

文章编号: 1001-3806(2024)06-0846-10

基于2维材料的异维结构光电探测器的研究进展

王旭乐¹, 程碑彤¹, 蒋若梅¹, 周咏^{1,2}, 谢修敏¹, 赵超军¹, 张伟¹, 宋海智^{1,3,4,*}

(1. 西南技术物理研究所量子研究中心, 成都 610041, 中国; 2. 成都工业大学电子工程学院, 成都 611730, 中国; 3. 电子科技大学基础与前沿研究院, 成都 610054, 中国; 4. 长春理工大学高功率半导体激光器国家重点实验室, 长春 130013, 中国)

摘要: 基于2维材料的光电探测器是新一代探测技术的重要发展方向。2维材料因不受晶格匹配的限制, 可以利用范德华力与其它维度的材料, 如0维的量子点、1维的纳米线、3维的半导体衬底等, 形成异维结构的光电探测器。迄今为止, 基于2维材料的异维结构光电探测器研究已经取得了很大的进展, 实现了显著优于单纯2维材料探测器的性能。归纳了异维结构范德华异质结在光电探测中的优势; 指出了2维材料与0维材料、1维材料、3维材料或多层多维度材料组成的异维结构光电探测器的研究现状; 并在此基础上, 对其面临的挑战和前景进行了总结与展望。

关键词: 探测器; 2维材料; 范德华异质结; 异维结构

中图分类号: TN36 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.06.010

Research progress on 2-D material based on hetero-dimension photodetectors

WANG Xule¹, CHENG Beitong¹, JIANG Ruomei¹, ZHOU Yong^{1,2}, XIE Xiumin¹,
ZHAO Chaojun¹, ZHANG Wei¹, SONG Haizhi^{1,3,4,*}

(1. Quantum Research Center, Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. School of Electronic Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu 611730, China; 3. Institute of Fundamental and Frontier Sciences, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 4. State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130013, China)

Abstract: Photodetecting based on two-dimensional (2-D) material is an important trend for new generation of photodetection technology. Free of lattice matching, 2-D materials can be easily combined via van der Waals (VDW) force to materials of other dimensions, such as zero-dimensional (0-D) quantum dots, one-dimensional (1-D) nanowires and three-dimensional (3-D) semiconductors, to form hetero-dimension (HD) photodetectors. So far, significant progresses have been made for 2-D material based HD photodetectors to exhibit obviously higher performance than 2-D material photodetectors. The merits of VDW HD junctions in photodetection are introduced in this paper, and the photodetector research achievements of the HD styles including 2D-0D, 2D-1D, 2D-3D, and multi-layer multi-dimension are reviewed. Some insight into the possible challenges and future prospects of 2-D materials based HD-structure photodetectors is attempted.

Key words: detectors; 2-D materials; van der Waals heterostructures; hetero-dimension structure

0 引言

光电探测器是支撑信息科技发展的重要器件, 已广泛应用于光通信、环境监测、红外成像、遥感制导、军事侦测等很多领域^[1-3]。基于传统材料^[4]如 Si、In-GaAs、HgCdTe、氧化钒等的探测器产品, 目前仍然主导着光电探测技术的商业市场。然而, 传统材料存在晶

格匹配约束、制造工艺复杂、特定波长检测困难、柔韧性差、难以突破探测极限等技术瓶颈, 限制了光电探测技术的进一步发展^[5-8]。自2004年石墨烯(graphene)^[9]发现以来, 2维(two-dimensional, 2-D)材料因其独特的物理、化学、光电特性以及低成本的合成方法而在光电探测领域受到了广泛关注^[10-13], 与此同时, 光吸收和载流子寿命等不足^[14-15]等性能缺陷也对2-D材料光电探测能力提出了重要挑战。

为了提高2-D材料探测器的光电性能, 研究人员提出了许多优化方法。其中, 将不同的2-D材料人工堆叠, 构建2-D范德华(van der Waals, VDW)异质结是目前最常见且比较有效的方法, 近年来得到了较快的发展^[16-17]。值得注意的是, 与传统材料相比, 2-D

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB2203400; 2021YFA0718803); 成都市重大科技创新项目(2021-YF08-00159-GX)

* 通信作者: hzsong1296@163.com

收稿日期: 2023-09-22; 修回日期: 2023-11-10

材料还可以凭借其无表面悬挂键、无需晶格匹配等特性,与其它维度材料以 VDW 方式任意组合,为构建新结构和新功能器件提供了更大的自由度。因此,除 2-D VDW 异质结外,以 2-D 材料为基础的异维(hetero-dimension, HD)结构同样受到了极大关注。经过一定的探索研究,该类型器件已被证明具有优于单纯 2-D 材料所构成的同类器件的性能,这使得 HD 结构成为一种很有前途、可制造高性能光电探测器的重要方法^[18-19]。

鉴于 HD 结构的重要应用价值,本文中重点介绍 2-D 材料与 0 维(zero-dimensional, 0-D)、1 维(one-dimensional, 1-D)以及 3 维(three-dimensional, 3-D)材料构成的 HD 结构光电探测器的研究现状,讨论它们在光电探测上的优势与不足,为该类器件的进一步设计、开发和性能改善方面提供可行性分析,并对基于 2-D 材料的 HD 结构光电探测器目前面临的挑战以及今后的发展前景进行总结和展望。

1 基于 2-D 材料的 HD 结构概述

HD 结构是指将两种或者多种不同维度的材料通过 VDW 紧密堆叠构成的异质结^[19]。设计原理上,基于 2-D 材料的 HD 结构光电探测器可以选择性组合不同维度材料的优点,取长补短,从而克服单一材料在器件应用中固有的缺陷;并且还会因不同维度材料间的独特耦合机制而展示出通常结构所不具备的新颖特性,有望突破目前光电探测器领域的技术局限,从而满足更高的实际应用需求。器件应用方面,两种或者多种维度的具有优异特性材料的组合既可以扩展器件应用场景,又可以通过能带调控工程^[20]以及施加外部调控^[21]等手段对材料的光电特性进行调控,从而提升光电探测器如反映探测器光电转换能力的响应度、量子效率;体现探测器光信号响应能力范围的光谱响应范围;代表探测灵敏度的比探测率以及无光照下电流大小的暗电流等特性。

HD 结构中目前研究较多的几种组合包括:2D-0D、2D-1D 以及 2D-3D HD 结构,如图 1 所示。对于 2D-0D 和 2D-1D HD 结构,可以利用 0 维和 1 维材料独特的光电子性能,如量子限制效应,来提高 2-D 材料光电探测器的性能^[22-23];对于 2D-3D HD 结构,可以利用 3-D 材料的大空间自由度提高光吸收率,并且简化器件制造过程^[24]。在许多情况下,不同维度材料的堆叠次序会产生不同的功能表现,本文作者将区分 2-D/ x -D 和 x -D/2-D(底部/顶部)等不同标记方式。在此基础上,更高复杂度的 HD 结构,例如 3-D/0-D/2-D 和 2-D/0-D/2-D 等,可以实现更进一步的性能优化^[25-26]。

以下将分别介绍几种不同 HD 结构光电探测器的研究现状、发展趋势等内容。

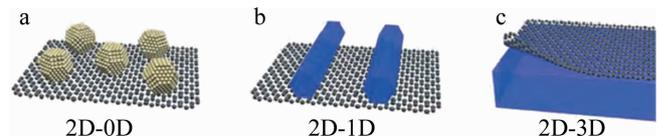


图 1 基于 2-D 材料的典型 HD 结构示意图^[27]

Fig. 1 Schematic diagrams of typical 2-D material based HD structures^[27]

2 2D-0D HD 结构光电探测器

0-D 材料包括富勒烯^[28]、纳米晶粒(nanoparticle, NP)^[29]和量子点(quantum dot, QD)^[30]等。其中具有宽光谱吸收特性和尺寸可调的 QD 是很有发展前途的光敏感材料^[31],而 2-D 材料与 QD 组合而成的 2D-0D HD 结构有可能同时发挥 QD 和 2-D 材料各自的优势,从而提升光电器件的性能。制备技术方面,可以通过溶液法化学加工等措施较为容易地使 0-D 材料与 2-D 材料集成为一体^[32],从而高效地形成 2D-0D HD 结构。图 2 是基于 2D-0D HD 结构的光电探测器原理结构图。

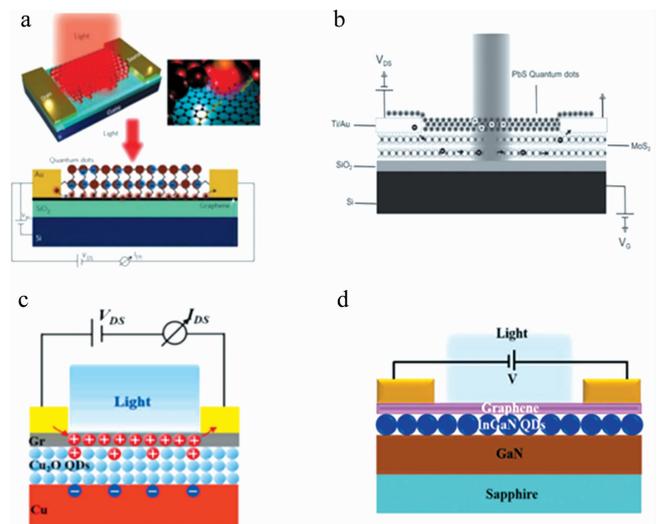


图 2 基于 2D-0D HD 结构的光电探测器原理结构图

a—graphene/PbS-QD 光电晶体管结构图^[33] b—MoS₂/PbS-QD 光电晶体管 HD 结构图^[34] c—Cu₂O-QD/graphene 光电探测器的原理图^[40] d—InGaN-QD/graphene 光电探测器结构图^[41]

Fig. 2 Schematic and structural diagrams of the 2D-0D HD structure photo-detectors

a—structural diagram of the graphene/PbS-QD photodetector^[33] b—schematic diagram of the phototransistor based on MoS₂/PbS-QD HD structure^[34] c—schematic diagram of the photodetector based on graphene/Cu₂O-QD HD structure^[40] d—structural diagram of the InGaN-QD/graphene photodetector^[41]

与 QD 组合形成的 2D-0D HD 结构的基本工作原理是:用高吸收系数的 QD 作为光吸收层,当光照时

QD层内产生大量的光生电子-空穴对,其中一种载流子在内建电场的作用下转移到2-D材料中,另一种载流子被捕获在QD中,两种载流子空间分离产生光生伏特效应;或者2-D材料中的光生载流子在偏置电压下以高迁移率进行2-D输运,形成横向沟道光电流,同时QD中的载流子凭借其较长的寿命进一步调制2-D沟道电导,协同产生增强的光电导效应。在此原理基础上,2012年,KONSTANTATOS等人^[33]通过在graphene上沉积PbS-QD,成功地制备出具有超高探测率($7 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)的graphene/PbS-QD光电探测器件(见图2a)。相比于单层graphene光电器件,该器件的响应度从约 10^{-2} A/W 提高到了约 10^7 A/W ,量子效率达到25%;并且改变QD的尺寸还可以调整器件的光谱响应范围。得益于PbS-QD的较强的光吸收和MoS₂带隙随层数可调的特性,2015年,KUFER等人^[34]报道了一种宽带MoS₂/PbS-QD光电晶体管(见图2b),该器件对可见光和近红外光均有响应,响应度最高可达到 10^6 A/W ,明显高于此前报道的单纯PbS-QD和单纯MoS₂光电探测器。除了较典型的PbS-QD,2021年,KUNDU等人^[35]研制的MoS₂/PbSe₂-QD器件在室温下对2.55 μm波长光信号的响应度和探测率分别达到137.6 A/W和 $7.7 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。2022年,KOLLI等人^[36]研制的MoS₂/SnS₂-QD光电探测器实现了从紫外到可见再到近红外的宽光谱响应。与MoS₂同一类型的过渡金属硫系化物(transition metal dichalcogenide, TMD)2-D材料包括WSe₂和WS₂与QD结合构成的器件^[37-39],也能产生较好的光电性能。这得益于TMD在近红外范围内表现出的较高的光吸收能力,而且表明TMD与不同QD结合构成的HD结构可以用于提升光电探测器件的

性能。

相比于以上2D-0D的情况,0D-2D HD结构出现较晚,但也显示了值得重视的性能。2019年,LIU等人^[40]利用Cu₂O-QD/graphene HD结构,制备了柔性高灵敏光电探测器(见图2c),该器件在室温条件下,弯曲前后分别获得了 10^{10} A/W 和 10^6 A/W 的良好响应率。HU等人^[41]展示了一种用于GaN基光电探测器的InGaN-QD/graphene HD结构(见图2d),在室温条件下,该结构显示了优于 10^9 A/W 的超高响应度和fW量级的光探测能力。KAN等人^[42]将ZnS-QD/graphene HD结构与3D-4H-SiC集成,研制了一种PIN光伏型探测器,其器件对深紫外光具有极好的选择性和较快的响应速度(28 μs),远远优于传统的光导型光电探测器,但量子效率仅为1.36%。

除QD材料外,NP作为典型的0-D材料也在HD结构中发挥着重要作用,其研究成果包括MoS₂/Ni-NP^[43]、MoS₂/Au-NP^[44]、ReS₂/Au-NP^[45]等光电探测器,这类2D-0D器件利用金属颗粒表面等离子共振(surface plasmon resonance, SPR)效应,极大地增强了局域电磁场,促进了器件光吸收。此外,金属激发的热电子传输到界面处,在一定条件下发生转移,也可形成增强的光电流。基于以上原理,这一类器件均显示了优异的探测性能。

表1中总结了目前常见的几种2D-0D HD结构探测器的部分性能参数指标。从上面的分析和表1可以看出,2D-0D结构光电探测器的研制取得了很大进展,主要是充分利用0-D结构的载流子陷阱效应抑制了噪声电流,获得了比单纯2-D材料探测器高得多的探测率,特别是在部分器件中获得了超高响应度(不小于 10^6 A/W)。综合分析认为,获得超高响应度

表1 常见的2D-0D HD结构光电探测器的部分性能参数指标

Table 1 Some performance parameters of a few studied 2D-0D HD structure photodetectors

年份	结构	响应范围/μm	响应度/(A · W ⁻¹)	探测率/ (cm · Hz ^{1/2} · W ⁻¹)	响应速度(上升)/s	参考文献
2018	graphene/PbS-QD	0.6 ~ 1.55	10^4 (@ 1.55 μm)	10^{12}	3×10^{-3}	[46]
2018	MoS ₂ /PbS-QD	0.7 ~ 0.9	5.4×10^4 (@ 0.85 μm)	10^{11}	9.5×10^{-4}	[47]
2019	WS ₂ /PbS-QD	0.8 ~ 2.2	1400 (@ 1.8 μm)	10^{12}	0.2	[39]
2019	BP/InP-QD	—	1×10^9 (@ 0.405 μm)	10^{16}	—	[48]
2019	MoS ₂ /ZnCdSe/ZnS (core/shell)-QD	0.45 ~ 0.7	3.7×10^4 (@ 0.45 μm)	10^{12}	0.3	[49]
2019	Cu ₂ O-QD/graphene	—	1.2×10^{10} (@ 0.45 μm)	1.4×10^{12}	—	[40]
2019	InGaN-QD/graphene	0.45 ~ 0.65	1.6×10^9 (@ 0.45 μm)	5.8×10^{14}	—	[41]
2019	ZnS-QD/graphene	0.2 ~ 0.28	0.29 (@ 0.25 μm)	1.41×10^{10}	2.8×10^{-5}	[42]
2021	MoS ₂ /PbSe-QD	1.2 ~ 3	137.6 (@ 2.55 μm)	7.7×10^{10}	—	[35]
2021	MoS ₂ /Au-NP	0.4 ~ 0.8	1.5 (@ 0.64 μm)	4.75×10^{13}	6.5×10^{-3}	[44]
2022	MoS ₂ /SnS ₂ -QD	0.3 ~ 3	435 (@ visible)	7.1×10^{12}	0.1	[36]
2022	ReS ₂ /Au-NP	0.554 ~ 0.78	2.1 (@ 0.554 μm)	1.12×10^{12}	0.2	[45]
2023	MoS ₂ /Ni-NP	0.532 ~ 0.98	106.21 (@ 0.532 μm)	1.9×10^{12}	5.3×10^{-2}	[43]

的机制可能包括:在光电导型 2D-0D HD 器件中,2-D 材料的高载流子迁移率与 0-D 材料载流子陷阱效应的协同使得载流子渡越时间 τ_{transit} 与寿命 τ_{lifetime} 相差多个数量级,2-D 材料沟道中的载流子通过 0-D 局域栅压协同下的横向多重加速碰撞可获得很高的电导增益 G ($\tau_{\text{lifetime}}/\tau_{\text{transit}}$)^[34]。同时可以看到,部分器件在响应度方面的表现比以上情形相差几个数量级,其主要原因在于:光伏型探测器的响应依赖于器件在纵方向极小尺度内的载流子空间分离,因此很难产生载流子增益,但在响应速度上有一定相对优势。目前,2D-0D HD 结构光电探测器还存在一些缺陷和问题:一是响应谱主要集中在可见到近红外波段,而 QD 对中波红外的吸收较弱,应用也较少;二是由于初始 0-D 结构表面分布有缺陷,器件存在一定的稳定性问题;三是金属颗粒与 2-D 材料界面处形成肖特基势垒,在减小暗电流的同时也降低了热载流子的注入效率,对器件性能影响较大。更为明显的问题是这类器件整体上较低的响应速度(毫秒量级),其主要原因是光生载流子限制在 0-D 深势阱中时有较长的滞留时间。以上问题需要在今后进一步研究中加以解决。

3 2D-1D HD 结构光电探测器

图 3 是基于 2D-1D HD 结构的光电探测器原理结构图。与 0-D 材料相似,1-D 材料由于具有较高的表面体积比、量子约束效应和优越的载流子输运特性^[54-56]等优点,被认为是很有发展潜力的高性能光电器件的候选材料。在结构制备方面,1-D 材料可以很容易地与 2-D 材料集成在一起,并形成紧密接触,得到更高质量的 VDW 异质结。在器件性能方面,将 1-D 材料和 2-D 材料合成 2D-1D HD 结构,可以改善基于 2-D 材料光电探测器的光吸收低等问题。此外,与 0-D 材料相比,1-D 材料具有如纳米管^[57](nanotube, NT)、纳米线^[58](nanowire, NW)、纳米带^[59](nanobelt, NB)和纳米棒^[60](nanorod, NR)等更丰富的形态,为构建 HD 结构光电探测器提供了更充分的选择。

此类研究中,基于 2-D/1-D HD 结构的光电探测器展现出了优异的性能。2013 年,JARIWALA 等人^[50]利用单壁碳纳米管(single-walled carbon nanotube, SWCNT)和单层的 MoS₂ 形成的二极管结构的载流子高速输运特性,制备了可实现 15 μs 以下快速光响应的 MoS₂/SWCNT HD 结构的高灵敏度光电探测器(见图 3a)。2018 年,QIN 等人^[61]观察到硒(selenium, Se)纳米片(nanoplate, NPL)的(110)面与 ReS₂(010)面之间的独特关系,成功地在单层 ReS₂ 上实现了 1-D

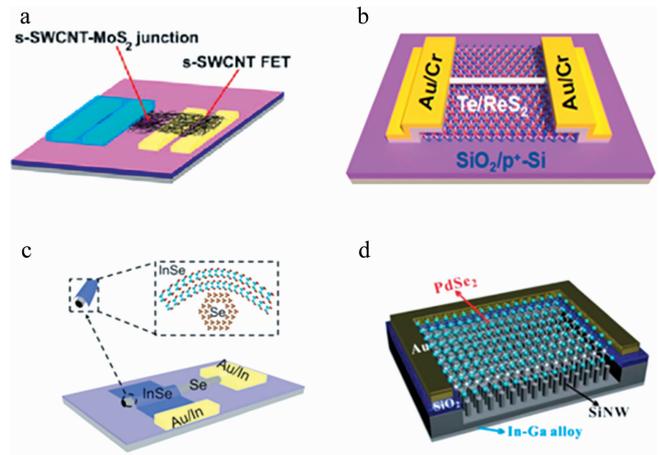


图 3 基于 2D-1D HD 结构的光电探测器原理结构图
a—MoS₂/SWCNT/光电二极管结构图^[50] b—ReS₂/Te-NW 光电晶体管结构图^[51] c—Se-NT/InSe HD 结构光电探测器的原理示意图^[52]
d—SiNWA/PdSe₂ 光电探测器结构原理图^[53]

Fig. 3 Schematic and structural diagrams of the 2D-1D HD structure photodetectors

a—structural diagram of the SWCNT/MoS₂ photodiode^[50] b—schematic diagram of the phototransistor based on ReS₂/Te-NW HD structure^[51] c—schematic diagram of the photodetector based on Se-NT/InSe HD structure^[52] d—schematic diagram of the SiNWA/PdSe₂ photodetector^[53]

原子链 Se-NPL 的外延生长,测试显示,该器件获得了 $8 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 的高探测率,比单纯 2-D 材料 ReS₂ 器件提高了近 3 个数量级。同样是与 ReS₂ 材料结合,2021 年,TAO 等人^[51]制备了具有 II 型异质能带结构的 ReS₂/Te-NW HD 光电探测器(见图 3b),获得了 180 A/W 的响应度和 5 ms 的光响应时间,整体性能优于之前报道的基于单一 ReS₂ 材料的光电探测器。此外,2-D/1-D HD 结构在紫外光区域也表现出良好的性能,比较有代表性的是:2015 年,DANG 等人^[62]通过在 graphene 上沉积 ZnO-NR 构建的一种混合型紫外光电探测器,由于 NR 表面态可容纳大量的载流子以及可能的级联倍增效应,该器件在近紫外区显示出 $3 \times 10^5 \text{ A/W}$ 的高响应度。

关于 1D-2D HD 结构的研究也获得了很大的进展。例如,HUO 等人^[63]最近展示了 CuO-NW/MoS₂ HD 结构光电探测器,该器件在反偏时,表现出 2500 A/W 的高响应度,高于同类 2-D MoS₂ 器件近 10 倍;正偏时,器件的上升时间小于 2.5 ms,衰减时间 3.2 ms,探测率高达 $6.5 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,具有良好的高频工作和弱光探测的潜力。此外,1D-2D HD 结构还可用于设计无需任何外部能量即可工作的自驱动型光电探测器。在不依赖电子束光刻等复杂生产技术的情况下,2020 年,SHANG 等人^[52]展示了一种基于 Se-NT/InSe 异质结的自驱动型光电探测器(见图 3c),

它在没有外部电源的条件下,得到了 110 mA/W 的响应度,量子效率可达 8.7%。除常见 TMD 材料外,WU 等人^[53]利用 Si NW 阵列(Si nanowire arrays, SiNWA)设计了一款 SiNWA/PdSe₂ HD 结构的自驱动型光电探测器(见图 3d),在 0.2 μm ~ 4.6 μm 宽光谱吸收范围内,其最高比探测率为 3.19 × 10¹⁴ cm · Hz^{1/2} · W⁻¹。

类似 2D-1D HD 结构还有 CdS-NW/WSe₂^[64]、Te-NW/MoTe₂^[65]、graphene/SWCNT^[66] 和 WS₂/Sb₂Se₃-NW^[67] 等。表 2 中总结了近 5 年来基于 2D-1D HD 异质结构的光电探测器的部分性能参数指标。可以看到,在室温条件下,这些器件表现出比单一 2-D 材料光探测器更优良的性能。此类器件性能改善的共性机制:一是 1-D 结构的载流子限制效应抑制了器件的常规

电流噪声,提高了灵敏度和探测率;二是两种光生载流子分离后进行双通道运输,避免了相互散射,增强了光电导。以上成果证明了 2D-1D 集成的优越性、多样性和新颖性,预示了良好的应用前景。然而,无论是 2D-1D 还是 1D-2D 类型,大多器件的光探测能力被限制在了可见光和近红外范围,需要进一步向其它谱段扩展。在纳米级的此类异质结中,由于材料晶体结构的不完美性,2D-1D 界面存在一定程度的结构无序,从而较大程度地影响到载流子输运特性。此外,界面处形成结的有效面积小、存在杂质表面态、1-D 纳米结构大规模均匀性难以精确控制等问题,都成为下一步优化 2D-1D HD 光电探测器所必须面对的课题。

表 2 常见的 2D-1D HD 结构光电探测器的部分性能参数指标

Table 2 Some performance parameters of a few studied 2D-1D HD structure photodetectors

年份	结构	响应范围/μm	响应度/(A · W ⁻¹)	探测率/(cm · Hz ^{1/2} · W ⁻¹)	响应时间(上升)/s	参考文献
2019	WS ₂ /Sb ₂ Se ₃ -NW	—	1.51 (@0.52 μm)	1.16 × 10 ¹⁰	8 × 10 ⁻³	[67]
2019	WS ₂ /CdS-NW	—	5472 (@0.45 μm)	5.3 × 10 ¹³	2 × 10 ⁻²	[68]
2020	graphene/SWCNT	0.36 ~ 0.94	204.5 (@0.365 μm)	—	0.042	[66]
2020	Se-NB/InSe	0.3 ~ 0.7	3.2 × 10 ⁻² (@0.46 μm)	1.7 × 10 ¹¹	3 × 10 ⁻²	[52]
2020	SiNWA/ PdSe ₂	0.2 ~ 4.6	0.726 (@0.98 μm)	3.19 × 10 ¹⁴	3.4 × 10 ⁻⁶	[53]
2021	Te-NW/ MoTe ₂	0.52 ~ 1.31	3 × 10 ⁴ (@0.52 μm)	4.9 × 10 ¹¹	4.8 × 10 ⁻³	[65]
2022	CH ₃ NH ₃ PbI ₃ -NW/graphene	—	558 (@0.655 μm)	2.3 × 10 ¹²	1.9 × 10 ⁻²	[69]
2023	CuO-NW/MoS ₂	0.4 ~ 0.8	2500 (@0.525 μm)	6.5 × 10 ¹¹	2.5 × 10 ⁻³	[63]

4 2D-3D HD 结构光电探测器

2-D 材料与商业化的 3-D 半导体衬底(如 Si^[70]、SiC^[71]、GaAs 等 III-V 型半导体^[72])结合构成的 2D-3D HD 结构,为制造高性能红外光电探测器提供了更多可供选择的方法。2D-3D HD 结构是将 2-D 和 3-D 材料各自的优势选择性地结合在一起,以实现光吸收增强、电荷转移加快、制造工艺简化^[73-74]等目的。图 4 是基于 2D-3D HD 结构的光电探测器原理结构图。

目前大多数的 2D-3D HD 光电探测器都是基于 2-D 材料与 3D-Si 的集成。2013 年,WANG 等人^[75]将 graphene 转移至具有硅光波导的绝缘体硅片上,制备了如图 4a 所示的 3D-Si/graphene HD 结构光电二极管,并且利用聚焦型亚波长金属光栅的多谱特性在室温下实现了对可见光到中红外的宽光谱响应。这种硅波导和 2-D 材料集成的光电探测器件,还具有高响应度以及与互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)工艺兼容等特性,是 graphene 器件实现功能优化的重要方式。为了进一步拓宽光谱响应范围和提高响应性能,研究人员也进行了其它大量的尝试。例如,2016 年,MAO 等人^[76]制备

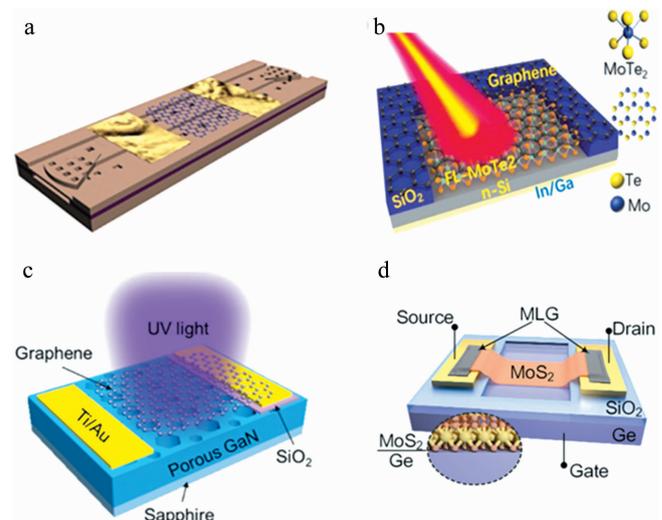


图 4 基于 2D-3D HD 结构的光电探测器原理结构图

a—3D-Si/graphene 光电探测器结构示意图^[75] b—3D-Si/MoTe₂ HD 结构光电探测器的结构示意图^[77] c—3D-GaN/graphene 光电探测器的原理图^[79] d—3D-Ge/MoS₂ HD 结构器件的原理图^[80]

Fig. 4 Schematic and structural diagrams of the 2D-3D HD structure devices a—schematic diagram of the 3D-Si/graphene photodetector^[75] b—schematic diagram of the 3D-Si/MoTe₂ HD photodetector^[77] c—schematic diagram of the 3D-GaN/graphene photodetector^[79] d—schematic diagram of the 3D-Ge/MoS₂ HD structure device^[80]

了 3D-Si/MoSe₂ HD 结构光电探测器,实现了从紫外到可见再到红外波段的光响应,同时,用 graphene 作为上下电极使光生载流子在结区快速分离和输运,从而将响应速度提高到 270 ns 的极快水平;2020 年,LU 等人^[77]首次通过脉冲激光沉积(pulsed laser deposition, PLD)方法制备了 3D-Si/MoTe₂ HD 结构光电二极管(见图 4b),较少的界面缺陷与超薄的膜厚使得此光电二极管具有了 0.3 μm ~ 1.8 μm 的宽响应谱,约 150 ns 的极快响应速度、24% 的量子效率和 6.8 × 10¹³ cm · Hz^{1/2} · W⁻¹ 的高比探测率;2021 年,WU 等人^[78]通过标准湿转移工艺成功制备了金字塔型 Si/WS₂ HD 结构,由于 HD 结构质量较高,其器件的比探测率达到 2.6 × 10¹⁴ cm · Hz^{1/2} · W⁻¹,光响应谱涵盖了可见到中红外波段的宽阔范围。

2-D 材料与 Si 以外的其它 3-D 半导体材料的集成方面也出现了一些代表性成果。例如,2020 年,LI 等人^[79]制备了 3D-GaN/graphene HD 结构的高灵敏紫外光电探测器(见图 4c),其最大比探测率达到 1 × 10¹⁷ cm · Hz^{1/2} · W⁻¹;2019 年,JIA 等人^[81]利用 3D-GaAs/MoS₂ HD 结构制备的光电探测器实现了深紫外到近红外波段的稳定宽光谱响应;2019 年,WU 等

人^[82]就研制出一种基于 3D-Ge/PdSe₂ HD 异质结构的偏振敏感光电探测器,其光响应时间短至 6.4 μs,探测偏振度高达 112.2,超过了基于所有单纯 2-D 材料的偏振敏感器件。此外,得益于 Ge 的加入,该器件的有效探测波长扩展到了深紫外到中红外波段的超宽范围。作为 2-D 材料与 3D-Ge 材料集成的最新成果,2023 年,ZHANG 等人^[80]利用 3D-Ge/MoS₂ HD 结构研制了双波段光电探测器(见图 4d),可见光响应度为 24.9 A/W,红外响应度为 0.4 A/W。

表 3 中总结了近 5 年报道的 2D-3D HD 结构光电探测器的部分性能参数指标。这些探测器性能改善的物理机制包括:2-D 材料提供无缺陷界面、载流子高效收集通道、可调控能带结构和新颖光学特性等;3-D 材料提供高速输运性能、高效光吸收和结构稳定性等,二者优势互补强化了整体探测性能。综合以上信息可以看出,2D-3D HD 结构光电探测器在光吸收范围和响应度等性能上的确表现出了强于单纯 2-D 材料探测器的优势。然而,3-D 材料的参与同时也增大了器件体积、加大了大规模集成的难度、降低了柔性器件应用的可行性,这些问题将是下一步重点研究的课题。

表 3 常见的 2D-3D HD 结构光电探测器的部分性能参数指标

Table 3 Some performance parameters of a few studied 2D-3D HD structure photodetectors

年份	结构	响应范围/μm	响应度/(A · W ⁻¹)	探测率/(cm · Hz ^{1/2} · W ⁻¹)	响应时间(上升)/s	参考文献
2018	3D-Si/PtSe ₂	0.2 ~ 1.55	0.52 (@ 0.808 μm)	3.26 × 10 ¹³	1.3 × 10 ⁻⁵	[70]
2018	3D-Si/SnS	0.37 ~ 1.06	273 (@ 0.808 μm)	7 × 10 ¹³	2.5 × 10 ⁻²	[74]
2019	3D-GaAs/MoS ₂	0.2 ~ 1.2	3.52 × 10 ⁻² (@ 0.78 μm)	1.96 × 10 ¹³	3.4 × 10 ⁻⁶	[81]
2019	3D-Ge/PdSe ₂	0.2 ~ 3.04	0.691 (@ 0.98 μm)	1.73 × 10 ¹³	6.4 × 10 ⁻⁶	[82]
2020	3D-Si/MoTe ₂	0.3 ~ 1.8	0.19 (@ 0.98 μm)	6.8 × 10 ¹³	1.5 × 10 ⁻⁷	[77]
2020	3D-GaN/graphene	0.4 ~ 0.42	—	1 × 10 ¹⁷	3.5 × 10 ⁻⁴	[79]
2021	3D-Si/WS ₂	0.2 ~ 3.0	0.29 (@ 0.98 μm)	2.6 × 10 ¹⁴	5.2 × 10 ⁻⁶	[78]
2022	3D-Si/GaSe	—	2.8 × 10 ³ (@ 0.58 μm)	6.2 × 10 ¹²	—	[83]
2023	3D-Ge/MoS ₂	—	24.9 (@ 0.532 μm), -0.4 (@ 1.55 μm)	7.9 × 10 ¹¹ , -1.3 × 10 ¹⁰	—	[80]

5 多层 HD 结构光电探测器

前面讨论了研究较为普遍的两层 HD 结构的光电探测器,而近年来人们受首例具有三明治夹层结构的 VDW 光电探测器^[84]的设计理念的影响,还提出了采用多层堆叠策略构建 HD 结构的方法。在实验研究方面,研究人员将 HD 结构与传统异质结构进行集成,成功制备了基于新型双结结构的多层 HD 光电探测器。图 5 是基于多层 HD 结构的光电探测器原理以及能带图。

2015 年,KIM 等人^[85]制备了一种 graphene/ZnS-NB/graphene 的 2-D/1-D/2D HD 结构紫外光电探测

器,得益于该结构中 graphene 和 ZnS-NB 之间有效结区的增加,器件获得了高于当时已经报道的 ZnS-NB 光电探测器 10⁶ 倍的光电流。2017 年,NIAN 等人^[86]利用激光冲击压印制备了一种 graphene/PbS-QD/graphene 的 2-D/0-D/2D HD 结构(见图 5a),经过激光冲击,graphene 与 PbS-QD 紧密接触在一起,改善了两种材料之间的传输效率,相较于已报道的同类型 graphene 探测器,该器件将光响应时间缩短了 20 倍。2022 年,LI 等人^[87]设计了被双层 Au 纳米颗粒修饰的 MoS₂ 光电探测器,如图 5b 所示的 Au-NP/MoS₂/Au-NP HD 结构,得到了最高 1757 A/W 的响应度和 3.44 × 10¹⁰ cm · Hz^{1/2} · W⁻¹ 的探测率,同时量子效率

达到了 4106%。

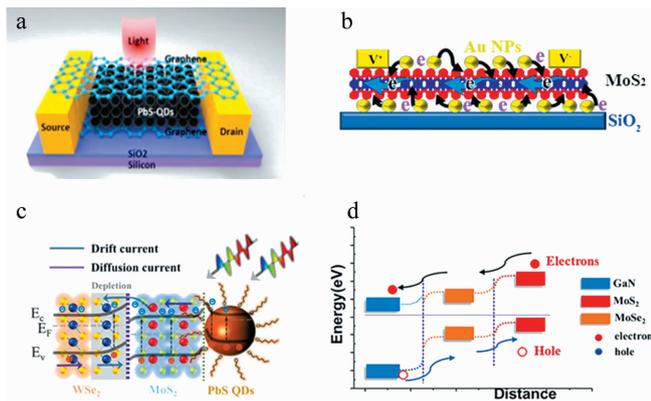


图5 基于多层 HD 结构的光电探测器原理以及能带图
a—graphene/PbS-QD/graphene 结构的原理图^[85] b—Au-NP/MoS₂/Au-NP 杂化结构示意图^[87] c—光照下, WSe₂/MoS₂/PbS-QD 异质结构的能带和载流子输运示意图^[89] d—3D-GaN/MoSe₂/MoS₂ 异质结构的能带图^[90]

Fig. 5 Schematic and energy band diagrams of the multi-HD structure photodetectors

a—schematic diagram of the graphene/PbS-QD/graphene hybrid structures^[85] b—schematic diagram of the Au-NP/MoS₂/Au-NP hybrid structures^[87] c—energy band diagram and current transport of the WSe₂/MoS₂/PbS-QD heterojunction upon illumination^[89] d—schematic diagram of the energy band diagram for 3D-GaN/MoSe₂/MoS₂ heterostructures^[90]

另一种多层 HD 结构是与普通异质结构一起构建的双结结构。2018 年, WANG 等人^[88] 为了解决少层 MoS₂ 和 WS₂ 异质结间接带隙引起的低光吸收, 在

表4 多层 HD 结构光电探测器的部分性能参数指标

Table 4 Some performance parameters of multi-HD structure photodetectors

年份	结构	响应范围/ μm	响应度/ $(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	探测率/ $(\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1})$	响应时间 (上升)/s	参考文献
2018	MoS ₂ /WS ₂ /Au-NP	0.532 ~ 1.03	5.5 (@0.532 μm)	1.4×10^{10}	—	[88]
2021	3D-Ce/graphene/C ₃ N-QD/graphene	—	2.98×10^7 (@1.55 μm)	1.04×10^{13}	5.7×10^{-5}	[26]
2022	Au-NP/MoS ₂ /Au-NP	—	1757 (@0.532 μm)	3.44×10^{10}	<0.024	[87]
2022	WSe ₂ /MoS ₂ /PbS-QD	0.40 ~ 1.06	0.8 (@0.785 μm)	5.15×10^{11}	5×10^{-5}	[89]
2023	3D-GaN/MoSe ₂ /MoS ₂	0.25 ~ 0.63	82 (@0.365 μm)	1.79×10^{14}	—	[90]

6 结束语

本文中主要针对几种 HD 结构光电探测器, 包括 2D-0D、2D-1D、2D-3D 及多层多维等, 对探测性能提升方面的研究进展进行了总结和分析。由于 QD 的宽光谱吸收和尺寸可调等特性, 2D-0D HD 结构光电探测器在光吸收谱和响应度上表现出了很好的性能; 碳纳米管材料的独特结构和物性使 2D-1D HD 结构光电探测器表现出了较高的比探测率; 传统体材料半导体的易制备和强吸收

MoS₂/WS₂ 异质结构的基础上, 将周期性 Au NPs 与异质结构相结合, 构建了 2D/2-D/0-D 的新型双结结构, 同样是利用了 SPR 效应, 相较于无 HD 结构时, 器件在 1030 nm 的光响应度提高了 25 倍。类似的增强光响应的例子还有 ZENG 等人的工作^[89], 该项研究展示了一种基于 MoS₂/WSe₂/PbS-QD 双结结构的光电探测器, 其 2D/2-D/0-D 结构的能带分布情况如图 5c 所示, 测试结果显示, 该器件在增加了光响应度的同时, 克服了 2-D/0-D HD 结构中出现的响应时间较长的问题, 在室温下获得了 43 μs /48 μs 的快速上升/衰减时间, 量子效率最大可接近 100%。

除了以上于 0-D、1-D 材料的多层集成方案, MAITY 等人^[90] 最近展示了一种 3-D/2-D/2-D 形式的多层 HD 设计, 制备了 3D-GaN/MoSe₂/MoS₂ 异质结构光电探测器 (见图 5d), 相较于单异质结, 这种保持了阶梯状能带排列的双异质结器件, 在 365 nm 的光照下光吸收提高了约 100 倍, 获得了 27.88% 的量子效率和更高的探测率 ($1.79 \times 10^{14} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)。表 4 中总结了以上提到的多层 HD 结构光电探测器的部分性能参数指标。结合以上分析可以看到, 基于多层复杂 HD 结构的光电探测器, 表现出超越传统异质结构探测器件的光电特性, 为实现性能全面增强的新型高品质光电探测器件提供了更多的可行性方案。然而, 针对此类器件的理论和实验研究还不充分, 不明确的潜在探测机制还将影响有效方案的形成, 因此如何设计更高效的多层 HD 结构, 仍然是一个挑战。

特性, 使得 2D-3D HD 结构在光吸收、光谱响应、响应度等方面都有提升; 多层多维结构为探测器调控提供了很大自由空间, 性能可以得到全面提升。以上表明实用水平 HD 探测器的研制具有很强的可行性。

与此同时, 仍然存在一些挑战: (a) 较难做到同时获得高响应度和快速度; (b) 中长波红外 HD 探测器还缺乏有效手段; (c) 规模化制备技术仍不成熟。这些困难将会很快解决, HD 探测器将在不久的将来会服务于各个领域的高端应用场景。

参 考 文 献

- [1] KAHN J M, BARRY R. Wireless infrared communications[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(2):265-298.
- [2] KÄLLHAMMER J. Imaging: The road ahead for car night-vision[J]. Nature Photonics, 2006, 5(10):12-13.
- [3] HAN J, WANG J. Photodetectors based on two-dimensional materials and organic thin-film heterojunctions[J]. Chinese Physics, 2019, B28(1):17103.
- [4] ROGALSKI A. Infrared and terahertz detectors[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2023:19-21 (in Chinese).
罗加尔斯基 A. 红外与太赫兹探测器[M]. 第3版. 北京:科学出版社, 2023:19-21.
- [5] CHENG B T, DAI Q, XIE X M, *et al.* Research progress of single-photon detectors[J]. Laser Technology, 2022, 46(5): 601-609 (in Chinese).
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.
- [6] CASALINO M, COPPOLA G, IODICE M, *et al.* Near-infrared sub-bandgap all-Silicon photodetectors: State of the art and perspectives [J]. Sensors, 2010, 10(12):10571-10600.
- [7] POP E. Energy dissipation and transport in nanoscale devices[J]. Nano Research, 2010, 3(3):147-169.
- [8] JIN X, LIU X, LEE J, *et al.* Modeling of subthreshold characteristics of short channel junctionless cylindrical surrounding-gate nanowire metal-oxide-silicon field effect transistors[J]. Physica Scripta, 2014, 89(1):15804.
- [9] 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.
- [10] LIU C, CHEN H, WANG S, *et al.* Two-dimensional materials for next-generation computing technologies[J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(7):545-557.
- [11] HUO N, KONSTANTATOS G. Recent progress and future prospects of 2D-based photodetectors [J]. Advanced Materials, 2018, 30(51):1801164.
- [12] LONG M, LIU E, WANG P, *et al.* Broadband photovoltaic detectors based on an atomically thin heterostructure[J]. Nano Letters, 2016, 16(4):2254-2259.
- [13] DAS S, ROBINSON J A, DUBEY M, *et al.* Beyond graphene: Progress in novel two-dimensional materials and van der Waals solids [J]. Annual Review of Materials Research, 2015, 45(1):1-27.
- [14] AN J, WANG B, SHU C, *et al.* Research development of 2D materials based photodetectors towards mid-infrared regime[J]. Nano Select, 2021, 2(3):527-540.
- [15] ZHANG X, LI J, MA Z, *et al.* Design and integration of a layered MoS₂/GaN van der Waals heterostructure for wide spectral detection and enhanced photoresponse[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(42):47721-47728.
- [16] NOVOSELOV K S, MISHCHENKO A, CARVALHO A, *et al.* 2D materials and van der Waals heterostructures[J]. Science, 2016, 353(6298):461-472.
- [17] LIU Y, WEISS N O, DUAN X, *et al.* Van der Waals heterostructures and devices [J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1(9):16042.
- [18] WANG P, JIA C, HUANG Y, *et al.* Van der Waals heterostructures by design: From 1D and 2D to 3D[J]. Matter, 2021, 4(2):552-581.
- [19] JARIWALA D, MARKS T J, HERSAM M C. Mixed-dimensional van der Waals heterostructures [J]. Nature Materials, 2017, 16(2):170-181.
- [20] NUTTING D, FELIX J F, TILLOTSON E, *et al.* Heterostructures formed through abraded van der Waals materials[J]. Nature Communication, 2020, 11(1):1-10.
- [21] WANG J, FANG H, WANG X, *et al.* Recent progress on localized field enhanced two-dimensional material photodetectors from ultraviolet-visible to infrared [J]. Nano Micro Small, 2017, 13(35):1700894.
- [22] KAGAN C R, LIFSHITZ E, SARGENT E H, *et al.* Building devices from colloidal quantum dots[J]. Science, 2016, 353(6302):885-894.
- [23] CHEN H, LIU H, ZHANG Z, *et al.* Nanostructured photodetectors: From ultraviolet to Terahertz [J]. Advanced Materials, 2016, 28(3):403-433.
- [24] DHYANI V, DAS S. High-speed scalable silicon-MoS₂ P-N heterojunction photodetectors[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):1-9.
- [25] FENG X, HE Z, LIU Z, *et al.* Intact vertical 3D-0D-2D carbon-based P-N junctions for use in high-performance photodetectors[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(16):2100387.
- [26] ZHANG S, GUAN L, NIU X, *et al.* Design and build MoS₂/Au/MoS₂ sandwich structure to significantly enhance the photoluminescence[J]. AIP Advances, 2019, 9(9):095305.
- [27] LI I, PI L J, LI H Q, *et al.* Photodetectors based on two-dimensional semiconductors; Progress, opportunity and challenge[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(27):3134-3153 (in Chinese).
李亮, 皮乐晶, 李会巧, 等. 二维半导体光电探测器:发展、机遇和挑战[J]. 科学通报, 2017, 62(27):3134-3153.
- [28] KHAN I, SAEED K, KHAN I. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2019, 12(7):908-931.
- [29] YU W J, LI Z, ZHOU H, *et al.* Vertically stacked multi-heterostructures of layered materials for logic transistors and complementary inverters[J]. Nature Materials, 2013, 12(3):246-252.
- [30] ALIVISATOS A P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots[J]. Science, 1996, 271(5251):933-937.
- [31] BERA D, QIAN L, TSENG T, *et al.* Quantum dots and their multimodal applications: A review [J]. Materials, 2010, 3(4):2260-2345.
- [32] ZHOU W, SHANG Y, GARCÍA de ARQUER F P, *et al.* Solution-processed upconversion photodetectors based on quantum dots[J]. Nature Electronics, 2020, 3(5):251-258.
- [33] KONSTANTATOS G, BADIOLI M, GAUDREAU L, *et al.* Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain[J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(6):363-368.
- [34] KUFER D, NIKITSKIY I, LASANTA T, *et al.* Hybrid 2D-0D MoS₂-PbS quantum dot photodetectors [J]. Advanced Materials, 2015, 27(1):176-180.
- [35] KUNDU B, ÖZDEMİR O, DALMASES M, *et al.* Hybrid 2D-QD MoS₂-PbSe quantum dot broadband photodetectors with high-sensitivity and room-temperature operation at 2.5 μm[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(22):2101378.
- [36] KOLLI C S R, SELAMNENI V, MUNIZ MARTINEZ B A, *et al.* Broadband, ultra-high-responsive monolayer MoS₂/SnS₂ quantum-dot-based mixed-dimensional photodetector[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(13):15415-15425.
- [37] YU Y, ZHANG Y, ZHANG H, *et al.* PbS-decorated WS₂ phototransistors with fast response[J]. ACS Photonics, 2017, 4(4):950-956.
- [38] HU C, DONG D, YANG X, *et al.* Synergistic effect of hybrid PbS

- quantum dots/2D-WSe₂ toward high performance and broadband phototransistors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(2):1603605.
- [39] ÖZDEMİR O, RAMIRO I, GUPTA S, *et al.* High sensitivity hybrid PbS CQD-TMDC photodetectors up to 2 μm[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(10):2381-2386.
- [40] LIU Q, TIAN H, LI J, *et al.* Hybrid Graphene/Cu₂O quantum dot photodetectors with ultrahigh responsivity [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(20):1900455.
- [41] HU A, TIAN H, LIU Q, *et al.* Graphene on self-assembled InGaN quantum dots enabling ultrahighly sensitive photodetectors[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(8):1801792.
- [42] KAN H, ZHENG W, LIN R, *et al.* Ultrafast photovoltaic-type deep ultraviolet photodetectors using hybrid zero-/two-dimensional heterojunctions[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(8):8412-8418.
- [43] DUAN R, QI W, LI P, *et al.* A high-performance MoS₂-based visible-near-infrared photodetector from gateless photogating effect induced by nickel nanoparticles[J]. *Research*, 2023, 6:0195.
- [44] MUKHERJEE S, CHOWDHURY R K, KARMAKAR D, *et al.* Plasmon triggered, enhanced light-matter interactions in Au-MoS₂ coupled system with superior photosensitivity[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 2021, C125(20):11023-11034.
- [45] SELAMNENI V, MUKHERJEE A, RAGHAVAN H, *et al.* Plasmonic Au nanoparticles coated on ReS₂ nanosheets for visible-near-infrared photodetectors[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(8):11381-11390.
- [46] ZHENG L, ZHOU W, NING Z, *et al.* Ambipolar graphene-quantum dot phototransistors with CMOS compatibility[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(23):1800985.
- [47] PAK S, CHO Y, HONG J, *et al.* Consecutive junction-induced efficient charge separation mechanisms for high-performance MoS₂/quantum dot phototransistors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(44):38264-38271.
- [48] KWAK D, RAMASAMY P, LEE Y, *et al.* High-performance hybrid InP QDs/black phosphorus photodetector[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(32):29041-29046.
- [49] ZHANG S, WANG X, CHEN Y, *et al.* Ultrasensitive hybrid MoS₂-ZnCdSe quantum dot photodetectors with high gain [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(26):23667-23672.
- [50] JARIWALA D, SANGWAN V K, WU C, *et al.* Gate-tunable carbon nanotube-MoS₂ heterojunction P-N diode[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(45):18076-18080.
- [51] TAO J, JIANG J, ZHAO S, *et al.* Fabrication of 1D Te/2D ReS₂ mixed-dimensional van der Waals P-N heterojunction for high-performance phototransistor [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(2):3241-3250.
- [52] SHANG H, CHEN H, DAI M, *et al.* A mixed-dimensional 1D Se-2D InSe van der Waals heterojunction for high responsivity self-powered photodetectors [J]. *Nanoscale Horizons*, 2020, 5(3):564-572.
- [53] WU D, JIA C, SHI F, *et al.* Mixed-dimensional PdSe₂/SiNW heterostructure based photovoltaic detectors for self-driven, broadband photodetection, infrared imaging and humidity sensing [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2020, A8(7):3632-3642.
- [54] LEE T I, LEE S, LEE E, *et al.* High-power density piezoelectric energy harvesting using radially strained ultrathin trigonal tellurium nanowire assembly[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(21):2920-2925.
- [55] DU Y, QIU G, WANG Y, *et al.* One-dimensional van der Waals material tellurium; Raman spectroscopy under strain and magnetotransport[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(6):3965-3973.
- [56] QIN J, QIU G, JIAN J, *et al.* Controlled growth of a large-size 2D selenium nanosheet and its electronic and optoelectronic applications [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(10):10222-10229.
- [57] AN Q, MENG X, XIONG K, *et al.* Self-powered ZnS nanotubes/Ag nanowires MSM UV photodetector with high on/off ratio and fast response speed[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):1-12.
- [58] LI Y, SHI Z, WANG L, *et al.* Solution-processed one-dimensional CsCu₂I₃ nanowires for polarization-sensitive and flexible ultraviolet photodetectors[J]. *Materials Horizons*, 2020, 7(6):1613-1622.
- [59] NAWAZ M Z, XU L, ZHOU X, *et al.* CdS nanobelt-based self-powered flexible photodetectors with high photosensitivity[J]. *Materials Advances*, 2021, 2(18):6031-6038.
- [60] PATIL R A, CHANG C, DEVAN R S, *et al.* Impact of nanosize on supercapacitance: Study of 1D Nanorods and 2D thin-films of Nickel oxide[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(15):9872-9880.
- [61] QIN J K, QIU G, HE W, *et al.* Epitaxial growth of 1D atomic chain based Se nanoplates on monolayer ReS₂ for high-performance photodetectors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(48):1806254.
- [62] DANG V Q, TRUNG T Q, KIM D, *et al.* Ultrahigh responsivity in graphene-ZnO nanorod hybrid UV photodetector [J]. *Nano Micro Small*, 2015, 11(25):3054-3065.
- [63] HUO J, ZOU G, XIAO Y, *et al.* High performance 1D-2D CuO/MoS₂ photodetectors enhanced by femtosecond laser-induced contact engineering[J]. *Materials Horizons*, 2023, 10(2):524-535.
- [64] LIN P, ZHU L, LI D, *et al.* Tunable WSe₂-CdS mixed-dimensional van der Waals heterojunction with a piezo-phototronic effect for an enhanced flexible photodetector [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(30):14472-14479.
- [65] ZHAO D, CHEN Y, JIANG W, *et al.* Gate-tunable photodiodes based on mixed-dimensional Te/MoTe₂ van der Waals heterojunctions[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2021, 7(5):2001066.
- [66] ZHANG Y, DENG T, LI S, *et al.* Highly sensitive ultraviolet photodetectors based on single wall carbon nanotube-graphene hybrid films [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 512(15):145651.
- [67] SUN G, LI B, LI J, *et al.* Direct van der Waals epitaxial growth of 1D/2D Sb₂Se₃/WS₂ mixed-dimensional P-N heterojunctions [J]. *Nano Research*, 2019, 12(5):1139-1145.
- [68] GONG Y, ZHANG X, YANG T, *et al.* Vapor growth of CdS nanowires/WS₂ nanosheet heterostructures with sensitive photodetections[J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(34):345603.
- [69] WANG G, HAN B, MAK C H, *et al.* Mixed-dimensional van der Waals heterostructure for high-performance and air-stable perovskite nanowire photodetectors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(49):55183-55191.
- [70] XIE C, ZENG L, ZHANG Z, *et al.* High-performance broadband heterojunction photodetectors based on multilayered PtSe₂ directly grown on a Si substrate [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(32):15285-15293.
- [71] LEE E W I, MA L, NATH D N, *et al.* Growth and electrical characterization of two-dimensional layered MoS₂/SiC heterojunctions [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(20):203504.
- [72] KANISAWA K, YAMAGUCHI H, HIRAYAMA Y. Two-dimensional growth of InSb thin films on GaAs(111) substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(5):589-591.

- [73] LEE C H, McCULLOCH W, LEE E W I, *et al.* Transferred large area single crystal MoS₂ field effect transistors[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(19):043103.
- [74] YAO J, ZHENG Z, YANG G. Ultrasensitive 2D/3D heterojunction multicolor photodetectors: A synergy of laterally and vertically aligned 2D layered materials[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(44):38166-38172.
- [75] WANG X, CHENG Z, XU K, *et al.* High-responsivity graphene/silicon heterostructure waveguide photodetectors[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11):888-891.
- [76] MAO J, YU Y, WANG L, *et al.* Ultrafast, broadband photodetector based on MoSe₂/silicon heterojunction with vertically standing layered structure using graphene as transparent electrode[J]. Advanced Science, 2016, 3(11):1600018.
- [77] LU Z, XU Y, YU Y, *et al.* Ultrahigh speed and broadband few-layer MoTe₂/Si 2D-3D heterojunction-based photodiodes fabricated by pulsed laser deposition[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(9):1907951.
- [78] WU D, GUO C, WANG Z, *et al.* A defect-induced broadband photodetector based on WS₂/pyramid Si 2D/3D mixed-dimensional heterojunction with a light confinement effect[J]. Nanoscale, 2021, 13(31):13550-13557.
- [79] LI J, XI X, LIN S, *et al.* Ultrahigh sensitivity graphene/nanoporous GaN ultraviolet photodetectors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(10):11965-11971.
- [80] ZHANG Y, WANG B, HAN Z, *et al.* Bidirectional photoresponse in a mixed-dimensional MoS₂/Ge heterostructure and its optic-neural synaptic behavior for colored pattern recognition[J]. ACS Photonics, 2023, 10(5):1575-1582.
- [81] JIA C, WU D, WU E, *et al.* A self-powered high-performance photodetector based on a MoS₂/GaAs heterojunction with high polarization sensitivity[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(13):3817-3821.
- [82] WU D, GUO J, DU J, *et al.* Highly polarization-sensitive, broadband, self-powered photodetector based on graphene/PdSe₂/germanium heterojunction[J]. ACS Nano, 2019, 13(9):9907-9917.
- [83] SORIFI S, KAUSHIK S, SINGH R. A GaSe/Si-based vertical 2D/3D heterojunction for high-performance self-driven photodetectors[J]. Nanoscale Advances, 2022, 4(2):479-490.
- [84] BRITNELL L, RIBEIRO R M, ECKMANN A, *et al.* Strong light-matter interactions in heterostructures of atomically thin films[J]. Science, 2013, 340(6138):1311-1314.
- [85] KIM Y, KIM S J, CHO S, *et al.* High-performance ultraviolet photodetectors based on solution-grown ZnS nanobelts sandwiched between graphene layers[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1):12345.
- [86] NIAN Q, GAO L, HU Y, *et al.* Graphene/PbS-quantum dots/graphene sandwich structures enabled by laser shock imprinting for high performance photodetectors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(51):44715-44723.
- [87] LI G, SONG Y, FENG S, *et al.* Improved optoelectronic performance of MoS₂ photodetector via localized surface plasmon resonance coupling of double-layered Au nanoparticles with sandwich structure[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2022, 4(4):1626-1632.
- [88] WANG G, LI L, FAN W, *et al.* Interlayer coupling induced infrared response in WS₂/MoS₂ heterostructures enhanced by surface plasmon resonance[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(22):1800339.
- [89] ZENG P, WANG W, HAN D, *et al.* MoS₂/WSe₂ 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.
- [90] MAITY S, SARKAR K, KUMAR P. Layered heterostructures based on MoS₂/MoSe₂ nanosheets deposited on GaN substrates for photodetector applications[J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(6):4224-4235.