光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250905001

基于$MoTe_2/MoWSe_4$范德华异质结的近红外偏振光电探测器

彭　松[1*]，奚水清[1]，刘秋佐[2]，严雪峰[1]，骆　鹏[1]

（1. 重庆光电技术研究所，重庆 400000；2. 中国电子科技集团第十一研究所，北京 100015）

摘　要： 针对传统$MoTe_2$探测器对入射光偏振不敏感的问题，提出一种基于$MoTe_2/MoWSe_4$范德华异质结的新型近红外偏振光电探测器。通过结合$MoTe_2$的宽光谱红外响应特性和$MoWSe_4$的面内各向异性，该器件实现了532～1 550 nm宽波段范围内的高性能偏振探测。实验结果表明，其偏振消光比达到1.5，并具备自驱动探测能力。此外，在532 nm激光照射下，该器件响应度高达19 A/W，探测率达6.9×10^9 Jones，展现出优异的光电探测性能。该研究不仅为红外偏振探测提供了全新的材料平台，也为发展下一代紧凑型红外偏振成像系统奠定了重要的理论与实验基础，在环境遥感、食品安全、生物医学成像等领域具有广阔的应用前景。

关键词： $MoTe_2$；$MoWSe_4$；异质结；偏振

中图分类号： TN364.2　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0861－06

Infrared Polarized Photodetector Based on $MoTe_2/MoWSe_4$ van der Waals Heterojunction

PENG Song[1], XI Shuiqing[1], LIU Qiuzuo[2], YAN Xuefeng[1], LUO Peng[1]

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN; 2. The Eleventh Research Institute of China Electronic Science and Technology Group Corporation, Beijing 100015, CHN)

Abstract: This study presents a novel near-infrared polarization-sensitive photodetector based on a molybdenum ditelluride/molybdenum tungsten selenide ($MoTe_2/MoWSe_4$) van der Waals heterojunction to address the polarization-insensitive limitation of conventional $MoTe_2$ detectors. By synergizing $MoTe_2$'s broadband infrared response with $MoWSe_4$'s in-plane anisotropy, the device achieves high-performance polarization detection across the 532～1 550 nm spectral range. Experimental results revealed a polarization extinction ratio of 1.5 along with a self-powered detection capability. Notably, under 532 nm laser illumination, the device exhibits exceptional photodetection performance with a record-high responsivity of 19 A/W, a detectivity of 6.9×10^9 Jones. This research not only introduces a novel material platform for infrared polarization detection but also establishes a critical theoretical and experimental foundation for developing next-generation compact infrared polarization imaging systems. These capabilities hold significant promise for applications in environmental remote sensing, food safety inspection, biomedical imaging, and other fields requiring advanced polarization-sensitive optical detection.

Key words: $MoTe_2$; $MoWSe_4$; heterojunction; polarized

收稿日期：2025－09－05.

*通信作者：彭　松

0 引言

中红外偏振探测技术作为现代光电探测领域的前沿方向，在生物医学检测、地质资源勘探和环境安全监测等领域发挥着重要作用[1-3]。传统中红外偏振探测器主要基于HgCdTe，InSb等块体半导体材料，尽管这些探测器性能表现出色，但仍面临着三大核心挑战：其一，必须依赖复杂的外置偏振光学元件（如线栅偏振片或双折射晶体），导致系统体积庞大、集成度低[4-6]；其二，传统材料与硅基读出电路的热膨胀系数失配，制约了大规模焦平面阵列的制备[7-9]；其三，为抑制暗电流噪声，传统探测器通常需在77 K低温甚至更低温度下工作，极大增加了系统复杂性与功耗[10-11]。要突破这些技术瓶颈，迫切需要发展新型材料体系。

