的比探测率^[100]; (b) 二维 $\alpha\text{-Ga}_2\text{Se}_3$ 器件结构示意图及其在不同探测波长和暗态条件下的 I - V 特性曲线, 以及相应的光响应度和开关比^[101]; (c) 二维 $\text{LiInP}_2\text{Se}_6$ 器件结构示意图以及其 532 nm 下的比探测率和其他波长下的光响应^[102]

Fig. 9. (a) Structure and energy band diagram of ultra-broadband $\text{WS}_2/\text{AlO}_x/\text{Ge}$ heterostructure photodetector and its specific detectivity at different wavelengths (Reproduced from Ref. [100], with the permission of American Chemical Society); (b) schematic diagram of two-dimensional $\alpha\text{-Ga}_2\text{Se}_3$ device structure and its I - V characteristic curves under different detection wavelengths and dark conditions, along with the corresponding photoresponsivity and on/off ratio (Reproduced from Ref. [101], with the permission of John Wiley and Sons); (c) schematic diagram of two-dimensional $\text{LiInP}_2\text{Se}_6$ device structure and its specific detectivity at 532 nm and photoresponse at other wavelengths (Reproduced from Ref. [102], with the permission of American Chemical Society).

可突破单一共振频率的限制, 实现宽波段光场增强探测. Zhang 等^[109] 则利用自卷曲工艺构建了基于单壁碳纳米管/石墨烯异质结的三维光电探测器(图 10(b)), 其中石墨烯作为导电通道, 单壁碳纳米管负责吸收可见至近红外波段的人射光. 与传统平面器件相比, 该三维结构天然形成光学微腔, 显著地增强了光场耦合效果. 器件在 470—940 nm 范围内实现宽谱探测, 在 590 和 940 nm 分别获得高达 4.9×10^4 与 1.9×10^4 A/W 的超高响应度, 响应时间仅 1.6 ms, 比探测率达 2.28×10^{11} Jones. 同时, 该结构还具备优异的室温中红外探测能力 (10.6 μm 处响应度为 3.08 A/W), 并实现了高质量成像. 综上, 表面等离激元共振增强与光学微腔设计是光场增强策略的两条重要实现路径, 前者适用于针对特定波段的强吸收优化, 后者则可在更宽波段范围内提升光场利用效率, 为二维材料宽谱高性能光电探测器的设计提供了有力工具.

4.4 应变调控策略

应变调控作为一种高效且可逆的能带调节手段, 能够在不引入额外化学杂质的情况下改变二维材料的晶格常数和电子结构^[17,18], 从而显著地影响其光电性能. 通过外加机械拉伸、压缩、弯曲或构建应变梯度, 可以实现带隙宽度、能带排列及载流子有效质量的精确调控, 进而优化光吸收系数、载流子寿命与迁移率等关键参数^[110–113]. 与化学掺杂或缺陷调控相比, 应变调控具有无损性、可动态调节及可空间选择性作用等优势, 非常适合柔性光电器件及可穿戴探测系统.

Sahatiya 等^[114] 制备了柔性橡皮基底上的二维石墨烯/ZnO 异质结光电探测器, 实现了室温下从紫外到可见光的宽谱探测. 图 11(a) 和图 11(b) 显示了在不同的压缩应变下异质结光电流和响应度的变化, 在 30% 压缩应变作用下, 二维 ZnO 原子位移产生的压电势显著地增强了光生载流子分离效率, 使器件在紫外光下的光响应提升了 87%.

