

## 二维材料范德华异质结光电探测器研究进展

赵语嫣<sup>1</sup>, 程碑彤<sup>1</sup>, 黄帅<sup>1</sup>, 蒋若梅<sup>1</sup>, 胡卫英<sup>1</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 宋海智<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>西南技术物理研究所量子研究中心和激光雷达与器件技术重点实验室 四川成都

<sup>2</sup>天府绛溪实验室微波与光子集成前沿研究中心 四川成都

<sup>3</sup>长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室 吉林长春

**【摘要】**二维(two-dimensional, 2D)材料因其新颖的物理特性, 已广泛用于光电探测器的研制。由于 2D 材料可以不受晶格匹配限制地在不同材料间以范德华(van der Waals, vdW)力结合而有效调节 2D 材料的性能, 用于光电探测器的 vdW 异质结近年来也得到了广泛深入的研究, 并在探测器性能上获得了很大提升。为了全面了解 2D 材料 vdW 异质结在光电探测器发展中的作用, 本文综述了双层 2D 材料 vdW 异质结光电探测器的研究现状, 总结了不同手段调控下的 2D 材料 vdW 异质结光电探测器的发展成果, 描述了构建三层 2D 材料 vdW 异质结并应用于光电探测器性能提升方面的努力, 报告了拓扑量子材料与 2D 材料的 vdW 异质结对光电探测器发展的贡献, 最后展望了 2D 材料 vdW 异质结光电探测器的未来发展趋势。期待本文工作作为新一代 2D 材料光电器件的未来发展提供参考。

**【关键词】**二维材料; 光电探测器; 范德华异质结; 光电性能

**【基金项目】**国家重点研发计划项目 2021YFA0718803; 成都市重大科技创新项目 2021-YF08-00159-GX

**【收稿日期】**2024 年 11 月 8 日

**【出刊日期】**2024 年 12 月 20 日

**【DOI】**10.12208/j.pstr.20240007

### Research progress of photodetectors based on two-dimensional material van der Waals heterojunctions

Yuyan Zhao<sup>1</sup>, Beitong Cheng<sup>1</sup>, Shuai Huang<sup>1</sup>, Ruomei Jiang<sup>1</sup>, Weiyong Hu<sup>1</sup>, Wei Zhang<sup>1</sup>, Haizhi Song<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Quantum Research Center and Key Laboratory of Lidar and Device, Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan

<sup>2</sup>Shimmer Center, Tianfu Jiangxi Laboratory, Chengdu, Sichuan

<sup>3</sup>State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin

**【Abstract】** With their high novelty, two-dimensional (2D) materials have been widely applied in the creation of photodetectors. In recent years, since different 2D materials can be combined together by van der Waals (vdW) force without requiring the lattice matching to effectively tune materials' characteristics, 2D-material vdW heterojunction based photodetectors were widely and deeply investigated and were remarkably improved in the optoelectronic performance. In order to thoroughly learn the roles of 2D-material vdW heterojunctions in constructing highly sophisticated photodetectors, we herewith review the research status of two-layer vdW heterojunction photodetectors, summarize the achievements in modulating the two-layer vdW heterojunction photodetectors by various approaches, describe the efforts in constructing three-layer vdW heterojunctions and further improving the photodetectors' performance, report the contributions of vdW heterojunctions composed of 2D and topological materials to the advances of photodetectors, and finally prospect the future trend in developing 2D-material vdW heterojunction photodetectors. We expect that this work serves as a reference for advancing next-generation optoelectronic devices based on 2D materials.

\*通讯作者: 宋海智

**【Keywords】** Two-dimensional materials; Photodetector; Van der Waals heterojunctions; Optoelectronic characteristics

## 引言

光电探测器是现代光电子系统的核心元件, 多种光电探测器已广泛应用于光通信、热成像、生物医疗、态势感知和环境监控等领域<sup>[1-3]</sup>, 对国防科技和国民经济提供了重要的支撑。高性能的光电探测器离不开高质量的光敏感材料, 目前商业化的光电探测器主要由硅、锗、碲镉汞、汞镉碲、氧化钒等无机半导体材料构成, 但它们也存在着诸如探测能力有极限、造价昂贵(多需要制冷设备)、制备工艺复杂苛刻等不足<sup>[3]</sup>。此外, 传统半导体材料的光电探测能力往往只能覆盖一定波长区域, 尤其是在中远红外及太赫兹波段缺乏新颖高效低成本的光敏材料<sup>[4]</sup>。因此, 如何突破传统材料的局限, 使光电探测器实现 SWaP<sup>3</sup>(小尺寸、轻型化、高性能、低功耗和低成本)目标, 是有待解决的关键问题<sup>[5]</sup>。

自石墨烯(graphene)被成功制备<sup>[6]</sup>以来, 越来越多的二维(Two-Dimensional, 2D)材料得到了广泛的关注。更由于其独特优异的物性, 例如载流子迁移率高、带隙可调、光谱响应范围大、表面悬挂键少、能够有效避免短沟道效应等诸多优势<sup>[7-9]</sup>, 2D材料已成为光电探测领域的重要候选材料<sup>[10]</sup>。目前常用的光电探测 2D 材料有石墨烯<sup>[11]</sup>、过渡金属硫族化合物(transition-metal-dicalcogenides, TMDs)<sup>[12]</sup>、黑磷(black phosphorous, BP)和蓝磷(Blue phosphorous, BlueP)<sup>[13]</sup>、六方氮化硼(h-BN)以及其它材料<sup>[14-16]</sup>。然而单一 2D 材料的性能依然存在缺陷, 需要开发相应的优化措施。2D 材料层内原子由共价键结合而成, 层间通过弱的范德华(van der Waals, vdW)力结合, 因此不同材料组合可以不受晶格匹配限制而形成 vdW 异质结<sup>[17]</sup>。与单一 2D 材料相比, 2D 材料异质结拥有带隙可调、载流子迁移率可提升和层间电荷可高效转移等特点, 为 2D 材料光电性能的提高和新型器件设计提供更多可能性。因此, 近年来, 2D 材料 vdW 异质结在光电探测器领域得到了重视和发展, 人们研究和研制了多种不同结构的双层、多层 vdW 异质结, 观察到这类结构在探测灵敏度、暗电流、工作温度等指标上超越了传统薄膜器件的极限<sup>[4]</sup>。在这一领域, 近年来还发展出了拓扑材料与 2D 材料构成的 vdW 异质结构, 为

光电探测器件带来新的发展机遇<sup>[18]</sup>。

为了进一步提高 2D 材料光电探测技术水平, 本文将梳理 2D 材料 vdW 异质结光电探测器方面近年来的研究进展, 总结双层异质结探测器及其调控的成果, 描述多层异质结、拓扑材料异质结对光电探测器性能的优化情况, 并提出对未来趋势的期望, 为光电探测技术的综合发展提供有效参考。

## 1 双层 2D 材料 vdW 异质结光电探测器

通过叠加两种不同的 2D 材料形成的 vdW 异质结构, 对于探索低维系统的新奇物理特性和开发其在光电信息领域的应用具有重要意义。几种典型的 2D 材料如石墨烯、TMDs 以及 BP 等, 已经被有效整合到这种结构中, 且其在光电探测领域的应用前景得到了广泛的研究。下面将从理论仿真和实验研究两个方面介绍双层 vdW 异质结用于光电探测器的研究进展。