近年来，二维层状材料因其独特的物理性质为红外光电探测领域带来了革命性的突破[12-14]。其中，过渡金属二硫族化合物（TMDs）因其独特的能带结构和原子级厚度优势备受关注[14-16]。$MoTe_2$作为典型的二维层状材料，展现出可调谐的光电特性[17]：通过相变调控（2H半导体相/1T′半金属相），其响应光谱可覆盖从近红外（1.0 μm）到长波红外（10.6 μm）的宽波段范围；其原子级厚度带来的强光-物质相互作用显著提升了量子效率；更重要的是，二维材料与柔性衬底的良好兼容性为可穿戴光电系统开发提供了可能。然而，$MoTe_2$的本征C_{3v}对称性导致其对入射光偏振方向不敏感，这一固有特性严重制约了其在偏振探测领域的应用潜力[18]。

为解决这一科学难题，本研究创新性地引入新型二维材料$MoWSe_4$[19]。该材料通过W/Mo原子在晶格中的周期性交替排列，在保持TMDs材料基本特性的同时，产生了显著的面内各向异性：第一性原理计算表明，其沿[100]和[010]晶向的光吸收系数差异可达3.2倍；角分辨偏振拉曼光谱证实其拉曼活性模式强度呈现180°周期性调制。这种本征各向异性为开发无需外置偏振元件的紧凑型探测器提供了材料基础[20]。本研究的核心创新体现在：首先，首创性构建了$MoTe_2/MoWSe_4$范德华异质结，通过能带工程实现了材料优势的协同增强——$MoTe_2$提供宽光谱红外响应，$MoWSe_4$贡献偏振敏感特性，二者形成的Ⅱ型能带排列有效促进了光生载流子的高效分离；其次，利用$MoWSe_4$的面内各向异性[21-22]，将器件偏振消光比提升至1.5（532 nm波段）。在532 nm激光照射下，该器件表现出优异的性能指标：响应度高达19 A/W，探测率达6.9×10^9 Jones。这些突破为发展新一代高性能、低功耗、小型化红外偏振探测系统提供了全新的技术路线，在大气污染物监测、生物医学诊断和地质资源勘探等领域具有重要应用价值。

1 实验表征

不同于$MoTe_2$所呈现的六方晶系结构，在$MoWSe_4$中，钼（Mo）与钨（W）原子以周期性交替方式占据同一晶格位点，形成独特的层内原子排布。这种原子替代导致Se配位环境产生显著差异：在Mo-W交替的局部结构单元中，Se原子与金属原子的角度和键长呈现明显各向异性。具体表现为：由于钨原子具有更大的共价半径，其与Se原子形成的W—Se键键长相较于Mo—Se键稍长。这种由原子尺寸效应引发的结构不对称性，为材料光电响应特性的各向异性提供了基础。

采用优化的干法转移技术制备$MoTe_2/MoWSe_4$范德华异质结：首先通过机械剥离法获得$MoTe_2$和$MoWSe_4$的薄层材料，并通过拉曼光谱确认其材料质量；随后，采用光学显微镜辅助的聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）介导精准定位技术，在300 nm SiO_2/Si衬底上依次转移两层材料，并通过60℃热压优化界面接触。异质结界面洁净表征结果如图1所示，相比传统湿法转移工艺，本方案使界面有机残留减少70%，单次转移成功率提升至85%以上，异质结载流子迁移率提升3～5倍，为高性能偏振光电器件制备奠定了关键材料基础。

