动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20241214001

面向短波红外的混合维度异质结硅APD探测集成研究进展

韩　涛[1]，雷仁方[1,2]，张建兵[2*]

（1. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；2. 华中科技大学 集成电路学院，武汉 430074）

摘　要： 为满足消费电子、医学成像、军事与安全监控等短波红外探测与成像场景的应用需求，通过新材料、新机理、新结构和集成工艺等关键技术，开发兼具宽谱响应、低暗电流与低成本的短波红外探测器，推动高性能短波红外探测系统的发展。文章首先分析了传统APD器件的应用局限性及新型半导体材料的研究方向；然后描述了量子点材料、二维材料在光电探测器中应用与不足；其次围绕混合维度异质结材料与探测器的集成化技术，重点阐述了混合维度异质结材料融合不同维度材料的能带特性、工艺兼容性优势，以及存在的技术难题；接着介绍了国内外关于混合维度异质结材料与器件的研究进展；最后展望了基于混合维度异质结硅APD短波红外探测阵列的发展趋势。混合维度异质结材料体系不仅能突破硅基材料在短波红外探测中的固有能带限制，还可为下一代高分辨红外成像芯片和光电集成系统提供关键技术支持，从而助力消费电子、机器视觉和人工智能领域发展。

关键词： 混合维度异质结；硅APD器件；短波红外；集成工艺

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0819－11

Advances in Research on Short-Wave Infrared Detection Technology of Silicon APD Based on Hybrid Dimension Hetero-Junction Material

HAN Tao[1], LEI Renfang[1,2], ZHANG Jianbing[2]

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN; 2. School of Integrated Circuits, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, CHN)

Abstract: To meet the short wave infrared detection and imaging application needs of consumer electronics, medical imaging, military and security monitoring. The short wave infrared detectors with wide spectral response, low dark current and low cost can be prepared by break through the new materials, new mechanisms, new structures and integrated processes, which would promote the development of high performance shortwave infrared detection systems. In this paper, the application limitations of traditional APD devices and the research directions of new semiconductor materials are introduced. Next, the application and shortcomings of quantum dots and two-dimensional materials in photo detectors is described. Then, the article focuses on the integration technology between mixed dimensional hetero-junction materials and detectors, mixed dimensional hetero-junction materials can integrate the band characteristics of different dimension materials, so it has the process compatibility advantage. Meanwhile, the relevant technical challenges have also been

收稿日期：2024－12－14.

基金项目：国家自然科学基金项目（U2167208）；2023年度重庆市博士后研究项目（2023CQBSHTB3144）.

* **通信作者：**张建兵

elucidated. Subsequently, the research progress on mixed dimensional hetero-junction materials and devices in China and elsewhere is reviewed and introduced. Finally, the development and application trend of silicon APD short-wave infrared detection arrays based on hybrid dimensional hetero-junction material is discussed. The mixed dimensional hetero-junction material can not only break through the inherent band limitations of silicon material in short wave infrared detection, but also provide the key technical support for the next generation of high resolution infrared imaging chips and optoelectronic integrated systems, thereby assisting the development of consumer electronics, machine vision, and artificial intelligence fields.

Key words: hybrid dimension hetero-junction; APD device; short-wave infrared; integrated process

0 引言

针对消费电子、医学成像、汽车安全、军事与安全监控等短波红外应用场景，兼具高灵敏度、低暗电流、宽谱段特性的高性能短波红外探测器是实现小型化、轻量化探测系统的关键元器件。传统硅基雪崩光电二极管（Avalanche Photo Diode，APD）虽具备成熟的掺杂工艺和接触技术，且受离散杂质散射影响较小，但其界面质量较差、暗电流较大、响应度不足，加之薄膜掺杂浓度波动显著，导致响应波段局限于1.1 μm以下，难以满足短波红外探测需求[1]。基于InGaAs材料的APD器件虽然响应波长可扩展至1.7 μm以下，但其依赖分子束外延（Molecular Beam Epitaxy，MBE）或金属有机化学气相沉积（Metal-Organic Chemical Vapor Deposition，MOCVD）等复杂工艺，原料与设备成本高昂。此外，为实现探测器芯片与硅基读出电路的集成，需采用高精度倒装互联技术，这不仅大幅增加了制造成本，还因工艺限制降低了探测面阵分辨率[2]。因此，传统APD器件普遍存在探测波段受限、成本高、探测分辨率不足等问题。

随着信息智能化时代的到来，多维信息红外探测成为主要发展方向，新型APD器件的研究重点聚焦于三个方面：（1）融合新型半导体材料（如二维材料、量子点）以实现多维光电信息的高效获取；（2）通过工艺优化推动传统红外探测器向低成本、高集成度与规模化方向发展，并以此为契机深化新物理机理研究；（3）创新器件架构设计，突破传统APD成本高、性能受限等难题[3]。基于新材料探索、新机理挖掘、新结构开发和多功能集成等技术路径，开发兼具宽谱响应、低暗电流与低成本的短波红外探测器，将有力推动高性能短波红外探测系统的发展。

宽带光电探测技术覆盖可见光到红外波段，在多光谱成像、视觉感知和神经形态计算等领域具有重要应用价值。然而，传统半导体材料因光谱响应范围窄、大面积均匀性不足等问题，难以满足宽谱段、高一致性光电探测阵列的制备需求。为此，研究热点逐渐转向零维材料（Zero-Dimensional，0D）、二维材料（Two-Dimensional，2D）、钙钛矿（Perovskite）以及有机半导体（Organic Semiconductor Materials，OSM）等新型功能材料[4-5]。为突破短波红外探测效率瓶颈，研究人员通过能带工程与器件结构创新，开发出多种兼具宽谱响应与高灵敏度的新型光电探测器。

1 新型半导体材料在探测器领域中的应用

石墨烯、过渡金属硫化物（如MoS_2，WS_2）和黑磷等二维材料具有良好的机械强度、较低的界面态密度、较少的表面悬挂键和较强的层内化学键，适用于微电子和光电子等集成电路领域[6]。以MoS_2材料为例，其层内和层间原子结构分别依靠较强的化学共价键和较弱的范德华力紧密堆叠，这种独特的结构使其能够兼容CMOS工艺，并可抑制短沟道量子效应对器件造成的不良影响[7-8]。图1给出了不同层数MoS_2材料的能带结构，当材料的层数不同时，带隙宽度也随之发生变化，其中K点附近的能带随着层数减小发生较小的变化，而Γ点处的能带受层间耦合作用将出现较大的变化[9-10]。

二维材料的主要特性可归纳为：（1）无表面悬空键特性，便于构建范德华异质结，从而提升载流子迁移率；（2）宽光谱响应范围，覆盖可见至红外波段；（3）厚度依赖的带隙可调性，实现能带工程调控；（4）低暗