该领域较早受到理论关注的有基于石墨烯的 vdW 异质结。2015 年, Cai 等<sup>[19]</sup>发现 graphene/BP 异质结可以保护 BP 不受外界环境的影响而发生化学降解, 解决 BP 器件稳定性的问题; 石墨烯作为一个活性层可以改善 BP 与金属电极的接触性能, 同时这种异质结提供了打开石墨烯零带隙的新颖简便的手段。2016 年, Le 等<sup>[20]</sup>在 graphene/MoS<sub>2</sub>上也证明了范德华层间耦合对系统稳定性的提升, 其后同结构计算<sup>[21]</sup>更证明了其良好的热稳定性和较高的原子内聚能, 有利于光电探测性能的进一步提升。2017 年, Behera 等<sup>[22]</sup>对 graphene/h-BN 的研究显示, 石墨烯的带隙进一步打开, 且通过诱导电场呈现出场驱动的开关闭合性质, 有助于研制微纳场效应光晶体管探测器件。2019 年, Wang 等<sup>[23]</sup>证明 graphyne(石墨炔)/BlueP 的直接带隙和 I 型能带对准特性可用于实现自旋电子型的量子光电探测。

基于 TMDs 的范德华异质结构也得到了深入的理论研究。2014 年, 对 MoS<sub>2</sub>/MX<sub>2</sub> (M=Mo,Cr,W;X=S,Se) 类型异质结的计算<sup>[24]</sup>表明, 多数异质结的间接带隙半导体特性有助于增强光电转换效率。2018 年, Wang 等<sup>[25]</sup>研究了 TMD/ZnO 异质结, 观察到它们在可见光和红外区域均表现出良好的光吸收特性(图 1a); 同时 MoS<sub>2</sub>/ZnO 和 WS<sub>2</sub>/ZnO 为 II 型能带

对齐, 更有助于有效地分离光生电荷从而增强光电探测性能。2019年, Ren等<sup>[26]</sup>计算研究了TMD/Boron-Phosphide异质结构, 发现其在界面处具

有较强的内建电场, 可有效应用于光电和光催化领域。类似地, 基于SnS<sub>2</sub>、SnSe<sub>2</sub>的双层异质结<sup>[27]</sup>也被证明是可靠光电探测器件的有力候选。

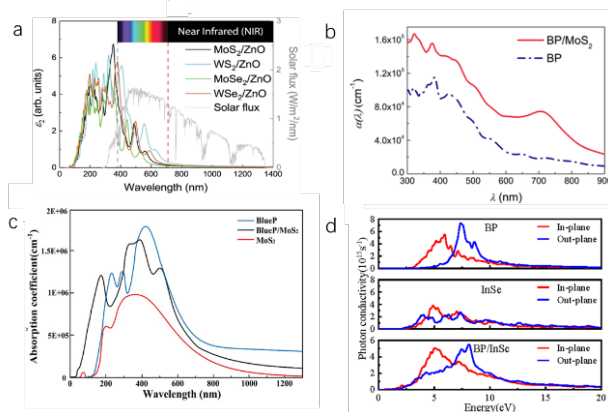


图1 几种vdW异质结光电器件的理论计算成果

(a) TMD/ZnO异质结构的介电函数虚部<sup>[25]</sup>; (b) BP/MoS<sub>2</sub>异质结和单层BP在x方向的光吸收系数对比<sup>[29]</sup>; (c) BlueP/MoS<sub>2</sub>异质结、单层MoS<sub>2</sub>及单层BlueP的光吸收系数<sup>[30]</sup>; (d) BP/InSe异质结、单层BP及单层InSe的光导率<sup>[31]</sup>

BlueP/BP异质结构<sup>[28]</sup>是一种直接带隙半导体, 具有II型能带偏移, 这种异质结构可能表现出很强的栅极可调谐电流整流特性, 在未来电子和光电子领域具有很大的应用潜力。但二维磷烯(BP和BlueP)材料相关的双层异质结, 主要也是与TMD的结合。2018年, Tang等<sup>[29]</sup>对BP/MoS<sub>2</sub>光电特性的研究(图1b)表明, BP与MoS<sub>2</sub>的良好匹配可以提高光电探测器的响应和吸收特性。2020年, Yang等<sup>[30]</sup>对不同构型的BlueP/MoS<sub>2</sub>异质结进行了优化, 使其可以有效

地分离电子和空穴, 且具有较宽的光响应范围和良好的光吸收能力(图1c), 在光电和光伏器件中具有很大的应用潜力。2022年, 本团队Huang等<sup>[31]</sup>计算验证了BP/InSe异质结优异的吸收系数和光导率(图1d)等, 证明其可以有效抑制电子-空穴对的复合, 有利于提高光电器件的效率。其它材料如AlAs/InSe的理论研究<sup>[32]</sup>也在不断验证范德华双层2D材料异质结光吸收性能的提升和作为光电探测器有力候选的优势所在。

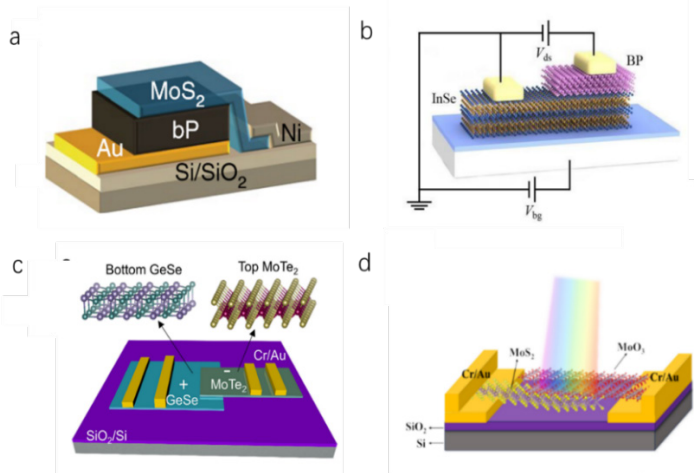


图2 典型2D vdW异质结探测器结构示意图

(a) BP/MoS<sub>2</sub>异质结器件<sup>[36]</sup>; (b) InSe/BP/Metal垂直异质结构雪崩器件<sup>[37]</sup>; (c) GeSe/MoTe<sub>2</sub>异质结器件<sup>[39]</sup>; (d) MoS<sub>2</sub>/MoO<sub>3</sub>异质结器件<sup>[40]</sup>