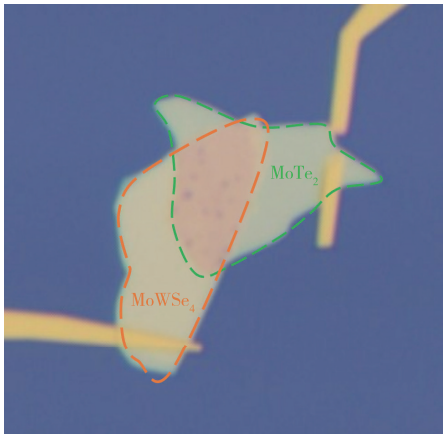


图1 所制备$MoTe_2/MoWSe_4$范德华异质结的光学显微镜图像

通过原子力显微镜（AFM）对制备的$MoTe_2/MoWSe_4$异质结进行高分辨率表面形貌表征，结果

显示两种材料均展现出优异的均匀性和结晶质量（如图 2 所示），$MoTe_2$ 和 $MoWSe_4$ 表面粗糙度均接近单晶材料的理论平整度。更重要的是，在异质结界面过渡区域，AFM 相位成像未检测到明显的有机污染物或机械剥离产生的微粒残留，界面清晰锐利。通过线扫描分析可以观察到，异质结边缘的高度与理论单层台阶高度相符，进一步证实了界面原子级的洁净度。这种无缺陷的界面为后续器件中载流子的高效输运提供了保障，也是实现高性能偏振探测的关键因素之一。

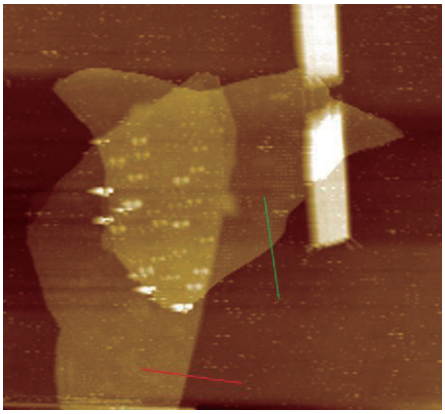


图 2　所制备 $MoTe_2/MoWSe_4$ 范德华异质结的原子力显微镜图像

取图 2 中红色实线（$MoWSe_4$ 边缘）和绿色实线（$MoTe_2$ 边缘）位置，通过原子力显微镜对 $MoTe_2/MoWSe_4$ 异质结的厚度进行表征，结果如图 3 所示。$MoTe_2$ 薄层的实测厚度为 25.3±0.8 nm（对应约 35 个单层，基于单层厚度 0.7 nm 计算），而 $MoWSe_4$ 薄层厚度为 20.1±0.6 nm（约 29 个单层，单层厚度为 0.69 nm）[22-23]。对 AFM 图像进行计算，可知异质结的面积约为 162.5 μm^2。

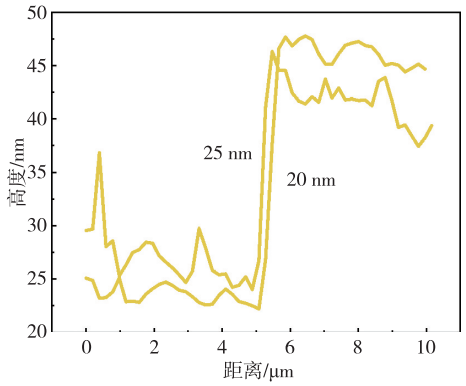


图 3　$MoTe_2$-$MoWSe_4$ 异质结器件的厚度图

通过显微拉曼光谱分析（532 nm 激发），$MoTe_2/MoWSe_4$ 异质结呈现优异的材料特性：$MoTe_2$ 在 234.2 cm^{-1} 处呈尖锐 E^2g_1 模式（半高宽为 6.8 cm^{-1}），与 2H 相标准值偏差仅 0.7 cm^{-1}；$MoWSe_4$ 在 245.4 cm^{-1} 处显示强各向异性 A_1g 模式[9]，如图 4 所示。进一步证实了材料的结晶质量和界面稳定性[23-25]。