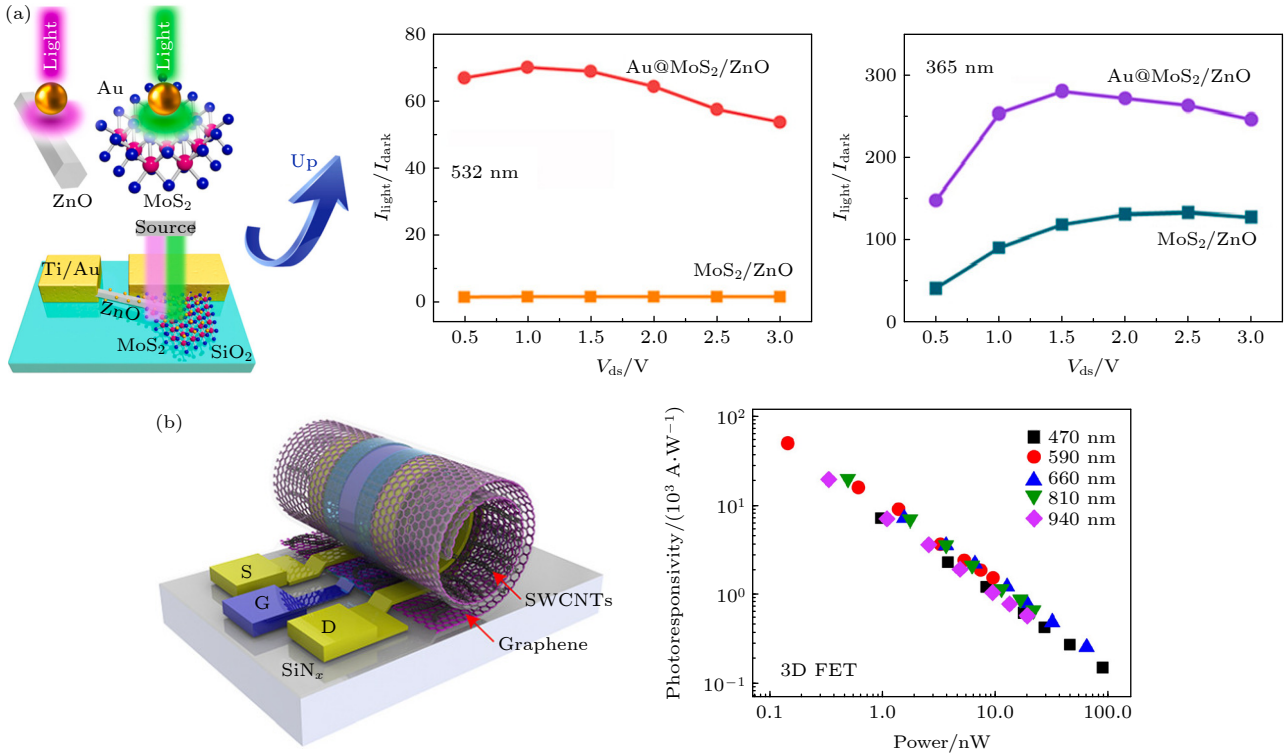


图 10 (a) 引入金纳米颗粒的 p-MoS₂/n-ZnO 异质结结构示意图及其在不同响应波长下的性能提升对比^[106]; (b) 单壁碳纳米管/石墨烯异质结三维光电探测器结构示意图及其在不同探测波长下的响应度^[109]

Fig. 10. (a) Schematic diagram of p-MoS₂/n-ZnO heterostructure with incorporated gold nanoparticles and performance enhancement comparison at different response wavelengths (Reproduced from Ref. [106], with the permission of Elsevier); (b) schematic diagram of single-walled carbon nanotube/graphene heterostructure three-dimensional photodetector structure and its responsivity at different detection wavelengths (Reproduced from Ref. [109], with the permission of RSC Pub).

这一性能提升归因于压电势导致的导带能级下降与肖特基势垒高度升高, 从而促进了异质结中的电子-空穴对分离. Wang 等^[115]展示了一种基于 MoS₂/Sb₂Te₃ 范德瓦耳斯 p-n 异质结的应变可调光电探测器 (图 11(c) 和图 11(d)), 实现了从可见光到近红外的宽谱响应. 该器件暗电流低至 4.3 pA, 在 0.12 A/W 的光响应度下仍保持 0.197 s 与 0.138 s 的上升和下降时间. 值得注意的是, 当对器件施加高达 0.3% 的压缩应变时, 异质结界面的应变调节会显著地影响材料的带隙, 从而改变其能带结构并引起光吸收特性的明显变化. 此外, 也有研究将应变调控与光场增强策略相结合^[116], 通过同时利用应变引起的能带重构与局域电磁场效应, 实现对光吸收和载流子动力学的双重优化, 为下一代高性能、多功能光电探测器的发展开辟了新的方向.

5 总结与展望

近年来, 二维材料凭借优异的光电性能、可调的能带结构以及与不同维度材料构建异质结构的

能力, 已在宽谱光电探测领域展现出巨大潜力. 本文系统地综述了二维窄带隙材料、二维拓扑材料和二维钙钛矿等光电探测器的研究进展, 并重点讨论了异质集成、缺陷调控及光场增强的性能优化策略, 阐述了它们在拓展光谱响应范围、提升灵敏度与响应速度方面的作用机制与代表性成果. 总体来看, 二维材料宽谱光电探测器的发展呈现出材料体系多元化、能带结构精细调控、多物理场协同增强以及柔性化与可穿戴化等趋势. 通过材料创新与结构设计的结合, 现有器件已实现了从深紫外到中红外甚至太赫兹的超宽谱响应, 并在灵敏度、响应速度与成像能力等方面取得显著的突破. 然而, 未来的发展仍面临诸多挑战, 包括如何实现大面积、高质量、低缺陷的二维材料可控生长与转移, 如何提升器件在空气、湿度及强光照等复杂环境下的稳定性, 以及如何将宽谱探测与偏振探测、光存储、神经形态视觉等功能集成化. 此外, 结合光通信、环境监测、生物成像和安防等领域的应用需求, 进一步评估与优化二维材料光电探测器在实际复杂场景下的性能, 将是推动其走向实用化的重要方向.