表 1 部分 2D 材料 vdW 异质结光电探测器的性能总结

Materials	Wavelength /nm	Responsivity R/A W <sup>-1</sup>	Detectivity D*/Jones	Response Time/ms	Ref.
graphene/MoS <sub>2</sub>	1440	1.26	/	/	41
graphene/MoS <sub>2</sub>	220	3.4×10 <sup>3</sup>	10 <sup>12</sup>	/	42
graphene/MoS <sub>2</sub>	520	2.1×10 <sup>3</sup>	1.5×10 <sup>10</sup>	/	43
graphene/MoS <sub>2</sub>	432	2.2×10 <sup>5</sup>	3.5×10 <sup>13</sup>	/	44
graphene/BP	1550	3.3×10 <sup>3</sup>	/	4	45
BP/WSe <sub>2</sub>	1550	3.3×10 <sup>3</sup>	10 <sup>10</sup>	0.8	46
MoS <sub>2</sub> /BP	633	0.418	/	/	34
MoS <sub>2</sub> /BP	532	22.3	3.1×10 <sup>11</sup>	0.015	35
MoS <sub>2</sub> /BP	1550	0.153	/	/	35
MoS <sub>2</sub> /b-AsP	/	0.2161	9.2×10 <sup>9</sup>	/	47
MoS <sub>2</sub> /PtSe <sub>2</sub>	1550	0.021	2.72×10 <sup>8</sup>	/	48
MoS <sub>2</sub> /MoO <sub>3</sub>	365	0.645	8.98×10 <sup>10</sup>	/	40
WS <sub>2</sub> /HfS <sub>2</sub>	4700	8.2×10 <sup>2</sup>	/	/	49
ReS <sub>2</sub> /ReSe <sub>2</sub>	980	0.66	10 <sup>9</sup>	0.006	50
ReSe <sub>2</sub> /MoTe <sub>2</sub>	2000	1.05	6.66×10 <sup>11</sup>	5.6	51
GeSe/MoTe <sub>2</sub>	1310	1.4×10 <sup>4</sup>	10 <sup>12</sup>	0.45	52
GeSe/MoTe <sub>2</sub>	1050	28.4	5.6×10 <sup>9</sup>	/	39
GeSe/ReSe <sub>2</sub>	1550	2.89×10 <sup>5</sup>	4.91×10 <sup>13</sup>	/	53
GeSe/MoSe <sub>2</sub>	850	0.465	7.3×10 <sup>9</sup>	180	54
InSe/ReSe <sub>2</sub>	980	3.54	10 <sup>9</sup>	0.36	55
WSe <sub>2</sub> /ReS <sub>2</sub>	785	0.29	8.02×10 <sup>12</sup>	/	60
MoSe <sub>2</sub> /GeSn/Ge	2250	12.75	1.74×10 <sup>10</sup>	/	61
WSe <sub>2</sub> /graphenen/MoS <sub>2</sub>	532	4.25×10 <sup>3</sup>	2.2×10 <sup>12</sup>	/	79
h-BN/b-AsP/h-BN	3400	0.19	/	/	80
MoTe <sub>2</sub> /GeSe/MoS <sub>2</sub>	405~1550	0.723	2.3×10 <sup>12</sup>	/	81
2H-MoTe <sub>2</sub> /1T'-MoTe <sub>2</sub> /MoSe <sub>2</sub>	530~1550	0.76	3×10 <sup>9</sup>	/	82
WS <sub>2</sub> /Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	370-1550	30.4	2.3×10 <sup>11</sup>	/	83
graphene/Bi <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	1550	10	/	/	84
WSe <sub>2</sub> /Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	1550	0.027	/	0.18	91
SnTe/Bi <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	1550	0.146	1.15×10 <sup>10</sup>	0.0069	92

双层 vdW 异质结在实验研究方面也取得了很大进展。早期的重要进展多发生在 TMD 相关结构。2014 年, Zhang 等<sup>[33]</sup>制备的 graphene/MoS<sub>2</sub> 异质结, 由于电子-空穴对界面被有效分离, 室温下实现了 10<sup>7</sup>A/W 的高响应度和 10<sup>8</sup> 的光电导增益。同年, Deng 等人<sup>[34]</sup>制备了 p-BP/n-MoS<sub>2</sub> 结构, 在 633nm 实现了 418mA/W 的响应度, 比之前基于单层 BP 的探测器提高近 100 倍。2016 年, Ye 等人<sup>[35]</sup>采用 BP/MoS<sub>2</sub> 制备了探测范围在可见光到近红外的光电探测器, 在 532nm 和 1550nm 处响应度分别为

22.3 A/W 和 153.4 mA/W, 并且实现了 15 μs 的快速响应。2018 年, Bullock 等人<sup>[36]</sup>优化了 BP/MoS<sub>2</sub> 器件结构 (图 2a), 使中红外探测效率达到 35%、比探测率 D\* 达到 1.1×10<sup>10</sup> Jones。此后的主要实验进展拓展到了其它 2D 材料。2019 年, 南京大学 Gao 等<sup>[37]</sup>报导了 BP/InSe 垂直异质结弹道雪崩光电二极管 (图 2b), 表明其可在纳米级的有源区域发生雪崩, 在几伏偏压下增益高达 3×10<sup>4</sup>, 且具有良好的噪声特性, 可用于中波红外微弱光探测, 对激光测距和生物探测等领域具有重要意义。为提高二维红

外光电探测器的低量子效率, 2022年, Chen等人<sup>[38]</sup>制备了一种BP/Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se异质结探测器, 该器件具有动量匹配和带对准异质结构, 室温下在1.3 μm和2.0 μm处表现出84%和76.5%的高量子效率。同年, Chen等人<sup>[39]</sup>研制的GeSe/MoTe<sub>2</sub>两层vdW异质结具有紫外、可见光和近红外宽光谱探测能力(图2c), 在1050 nm附近宽谱上有28.4 A/W的高响应率和5.6×10<sup>9</sup> Jones的比探测率, 在365 nm处具有3 μs的快响应速度。2024年, Li等<sup>[40]</sup>构建了MoS<sub>2</sub>/MoO<sub>3</sub>异质结光电探测器(图2d), 将紫外到可见光范围的比探测率D\*峰值提高到8.98×10<sup>10</sup> Jones。

还有很多同类或异类2D材料构建的双层vdW异质结, 部分如文献<sup>[41-55]</sup>, 与以上典型结果一起列在表1中。可以看出, 这些研究确切表明了, 构建vdW异质结是改善2D材料光电探测器性能的有效途径。

## 2 双层vdW异质结光电探测性能的调控

双层vdW异质结的光电探测性能, 可以通过不同的调控方法获得提升。常用的调控方法有掺杂、外加电场、应变等, 本节将介绍不同的调控手段下双层vdW异质结光电探测器的研究成果。

掺杂调控是指在2D材料表面吸附其它分子、掺杂同类或异类原子, 或者去除和替换部分原子以构造缺陷, 是调优2D材料性能的有效手段。2021年, Wang等<sup>[56]</sup>计算了空位和原子掺杂对g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/WSe<sub>2</sub>异质结的电子结构和光学性质的影响, 从图3中(a)和(b)展示的6种不同掺杂方式及其能带结构, 可以看到掺杂导致能带对准从I型向II型转变, 这将促进光生电子-空穴对的分离从而提高探测效率。同年, Fu等<sup>[57]</sup>在graphene/MoS<sub>2</sub>异质结中掺杂F、Cl、Br和I元素, 如图3(c)所示, 计算发现掺杂异质结的能带结构发生了明显的变化, 出现了新的能级, 其中MoS<sub>2</sub>层在费米面附近产生了一定的态密度, 介电函数性质表明掺杂卤素异质结的光吸收范围从可见光扩展到红外光, 提高了异质结对红外光的利用率。2024年, Lv等<sup>[58]</sup>研究了α-In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/MoS<sub>2</sub>异质结掺杂对带结构的影响(图3d), 进一步确证了<sup>[56]</sup>所显示的掺杂调控导致I型向II型能带对准的转变。

通过掺杂对vdW异质结进行调控的实验工作

也取得了很大进展。2017年, Long等人<sup>[47]</sup>将砷元素掺入BP制作了b-AsP/MoS<sub>2</sub>异质结光电探测器, 如图4(a)所示。该器件的光谱响应度远高于b-AsP器件、PbSe器件和热敏电阻, 且改变As掺杂量可以调节带隙, 使该结构成为性能优良的宽谱光探测材料。2022年, Yu等<sup>[59]</sup>实验研究了MoS<sub>2</sub>/SnSe<sub>2</sub>掺杂, 如图4(b)所示, 发现掺Nb异质结探测器的紫外/可见光抑制比相较不掺杂情形提高了5个数量级, 响应时间明显优化了3个数量级。2023年, Zhan等<sup>[60]</sup>利用p型掺杂剂F<sub>4</sub>-TCNQ(四氟四氰基喹啉二甲烷)分子, 通过WSe<sub>2</sub>/ReS<sub>2</sub>异质结的表面电荷转移掺杂制备了p-i-n光电探测器, 其结构原理及显微图像如图4(c)所示。该结构降低了肖特基势垒、增强了内建电场, 使得探测器在785 nm波长的响应度从0.08提高到0.29 A/W, 比探测率从1.89×10<sup>12</sup>提高到8.02×10<sup>12</sup> Jones, 外量子效率从12.67%提高到46.29%。同年, Lin等<sup>[61]</sup>对MoSe<sub>2</sub>/GeSn异质结的两层分别进行n型和p型掺杂, 在n-Ge衬底上形成了光晶体管结构, 使器件在2250 nm响应度达到12.75 A/W, 比探测率达到1.74×10<sup>10</sup> Jones, 为高性能短中波红外光电探测器提供了新方法。以上实验进展在表1中进行了列表总结, 可以看出, 2D材料掺杂是vdW异质结探测性能提升的重要调控手段。