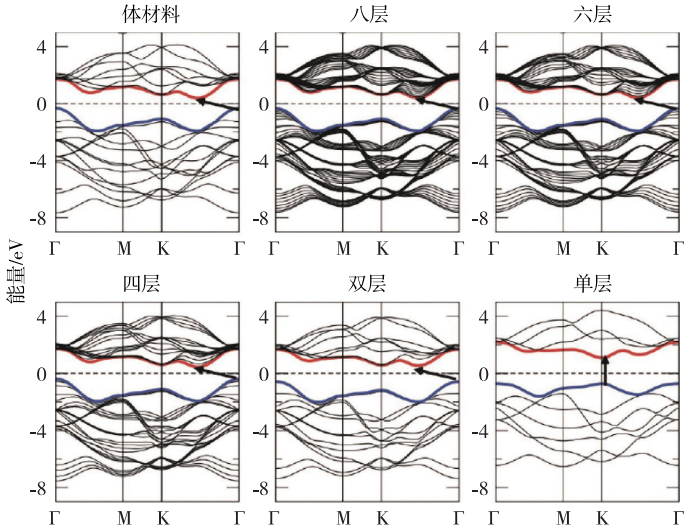


图 1　不同层数 MoS_2 材料的能带结构[11-13]

电流特性，增强器件信噪比；(5)兼具高透明度、强机械性能与柔韧兼容性[14-16]。基于上述优势，二维材料在小型化、柔性化红外探测器领域具有应用潜力。然而，二维材料的局限性同样不容忽视：材料具有较大的激子束缚能和较小的吸收截面，从而导致光生载流子分离效率低，而缺陷处库伦相互作用引发的电子-空穴对快速复合，进一步制约了其在高效光电探测中的应用。

量子点材料的半径接近或小于激子波尔半径，量子限域效应赋予其荧光光谱可调谐性、高荧光量子产率、多激子生成效应、宽谱强吸收特性及高载流子生成效率等优势，同时具备成本大规模制备等潜力，在近红外至短波红外传感领域备受关注[17-18]。通过量子尺寸效应，量子点可精确调控电子能带结构及光谱响应范围，例如 PbS 量子点通过能带工程设计可实现短波红外高效响应，如图 2 所示。

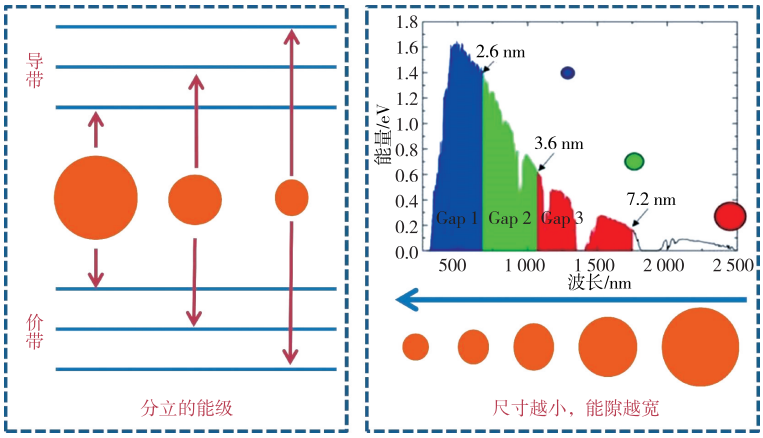


图 2　量子点材料的能级结构示意图[17-18]

得益于近红外和短波红外波段的高吸收系数，量子点材料通过范德华力与芯片衬底集成，借助喷涂、旋涂等溶液工艺实现大面积均匀成膜，成为新一代高性能光电子器件的理想候选材料[19]。基于量子点的光电探测器兼具高归一化探测率、长载流子扩散长度、宽谱响应可调谐性、低暗电流及室温工作等特性，部分器件的外量子效率和比探测率已突破实用化阈值[20-21]。然而，量子点材料固有的低载流子迁移率和高表面陷阱态密度，导致器件响应速度受限、探测率衰减显著，仍是当前研究的核心挑战。

2　混合维度异质结材料与探测器的集成化技术

纳米材料是由基本颗粒组成的粉状或团块状的天然或人工材料，按照不同的维度分为零维、

一维、二维和三维纳米材料。零维材料是指三个维度都处于纳米尺度的颗粒，以单个原子或分子形式存在，尺寸在几个到几十纳米之间，具有量子隧穿效应和量子尺寸效应等量子效应，使器件具备较高的光吸收效率、可调的能带带隙以及较高的能量转换效率，如纳米颗粒、量子点等。二维材料由单个或多个原子层组成，厚度在几个到几十纳米之间，电子仅可在两个维度的纳米尺度上自由运动，具有大比表面积、高载流子迁移速率和较小的杨氏模量等独特性质，如纳米薄膜、纳米片等。近年来，量子点材料和二维材料构成的混合维度异质结材料（如PbS/WS_2，PbS/Bi_2Te_3）被应用在雪崩光电二极管器件研究中，量子点材料用于实现高吸收率的宽带光吸收，二维材料用作有效的电荷传输通道。通过范德华力或其他弱相互作用结合不同维度纳米材料的特性，形成具有独特物理和化学性质的异质结构，有助于突破单一材料的性能限制，实现性能互补与功能拓展。

混合维度异质结通过融合不同维度材料的能带特性、工艺兼容性优势，可显著提升器件的量子效率和响应速度，同时拓宽光谱响应范围、增强光吸收效率，并优化光生电子-空穴对的分离与传输动力学，从而延长载流子寿命，如图3所示[11]。此类材料体系不仅能突破硅基材料在短波红外探测中的固有能带限制，还可为下一代高分辨红外成像芯片和光电集成系统提供关键技术支持。当前，硅基APD阵列探测器与量子点、二维材料等新型单片集成技术是未来实现光电芯片集成化的重要研究方向。

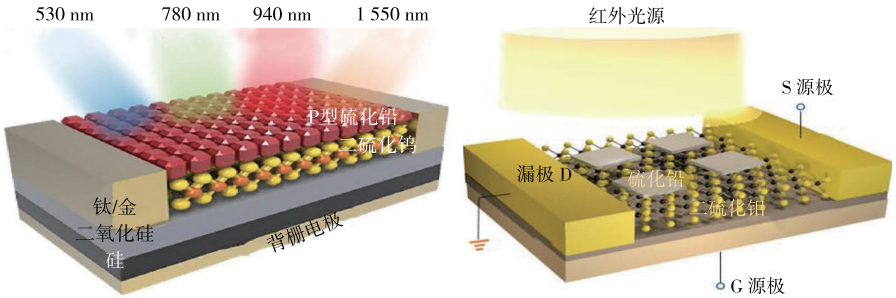


图3 混合维度异质结材料与硅APD探测器的集成结构示意图[10,14,22]