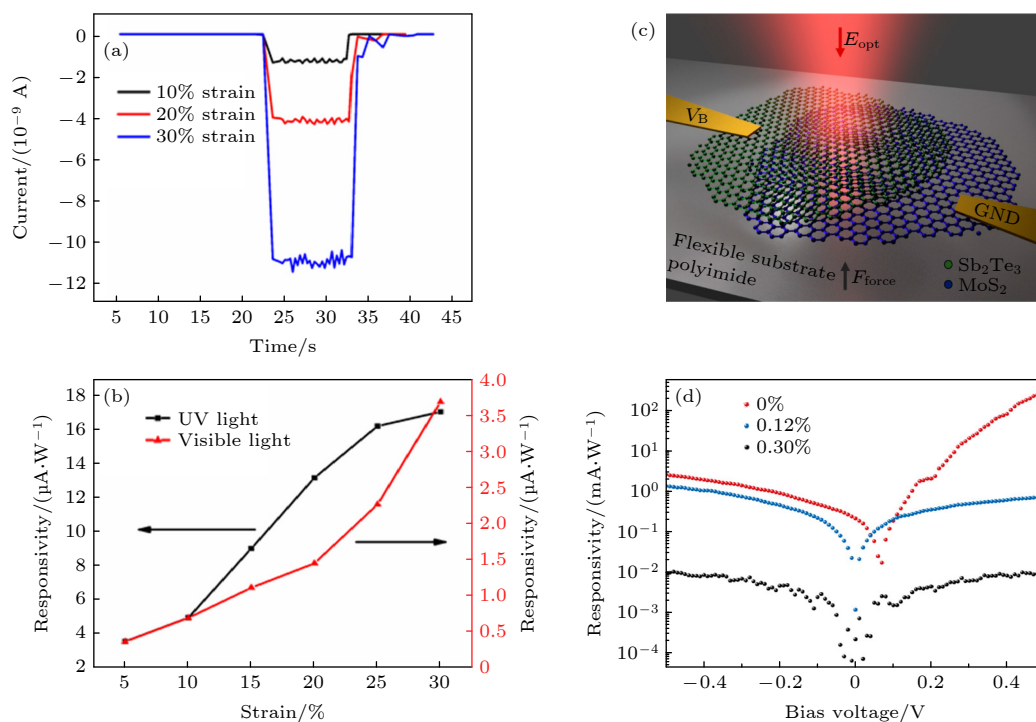


图 11 (a), (b) 不同应变条件下光电流变化的时间响应, 以及在紫外和可见光照射下光响应度随应变变化的关系图^[114]; (c), (d) MoS₂/Sb₂Te₃ 异质结的结构示意图及其在不同应变下的响应度变化^[115]

Fig. 11. (a), (b) Temporal response of photocurrent changes under different strain conditions and the relationship between photoreponsivity and strain under ultraviolet and visible light illumination (Reproduced from Ref. [114], with the permission of IOP Publishing); (c), (d) schematic diagram of MoS₂/Sb₂Te₃ heterostructure and its responsivity variation under different strains (Reproduced from Ref. [115], with the permission of MDPI).