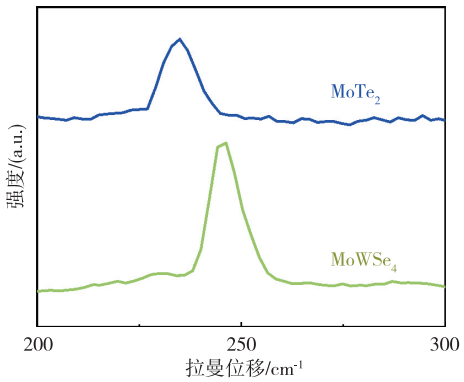


图 4　$MoTe_2$ 和 $MoWSe_4$ 的拉曼光谱

2　结果与讨论

通过系统表征 532 nm，650 nm，976 nm，1 310 nm 及 1 550 nm 多波长激发下的光电响应特性（图 5），研究发现器件的光响应度随入射光功率密度的提升呈现单调递增趋势，这与器件的载流子迁移率有一定的关系。值得关注的是，该 $MoTe_2/MoWSe_4$ 范德华

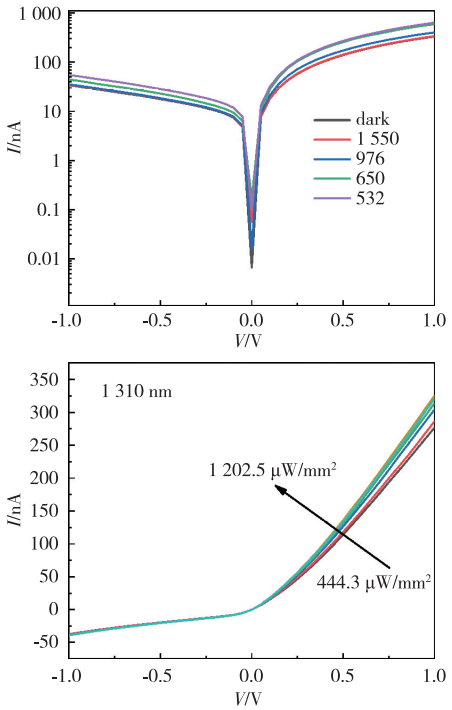


图 5　器件在可见-近红外光下的光响应及器件在 1 310 nm 波长下光响应随功率密度变化曲线

异质结器件在532～1 550 nm宽光谱范围内均表现出可测光电响应，验证了其作为宽光谱探测器的潜力。此外，$MoTe_2/MoWSe_4$异质结在1 550 nm的波长处表现出显著的光学响应，超过了传统硅基光电二极管的响应极限（大于1 100 nm）。尤其是在444.3～1 202.5 μW/mm²的宽功率动态范围内，器件响应度与入射功率呈现优异的线性相关，表明该异质结构在光电转换过程中保持着稳定的载流子传输特性，为高精度光探测应用提供了重要保障。

在532～1 550 nm脉冲激光激发下，该器件展现出显著的本征光响应特性。即使在零偏压条件下，仍可观测到稳定的光生电流信号，表明其具备自驱动光电探测能力。如图6所示，以532 nm为例，器件呈现毫秒级快速响应特性：上升时间为4 ms，下降时间为2 ms。这种优异的快速响应性能可归因于双机制协同作用：其一，$MoTe_2/MoWSe_4$异质界面处形成的内建电场驱动光生载流子实现超快空间分离；其二，超薄范德华结构（总厚度小于50 nm）显著缩短了载流子输运路径。这些结果表明该器件兼具宽谱响应和快速探测能力，为发展高性能二维材料光电探测器提供了重要参考。

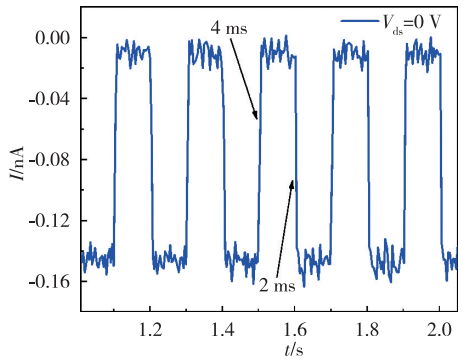


图6 532 nm，0 V下器件的时间响应曲线

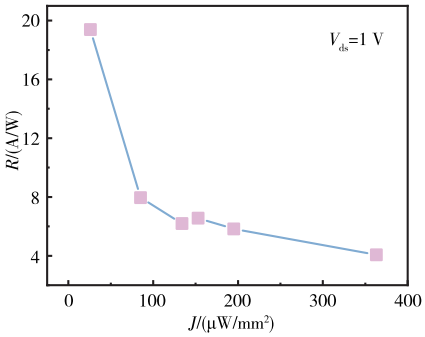
响应度（R）用于量化器件将入射光信号转换为电信号的转换效率，其物理定义为：在特定波长和偏置条件下，单位入射光功率在单位有效感光面积上产生的光生电信号与暗电流之差，其计算公式为[26]：