应变调控是通过在一个或者多个方向同时施加应变, 改变材料晶格常数或空间对称性, 从而实现性能的调控。2D材料的应变承受极限通常要明显高于三维块体材料, 这意味着2D材料的性能可以更有效地通过应力被调控。2018年, Liao等<sup>[64]</sup>发现对BP/MoS<sub>2</sub>异质结施加应力可以调节带隙大小, 同时使能带对准由II型变为I型。2019年, Wang等的工作<sup>[23]</sup>显示, 应力对graphene/BlueP的调控有与电场类似的功能, 两者可以联合实施, 获得更大的调控自由度。同年, 谭淼等<sup>[65]</sup>和Fang等<sup>[27]</sup>的计算表明, WS<sub>2</sub>(Se)<sub>2</sub>/WSe<sub>2</sub>(Te)<sub>2</sub>和SnS(Se)<sub>2</sub>类异质结在施加单轴或双轴应力后由半导体变为金属特性。2021年, 展晓飞等<sup>[66]</sup>发现双轴应力下g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BlueP异质结能带类型转变有利于实现高效光生电荷分离, 且应力调控后在可见光区的光吸收明显增强。2022年, 郭瑞等<sup>[32]</sup>证明AlAs/InSe异质结通过应变或联合电场, 可以有效地调控带隙值。

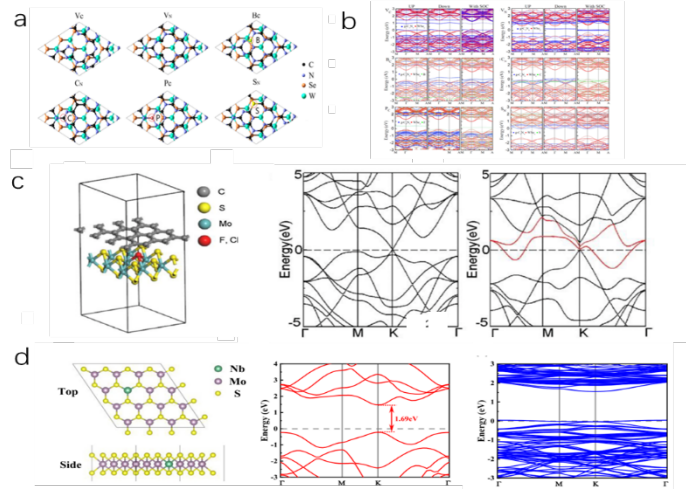


图 3 掺杂调控 vdW 异质结理论研究典型成果 (a) 结构优化后的 C、N 空位及 B、C、P、S 原子掺杂 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/WSe<sub>2</sub> 异质结的俯视图<sup>[56]</sup>; (b) 图 (a) 中六种结构的能带结构图<sup>[56]</sup>; (c) 掺杂的异质结模型图、本征 graphene/MoS<sub>2</sub> 异质结的能带结构及 F 掺杂 graphene/MoS<sub>2</sub> 异质结的能带结构<sup>[57]</sup>; (d) Nb 掺杂 MoS<sub>2</sub> 原子结构的俯视图和侧视图以及 MoS<sub>2</sub> 和 Nb 掺杂 MoS<sub>2</sub> 的能带结构<sup>[58]</sup>

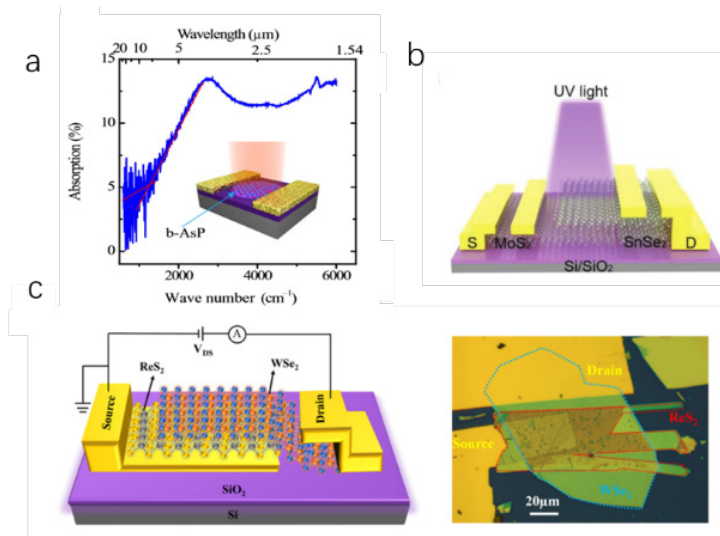


图 4 掺杂调控的 vdW 异质结探测器 (a) b-As<sub>0.83</sub>P<sub>0.17</sub> 样品的红外吸收光谱以及用于光电探测的 b-As<sub>0.83</sub>P<sub>0.17</sub> 器件结构图<sup>[47]</sup>; (b) 掺 Nb 的 MoS<sub>2</sub>/SnSe<sub>2</sub> 异质结的光电探测器示意图<sup>[59]</sup>; (c) F<sub>4</sub>-TCNQ 掺杂 WSe<sub>2</sub>/ReS<sub>2</sub> 异质结探测器原理图及光学显微镜图像<sup>[60]</sup>

此外, 通过改变不同层间的原子对齐方式或者改变异质结中材料的堆叠方式, 也可以实现对材料器件性能的调控。在以上调控下, 异质结中各层材料的性能优点可能被同时放大, 并且还能出现一系列新的物理性质, 形成 vdW 异质结在光电探测方面的优势。

### 3 三层 vdW 异质结光电探测器

从以上双层 vdW 异质结的研究成果看到, 此类探测器仍需要不断创新, 以适应高端应用需要。由于增加不同材料层可能会为 vdW 异质结性能优

化开辟更大的空间<sup>[67]</sup>, 人们想到进一步发展双层以上 vdW 异质结。本小节将梳理三层 2D 材料 vdW 异质结光电探测器方面近年来的研究成果。

在理论计算方面, 2013-2015 年, Kim 等<sup>[68]</sup>和 Farooq 等<sup>[69]</sup>的研究证明了 BN/graphene/BN 三层异质结构可以打开石墨烯带隙, 增强其光电晶体管应用潜力。2016-2017 年, Datta 等<sup>[70,71]</sup>证明 MoS<sub>2</sub>/MX<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub> 结构在应力下有效质量减小并发生半导体-金属相变, 有利于形成纳米尺度的高灵敏度效应光电探测器。2016-2018 年, Xu 等<sup>[72]</sup>和 Xia 等<sup>[73]</sup>的研究表明, 基于

TMD/graphene 的三层 vdW 异质结的光电转换机制具有显著的外电场调控特性, 有利于形成高性能二维场效应光电探测器。2020 年, Bafekry 等<sup>[74]</sup>理论分析了  $C_3N_4/MoS_2/C_3N_4$  等异质结, 表明其新颖的磁性特征可用于构建纳米尺度的基于自旋效应的光电器件。2021 年, Han 等<sup>[75]</sup>计算了基于  $BlueP/MoX_2$  的三层异质结, 发现其对光生电子-空穴对的加速分离能力和可控光电转换效率。2022 年, Liu 等<sup>[76]</sup>提出了  $MoS_2/SiC/MoS_2$  和  $SiC/MoS_2/SiC$  三层异质结构, 发现其能带结构的应力调制效应十分有利于研制高功率高可靠的 2D 光电器件。