可以预见, 随着材料科学、纳米制造与光电子学的持续交叉融合, 基于二维材料的宽谱光电探测技术将在灵敏度、响应速度、功能多样性和稳定性方面取得新的突破, 并有望为新一代高性能、低功耗、智能化光电系统的构建提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] Guan R Q, Xu H, Lou Z, Zhao Z, Wang L L 2024 *Adv. Sci.* **11** 2402530
- [2] Luo J Y, Selopal G S, Tong X, Wang Z M 2024 *Electron* **2** e30
- [3] Mearaj T, Farooq A, Hafiz A K, Khanuja M, Zargar R A, Bhat A A 2024 *ACS Appl. Bio Mater.* **7** 3483
- [4] Ma T J, Xue N, Muhammad A, Fang G, Yan J Y, Chen R K, Sun J H, Sun X G 2024 *Micromachines* **15** 1249
- [5] Liu X Z, Yang X Z, Tang Q, Lü Y, Zhang G, Feng W L 2024 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **57** 373002
- [6] Yao J D, Yang G W 2020 *Nanoscale* **12** 454
- [7] Xia F N, Wang H, Xiao D, Dubey M, Ramasubramaniam A 2014 *Nat. Photonics* **8** 899
- [8] Long M S, Wang P, Fang H H, Hu W D 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1803807
- [9] Shuck C E, Xiao X, Wang Z Y 2024 *Acc. Chem. Res.* **57** 3079
- [10] Song J M, Yu Y F, Zheng T, Cui Y Y, Chen Q S, Zhao W W, Yang F, Lu J P, Liu H W, Ni Z H 2025 *Appl. Phys. Lett.* **126** 043102
- [11] Chaves A, Azadani J G, Alsalman H, da Costa D R, Frisenda R, Chaves A J, Song S H, Kim Y D, He D, Zhou J, Castellanos-Gomez A, Peeters F M, Liu Z, Hinkle C L, Oh S H, Ye P D, Koester S J, Lee Y H, Avouris P, Wang X R, Low T 2020 *npj 2D Mater. Appl.* **4** 29
- [12] Tian Y, Liu H, Li J, Liu B D, Liu F 2025 *Nanomaterials* **15** 431
- [13] Dhanabalan S C, Ponraj J S, Zhang H, Bao Q L 2016 *Nanoscale* **8** 6410
- [14] Zulfikar M W, Nisar S, Dastgeer G, Rabeel M, Ghazanfar H, Ali A, Imran M, Kim H, Kim D K 2025 *Nanoscale* **17** 17881
- [15] Rani A, Verma A, Yadav B C 2024 *Mater. Adv.* **5** 3535
- [16] Li X, Liu K X, Wu D, Lin P, Shi Z F, Li X J, Zeng L H, Chai Y, Lau S P, Tsang Y H 2025 *Adv. Mater.* **n/a** 2415717
- [17] Hosseini M, Elahi M, Pourfath M, Esseni D 2015 *IEEE Trans. Electron Devices* **62** 3192
- [18] Zhang R, Koutsos V, Cheung R 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 042104
- [19] Xiang D, Han C, Zhang J L, Chen W 2014 *Sci. Rep.* **4** 4891
- [20] Shu H B, Li Y H, Niu X H, Wang J L 2016 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** 13150
- [21] Yin C D, He S X, Fan X F, Xiao Y K, Zhao L C, Gao L M 2024 *Adv. Opt. Mater.* **12** 2401122
- [22] Ouyang Y, Zhang C Y, Wang J, Guo Z, Wang Z G, Dong M D 2025 *Adv. Sci.* **12** 2416259
- [23] Liao L, Peng H L, Liu Z F 2014 *J. Am. Chem. Soc.* **136** 12194
- [24] Tiwari S K, Sahoo S, Wang N N, Huczko A 2020 *J. Sci. : Adv. Mater. Devices* **5** 10
- [25] Dumcenco D, Ovchinnikov D, Marinov K, Lazić P, Gibertini