混合维度异质结硅基APD探测阵列集成化研究在安全监控、三维成像和量子计算等领域具有巨大应用前景。目前，研究团队已初步验证了混合维度异质结材料的APD器件可行性。然而，该技术仍面临较多挑战：异质结界面的能带失配与缺陷态抑制需通过精确的能带工程设计解决；材料生长工艺的均匀性和重复性亟待提升；载流子跨纬度运输的微观机制尚不明确；混合维度异质结材料与硅APD器件集成技术和跨层级可靠性评价模型等，如图4所示。

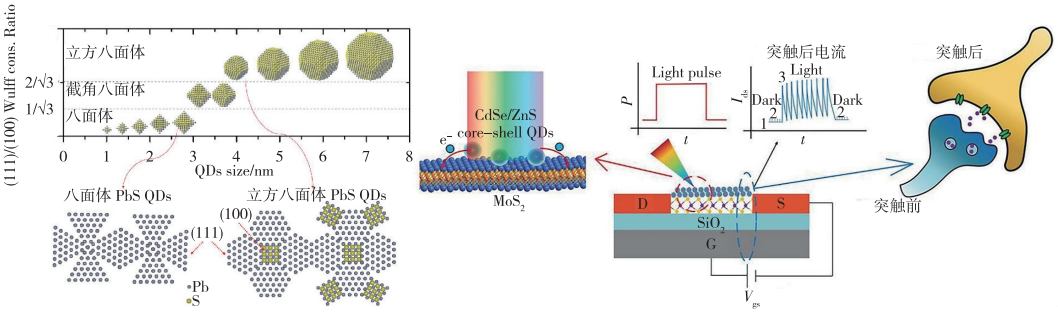


图4 混合维度异质结硅基APD探测阵列的科学问题[22-27]

3 混合维度异质结集成化技术的国内外研究现状

针对混合维度异质结硅APD器件存在的材料制备与界面控制、电荷输运与稳定性、多尺度模拟与集成等技术难题，国内外众多研究机构通过材料工程优化与器件结构创新，持续提升异质结光电探测器的性能，并探索其与光电子系统的多功

能集成路径，推动该领域取得显著进展。混合维度异质结材料凭借其独特的能带结构、原子级平整界面及厚度可控性，为高性能光电器件设计提供了全新的解决方案[28]。研究人员采用不同的化学合成方法，成功制备出多种维度与形貌的异质结材料，并开展测试表征研究验证其器件潜力，图 5 给出了典型的异质结光电探测器的器件结构[23,29]。

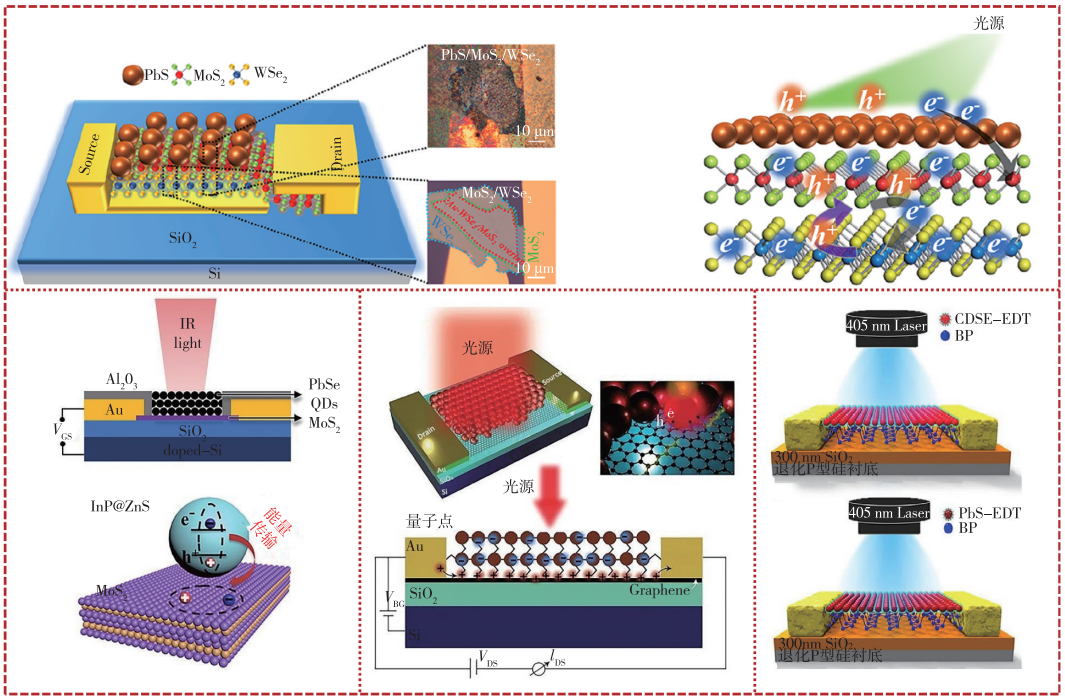


图 5　典型的异质结光电探测器的器件结构[22,30]

3.1　国外研究

奥地利微电子研究所 Grasser 团队联合美国纽约州立大学 Yao 和 Li 团队设计了一种混合维度异质结结构，该结构由一个二维单层夹在金属和三维半导体之间构成，用于研究垂直方向的电荷传输性质。Ti/MoS_2/p-Si 和 Au/MoS_2/p-Si M2DS 配置表现出混合维二极管，具有高整流比（5.4×10^4）和电导（1.3×10^5 S/m^2），实现了二维材料与成熟的三维硅基半导体技术的异质集成，如图 6 所示[31]。

波兰华沙董布罗夫斯基军队技术学院应用物理研究所和中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室的 Martyniuk 教授团队合作介绍了具有雪崩倍增的低临界电场特征的创新材料对高能效光电器件的意义[32]。传统材料中的雪崩倍增机制受到高驱动电压的限制，而基于二维材料的 APD 可以规避高驱动电压的制约，如图 7 所示。

韩国釜山国立大学 Kim 教授和成均馆大学 Choi 教授等通过化学气相传输法合成高质量 1D-$Nb_2Pd_3Se_8$，并与 2D-WSe_2 集成构建范德华异质结自供电光电探测器，实现栅压可调谐双极性光响应，如图 8 所示。该结构突破混合维度结构在感内