以上理论研究大都针对具有对称材料结构的三层异质结, 本团队 Cheng 等<sup>[77,78]</sup>则对复杂非对称三层异质结构展开了研究。计算结果首先表明, 基于石墨烯、 $MoS_2$ 、磷烯的三层非对称 vdW 异质结具有优于双层结构的稳定性。电子性质计算表明,  $BP/graphene/MoS_2$  和  $BlueP/graphene/MoS_2$  这两种三层异质结 (图 5a) 在打开石墨烯带隙 (图 5b) 的同时, 还能够保留异质结各单层材料优异的电子特性 (如高迁移率), 这对于在 2D 材料光电探测器中提

高光响应速度非常有益。光电性质的计算表明,  $BP/graphene/MoS_2$  和  $BlueP/graphene/MoS_2$  具有增强的内建电势 (图 5c), 有助于光晶体管探测器的构建; 其中波、长波红外和紫外波段的光吸收显著强于对应的双层异质结 (图 5d), 这为构建新一代微纳光谱探测器件提供了新思路。

三层 vdW 异质结实验方面近年来也有一定进展。2016 年, Long 等人<sup>[79]</sup>制备  $MoS_2/graphene/WSe_2$  红外光电探测器, 通过增加石墨烯层拓宽了器件的光谱响应范围。2018 年, Yuan 等<sup>[80]</sup>设计制备了  $h-BN/b-AsP/h-BN$  三层 vdW 异质结光电探测器, 室温下在 3.4、5.0 和 7.7  $\mu m$  处的光响应度分别达到 190、16 和 1.2  $mA/W$ 。2024 年, Jiang 等<sup>[81]</sup>制备  $MoTe_2/GeSe/MoS_2$  光电探测器结构, 得到了 405 ~ 1550nm 的宽谱响应, 723  $mA \cdot W^{-1}$  的响应度和高达  $2.3 \times 10^{12}$  Jones 的比探测率。前不久, Pan 等人<sup>[82]</sup>研制了一种更新材料的异质结构光电探测器,  $2H-MoTe_2/1T'-MoTe_2/MoSe_2$ , 在 532~1550 nm 的宽谱范围内实现更高响应度  $0.76 AW^{-1}$  和比探测率  $3 \times 10^9$  Jones。表 1 中列表<sup>[79-82]</sup>展示了上述实验结果。

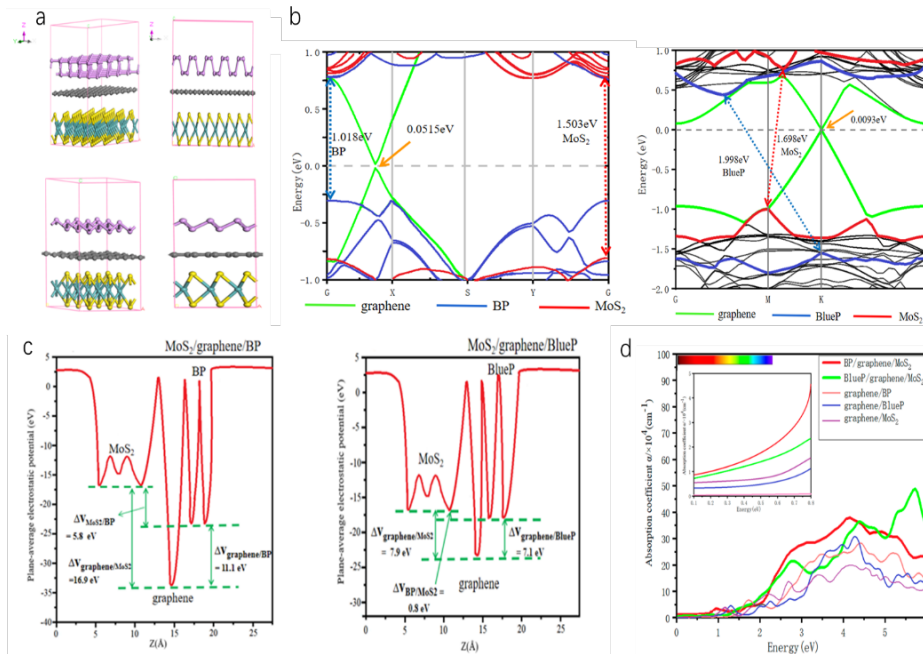


图 5 BP/graphene/MoS<sub>2</sub> 和 BlueP/graphene/MoS<sub>2</sub> 三层 vdW 异质结的光电特性<sup>[77,78]</sup> (a) 原子结构主视图和侧视图; (b) 投影能带结构图; (c) 平均静电势图; (d) 光吸收系数对比图

综合以上成果我们可以看到, 构建三层 vdW 异质结构是更好地调节 2D 材料、获得更高光电性能

的有效途径。

#### 4 拓扑材料 vdW 异质结光电探测器

拓扑材料是在 2005 年前后开始发展起来的新型材料, 因其表现出如量子反常霍尔效应、零带隙拓扑态及超高载流子迁移率等新颖物理特性, 在光电器件领域具有重要的研究价值。特别地, 将 2D 拓扑材料与常见 2D 材料组合构成 vdW 异质结构, 可能为 2D 材料光电探测器带来新的发展机遇。

光电探测涉及的拓扑绝缘体 2D 材料主要有  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  等。2016 年, Yao 等<sup>[83]</sup>研制了  $\text{WS}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  异质结探测器, 可在 370 ~ 1550 nm 宽谱范围内稳定实现响应度 30.7 A/W、探测率  $2.3 \times 10^{11}$  Jones, 在 TMD 相关 2D 光电探测器中表现非常突出。2017 年, Kim 等<sup>[84]</sup>构建了一种基于  $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{graphene}$  异质

结构的光电探测器, 通过  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  的宽带吸收和界面上高效的热载流子分离同时提高了响应范围和响应度, 在室温下实现了覆盖近中红外谱段的高灵敏探测。2020 年, Yang 等<sup>[85]</sup>外延生长制备了  $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{WSe}_2$  异质结构 (图 6a), 定量确认了其 II、III 型能带对准特性, 显示了其在高速、宽谱、自驱动光电探测器方面的应用潜力。同年, Bafekry 等<sup>[86]</sup>计算了  $\text{graphene}/\text{Pt}_2\text{HgSe}_3$  异质结, 发现石墨烯带隙打开达 15 meV, 同时拓扑绝缘体层可吸收更多紫外-可见光从而形成高速、宽谱、可调控的光探测能力。2022 年, Kiemle 等<sup>[87]</sup>制备了  $\text{graphene}/\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  异质结 (图 6b), 展示了该结构在偏振分辨光探测方面的良好性能。

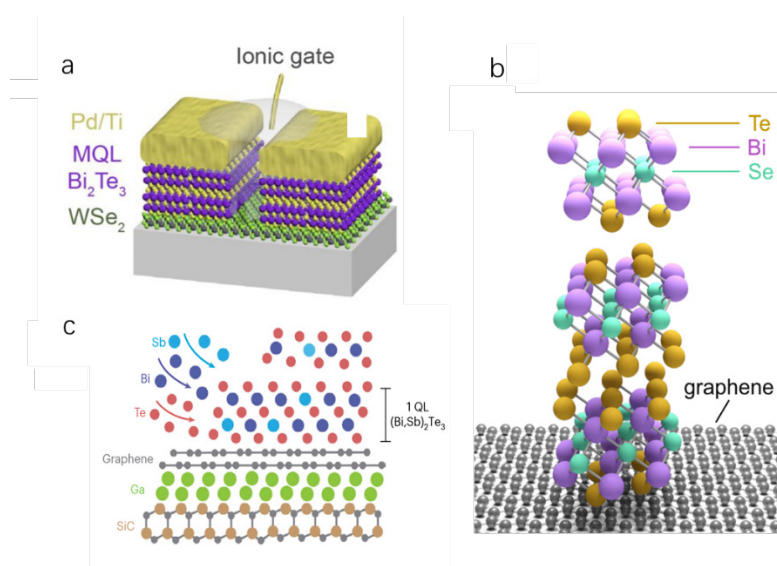


图 6 典型拓扑量子材料与 2D 材料构建的光电探测器示意图 (a);  $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{WSe}_2$  异质结<sup>[85]</sup>; (b) 石墨烯上的  $\text{graphene}/\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  异质结<sup>[87]</sup>; (c)  $(\text{Bi, Sb})_2\text{Te}_3/\text{graphene}/\text{Ga}$  三层异质结<sup>[89]</sup>