- M, Marzari N, Sanchez O L, Kung Y C, Krasnozhan D, Chen M W, Bertolazzi S, Gillet P, Fontcuberta i Morral A, Radenovic A, Kis A 2015 *ACS Nano* **9** 4611
- [26] Rai A, Movva H C P, Roy A, Taneja D, Chowdhury S, Banerjee S K 2018 *Crystals* **8** 316
- [27] Manzeli S, Ovchinnikov D, Pasquier D, Yazyev O V, Kis A 2017 *Nat. Rev. Mater.* **2** 17033
- [28] Xu Y J, Yuan J, Zhang K, Hou Y, Sun Q, Yao Y M, Li S J, Bao Q L, Zhang H, Zhang Y G 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1702211
- [29] Zhang M, Biesold G M, Lin Z Q 2021 *Chem. Soc. Rev.* **50** 13346
- [30] Mu X, Wang J, Sun M 2019 *Mater. Today Phys.* **8** 92
- [31] Han F W, Xu W, Li L L, Zhang C, Dong H M, Peeters F M 2017 *Phys. Rev. B* **95** 115436
- [32] Long G, Maryenko D, Shen J Y, Xu S G, Hou J Q, Wu Z F, Wong W K, Han T Y, Lin J X Z, Cai Y, Lortz R, Wang N 2016 *Nano Lett.* **16** 7768
- [33] Sun Y H, Wang R M, Liu K 2017 *Appl. Phys. Rev.* **4** 011301
- [34] Zhang X L, Huang J C, Zuo H Z, Zhang Y F, Yang R Z, Chen J L, Li G J, Li W, Peng Z Y 2025 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **292** 113798
- [35] Liu F, Fan Z X 2023 *Chem. Soc. Rev.* **52** 1723
- [36] Zhang X J, Shao Z B, Zhang X H, He Y Y, Jie J S 2016 *Adv. Mater.* **28** 10409
- [37] Malik M, Iqbal M A, Choi J R, Pham P V 2022 *Front. Chem.* **10** 905404
- [38] Xu Y J, Shen H L, Wu D, Zhao Q C, Wang Z H, Ge J W, Zhang W 2022 *J. Alloys Compd.* **902** 163878
- [39] Shu Y T, Zhang Y W, Wang S 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 177301 (in Chinese) [舒衍涛, 张有为, 王顺 2021 物理学报 **70** 177301]
- [40] Hanbicki A T, Currie M, Kioseoglou G, Friedman A L, Jonker B T 2015 *Solid State Commun.* **203** 16
- [41] Yuan H T, Liu X G, Afshinmanesh F, Li W, Xu G, Sun J, Lian B, Curto A G, Ye G J, Hikita Y, Shen Z X, Zhang S C, Chen X H, Brongersma M, Hwang H Y, Cui Y 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 707
- [42] Xu Y H, Liu J Q 2016 *Small* **12** 1400
- [43] Li Q, Lu J, Gupta P, Qiu M 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1900595
- [44] Liu Y, Huang Y, Duan X F 2019 *Nature* **567** 323
- [45] Liu C Y, Guo J S, Yu L W, Li J, Zhang M, Li H, Shi Y C, Dai D X 2021 *Light Sci. Appl.* **10** 123
- [46] Zhou J S, Yang J H, Wei Z M 2020 *J. Semicond.* **41** 080401
- [47] Wang P Q, Jia C C, Huang Y, Duan X F 2021 *Matter* **4** 552
- [48] Gao S, Wang Z Q, Wang H D, Meng F X, Wang P F, Chen S, Zeng Y H, Zhao J L, Hu H G, Cao R, Xu Z Q, Guo Z N, Zhang H 2021 *Adv. Mater. Interfaces* **8** 2001730
- [49] Shin G H, Park J, Lee K J, Lee G B, Jeon H B, Choi Y K, Yu K, Choi S Y 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 7626
- [50] Gong M G, Liu Q F, Cook B, Kattel B, Wang T, Chan W L, Ewing D, Casper M, Stramel A, Wu J Z 2017 *ACS Nano* **11** 4114
- [51] Mukherjee S, Bhattacharya D, Patra S, Paul S, Mitra R K, Mahadevan P, Pal A N, Ray S K 2022 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14** 5775
- [52] Dong T, Simões J, Yang Z C 2020 *Adv. Mater. Interfaces* **7** 1901657
- [53] Zhang L, Wang B, Zhou Y H, Wang C, Chen X L, Zhang H 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 2000045