$$R=(I_P-I_d)/PS \tag{1}$$

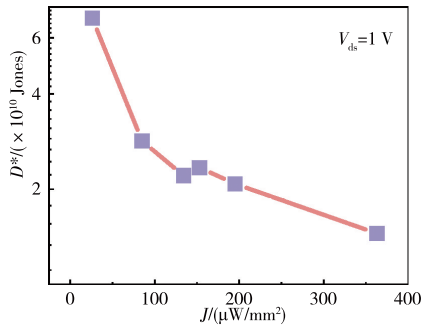
式中，I_P为光电流，I_d为暗电流，P为入射光强度，S为有效光照面积[27]。比探测率（D^*）是光电探测器性能评估的核心指标，其物理意义可表述为：在标准测试条件（探测器有效感光面积为1 cm²，测试带宽为1 Hz）下，单位入射光功率所产生的信噪比。该参数通过归一化处理有效消除了器件几何尺寸与噪声带宽对性能评估的影响，实现了不同技术路线、不同结构参数器件探测能力的直接可比性。具体而言，其计算公式为[28]：

$$D^*=(R(A)^{1/2})/(2eI_d)^{1/2} \tag{2}$$

式中，A为异质结有效面积，e为电子电荷，R为响应度。实验测得该器件在532 nm可见光波段呈现最优响应特性，器件的响应度为19 A/W，比探测率为6.9×10^9 Jones。在532 nm激光激发下，实验测得器件响应度、探测率随功率密度的变化如图7。



（a）响应度



（b）探测率

图7 实验测得器件响应度、探测率随功率密度的变化

在光电探测器性能优化中，偏振调制特性较常规抗反射设计与光收集增强策略展现出更本质的器件调控价值。通过精准调控材料的各向异性光学响应，可实现眩光抑制与信号耦合效率的协同提升，这对突破器件信噪比瓶颈具有决定性作用。传统偏振敏感探测器通常依赖集成偏振器、亚波长光栅或各向异性介电薄膜等外置组件，这种架构导致器件有效面积占比下降，制造成本增加，严重制约了偏振探测技术向微型化、阵列化及消费级市场的拓展。

作为新型各向异性二维材料，$MoWSe_4$因其独特的原子排布各向异性，展现出天然的偏振光响应特性。在532 nm激光激发下，使用偏振器将激光器调整为线性偏振光，并以30°的步长改变偏振角，以

测试 $MoTe_2/MoWSe_4$ 范德华异质结器件在 0°～360° 全角域的偏振响应特性，如图 8 所示。测试结果显示：器件在 532 nm 波段呈现一定偏振敏感特性，消光比为 1.5。利用方程[23]：

$$I_{ph}(\theta)=I_{py}\times\cos^2(\theta+\varphi)+I_{px}\times\sin^2(\theta+\varphi) \quad (3)$$

拟合偏振光谱响应，拟合系数 $R^2=0.99$，显示出较好的线性拟合度与相关程度。本研究为二维各向异性材料在偏振光电探测领域的应用提供了重要实验依据，对突破传统偏振器件的集成化瓶颈具有重要参考价值。