基于拓扑半金属材料的光电探测器可有具有较大的光敏面积, 更有利于光子能量的收集, 在微弱信号的中红外探测方面具有更明显的优势。2019 年, Huang 等<sup>[88]</sup>制备了一种  $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{MoS}_2$  异质结光电探测器, 在可见光到近红外范围内大幅降低了暗电流, 提高了信噪比。拓扑超导体近来也受到了很大关注, 甚至在复杂多层 vdW 异质结构中发挥了作用。2023 年 Li 等<sup>[89]</sup>制备了  $(\text{Bi, Sb})_2\text{Te}_3/\text{graphene}/\text{Ga}$  三层异质结构 (图 6c), 2024 年 Thingstad 等<sup>[90]</sup>计算了 TMD/ $\text{MnPSe}_3$ /TMD 等三层异质结构, 显示了拓扑超导体在量子计算、量子探测等方面的良好应用前景。

表 1 中总结了一些性能优良的拓扑材料 vdW 异质结<sup>[83,84,91,92]</sup>研究成果, 从这些结果及其与其它结构

的比较可以看出, 拓扑材料用于 vdW 异质结是一种有效的提高光电探测器性能的手段。

## 5 结论与展望

用于光电探测器的 vdW 异质结近年来得到了广泛深入的研究, 并在 2D 材料探测器性能上获得了显著提升。本文综述了双层 2D 材料 vdW 异质结光电探测器的发展, 不同手段对 2D 材料 vdW 异质结光电探测器的调控, 三层 2D 材料 vdW 异质结光电探测器的进展, 以及拓扑材料/2D 材料 vdW 异质结对光电探测器的提升, 希望能为 2D 材料相关新型光电器件的未来发展提供参考。

展望今后的研究方向, 我们认为 2D 材料异质结探测器件应当在以下几个方面应对越来越艰难的



技术挑战:

1) 2D 材料 vdW 异质结光电探测器目前无法兼具高光响应度、高响应速度、宽波长响应以及高灵敏度等特点。寻找更新型的异质结构材料、同时实现更精致的不同调控手段、设计更新原理机制的器件结构将是必须面对的课题。

2) 目前部分高性能 2D 材料 vdW 异质结光电探测器的研究主要是基于仿真计算的结果, 尤其是多元材料组合和结构复杂的异质结器件, 在实验中还未得到验证。加快从理论仿真到器件制备的转化过程, 是 2D 材料 vdW 异质结高端器件能否在未来市场发挥决定作用的重要支撑。

3) 多数行之有效的 2D 材料 vdW 探测器解决了单元器件研制技术以后, 阵列器件研制的需求大为增长。这就需要首先实现高质量大尺寸 2D 材料的制备, 为 2D 材料 vdW 探测器走向规模化阵列化奠定基础。

4) 在人工智能及先进软件工具的协助下发现更多新型拓扑材料, 研究其与 2D 材料有效结合的机理机制, 构建新型低维高性能的拓扑异质结光电器件, 应当是未来微纳集成光电探测器的重要发展方向之一。

### 参考文献

- [1] Miao J S, Wang C. Avalanche photodetectors based on two-dimensional layered materials[J]. *Nano Research*, 2020, 14(6): 1878-1888.
- [2] 叶振华, 李辉豪, 王进东, 等. 红外光电探测器的前沿热点与变革趋势[J]. *红外与毫米波学报*, 2022, 41(1): 15-39.
- [3] 程碑彤, 代千, 谢修敏, 等. 单光子探测器的研究进展[J]. *激光技术*, 2022, 46(5): 601-609.
- [4] Wang H Y, Li Z X, Li D Y, et al. Van der Waals integration based on two-dimensional materials for high-performance infrared photodetectors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(30): 2103106.
- [5] 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.
- [6] Azar N S, Bullock J, Shrestha V R, et al. Long-wave infrared photodetectors based on 2D platinum diselenide atop optical cavity substrates[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(4): 6573-6581.
- [7] Liu X F, Guo Q B, Qiu J R. Emerging Low-Dimensional Materials for Nonlinear Optics and Ultrafast Photonics[J]. 2017, 29(14): 354-362.
- [8] 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.
- [9] Yuan L, Yu H, Xiang F D. Van der Waals integration before and beyond two-dimensional materials[J]. *Nature*, 2019, 567(7748): 323-333.
- [10] 贾欣宇, 兰长勇, 李春. 二维材料在红外探测器中的应用最新进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(7): 69-84
- [11] Zhang Y Z, Liu T, Meng B, et al. Broadband high photoresponse from pure monolayer graphene photodetector[J]. *Nature communications*, 2013, 4(1): 1811.
- [12] Kappera R, Voiry D, Yalcin S E, et al. Phase-engineered low-resistance contacts for ultrathin MoS<sub>2</sub> transistors[J]. *Nature Materials*, 2014, 13 (12): 1128-1134.
- [13] Guo Q S, Pospischil A, Bhuiyan M, et al. Black Phosphorus Mid-Infrared Photodetectors with High Gain[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(7): 4648-4655.
- [14] Gao L F, Zhao Y M, Chang X H. et al. Emerging applications of MXenes for photodetection: Recent advances and future challenges[J]. *Materials Today*, 2022, 61: 169-190.
- [15] Huang X Y, Zhuo Z W, Yan L, et al. Single-Layer Zirconium Dihalides ZrX<sub>2</sub>(X = Cl, Br, and I) with Abnormal Ferroelastic Behavior and Strong Anisotropic Light Absorption Ability[J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2021, 12(32): 7726-7732.
- [16] Zhou Y, Cheng B T, Huang S, et al. The Tunable Electronic and Optical Properties of Two-Dimensional Bismuth Oxyhalides[J]. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 2023, 13(20): 2798.
- [17] 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.
- [18] 张兴超, 潘锐, 韩嘉悦, 等. 拓扑量子材料光电探测器研究进展[J]. *中国光学*, 2021, 14(01): 43-65.
- [19] Cai Y Q, Zhang G, Zhang Y W. Electronic properties of phosphorene/graphene and Phosphorene/Hexagonal boron