- [54] Rudenko A N, Yuan S, Katsnelson M I 2015 *Phys. Rev. B* **92** 085419
- [55] Xu M, Gu Y Q, Peng R M, Youngblood N, Li M 2017 *Appl. Phys. B* **123** 130
- [56] Suess R J, Leong E, Garrett J L, Zhou T, Salem R, Munday J N, Murphy T E, Mitterdorff M 2016 *2D Mater.* **3** 041006
- [57] Chen X L, Lu X B, Deng B C, Sinai O, Shao Y C, Li C, Yuan S F, Tran V, Watanabe K, Taniguchi T, Naveh D, Yang L, Xia F N 2017 *Nat. Commun.* **8** 1672
- [58] Long M S, Gao A Y, Wang P, Xia H, Ott C, Pan C, Fu Y J, Liu E, Chen X S, Lu W, Nilges T, Xu J, Wang X M, Hu W D, Miao F 2017 *Sci. Adv.* **3** e1700589
- [59] Shen C F, Liu Y H, Wu J B, Xu C, Cui D Z, Li Z, Liu Q Z, Li Y R, Wang Y X, Cao X, Kumazoe H, Shimojo F, Krishnamoorthy A, Kalia R K, Nakano A, Vashishta P D, Amer M R, Abbas A N, Wang H, Wu W Z, Zhou C W 2020 *ACS Nano* **14** 303
- [60] Amani M, Tan C L, Zhang G, Zhao C S, Bullock J, Song X H, Kim H, Shrestha V R, Gao Y, Crozier K B, Scott M, Javey A 2018 *ACS Nano* **12** 7253
- [61] Niu Y Y, Wu D, Su Y Q, Zhu H, Wang B, Wang Y X, Zhao Z R, Zheng P, Niu J S, Zhou H B, Wei J, Wang N L 2018 *2D Mater.* **5** 011008
- [62] Liang Q J, Wang Q X, Zhang Q, Wei J X, Lim S X, Zhu R, Hu J X, Wei W, Lee C, Sow C, Zhang W J, Wee A T S 2019 *Adv. Mater.* **31** 1807609
- [63] Feng W, Gao F, Hu Y X, Dai M J, Li H, Wang L F, Hu P A 2018 *Nanotechnology* **29** 445205
- [64] Zhang B, Liu Y J, Hu B, Guo F H, Zhang M C, Li S Q, Yu W Z, Hao L Z 2024 *2D Mater.* **11** 025024
- [65] Yan B H, Felser C 2017 *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **8** 337
- [66] Kou L Z, Ma Y D, Sun Z, Heine T, Chen C F 2017 *J. Phys. Chem. Lett.* **8** 1905
- [67] Yang M, Zhou H X, Wang J 2022 *Mater. Today Commun.* **33** 104190
- [68] Yu H H, Zeng H R, Zhang Y Z, Liu Y H, ShangGuan W, Zhang X K, Zhang Z, Zhang Y 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2412913
- [69] Sharma A, Srivastava A K, Senguttuvan T D, Husale S 2017 *Sci. Rep.* **7** 17911
- [70] Jiang T, Zang Y Y, Sun H H, Zheng X, Liu Y, Gong Y, Fang L, Cheng X A, He K 2017 *Adv. Opt. Mater.* **5** 1600727
- [71] Li Y, Yu W Z, Zhang K, Cui N, Yun T H, Xia X, Jiang Y, Zhang G Y, Mu H R, Lin S H 2024 *Mater. Horiz.* **11** 2572
- [72] Liu C H, Chang Y C, Norris T B, Zhong Z H 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 273
- [73] Dong Z, Yu W Z, Zhang L B, Yang L, Huang L Y, Zhang Y, Ren Z Q, Mu H R, Chen C, Zhang J R, Li J, Wang L, Zhang K 2023 *InfoMat* **5** e12403
- [74] Yang Q, Wang X M, He Z H, Chen Y J, Li S W, Chen H J, Wu S X 2023 *Adv. Sci.* **10** 2205609
- [75] Wang Q S, Wen Y, Yao F R, Huang Y, Wang Z X, Li M L, Zhan X Y, Xu K, Wang F M, Wang F, Li J, Liu K H, Jiang C, Liu F Q, He J 2015 *Small* **11** 5388
- [76] Gu S H, Ding K, Pan J, Shao Z B, Mao J, Zhang X J, Jie J S 2017 *J. Mater. Chem. A* **5** 11171
- [77] Yao J D, Shao J M, Wang Y X, Zhao Z R, Yang G W 2015 *Nanoscale* **7** 12535
- [78] Zhang X C, Liu X C, Zhang C Y, Peng S L, Zhou H X, He L, Gou J, Wang X R, Wang J 2022 *ACS Nano* **16** 4851
- [79] Xi T R, Jiang H T, Li J X, He Y C, Gu Y C, Fox C, Primeau L, Mao Y L, Rollins J, Taniguchi T, Watanabe K, van der Weide D, Rhodes D, Zhang Y, Wang Y, Xiao J 2025 *Nat. Electron.* **8** 578