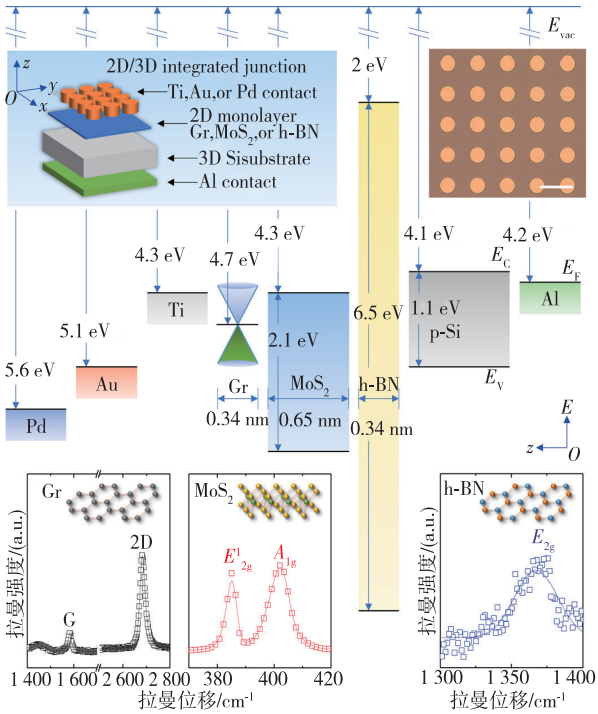


图 6　沿 M2DS 垂直堆栈的示意图、显微镜图和能带图

图像处理中的应用瓶颈，为高集成度、便携式感内卷积处理系统提供了理想平台[33]。

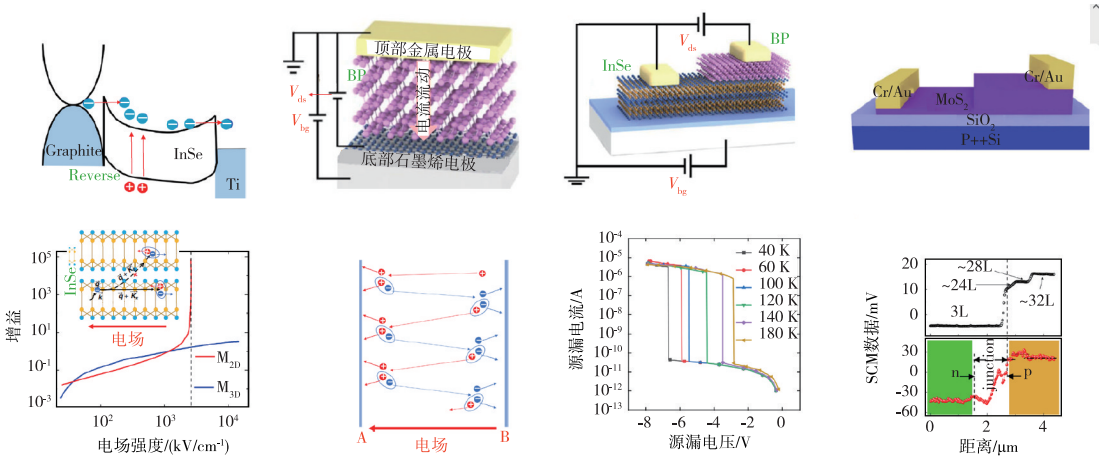


图7 二维材料的雪崩倍增效应和低临界电场特性示意图

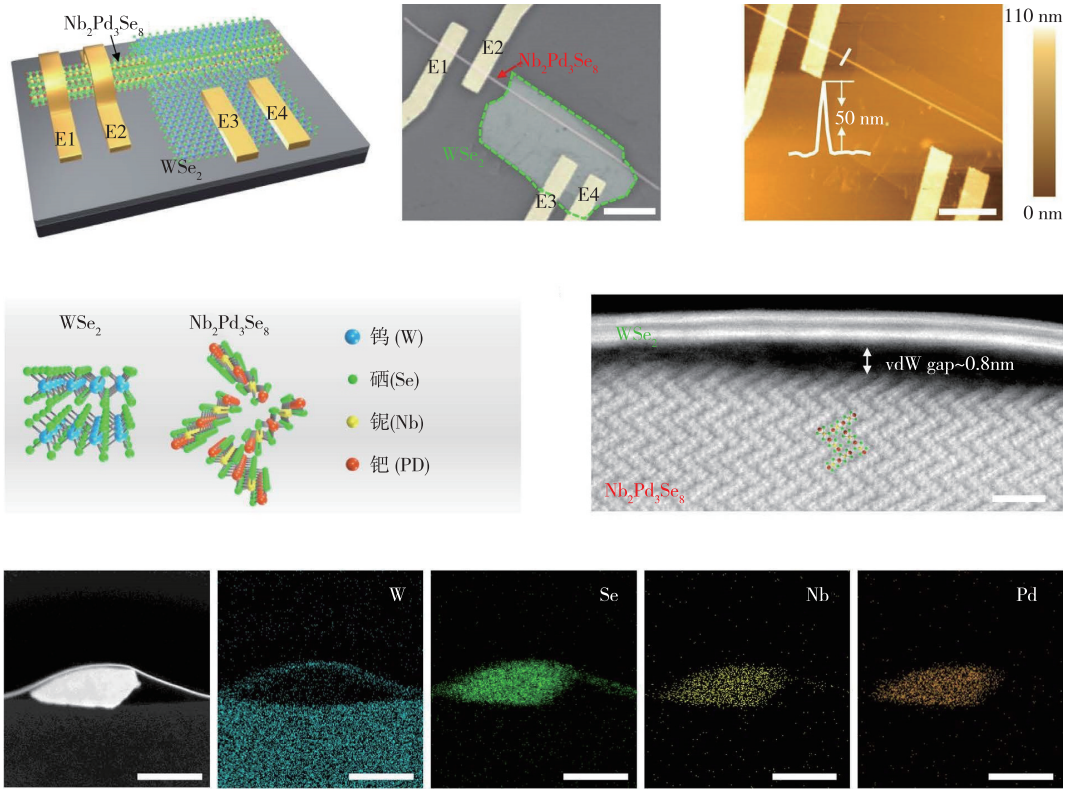


图8 基于1D-$Nb_2Pd_3Se_8$/2D-TMDs异质结构的门控可调宽带双向光响应示意图

英国曼彻斯特大学Vamivakas团队系统研究了CdSe/CdS的胶体量子点与单层$MoSe_2$间的能量转移机制，发现$MoSe_2$可通过激子共振耦合有效猝灭量子点荧光，为光生载流子的定向调控提供了新方法[34]。德国慕尼黑技术大学Müller-Buschbaum团队和苏州大学江林课题组合作，开发了金纳米球自组装嵌入PbS量子点基质的混合结构，用于绘制界面结构和电荷载流子的运动，从而指导光电器件的性能改进与优化[35]。荷兰格罗宁根大学的Loi团队使用MA^+-PbI_3^-配体钝化6.7 nm PbS量子点，显著提升油墨稳定性（保质期大于10周），并基于此制备了外量子效率为76%、比探测率为1.8×10^{12} Jones的可扩展的高效短波红外光电探测器[36]。美国Shultz团队构建了PbS量子点/石墨烯混合成像阵列，在1 V偏压、900 pW入射光（400～1 000 nm）条件下，器件的最高响应度达9.56×10^3～3.24×10^3 A/W，为量子点传感器和成像器件提供了一种可行的方案[37]。

3.2 国内研究

随着机器视觉、自动驾驶、智慧城市等应用场景的快速发展，国内研究人员聚焦混合维度异质结

光电探测器的多维能力开发。上海微系统与信息技术研究所制备了PbS/3D石墨烯/Si光电探测器，通过调节载流子传输，优化光吸收，使硅基PD检测波长扩展到2 200 nm，探测率为6.8×10^{10} Jones、响应率为5.2×10^{4} mA/W[38]。华中科技大学唐江教授团队制备PbS CQD光电二极管，设计出适配硅基ROIC顶入射结构的光电二极管，该器件的截止波长为1 300 nm，室温探测率为2.1×10^{12} Jones，3 dB带宽为140 kHz，线性动态范围超过100 dB[39]。华中科技大学蓝新正教授团队研制出胶体PbS量子点光电二极管成像仪，并开发出一种可控氧化工艺。该工艺能更好地对PbS-EDT传输层进行表面钝化处理，使器件的暗电流密度降低了近两个数量级，探测率提高了3.4倍[40]。东南大学倪振华教授和杭州电子科技大学张阳教授团队联合制备了PbS/MoS_2/WSe_2异质结光电二极管，利用PbS量子点层与MoS_2/WSe_2异质结材料结合，增强光伏响应。器件的最大响应率为0.76 A/W，比探测率为5.15×10^{11} Jones[30]。中科院半导体所相关科研团队制备了一种由PbS量子点和单层石墨烯构成的高响应度高探测率宽带光电探测器，器件在可见光和近红外光下的最高响应度分别为202 A/W和183 mA/W，最高探测率分别达到2.24×10^{11}和2.47×10^{8} Jones[24]。西安交通大学科研团队通过溶液相配体交换制备的高质量PbS量子点膜，用于PbS-QDs/a-IGZO的敏化光电晶体管。在1 064 nm波长下，器件具有9.3×10^{12} Jones探测率、45.3 A/W响应度和24.6 ms的衰减时间[25]。北京理工大学团队开发了一种基于PbS量子点和Bi_2Te_3材料协同效应的新型光电探测器，用于室温下探测中波红外波段，器件室温下探测率为1.6×10^{10} Jones，在中波红外波段也表现出良好的光电响应[26]。南方科技大学研究团队利用超快瞬态吸收光谱对MoS_2/$PtSe_2$异质结构进行光谱测试表征，研究电荷在不同能带间的动态转移，以及异质结构中激子能量的调控机制，为新型光电子器件提供指导[27]。复旦大学张荣君教授团队开展二维过渡金属硫族化合物/非晶氧化镓异质结的能带排列及层间电荷传输机制的研究，实现高增益宽谱探测，开发了宽谱光电探测研究的新平台，如图9所示[41]。

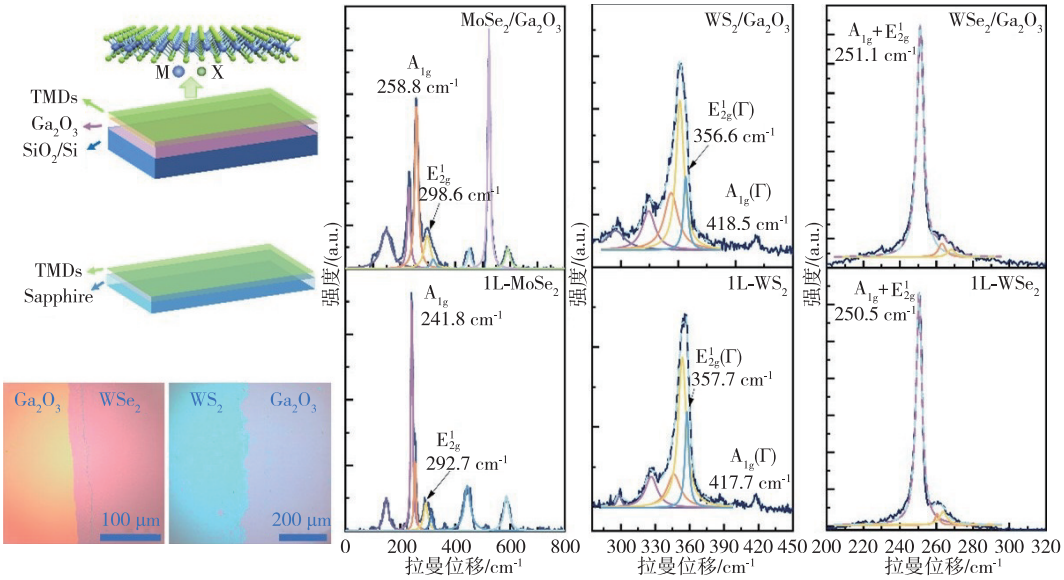


图9　三种TMDs/Ga_2O_3异质结材料的能带结构及测试表征结果示意图

青岛大学张军教授团队研究了一种创新的二维/三维范德华混合维度异质结结构，为基于2D/3D混合维度结构制造高灵敏低功耗的气体传感器提供新的思路，如图10所示[42]。

电子科技大学王志明教授、童鑫研究员团队开展基于QDs和2D材料异质结的光电探测器相关研究。图11给出了基于QDs/石墨烯异质结的紫外和可见光电探测器的结构和表征结果，推动光电探测器向低成本、轻量化、高响应和高性能发展[22]

西南技术物理研究所宋海智研究员团队关注了二维材料与零、一和三维材料构成的异质结构的研究，为该类器件的进一步设计、开发和性能改善提供了可行性分析，基于2D-0D HD结构的光电器件结构如图12所示[43]。