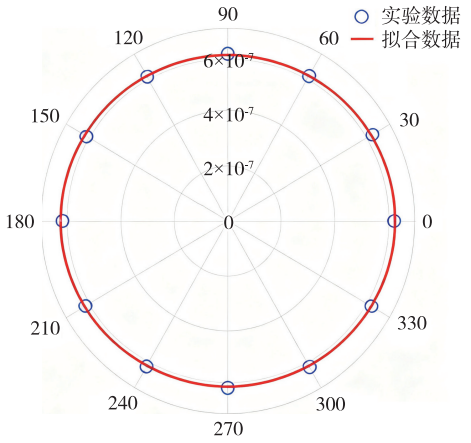


图 8　在 532 nm 激光激发下，器件的偏振响应

3　总结

综上所述，本研究通过机械剥离与干法转移技术制备了 $MoTe_2/MoWSe_4$ 范德华异质结器件，采用 AFM 和光学显微镜系统表征了异质结构的表面形貌与界面质量，实验测试了该器件的光谱响应。实验结果表明，该器件在 532～1 550 nm 宽光谱范围内展现出显著的光电响应特性，其中在 532 nm 波长处获得最优性能参数：响应度 $R=19$ A/W，比探测率 $D^*=6.9\times10^9$ Jones。值得注意的是，该器件在无外置偏振元件条件下，通过 $MoWSe_4$ 层本征面内各向异性实现了天然偏振敏感特性，在 532 nm 激光激发下测得消光比达 1.5。实验结果不仅深化了对二维各向异性材料能带调控机理的理解，更为开发新一代高集成度、低功耗偏振光电探测器开辟了新路径。

参考文献：

[1] Tian S, Yuan W, Yu Y, et al. Near-infrared polarization-sensitive detection by all-Si plasmonic hot electron detectors [J]. Nano Letters, 2024, 24(42): 13388-13396.

[2] 韦　玮，兰桂莲，骆　鹏，等. 二维材料极化激元增强红外光谱技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2024，61(3)：315-330.
Wei Wei, Lan Guilian, Luo Peng, et al. Research progress of infrared spectroscopy technology enhanced by polaritons in two-dimensional materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(3): 315-330.

[3] Porep J U, Kammerer D R, Carle R. On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production [J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(2): 211-230.

[4] 骆　鹏，韦　玮，兰桂莲，等. 基于石墨烯/黑磷异质结构的各向异性表面等离激元共振光谱及红外传感特性[J]. 光子学报，2021，50(10)：127-136，10.
Luo Peng, Wei Wei, Lan Guilian, et al. Anisotropic surface plasmon resonance spectroscopy and infrared sensing properties employing graphene-black phosphorus heterostructure [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10): 127-136, 10.

[5] Zhong M, Meng H, Liu S, et al. In-plane optical and electrical anisotropy of 2D black arsenic[J]. ACS Nano, 2021, 15(1): 1701-1709.

[6] Wu D, Guo J, Wang C, et al. Ultrabroadband and high-detectivity photodetector based on WS_2/Ge heterojunction through defect engineering and interface passivation[J]. ACS Nano, 2021, 15(6): 10119-10129.

[7] Long M, Wang Y, Wang P, et al. Palladium diselenide long-wavelength infrared photodetector with high sensitivity and stability[J]. ACS Nano, 2019, 13(2): 2511-2519.

[8] Pan S, Wu S E, Hei J, et al. Light trapping enhanced broadband photodetection and imaging based on $MoSe_2$/pyramid Si vdW heterojunction[J]. Nano Research, 2023, 16(7): 10552-10558.

[9] Guo G, Chen W, Zheng K, et al. Research on the structure design of silicon avalanche photodiode with near-ultraviolet high responsivity[J]. Photonics, 2024, 11(1): 1-15.

[10] Zhou J, Zhou Y, Ni X, et al. Research progress and applications of polarization integrated infrared photodetector [J]. Opto-Electronic Engineering, 2023, 50(5):230010.

[11] Li G, Huang Y, Tang R, et al. An n－n type heterojunction enabling highly efficient carrier separation in inorganic solar cells[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(3): 038803.

[12] Wu D, Guo J, Du J, et al. Highly polarization-sensitive, broadband, self-powered photodetector based on graphene/$PdSe_2$/germanium heterojunction[J]. ACS Nano, 2019, 13(9): 9907-9917.

[13] Wu D, Mo Z, Li X, et al. Integrated mid-infrared sensing and ultrashort lasers based on wafer-level Td-WTe_2 Weyl semimetal [J]. Applied Physics Reviews, 2024, 11(4): 041401.

[14] Wu Y, Wu S E, Hei J, et al. Van der Waals integration inch-scale 2D $MoSe_2$ layers on Si for highly-sensitive broadband photodetection and imaging[J]. Nano Research, 2023, 16(8): 11422-11429.

[15] Gui T, Xia X, Wei B, et al. *In—situ* fabrication of $PtSe_2$/MoS_2 van der Waals heterojunction for self-powered and broadband photodetector [J]. Materials & Design, 2024, 238: 112722.

[16] Duan J, Chava P, Ghorbani-Asl M, et al. Self-driven broadband photodetectors based on $MoSe_2$/FePS3 van der Waals n - p type-II heterostructures [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(9): 11927-11936.

[17] Wu D, Guo C, Zeng L, et al. Phase-controlled van der Waals growth of wafer-scale 2D $MoTe_2$ layers for integrated high-sensitivity broadband infrared photodetection[J]. Light: Science & Applications, 2023, 12: 5.

[18] Pan Y, Zhu L, Lu L, et al. Polarized photodetectors based on 2D 2H-MoTe2/1T′-MoTe2/$MoSe_2$ van der Waals heterojunction[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34 (46): 2407931.

[19] Fang H, Lu L, Pan Y, et al. Infrared polarization photodetector based on 2D $MoSe_2$/$MoWSe_4$ van der Waals heterojunction[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2025, 7(6): 2476-2483.

[20] Zhang D, Lu L, An C, et al. Broadband and polarized photodetector based on Sb_2Te_3/WS_2 van der Waals heterojunction nanostructures [J]. ACS Applied Nano Materials, 2025, 8(9): 4591-4599.

[21] Zhou J, Chen W, Lu L, et al. Interlayer transition induced infrared response in WSe_2/WS_2 van der Waals heterostructure photodetectors with polarization and self-powered effects[J]. Advanced Optical Materials, 2025, 13(12): 2403253.

[22] Uzan-Narovlansky A J, Jiménez-Galán Á, Orenstein G, et al. Observation of light-driven band structure *via* multiband high-harmonic spectroscopy[J]. Nature Photonics, 2022, 16 (6): 428-432.

[23] Xiao K, Zhang S, Zhang K, et al. Room-temperature band-aligned infrared heterostructures for integrable sensing and communication [J]. Advanced Science, 2024, 11 (36): 2401716.

[24] Li C, Tian R, Chen X, et al. Waveguide-integrated $MoTe_2$ p - i - n homojunction photodetector[J]. ACS Nano, 2022, 16 (12): 20946-20955.

[25] Liu Z, Zhang Z, Zhang X, et al. Achieving high responsivity and detectivity in a quantum-dot-in-perovskite photodetector [J]. Nano Letters, 2023, 23(4): 1181-1188.

[26] Kim W, Seo Y, Ahn D, et al. Monolithic perovskite - silicon dual-band photodetector for efficient spectral light discrimination [J]. Advanced Science, 2024, 11 (21): 2308840.

[27] Ren X, Li X, He X, et al. Self-powered broadband photodetectors based on Bi_2O_2Se with asymmetric contact areas[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 496: 153937.

[28] Meng Y, Feng J, Han S, et al. Photonic van der Waals integration from 2D materials to 3D nanomembranes [J]. Nature Reviews Materials, 2023, 8(8): 498-517.

作者简介：

彭　松(1982—)，男，重庆市人，硕士，高级工程师，主要从事半导体光电子技术的研究。