- [80] He Y, Yang L, Hu Z, Zhang L B, Pan X K, Wei Y, Guo S G, Lü X Y, Jiang M J, Han L, Wang D, Lan S Q, Sun X, Chen X S, Zhang K, Wang L 2024 *Adv. Funct. Mater.* **34** 2311008
- [81] Ye Q J, Lu J T, Yi H X, Zheng Z Q, Ma C R, Du C, Zou Y C, Yao J D, Yang G W 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 181104
- [82] Kim E B, Akhtar M S, Shin H S, Ameen S, Nazeeruddin M K 2021 *J. Photochem. Photobiol., C* **48** 100405
- [83] Leng K, Abdelwahab I, Verzhbitskiy I, Telychko M, Chu L Q, Fu W, Chi X, Guo N, Chen Z H, Chen Z X, Zhang C, Xu Q H, Lu J, Chhowalla M, Eda G, Loh K P 2018 *Nat. Mater.* **17** 908
- [84] Wang K, Wu C C, Yang D, Jiang Y Y, Priya S 2018 *ACS Nano* **12** 4919
- [85] Zha Y F, Wang Y, Sheng Y H, Zhang X W, Shen X Y, Xing F J, Liu C H, Di Y S, Cheng Y C, Gan Z X 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 191904
- [86] Liu Y, Wu C J, Guan X N, Lu P F, Chen W, Zhao F Y, Gu C J, Shen X 2025 *ACS Appl. Electron. Mater.* **7** 2128
- [87] Wei S L, Wang F, Zou X M, Wang L M, Liu C, Liu X Q, Hu W D, Fan Z Y, Ho J C, Liao L 2020 *Adv. Mater.* **32** 1907527
- [88] Li Z Q, Hong E L, Zhang X Y, Deng M, Fang X S 2022 *J. Phys. Chem. Lett.* **13** 1215
- [89] Xue H, Wang Y D, Dai Y Y, Kim W, Jussila H, Qi M, Susoma J, Ren Z Y, Dai Q, Zhao J L, Halonen K, Lipsanen H, Wang X M, Gan X T, Sun Z P 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1804388
- [90] Ahn J, Kyhm J H, Kang H K, Kwon N, Kim H K, Park S, Hwang D K 2021 *ACS Photonics* **8** 2650
- [91] Tsai M Y, Tsai T H, Gandhi A C, Lu H L, Li J X, Chen P L, Chen K W, Chen S Z, Chen C H, Liu C H, Lin Y F, Chiu P W 2023 *ACS Nano* **17** 25037
- [92] Polumati G, Kolli C S R, Flores M, Kumar A, Sanghvi A, Bugallo A D L, Sahatiya P 2024 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16** 19261
- [93] Fu S L, Liu X H, Man J X, Ou Q H, Zheng X L, Liu Z Y, Zhu T, Wang H E 2024 *J. Mater. Chem. C* **12** 3353
- [94] Jain S K, Low M X, Taylor P D, Tawfik S A, Spencer M J S, Kuriakose S, Arash A, Xu C L, Sriram S, Gupta G, Bhaskaran M, Walia S 2021 *ACS Appl. Electron. Mater.* **3** 2407
- [95] Jia Y F, Wei X, Zhang Z H, Liu J, Tian Y, Zhang Y, Guo T T, Fan J B, Ni L, Luan L J, Duan L 2021 *CrystEngComm* **23** 1033
- [96] Wu E P, Wu D, Jia C, Wang Y G, Yuan H Y, Zeng L H, Xu T T, Shi Z F, Tian Y T, Li X J 2019 *ACS Photonics* **6** 565
- [97] Wu T, Yao M L, Long M Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 056301 (in Chinese) [吴甜, 姚梦丽, 龙孟秋 2021 物理学报 **70** 056301]
- [98] Jiang J, Xu T, Lu J P, Sun L T, Ni Z H 2019 *Research* **2019** 4641739
- [99] Song J M, Zheng T, Wei X, Zhao X W, Cui Y Y, Sun C D, Zhang Y, Wei Z Y, Zhao W W, Lu J P, Ni Z H 2024 *ACS Appl. Nano Mater.* **7** 1598
- [100] Wu D, Guo J W, Wang C Q, Ren X Y, Chen Y S, Lin P, Zeng L H, Shi Z F, Li X J, Shan C X, Jie J S 2021 *ACS Nano* **15** 10119
- [101] Zhou N, Li H R, Li X B, Dang Z W, Sun Z D, Deng S J, Li J H, Xie Y, Xu H, Xia F F, Zhai T Y 2024 *Small Struct.* **5** 2400062
- [102] Sun L J, Wang S L, Ma C, Wei L M, Tao X T, Wang S P 2024 *ACS Appl. Opt. Mater.* **2** 679
- [103] Peng L S, Zheng T, Wu Z T, Zheng L, Zhang Y 2025 *J. Alloys Compd.* **1011** 178338
- [104] Li L, Wu Q Q, Wang C L, Cai Z Y, Lin L L, Gu X F, Ostrikov K K, Nan H Y, Xiao S Q 2024 *ACS Photonics* **11** 2615
- [105] Alamri M, Gong M G, Cook B, Goul R, Wu J Z 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 33390
- [106] Zhang J, Zhang X L, Li J, Ma Z Y, Leng B, Xia Q X, Shen L H, Song Y D, Fu Z W, Feng S Y, Feng L Z, Liu Z T, Yuldashev S, Jiang X, Liu B D 2022 *Opt. Mater.* **124** 111997
- [107] Noori Y J, Cao Y M, Roberts J, Woodhead C, Bernardo-Gavito R, Tovee P, Young R J 2016 *ACS Photonics* **3** 2515
- [108] Jiang F Q, Shi M D, Zhou J, Bu Y, Ao J P, Chen X S 2021 *Adv. Photonics Res.* **2** 2000187
- [109] Zhang Y, Li Y N, You Q, Sun J Y, Li K, Hong H, Kong L B, Zhu M Q, Deng T, Liu Z W 2023 *Nanoscale* **15** 1402
- [110] Suk J W, Piner R D, An J, Ruoff R S 2010 *ACS Nano* **4** 6557
- [111] Manzeli S, Allain A, Ghadimi A, Kis A 2015 *Nano Lett.* **15** 5330
- [112] Desai S B, Seol G, Kang J S, Fang H, Battaglia C, Kapadia R, Ager J W, Guo J, Javey A 2014 *Nano Lett.* **14** 4592
- [113] Hosseini M, Elahi M, Pourfath M, Esseni D 2015 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 375104
- [114] Sahatiya P, Solomon Jones S, Thanga Gomathi P, Badhulika S 2017 *2D Mater.* **4** 025053
- [115] Wang H, Dong C B, Gui Y L, Ye J, Altaieb S, Thomaschewski M, Movahhed Nouri B, Patil C, Dalir H, Sorger V J 2023 *Nanomaterials* **13** 1973
- [116] Lu D L, Chen Y, Kong L, Luo C B, Lu Z Y, Tao Q Y, Song W J, Ma L K, Li Z W, Li W Y, Liu L T, Li Q Y, Yang X D, Li J, Li J, Duan X D, Liao L, Liu Y 2022 *Small* **18** 2107104

SPECIAL TOPIC—2D materials and future information devices

Research progress of broadband photodetectors based on two-dimensional materials*

CUI Yueying¹⁾ SONG Junming¹⁾ ZHAO Weiwei^{1)2)†} YANG Fang^{2)‡}
LIU Hongwei^{2)††} NI Zhenhua¹⁾ LYU Junpeng¹⁾³⁾

1) (*School of Physics, Southeast University, Nanjing 211189, China*)

2) (*School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China*)

3) (*Advanced Ocean Institute, Southeast University, Nantong 226010, China*)

(Received 20 June 2025; revised manuscript received 10 September 2025)

Abstract

The increasing demands for high-speed imaging, aerospace, and optical communication have driven in-depth research on broadband photodetectors with high sensitivity and fast response. Two-dimensional (2D) materials have atomic-scale thickness, tunable bandgaps, and excellent carrier transport properties, making them ideal candidates for next-generation optoelectronics. However, their limited light absorption and intrinsic recombination losses remain key challenges. This paper provides an overview of recent progress of 2D-material-based broadband photodetectors. First, the fundamental optoelectronic properties of 2D materials, including bandgap modulation, carrier dynamics, and light-matter interactions, are discussed to clarify their broadband detection potential. Representative material systems, such as narrow-band gap semiconductors, 2D topological materials, and perovskites, are summarized, showing the detection ability from the ultraviolet to the mid-infrared regions. To overcome intrinsic limitations, four optimization strategies are highlighted: heterostructure engineering for efficient charge separation and extended spectral response; defect engineering to introduce mid-gap states and enhance sub-bandgap absorption; optical field enhancement through plasmonic nanostructures and optical cavities to improve responsivity; strain engineering for reversible band structure tuning, particularly suited for flexible devices. These strategies have achieved significant improvements in responsivity, detectivity, and bandwidth, with some devices implementing ultrabroadband detection and multifunctionality. In summary, 2D materials and their hybrids have shown great potential in broadband photodetection, with progress made in material innovation and device architecture optimization. The reviewed strategies, including heterostructure integration, defect modulation, optical field enhancement, and strain engineering, collectively demonstrate the different ways of overcoming intrinsic limitations and improving device performance. Looking ahead to the future, the reasonable combination of these methods is expected to further expand the detection window, improve sensitivity, and achieve multifunctional operations, thereby paving the way for the multifunctional applications of the next-generation broadband photodetectors in imaging, sensing, and optoelectronic systems.

Keywords: two-dimensional materials, broadband photodetectors, heterostructure integration, regulatory strategies

PACS: 85.60.Gz, 68.55.Ln, 68.65.-k, 73.40.Lq

DOI: 10.7498/aps.74.20251115

CSTR: 32037.14.aps.74.20251115

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2024YFB3211701), the Open Project of the State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, China (Grant No. KF25), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62404105, 12274234, T2222011), and the Key Program of the Research Fund for Advanced Ocean Institute of Southeast University, China (Grant No. KP20010003).

† Corresponding author. E-mail: jianpiao1986@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: phyyf@nmu.edu.cn

†† Corresponding author. E-mail: phylhw@njnu.edu.cn



二维材料宽谱光电探测器研究进展

崔月赢 宋俊明 赵伟玮 杨昉 刘宏微 倪振华 吕俊鹏

Research progress of broadband photodetectors based on two-dimensional materials

CUI Yueying SONG Junming ZHAO Weiwei YANG Fang LIU Hongwei NI Zhenhua LYU Junpeng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 228503 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251115

CSTR: 32037.14.aps.74.20251115

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251115>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

集成二维材料非线性光学特性研究进展

Research progress of nonlinear optical properties of integrated two-dimensional materials

物理学报. 2023, 72(17): 174202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230729>

光栅局域调控二维光电探测器

Photogating effect in two-dimensional photodetectors

物理学报. 2021, 70(2): 027801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201325>

基于扫描热探针技术的二维材料物性调控研究进展

Research progress of regulation of physical properties of two-dimensional materials based on thermal scanning probe lithography

物理学报. 2025, 74(3): 038101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241590>

二维材料体光伏效应研究进展

Research progress of bulk photovoltaic effect in two-dimensional materials

物理学报. 2023, 72(23): 237201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231786>

基于二维材料的自旋-轨道矩研究进展

Research progress of spin-orbit torques based on two-dimensional materials

物理学报. 2021, 70(12): 127501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210004>

高压下二维材料结构和光电性能研究进展

Recent progress of structures and photoelectric properties of two-dimensional materials under high pressure

物理学报. 2025, 74(20): 200701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251034>