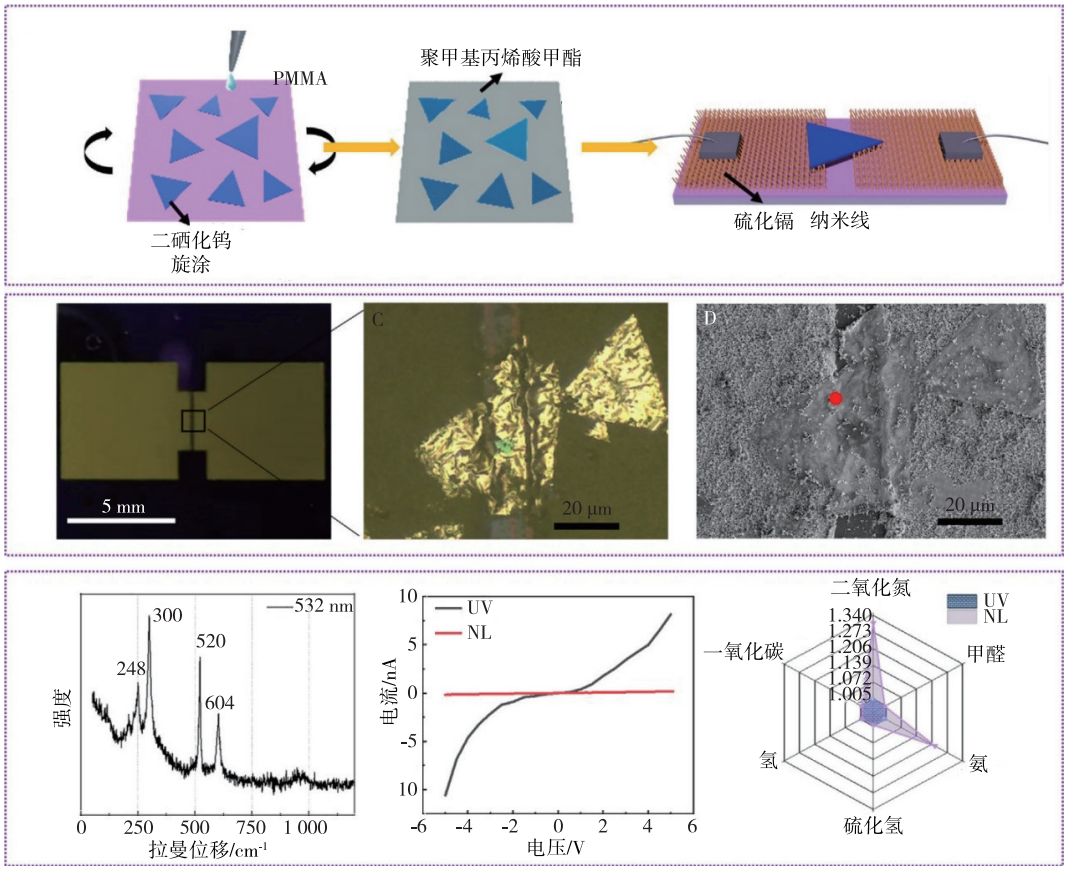


图 10 基于 2D/3D 混合维度结构的快速、高灵敏度的电子传感器研究

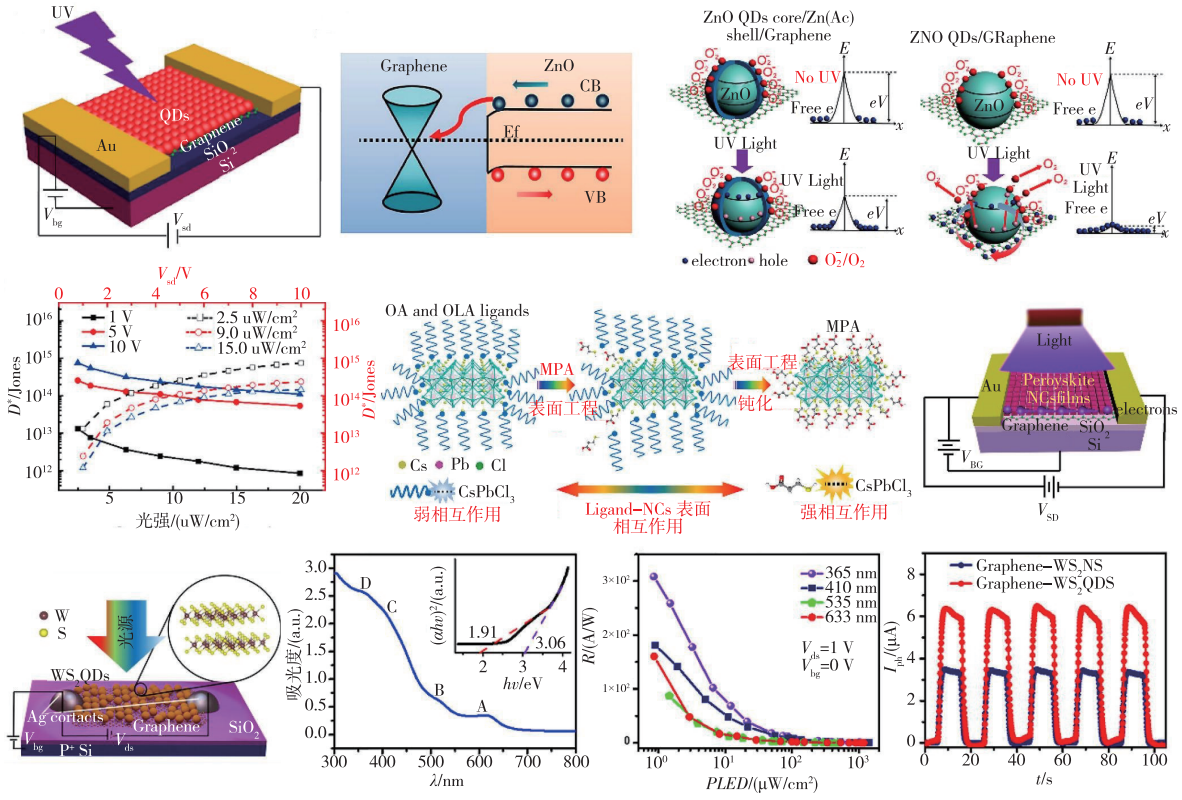


图 11 基于 QDs/石墨烯异质结的紫外和可见光电探测器示意图

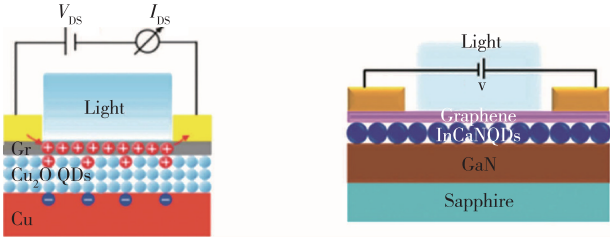


图12　基于2D-0D HD结构的光电器件结构示意图

重庆光电技术研究所李明团队开展CCD器件拓扑结构与像元、CMOS读出电路和三维异质互连集成等技术研究，提出了一种1 024×256阵列规模的集成式CCD-CMOS图像传感器，填补了国内CCD-CMOS三维集成技术空白，满足集成化、数字化的探测成像要求[44]。

4　研究展望

通过对量子点材料/二维材料等新型半导体材料的优缺点、混合维度异质结材料及其光电探测器应用的探究分析，可以发现：传统APD器件、基于量子点及二维材料的光电探测器均存在一定程度上的不足。结合短波红外探测技术发展趋势及相关应用场景，对混合维度异质结硅APD短波红外探测技术进行如下展望。

4.1　混合维度异质结材料的可控制备工艺和耦合机理难题

探索低成本大面积高质量混合维度异质结材料的可控制备工艺及配体交换技术，开展异质结材料的测试分析研究，依据表征结果评价材料的晶体质量，反馈并优化混合维度异质结材料的制备工艺。另外，通过分析不同维度材料间的耦合作用对体系能带结构的影响，掌握混合维度异质结材料的能带结构和多效应耦合等机理问题，利用理论计算及实验分析来验证相关理论，为短波红外探测技术的发展提供新型混合维度异质结材料的解决方案[45]。

4.2　硅基APD短波红外探测器研制面临的重要挑战

为评估混合维度异质结材料的晶体质量，开展基于混合维度异质结材料的硅基APD短波红外探测器的设计优化研究。利用TCAD软件进行器件的结构仿真设计，分析器件的结构尺寸参数、掺杂浓度和金属电极功函数等因素对量子效率、暗电流和响应时间等核心性能参数的影响。结合混合维度异质结材料的参数和结构仿真设计结果，优化调整器件的制备工艺方案，突破关键的工艺技术，这是高性能APD器件研制面临的首要挑战。利用神经网络算法对器件的结构仿真设计和制备工艺进行协同优化，这是一项关键且具挑战性的任务。通过不断调整优化关键参数，确定网络模型，分析训练结果，在提高器件的设计和制备效率的同时，提升器件的光电性能参数[46]。

4.3　基于混合维度异质结材料的硅基短波红外探测阵列混合集成和可靠性难题

当前阵列集成器件的关键性能指标还需进一步提升，有必要探索混合维度异质结探测器与CMOS读出电路的集成和封装工艺技术，开展环境模拟试验。此外，还需分析不同退化现象的敏感参数和失效机理，构建可靠性评价模型，优化封装与材料工艺，完成成像组件设计，验证阵列器件的成像效果和性能。

5　总结

通过文献调研发现：基于混合维度异质结材料的硅APD器件可以实现低成本低暗电流宽波段响应的短波红外探测功能。为满足未来高性能三维成像和多功能光电系统的工程化应用需求，突破混合维度异质结硅APD器件的技术难题，研究人员通过能带工程与器件结构创新，持续提升异质结光电探测器的性能，并探索其与光电子系统的多功能集成路径，开发出多种兼具宽谱响应与高灵敏度的新型光电探测器。混合维度异质结材料为高性能光电器件设计提供了全新的解决方案，通过融合不同维度材料的能带特性、工艺兼容性优势，释放硅在短波红外探测领域的潜力，实现短波红外探测功能，从而促进混合维度异质结材料在半导体光电器件领域的工程化和商业化应用。本文以混合维度异质结APD探测阵列为研究对象，系统探讨混合维度异质结材料的可控制备、异质结界面机理、器件结构设计、集成工艺等研究，指导其他混合维度异质结APD的研究，从而推动这类器件在红外探测领域的应用。

参考文献：

[1] Chen L, Lv J, Tian F, et al. A multifunctional device based on graphene/silicon heterojunction[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2022, 21: 703-708.

[2] Liu W, Lv J, Peng L, et al. Graphene charge-injection photodetectors[J]. Nature Electronics, 2022, 5(5): 281-288.

[3] He X, Wang Y, Peng Z, et al. On-chip two-dimensional material-based waveguide-integrated photodetectors[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2024, 12(7): 2279-2316.

[4] Kumar R, Panda D, Saha J, et al. Short-wave infrared (SWIR) photodetection by InAs/GaAs quantum dot heterostructures grown on Ge (100) substrate without migration enhanced epitaxy layer [J]. Superlattices and Microstructures, 2020, 148: 106714.

[5] Wu J, Gong M. Quantum dots/graphene nanohybrids photodetectors: progress and perspective[J]. Nano Express, 2021, 2(3): 031002.

[6] Yang C, Wang G, Liu M, et al. Mechanism, material, design, and implementation principle of two-dimensional material photodetectors[J]. Nanomaterials, 2021, 11(10): 2688.

[7] Zhong F, Wang H, Wang Z, et al. Recent progress and challenges on two-dimensional material photodetectors from the perspective of advanced characterization technologies[J]. Nano Research, 2021, 14(6): 1840-1862.

[8] Tan C, Yang Z, Wu H, et al. Electrically tunable interlayer recombination and tunneling behavior in WSe_2/MoS_2 heterostructure for broadband photodetector[J]. Nanoscale, 2024, 16(12): 6241-6248.

[9] Mei J, Liu M, Vivo P, et al. Two-dimensional antimony-based perovskite-inspired materials for high-performance self-powered photodetectors[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(50): 2106295.

[10] Han T, Liu H, Chen S, et al. Construction and electrical performance improvement of MoS_2 FET with graphene/metal contact[J]. Optical Materials Express, 2021, 11(9): 3099.

[11] Ghosh R, Yadav K, Kataria M, et al. Heavy mediator at quantum dot/graphene heterojunction for efficient charge carrier transfer: alternative approach for high-performance optoelectronic devices [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(29): 26518-26527.

[12] Wu F, Tian H, Shen Y, et al. Vertical MoS_2 transistors with sub-1-nm gate lengths [J]. Nature, 2022, 603(7900): 259-264.

[13] 韩 涛. 层状二硫化钼材料的制备及其器件应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
Han Tao. Preparation and device application research on 2D layered MoS_2 material[D]. Xi'an: Xidian University, 2022.

[14] Wang Q, Wen T, Cai K, et al. Nonvolatile infrared memory in MoS2/PbS van der Waals heterostructure[J]. Science Advances, 2018, 4(4): eaap7916.

[15] Wang B, Yuan J, Che M, et al. High-performance broadband photodetector based on $PtSe_2/MoS_2$ heterojunction from visible to near-infrared region [J]. Science China Information Sciences, 2024, 67(3): 132401.

[16] Miao J, Wang C. Avalanche photodetectors based on two-dimensional layered materials [J]. Nano Research, 2021, 14(6): 1878-1888.

[17] Alamri M, Gong M, Cook B, et al. Plasmonic WS_2 nanodiscs/graphene van der waals heterostructure photodetectors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(36): 33390-33398.

[18] Đorđević N, Schwanninger R, Yarema M, et al. Metasurface colloidal quantum dot photodetectors[J]. ACS Photonics, 2022, 9(2): 482-492.

[19] Bothra U, Albaladejo-Siguan M, Vaynzof Y, et al. Impact of ligands on the performance of PbS quantum dot visible-near-infrared photodetectors[J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(1): 2201897.

[20] Liu Y, Gong T, Zheng Y, et al. Ultra-sensitive and plasmon-tunable graphene photodetectors for micro-spectrometry[J]. Nanoscale, 2018, 10(42): 20013-20019.

[21] Ouyang W, Chen J, Shi Z, et al. Self-powered UV photodetectors based on ZnO nanomaterials [J]. Applied Physics Reviews, 2021, 8(3): 031315.

[22] Luo J, Selopal GS, Tong X, et al. Colloidal quantum dots and two-dimensional material heterostructures for photodetector applications[J]. Electron. 2024, 2(2): e30.

[23] Beygi H, Sajjadi S A, Babakhani A, et al. Surface chemistry of as-synthesized and air-oxidized PbS quantum dots [J]. Applied Surface Science, 2018, 457: 1-10.

[24] Luo M, Chen R, Zhu Z, et al. A broadband photodetector based on PbS quantum dots and graphene with high responsivity and detectivity[J]. Nanomaterials, 2023, 13(13): 1996.

[25] Zhang C, Yin X, Qian G, et al. Gate voltage adjusting PbS-I quantum-dot-sensitized InGaZnO hybrid phototransistor with high-sensitivity [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(4): 2308897.

[26] Yu L, Tian P, Tang L, et al. Room temperature broadband Bi_2Te_3/PbS colloidal quantum dots infrared photodetectors[J]. Sensors, 2023, 23(9): 4328.

[27] Yang J, Gong S, Zhang X, et al. Auger-assisted secondary hot carrier transfer in a type Ⅰ $MoS_2/PtSe_2$ heterostructure [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(23): 2311730.

[28] Agrawal J, Dixit T, Palani I A, et al. Highly visible-blind ZnO photodetector by customizing nanostructures with controlled defects[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(22): 1439-1442.

[29] Kim D, Leem J Y. Morphology effect of 1D ZnO nanostructures designed by hydrothermal and thermal annealing for fast ultraviolet photodetector applications [J]. Physica Status Solidi (A), 2020, 217(12): 1900946.

[30] Zeng P, Wang W, Han D, et al. MoS_2/WSe_2 VDW heterostructures decorated with PbS quantum dots for the development of high-performance photovoltaic and broadband photodiodes[J]. ACS Nano, 2022, 16(6): 9329-9338.

[31] Cabanillas A, Shahi S, Liu M, et al. Enormous out-of-plane charge rectification and conductance through two-dimensional monolayers[J]. ACS Nano, 2025, 19: 3865-3877.

[32] Martyniuk P, Wang P, Rogalski A, et al. Infrared avalanche photodiodes from bulk to 2D materials[J]. Light Sci Appl, 2023, 12, 212.

[33] Dat V K, Nguyen M C, Jeong B J, et al. Van der Waals Integration of 1D Nb2Pd3Se8 and 2D WSe_2 for Gate-Tunable In-Sensor Image Processing[J]. Advanced Materials, 2025, e00011: 1-11.

[34] Goodfellow K M, Chakraborty C, Sowers K, et al. Distance-dependent energy transfer between CdSe/CdS quantum dots and a two-dimensional semiconductor[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(2): 021101.

[35] Guan T, Chen W, Tang H, et al. Decoding the self-assembly plasmonic interface structure in a PbS colloidal quantum dot solid for a photodetector[J]. ACS Nano, 2023, 17(22): 23010-23019.

[36] Wang H, Pinna J, Romero D G, et al. PbS quantum dots ink with months-long shelf-lifetime enabling scalable and efficient short-wavelength infrared photodetectors [J]. Advanced Materials, 2024, 36(19): 2311526.

[37] Shultz A, Liu B, Gong M, et al. Development of broadband PbS quantum dot/graphene photodetector arrays with high-speed readout circuits for flexible imagers[J]. ACS Applied Nano Materials, 2022, 5(11): 16896-16905.

[38] Wu H, Liu Z, Wang B, et al. Integration of PbS quantum dots with 3D-graphene for self-powered broadband photodetectors in image sensors[J]. Acs Photonics, 2024, 11(3): 1342-1351.

[39] Liu J, Liu P, Chen D, et al. A near-infrared colloidal quantum dot imager with monolithically integrated readout circuitry[J]. Nature Electronics, 2022, 5(7): 443-451.

[40] Wang Y, Hu H, Yuan M, et al. Colloidal PbS quantum dot photodiode imager with suppressed dark current [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(50): 58573-58582.

[41] Zhu X, Liu W, Sheng C, et al. Toward Broadband Photodetection: Band Alignment and Interlayer Charge Transfer in 2D Transition Metal Dichalcogenides/3D-Ga_2O_3 Hybrid-Dimensional Heterostructures [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2024, 16(12): 15446-15456.

[42] Zheng W, Lu G, Liu X, et al. Mixed-dimensional heterojunction by 3D CdS nanowire arrays bridged with 2D WSe2 for ultrafast photoelectric gas sensor [J]. Matter, 2025, 8(2): 101914.

[43] 王旭乐,程碑彤,蒋若梅,等. 基于2维材料的异维结构光电探测器的研究进展[J]. 激光技术, 2024, 48(6): 846-855.
Wang Xule, Cheng Beitong, Jiang Ruomei, et al. Research progress on 2-D material based on hetero-dimension photodetectors[J]. Laser Technology, 2024, 48(6): 846-855.

[44] 李　明,黄　芳,刘戈扬,等. 高速数字化三维集成式CCD-CMOS图像传感器[J]. 半导体光电, 2024, 45(3):388-394.
LI Ming, HUANG Fang, LIU Geyang, et al. A High-Speed, Digitized, 3D-Integrated CCD-CMOS Image Sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(3):388-394.

[45] 张彩珍, 戴明娇, 闫升荣. ZnO基异质结紫外探测器光电特性研究[J]. 半导体光电, 2023, 44(6): 832-836.
Zhang Caizhen, Dai Mingjiao, Yan Shengrong. Study on the photoelectric characteristics of ZnO based heterojunction UV detectors[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(6): 832-836.

[46] 顾　杰, 颜元凯, 万　茜. 二硫化钼-石墨烯垂直异质结的制备与表征[J]. 半导体光电, 2020, 41(2): 252-256, 263.
Gu Jie, Yan Yuankai, Wan Xi. Preparation and characterization of graphene-molybdenum disulfide vertical heterojunction [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(2): 252-256, 263.

作者简介：

韩　涛(1991—),男,河南省濮阳市人,博士,工程师,主要从事半导体工艺技术研究;

张建兵(1980—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事红外探测与成像、光谱探测与成像的研究。