- nitride heterostructures[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2015, 119(24): 13929-13936.
- [20] Le N B, Huan T D, Woods L M. Interlayer interactions in van der Waals heterostructures: electron and phonon properties[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2016, 8(9): 6286-6292.
- [21] Zhao X M, Bo M L, Huang Z K, et al. Heterojunction bond relaxation and electronic reconfiguration of WS<sub>2</sub>-and MoS<sub>2</sub>-based 2D materials using BOLS and DFT[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 462(1): 508-516.
- [22] Behera S K, Deb P. Controlling the bandgap in graphene/h-BN heterostructures to realize electron mobility for high performing FETs[J]. *RSC advances*, 2017, 7(50): 31393-31400.
- [23] Wang Y S, Song N H, Yang X H, et al. Tailoring the electronic properties of graphyne/blue phosphorene heterostructure via external electric field and vertical strain [J]. *Chemical Physics Letters*, 2019, 730: 277-282.
- [24] Lu N, Guo H Y, Li L, et al. MoS<sub>2</sub>/MX<sub>2</sub> heterobilayers: Bandgap engineering via tensile strain or external electrical field[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(5): 2879-2886.
- [25] Wang S K, Tian H Y, Ren C D, et al. Electronic and optical properties of heterostructures based on transition metal dichalcogenides and graphene-like zinc oxide[J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 12009.
- [26] Ren K, Sun M L, Luo Y, et al. First-principle study of electronic and optical properties of two-dimensional materials-based heterostructures based on transition metal dichalcogenides and boron phosphide[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 476: 70-75.
- [27] Fang L, Liu R L, Tong X Y. Strain-induced electronic properties of van der Waals heterostructures based on tin dichalcogenides[J]. *AIP ADVANCES*, 2019, 9(5): 055324.
- [28] Huang L, Li J B. Tunable electronic structure of black phosphorus/blue phosphorus van der Waals pn heterostructure[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(8): 083101.
- [29] Tang K W, Qi W H, Li Y J, et al. Electronic Properties of van der Waals Heterostructure of Black Phosphorus and MoS<sub>2</sub>[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2018, 122(12): 7027-7032.
- [30] Yang F, Han J, Zhang L, et al. Adjustable electronic and optical properties of BlueP/MoS<sub>2</sub> van der Waals heterostructure by external strain: a first-principles study[J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(37): 375706.
- [31] Huang X Y, Cao Q L, Wan M J, et al. Electronic and Optical Properties of BP, InSe Monolayer and BP/InSe Heterojunction with Promising Photoelectronic Performance [J]. *Materials*, 2022, 15(18): 6214.
- [32] 郭瑞, 魏星, 曹末云, 等. AlAs/InSe 范德华异质结构的光学和可调谐电子特性[J]. *化学学报*, 2022, 80 (4): 526-534.
- [33] Zhang W J, Chuu C P, Huang J K, et al. Ultrahigh-Gain Phototransistors Based on Graphene-MoS<sub>2</sub> Heterostructures [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(25): 3456-3461.
- [34] Deng Y X, Luo Z, Conrad N J, et al. Black Phosphorus-Monolayer MoS<sub>2</sub> van der Waals Heterojunction P-N Diode[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(8): 8292-8299.
- [35] Ye L, Li H, Chen Z, et al. Near-Infrared Photodetector Based on MoS<sub>2</sub>/Black Phosphorus Heterojunction[J]. *Acs Photonics*, 2016, 3(4): 692-699.
- [36] 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 Photonics*, 2018, 12(10): 601-607.
- [37] Gao A Y, Lai J W, Wang Y J, et al. Observation of ballistic avalanche phenomena in nanoscale vertical InSe/BP heterostructures[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14: 217-222.
- [38] Chen Y F, Tan C W, Wang Z, et al. Momentum-matching and band-alignment van der Waals heterostructures for high-efficiency infrared photodetection[J]. *Science advances*, 2022, 8(30): eabq1781.
- [39] Chen P, Pi L J, Li Z X, et al. GeSe/MoTe<sub>2</sub> vdW heterostructure for UV-VIS-NIR photodetector with fast response[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(2): 021103.
- [40] Li H Y, Zhang T, Yi Z X, et al. High Sensitive and Stable UV-Vis Photodetector Based on MoS<sub>2</sub> / MoO<sub>3</sub> vdW Heterojunction [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2024, 16(26): 33829-33837.
- [41] Vabbina P, Choudhary N, Chowdhury A A, et al. Highly Sensitive Wide Bandwidth Photodetector Based on Internal

- Photoemission in CVD Grown p-Type MoS<sub>2</sub>/Graphene Schottky Junction(Article)[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2015, 7(28): 15206-15213.
- [42] Iqbal M Z, Khan S, Siddique S. Ultraviolet-light-driven photoresponse of chemical vapor deposition grown molybdenum disulfide/graphene heterostructured FET [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 459(1): 853-859.
- [43] Rathi S, Lee I, Lim D, et al. Tunable electrical and optical characteristics in monolayer graphene and few-layer MoS<sub>2</sub> heterostructure devices[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(8): 5017-5024.
- [44] Lee I, Kang W T, Kim J E, et al. Photoinduced tuning of schottky barrier height in graphene/MoS<sub>2</sub> heterojunction for ultrahigh performance short channel phototransistor[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(6): 7574-7580.
- [45] Liu Y, Shivananju B N, Wang Y S, et al. Highly Efficient and Air-Stable Infrared Photodetector Based on 2D Layered Graphene-Black Phosphorus Heterostructure[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(41): 36137-36145.
- [46] Ye L, Wang P, Luo W J, et al. Highly polarization sensitive infrared photodetector based on black phosphorus-on-WSe<sub>2</sub> photogate vertical heterostructure[J]. *Nano Energy*, 2017, 37: 53-60.
- [47] Long M S, Gao A Y, Wang P, et al. Room temperature high-detectivity mid-infrared photodetectors based on black arsenic phosphorus[J]. *Science advances*, 2017, 3(6): e1700589.
- [48] Wang B, Yuan J, Che M Q, et al. High-performance broadband photodetector based on PtSe<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub> heterojunction from visible to near-infrared region [J]. *Science China(Information Sciences)*, 2024, 67(3): 263-270.
- [49] Lukman S, Ding L, Xu L, et al. High oscillator strength interlayer excitons in two-dimensional heterostructures for mid-infrared photodetection[J]. *Nature nanotechnology*, 2021, 16(3): 354.
- [50] Li K L, Du C H, Gao H L, et al. Ultrafast and Polarization-Sensitive ReS<sub>2</sub>/ReSe<sub>2</sub> Heterostructure Photodetectors with Ambipolar Photoresponse[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2022, 14(29): 33589-33597.
- [51] Lin Z T, Zhu W B, Zeng Y H, et al. Enhanced Photodetection Range from Visible to Shortwave Infrared Light by ReSe<sub>2</sub>/MoTe<sub>2</sub> van der Waals Heterostructure[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(15): 2664.
- [52] Jaffery S H A, Riaz M, Abbas Z, et al. Strong interlayer transition in a staggered gap GeSe/MoTe<sub>2</sub> heterojunction diode for highly efficient visible and near - infrared photodetection and logic inverter[J]. *EcoMat*. 2023, 5(3): e12307.
- [53] Afzal A M, Iqbal M Z, Dastgeer G, et al. Ultrafast and Highly Stable Photodetectors Based on p-GeSe/n-ReSe<sub>2</sub> Heterostructures[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2021, 13(40): 47882-47894.
- [54] Hussain M, Jaffery S H A, Ali A, et al. NIR self-powered photodetection and gate tunable rectification behavior in 2D GeSe/MoSe<sub>2</sub> heterojunction diode[J]. *Scientific reports*, 2021, 11(1): 3688.
- [55] Du C H, Gao H L, Du W T, et al. High responsivity and broadband polarized photodetectors based on InSe/ReSe<sub>2</sub> van der Waals heterostructures[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 919: 165586.
- [56] Wang C, Ye J X, An Y K. Tailoring the band alignment and magnetic and optical properties of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/WSe<sub>2</sub> van der Waals heterostructures by vacancies and atomic doping[J]. *Modern Physics Letters B*, 2021, 35(34): 1-16.
- [57] Fu S, Wang D, Ma Z, et al. The first-principles study on the halogen-doped graphene/MoS<sub>2</sub> heterojunction[J]. *Solid State Communications*, 2021, 334-335: 114366.
- [58] Lv X R, Liu G P, Mao B Y, et al.  $\alpha$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/Nb-doped MoSh<sub>2</sub> heterojunction: a first-principles study[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2024, 39(1): 015001.
- [59] Yu Y L, Shen T, Long H R, et al. Doping Engineering in the MoS<sub>2</sub>/SnSe<sub>2</sub> Heterostructure toward High-Rejection-Ratio Solar-Blind UV Photodetection[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(43): 2206486.
- [60] Zhan Y X, Wu Z T, Zeng P Y, et al. High-Performance Self-Powered WSe<sub>2</sub>/ReS<sub>2</sub> Photodetector Enabled via Surface Charge Transfer Doping[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2023, 15(47): 55043-55054.
- [61] Lin G Y, Qian J H, Ding H K, et al. Harvesting strong photoluminescence of physical vapor deposited GeSn with

- record high deposition temperature[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2023, 56(35): 355104.
- [62] 刘标. 二维半导体与金属异质结界肖特基势垒调控的第一性原理研究[D]. 湖南大学, 2017.
- [63] Huang L, Huo N J, Li Y, et al. Electric-field tunable band offsets in black phosphorus and MoS<sub>2</sub> van der Waals pn heterostructure[J]. *The journal of physical chemistry letters*, 2015, 6(13): 2483-2488.
- [64] Liao C W, Zhao Y P, Ouyang G. Strain-modulated band engineering in two-dimensional black phosphorus/MoS<sub>2</sub> van der Waals heterojunction[J]. *ACS omega*, 2018, 3(11): 14641-14649.
- [65] 谭淼,张磊,梁万珍. 基于二维材料 WX<sub>2</sub> 构建的范德华异质结的结构和性质及应变效应的理论研究[J]. *物理化学学报*, 2019, 35 (4): 385-393.
- [66] 展晓飞,邓增龙,聂锦兰,等. 石墨相氮化碳/蓝磷异质结的光催化性能研究[J]. *实验科学与技术*, 2021, 19(3): 28-34.
- [67] Liu B Y, Chen Y F, You C Y, et al. High performance photodetector based on graphene/MoS<sub>2</sub>/graphene lateral heterostructure with Schottky junctions[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 779: 140-146.
- [68] Kim D Y, Hashmi A, Hwang C Y, et al. Thickness dependent band gap and effective mass of BN/graphene/BN and graphene/BN/graphene heterostructures[J]. *Surface science*, 2013, 610: 27-32.
- [69] Farooq M U, Hashmi A, Hong J. Thickness dependent optical properties of multilayer BN/graphene/BN[J]. *Surface Science*, 2015, 634: 25-30.
- [70] Datta K, Khosru Q D M. Electronic properties of MoS<sub>2</sub>/MX<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub> trilayer heterostructures: a first principle study[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2016, 5(11): Q3001.
- [71] Datta K, Shadman A, Rahman E, et al. Trilayer TMDC Heterostructures for MOSFETs and Nanobiosensors[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2017, 46(2): 1248-1260.
- [72] Xu L, Huang W Q, Hu W Y, et al. Two-dimensional MoS<sub>2</sub>-graphene-based multilayer van der Waals heterostructures: Enhanced charge transfer and optical absorption, and electric-field tunable Dirac point and band gap[J]. *Chemistry of Materials*, 2017, 29(13): 5504-5512.
- [73] Xia C X, Du J, Fang L Z, et al. PtSe<sub>2</sub>/graphene hetero-multilayer: Gate-tunable Schottky barrier height and contact type[J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(46): 465707.
- [74] Bafekry A, Yagmurcukardes M, Akgenc B, et al. Van der Waals heterostructures of MoS<sub>2</sub> and Janus MoSSe monolayers on graphitic boron-carbon-nitride (BC<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>N, C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and C<sub>4</sub>N<sub>3</sub>) nanosheets: A first-principles study[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(35): 355106.
- [75] Han J, Yang F, Xu L, et al. Modulated electronic and optical properties of bilayer/trilayer Blue Phosphorene/MoX<sub>2</sub> (X= S, Se) van der Waals heterostructures[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2021, 25, 101228.
- [76] Liu S, Li X, Meng D, et al. Tunable electronic properties of MoS<sub>2</sub>/SiC heterostructures: A First-Principles study[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51(7): 3714-3726.
- [77] Cheng B T, Zhou Y, Jiang R M, et al. Structural, Electronic and Optical Properties of Trilayer Van der Waals Heterostructure[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(9): 1574.
- [78] Cheng B T, Zhou Y, Jiang R M, et al. Graphene-Sandwiched Van der Waals Heterostructures for Photodetectors[C]// 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2023, 656-663.
- [79] Long M S, Liu E F, Wang P, et al. Broadband photovoltaic detectors based on an atomically thin heterostructure[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2254-2259.
- [80] Yuan S F, Shen C F, Deng B C, et al. Air-Stable Room-Temperature Mid-Infrared Photodetectors Based on h-BN/Black Arsenic Phosphorus/h-BN Heterostructures[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 3172-3179.
- [81] Jiang M H, Zheng T, Zhang J L, et al. Gate-Modulated Polarity Transition and Polarization-Sensitive Photodetection Enabled by Sandwiching Anisotropic GeSe in vdW Heterojunction[J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(16): 2303217.
- [82] Pan Y T, Zhu L Q, Lu L D, et al. Polarized Photodetectors Based on 2D 2H-MoTe<sub>2</sub>/1T'-MoTe<sub>2</sub>/MoSe<sub>2</sub> Van Der Waals Heterojunction[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 2407931. (in press)
- [83] Yao J D, Zheng Z Q, Yang G W. Layered-material WS<sub>2</sub>/topological insulator Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> heterostructure

- photodetector with ultrahigh responsivity in the range from 370 to 1550 nm[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(33): 7831-7840.
- [84] Kim J S, Park S J, Jang H, et al. Highly sensitive, gate-tunable, room-temperature mid-infrared photodetection based on graphene–Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> heterostructure[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(3): 482-488.
- [85] Yang C W, Tang H L, Sattar S, et al. Epitaxial Growth and Determination of Band Alignment of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>–WSe<sub>2</sub> Vertical van der Waals Heterojunctions[J]. *ACS Materials Letters*, 2020, 2(10): 1351-1359.
- [86] Bafekry A, Obeid M M, Nguyen, C. D, et al. Graphene hetero-multilayer on layered platinum mineral jacutingaite (Pt<sub>2</sub>HgSe<sub>3</sub>): van der Waals heterostructures with novel optoelectronic and thermoelectric performances[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(26): 13248-13260.
- [87] Kiemle J, Powalla L, Polyudov K, et al. Gate-Tunable Helical Currents in Commensurate Topological Insulator/Graphene Heterostructures[J]. *ACS nano*, 2022, 16(8): 12338-12344.
- [88] Huang Z H, Jiang Y D, Han Q, et al. High responsivity and fast UV-Vis-SWIR photodetector based on Cd<sub>3</sub>As<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub> heterojunction[J]. *Nanotechnology*, 2019, 31(6): 064001-061010.
- [89] Li C Q, Zhao Y F, Vera A, et al. Proximity-induced superconductivity in epitaxial topological insulator/graphene/gallium heterostructures[J]. *Nature materials*, 2023, 22(5): 570-575.
- [90] Thingstad E, Hutchinson J, Loss D, et al. Topological Interlayer Superconductivity in a van der Waals Heterostructure[J]. *arXiv preprint arXiv: 2405.07927*, 2024.
- [91] Liu H W, Zhu X L, Sun X X, et al. Self-Powered Broadband Photodetectors Based on Vertically Stacked WSe<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> p-n Heterojunctions[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(11): 13573-13580.
- [92] Zhang H B, Song Z L, Li D, et al. Near-infrared Photodetection Based on Topological Insulator P-N Heterojunction of SnTe/Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 509: 145290.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS