

专题: 半导体物理与器件

二维材料光电探测器的双极性响应与应用*

韩嘉悦¹⁾²⁾ 王军^{1)2)†}

1) (电子科技大学光电科学与工程学院, 成都 611731)

2) (电子科技大学, 电子薄膜与集成器件全国重点实验室, 成都 611731)

(2025 年 11 月 23 日收到; 2025 年 12 月 29 日收到修改稿)

双极性响应近年来作为光电探测器的新型工作机制, 通过在不同外部条件下输出可切换的正负光电流, 实现光信号的多维映射与信息复用, 应用于视觉仿生、在片计算等领域. 二维材料近年来由于具有独特的光电特性, 在双极性光响应领域发展迅猛. 基于二维材料及其异质结的探测器结构, 可以通过电场、波长、偏振及入射功率等手段构建实现多类型的双极性器件, 应用于类脑视觉、卷积前处理、事件相机及多维光谱解析等. 本综述围绕双极性光响应在光电探测器中的发展与应用, 系统总结了其物理机制、材料体系、器件结构及典型应用进展. 双极性光响应不仅提升了器件性能, 也赋予光电探测器计算与学习功能, 为多维光信息融合、低功耗视觉计算及智能光电系统的发展提供了新路径.

关键词: 双极性响应, 视觉应用, 多维度探测, 二维材料**DOI:** 10.7498/aps.75.20251589**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251589

1 引言

随着人工智能、物联网及光电技术的迅猛发展, 智能化感知系统正逐步成为新一代信息社会的重要基础^[1-3]. 其中, 光电探测器作为感知外界图像信息的必要单元, 承担着光信号到电信号转换的关键任务^[2,4,5]. 例如, 传统的 HgCdTe 探测器自 20 世纪以来一直是红外成像领域的基石, 通过能带工程实现了从短波到长波乃至多光谱的高性能探测^[6,7]. 随着外延生长与器件工艺的成熟, 其在响应率、噪声抑制和阵列规模方面不断提升, 形成了军民两用的成熟产业体系^[8,9]. 但是, 传统探测器多以单极性响应为主, 只能输出单一方向的光电流信号, 限制了其对光场中多维信息(如波长、偏振、相位及强度)的深度解析能力^[10-12]. 为突破这一瓶颈, 研究者提出了双极性响应(bipolar response 或者 bidirectional response)的概念, 使光电探测器

能够在不同外部条件下产生可切换的正向光电流、负向光电流(positive photocurrent/negative photocurrent, PPC/NPC), 实现光信号的多维映射与信息复用. 这一机制的出现, 使光电探测器从简单的光强响应单元演化为具备“感知-处理-学习”功能的智能光电子器件^[13,14].

双极性响应的提出不仅是器件性能的提升, 更是信息处理范式的变革. 相较于单极响应, 双极性响应器件可提供一个非线性、可重构的信号空间, 使得光学输入与电学输出之间形成可调谐的映射关系. 这种映射能够直接反映入射光的波长、偏振状态、入射功率等复杂信息, 为实现多维探测与类脑计算提供了物理基础. 尤其在典型双极性二维材料(如石墨烯^[15,16]、BP^[17,18]、MoTe₂^[19-21]、WSe₂^[22,23]等)的推动下^[24,25], 研究者通过电场调控、波长调控、偏振调控及入射功率调控等手段, 构建出多类型的双极性响应器件, 展现出从简单正负切换到复杂兴奋-抑制响应的演进过程^[26]. 这一过程对应于

* 国家重点研发计划(批准号: 2023YFB3611400)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wjun@uestc.edu.cn

生物视觉系统中双极细胞的兴奋-抑制调节机制, 为人工视觉与类脑神经感知芯片的实现提供了新的思路.

近年来, 双极性响应光电探测器在神经形态视

觉、全光逻辑、时空视觉感知及多维光谱解析等领域展现出巨大潜力 (如图 1 所示)^[26]. 通过引入不同的物理调控机制, 可实现多种典型双极性响应: 电控型、波长型、偏振型及输入功率型^[26]. 其中, 电控

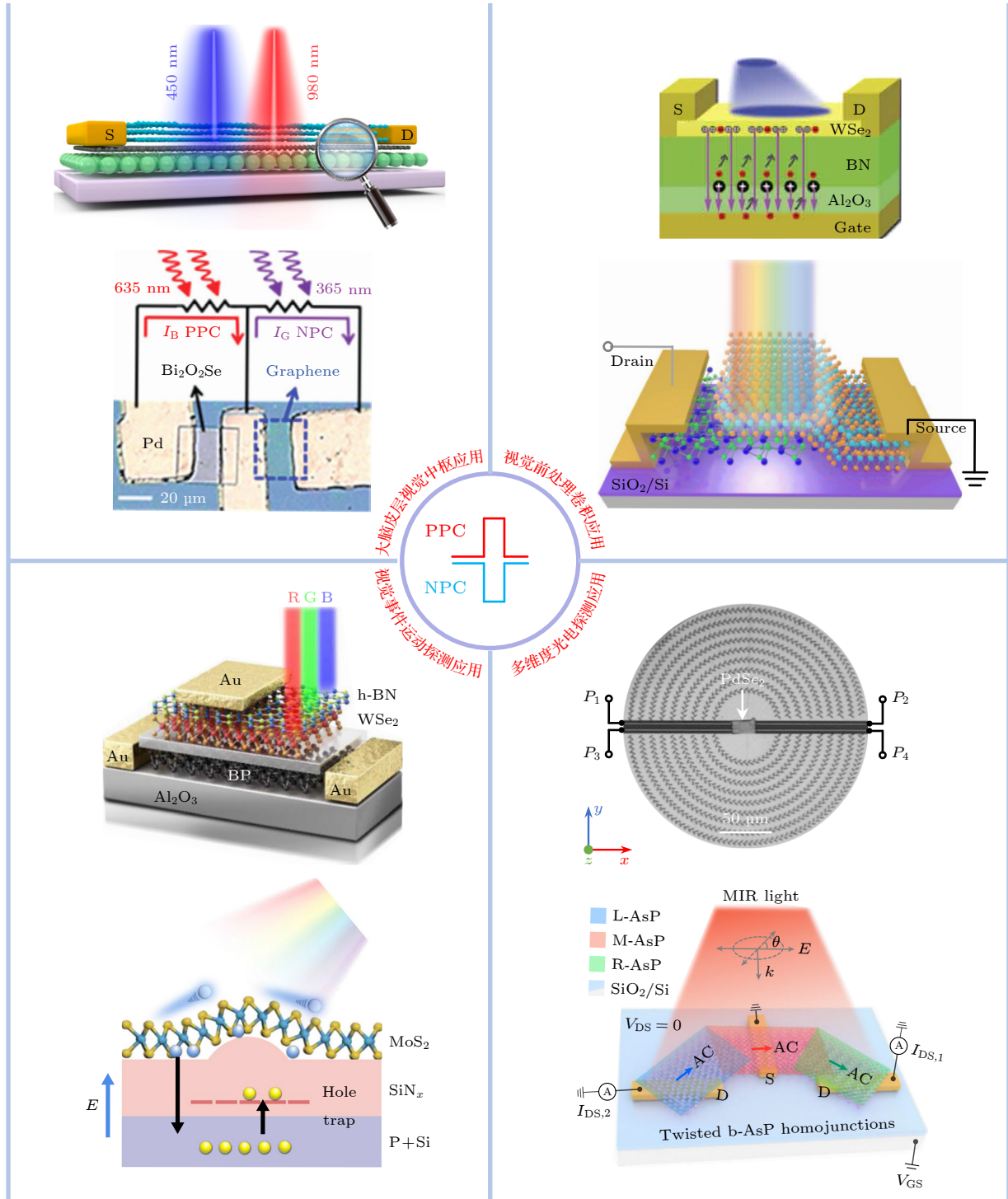


图 1 双极性响应发展应用概览, 大脑皮层视觉中枢应用^[27,28]、视觉前处理卷积应用^[29,30]、视觉事件运动探测应用^[31,32]、多维度光电探测应用^[33,34]. 引用图片已获相关授权

Fig. 1. Overview of the development and applications of bipolar photoresponse, including applications in the visual cortex of the brain^[27,28], visual preprocessing convolution^[29,30], visual event motion detection^[31,32], and multidimensional optoelectronic detection^[33,34]. Reproduced with permissions.

双极性响应基于场效应调制实现可编程的电学翻转, 波长双极性响应利用不同光谱范围内载流子传输通道的反转实现光谱判别, 偏振双极性响应依托体光伏效应或各向异性结构实现光场偏振信息的直接读出, 功率驱动双极性响应通过俘获与去俘获过程模拟生物视觉中的光适应行为. 多维度的可控双极性机制, 使得探测器不仅能实现高灵敏度与宽动态范围的光电转换, 还能在片上完成预处理和分类等计算任务, 为突破冯·诺依曼架构的瓶颈奠定了基础.

总体而言, 双极性响应光电探测器已成为智能光电信息系统的重要支撑. 通过物理机制创新与结构工程优化, 研究者实现了从单元响应到阵列化计算, 从材料调控到系统集成的跨越. 未来, 随着二维材料、钙钛矿及有机/无机杂化体系的协同发展, 基于双极性响应的光电探测器有望在多维信息融合、低功耗视觉计算及人工智能感知芯片等方向实现革命性突破.

2 双极性响应概述

2.1 双极性响应基本特征

双极性光响应的基本特征首先体现在其可在不同条件下实现光电流极性的可逆切换 (如图 2(a) 所示). 与传统单极性光电导响应不同, 双极性光响应允许器件在同一结构中输出正向与反向光电流, 从而为信息维度的扩展与信号编码方式的丰富提供了新的途径. 根据驱动机制的不同, 双极性光响应主要包括两类最常见代表性模式, 其一是波长驱动的双极性响应 (图 2(c)), 即器件在不同入射光谱区间内表现出由光生载流子能带跃迁路径变化所导致的光电流符号反转; 其二是栅极电压驱动的双极性响应 (图 2(b)), 通过外加栅压调制能带弯曲, 或者双极性材料极性翻转的方式实现. 两类机制共

同构成了双极性光响应的核心基本特征, 使其在可重构光电计算以及神经形态视觉等方向被广泛应用.

2.2 双极性响应器件探测材料选择

双极性响应需要依赖一定特性的二维材料, 最常见的是双极性的半金属、半导体材料, 其具有栅极可调的双极电输运特性 (例如石墨烯、 MoTe_2 、 WSe_2 等双极性材料) (如图 3 所示), 它们常常用于器件沟道, 实现栅极可调的正负响应; 二维材料还具有超高的比表面积使得通过表面束缚态可以实现去氧化以及氧化效果的紫外-可见光正负响应; MoS_2 等宽带隙半导体材料容易实现波长的正负响应, 通过束缚态以及光电导与热响应叠加实现^[35,36]; 此外, BP 等各向异性偏振材料可以实现偏振正负响应, 在多个维度进行探测.

2.3 双极性响应常见异质结能带

除了材料本身的性质带来的双极性响应之外, 还可以通过能带设计实现更多类型. 较为常用的策略包括双极性材料沟道+吸光材料、内建电场反向、光伏效应 (photovoltaic effect, PV)+光热电效应 (photothermoelectric effect, PTE)、背靠背异质结 4 种典型能带结构 (如图 4 所示). 第 1 类双极性材料与吸光材料异质结能带, 双极性材料通常充当沟道, 而吸光材料主要扮演响应角色, 通过栅极电压控制沟道材料进行正负响应调控. 第 2 类内建电场反向通常通过对异质结半导体费米能级的调整, 实现异质结内建电场的整体反向, 从而实现响应反向. 第 3 类可以控制光伏与 PTE 场相反, 通常实现随波长变化的双极性响应. 第 4 类主要是通过背靠背异质结实现两个相反的光伏响应, 类似于双色探测器结构^[37], 实现随波长变化的正负响应.

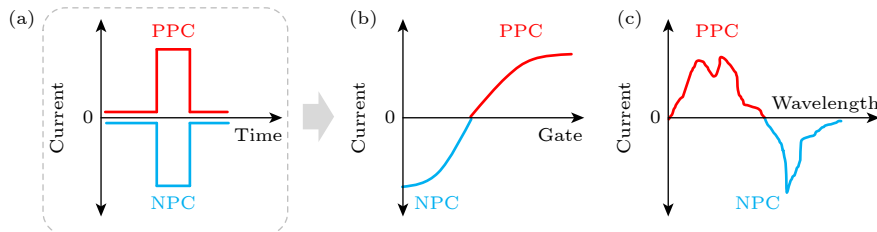


图 2 双极性响应基本特征

Fig. 2. Basic characteristics of bipolar response.

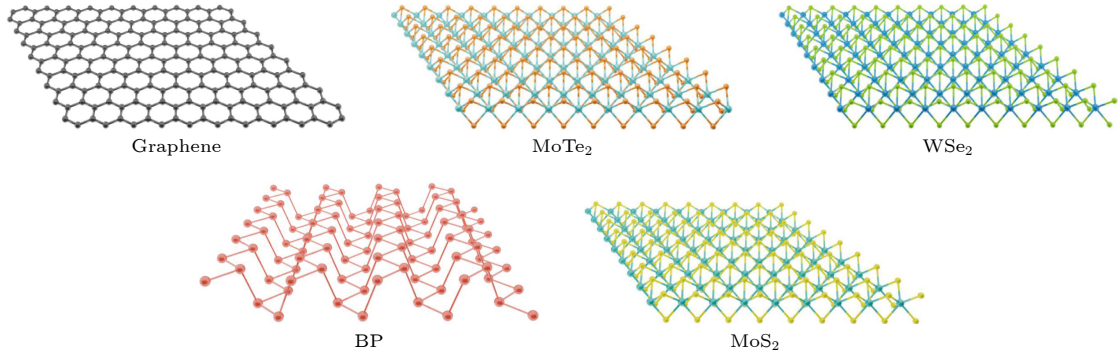


图 3 双极性响应常见材料

Fig. 3. Common materials exhibiting bipolar photoresponse.

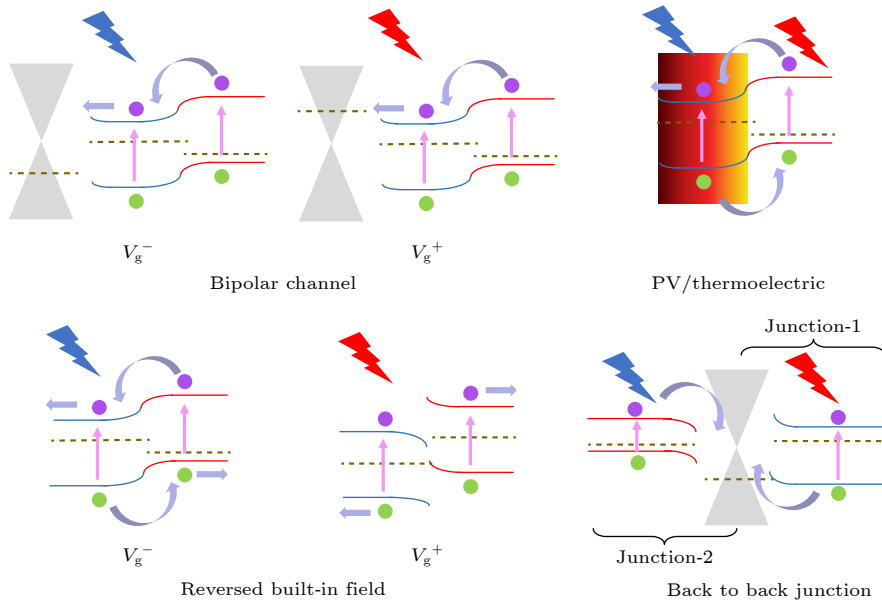


图 4 双极性响应常见异质结能带

Fig. 4. Common heterojunction energy band diagrams for bipolar responses.

2.4 双极性响应时域控制

一般来说常见的双极性响应在时域上不具有太多变化特征, 通常如图 5 所示, 这种类型的双极性响应通常只能应用于静态的卷积可重构图像处理, 模拟视觉中双极性细胞的功能. 而对于动态运动探测等场景需要产生大量的数据冗余导致设备能耗较大, 研究人员也针对性地提出了 3 种双极性响应的时域控制扩展 (如图 5 所示). 第 1 类双极性响应呈现出正负积累效果, 常用于运动探测 (可判断运动方向) 以及全光逻辑器件, 通过束缚态控制实现. 第 2 类双极性响应呈现出正负非易失性效果, 在运动探测中可以进行片上差分运算, 极大程度减少数据冗余, 通过浮栅极记忆等手段实现; 利用浮栅极能带以及空位能带控制实现非易失性可

重构效果 [31,38]. 第 3 类则是只留下开关光时的瞬态正负光电尖峰, 而静止的部分被完全去掉, 一般通过探测器差分方法实现.

2.5 双极性响应引入新多维度变量场

上述较多的双极性响应均建立在强度维度的光刺激下, 随着对新型维度场的探测分辨的要求, 研究人员还建立了更为复杂的映射关系: 正负响应电流分布与多维场的相互联系 (如图 6 所示). 包括施加弯曲应力引起照明面积的减小从而实现的双极性光响应 [39]、拓扑态与多维度光场的复杂双极性非线性映射关系 [40,41]、通过双极性光响应检测声波场等方式 [42]. 第 1 类针对单通道新型维度探测, 通过正负响应给到的明确转换边界可以进行高精

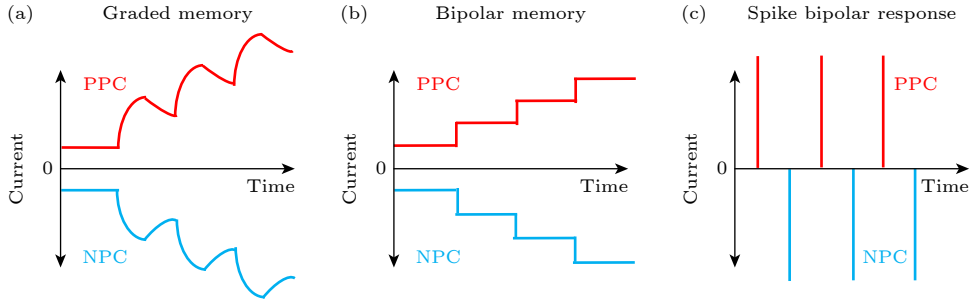


图 5 双极性响应常见异质结能带 (a) 类突触分级双极性记忆; (b) 非易失性双极性记忆; (c) 尖峰性双极性响应
 Fig. 5. Common heterojunction energy band diagrams for bipolar responses: (a) Synapse-like graded bipolar memory; (b) non-volatile bipolar memory; (c) spiking bipolar response.

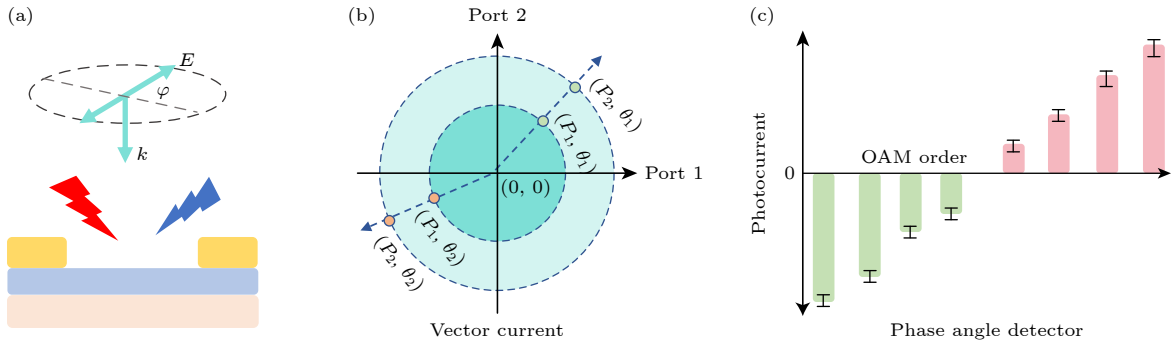


图 6 双极性响应在多维探测中的应用前景 (a) 多维光场作用在器件示意图; (b) 混合维度场探测; (c) 涡旋光探测
 Fig. 6. Prospective applications of bipolar photoresponse in multidimensional detection: (a) Schematic illustration of a device under multidimensional optical field excitation; (b) hybrid-dimensional field detection; (c) vortex light detection.

度解析, 第 2 类对混合多维度输入信息还原, 通过器件自身电场调控实现的对应关系, 通过神经网络对原有混合维度信息进行还原.

2.6 双极性响应的性能品质因素

目前, 由于双极性响应类型众多, 没有统一的性能参数, 此处总结了一些可以表征双极性响应性能的品质因素. 对于波长驱动的双极性响应, 双极性波长正负转换点 λ_α , 通常该位置的净光电流 $I_{\text{ph}-\lambda_\alpha} = 0$, 该转换点的大小决定了其全光应用的波段范围. 对于电压驱动的双极性响应, 通常由其正负响应的响应度 R_+ 与 R_- 决定, $R_+ = I_{\text{ph}+}/P$ 以及 $R_- = I_{\text{ph}-}/P$, 此外正负响应分别的线性动态范围 LDR_+ 以及 LDR_- 也应该被关注. 偏振驱动的双极性响应, 通常需要考虑 $\text{PR} = I_{0^\circ}/I_{90^\circ}$ 为负数的情况, 当其中某一个偏振电流为负时, PR 为负数. 最后是功率驱动的正负响应, 通常针对不同功率响应增加或者抑制的情况, 由 $F = I_{\text{ph}-}/I_{\text{ph}}$ 或 $F = I_{\text{ph}+}/I_{\text{ph}}$ 计算.

3 构筑双极性响应器件及深度应用

随着双极性响应机制在光电器件中的不断深化, 其研究重心正逐步从单体材料和基础物理机制转向系统级应用与智能信息处理. 双极性响应不仅提供了正负光电流的翻转特征, 更重要的是在多维光场解析、类脑视觉处理和自适应感知中展现出独特优势. 通过在材料、结构与信号处理层面引入可调极性这一核心概念, 研究者得以在单器件内实现对光谱、功率、偏振、时间与空间等多参量的联动探测与映射. 这种能力使得光电探测器由单纯的接收元演化为具有计算与学习功能的前端视觉处理单元.

3.1 面向大脑皮层视觉中枢应用器件

人类视觉系统以大脑皮层为核心, 具有层级化、并行化和自学习的特征, 其感知过程涉及视网膜感光细胞、双极细胞及皮层神经网络的协同工作. 外界光信号经视网膜感受后, 通过双极细胞的兴奋-抑制调节传递至视觉皮层, 在这一过程中完成了

图像分层感知、边缘检测及目标识别等功能. 这一生物视觉体系的特征在于信息的稀疏编码与突触可塑性处理, 从而实现了高效率、低能耗的视觉认知. 受此启发, 研究者开始在光电器件中引入双极性响应机制, 以模拟皮层视觉中枢的兴奋-抑制神经行为, 从而实现具有类脑特征的智能视觉器件.

2020年, Yang等^[27]基于石墨烯/ $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 的器件实现了从紫外到可见光范围的波长依赖正负响应(如图7(a), (b)所示). 该响应通过氧吸附-光栅极效应驱动, 分别对应兴奋性和抑制性突触后电流, 为二维材料构建类脑计算奠定了基础. 此外, 全光2D材料突触通过BP自钝化层表面吸附实现载流子束缚态机制^[43], 在365 nm光照下表现为负响应, 在280 nm光照下表现为正响应, 训练循环超过1000次后识别精度可超过90%^[43]. 随后, Hou等^[28]构建了Pyr-GDY/Gr/PbS-QDs双异质结(如图7(c)所示), 通过两层光敏材料响应谱差异实现可见光-近红外波段的双极性响应, 同时借助光栅极效应产生类突触响应(如图7(d)所示), 用于手写数字识别的准确率达90.8%^[28]. Lian等^[44]则通过硒化工程实现了类突触双极响应, 利用可见光产生抑制效应、近中红外光产生促进效应, 模拟全光

突触功能, 并在脉冲后增强达到182%. 2025年Yang等^[45]还提出了一种基于IGZO/SnO/SnS异质结的全光控突触器件, 集成了感知、存储与处理功能. 器件无需外加电压进行极性切换, 仅通过不同波长刺激即可观察到兴奋与抑制行为. Yang等^[45]进一步制备了 8×8 光电突触阵列, 并在人工神经网络模拟中实现对手写数字识别91%的准确率. 该工作通过栅极场效应晶体管结构解析了双极光响应机制, 为高性能光控神经形态视觉系统提供了一条有效路径.

3.2 面向视觉前处理卷积应用器件

在自然视觉系统中, 边缘信息代表了场景中最显著的空间特征, 生物视觉皮层中的感受野正是通过边缘响应实现目标快速识别的. 卷积神经网络中的卷积核运算正是对这一生物视觉机制的模拟, 因此在硬件层面引入可重构卷积结构可显著提升系统的视觉效率. 受人眼双极细胞机制启发, 研究者通过调控二维材料(如石墨烯、 MoTe_2 、 WSe_2 等)与双极性材料的层数及能带结构, 使每个像素单元的灵敏度可电控调节, 从而模拟视网膜神经细胞的光感受器特性, 实现不同类型的卷积功能, 如边缘

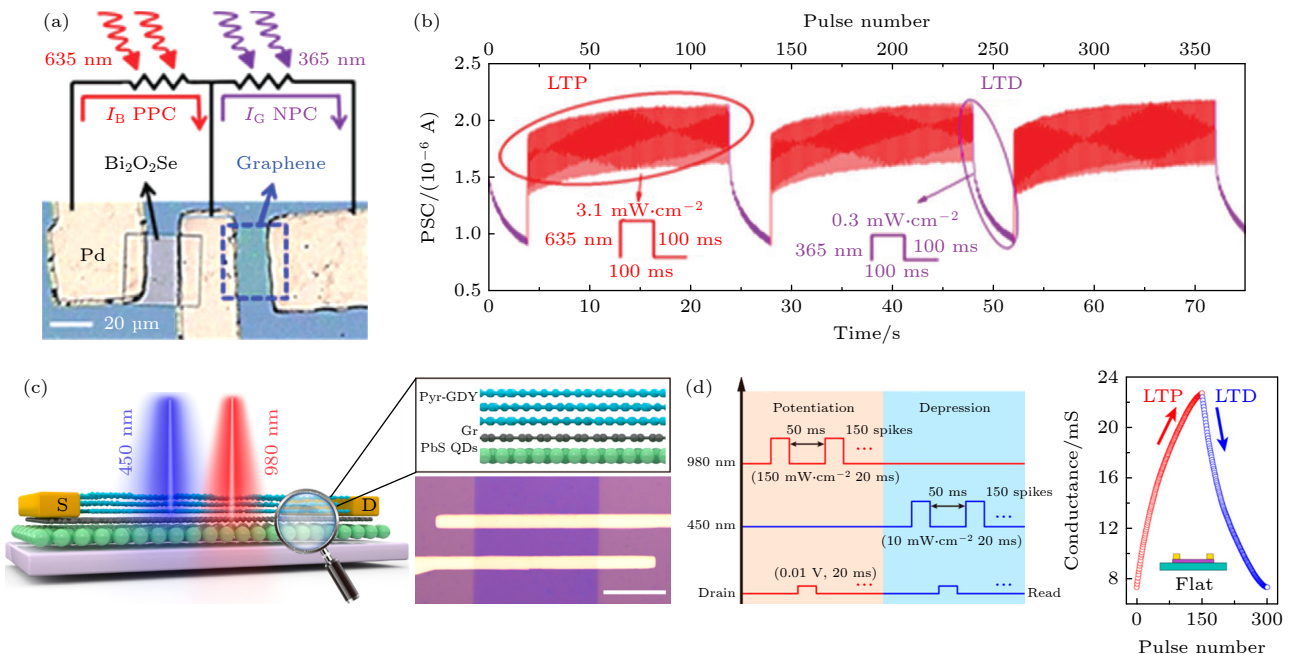


图7 大脑皮层视觉中枢应用器件 (a) 石墨烯/ $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 双极性响应器件^[27]; (b) 器件全光突触行为测试^[27]; (c) Pyr-GDY/Gr/PbS-QDs双异质结双极性响应器件^[28]; (d) 器件全光突触行为测试^[28]. 引用图片已获相关授权

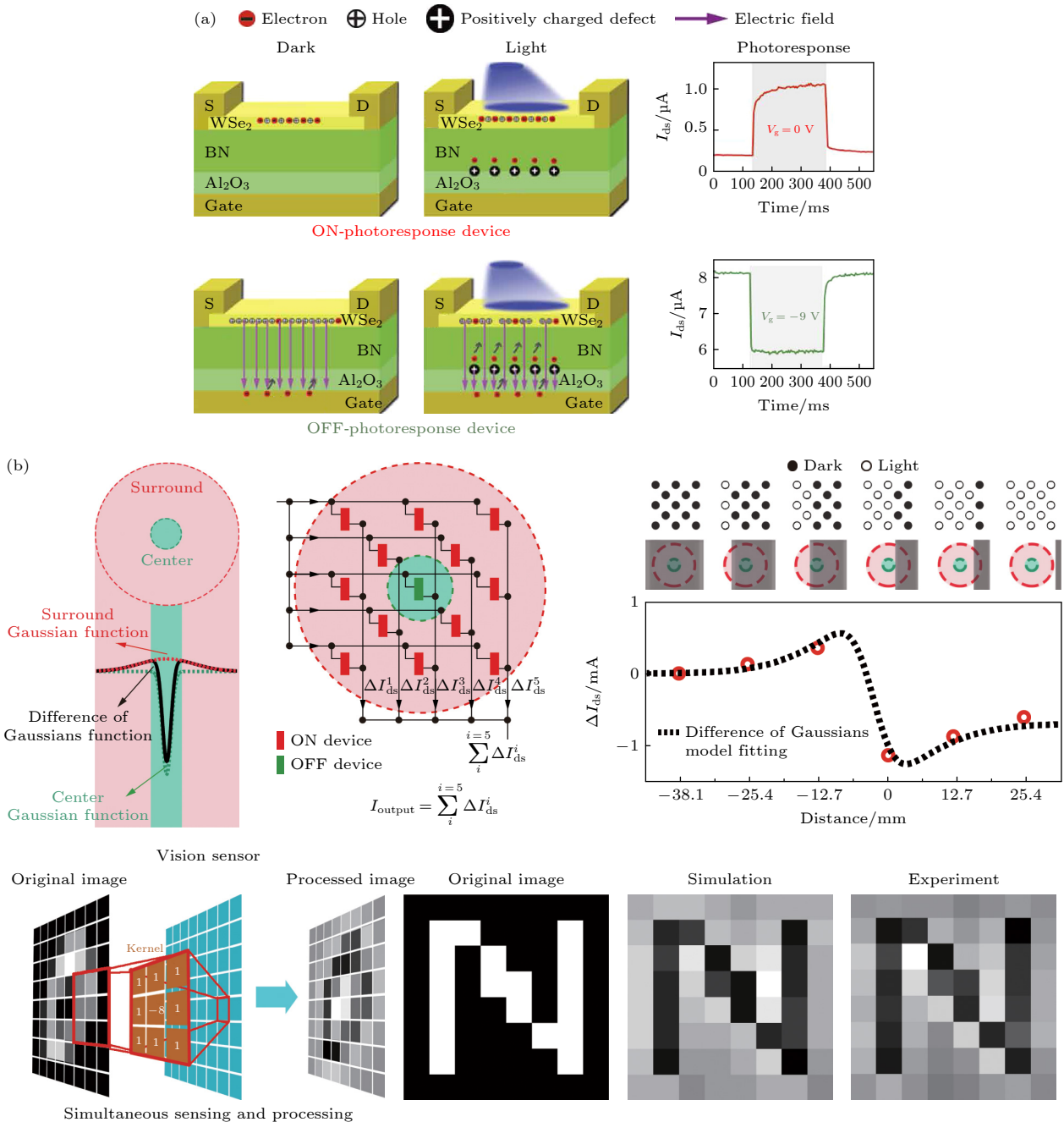
Fig. 7. Visual cortex application devices: (a) Graphene/ $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ bipolar response device^[27]; (b) all-optical synaptic behavior characterization of the device^[27]; (c) Pyr-GDY/Gr/PbS-QDs dual heterojunction bipolar response device^[28]; (d) all-optical synaptic behavior testing of the device^[28]. Reproduced with permissions from Wiley and American Chemical Society.

提取、锐化、模糊及轮廓增强等. 这种可调极性卷积阵列不仅具备高空间分辨能力, 还能根据入射光场自适应地调整响应极性, 实现实时的图像增强与特征识别.

为实现高效的视觉前处理功能, 研究者提出了基于可重构阵列结构的双极性响应卷积探测器. 这类器件的核心特征在于其电栅极调制能力, 使器件在不同外加栅压下可实现正负光电流的切换, 从而在硬件层面实现卷积核的符号映射. 电控门调制不仅赋予了器件极高的可编程性, 也为实现多场景视觉适应提供了可能. 尤其在空间特征处理过程中,

维持响应的线性功率关系对于图像灰度梯度与对比度的精确保持至关重要. 基于此类电调双极性响应机制的卷积阵列, 能够直接在片上完成视觉特征的提取与预处理, 大幅提升后端计算的效率与通用性.

早期, Mennel 等^[46] 基于 WSe₂ 实现了 3×3 阵列的视觉数据预处理原型, 实现了 50 ns 的超高速光学图像识别, 大幅降低了人工神经网络的计算负担. 随后, Wang 等^[30] 利用 WSe₂/hBN 异质浮栅结构构建了 3×3 卷积阵列 (如图 8(a) 所示), 实现了可编程图像卷积操作, 并通过输入不同光模式成



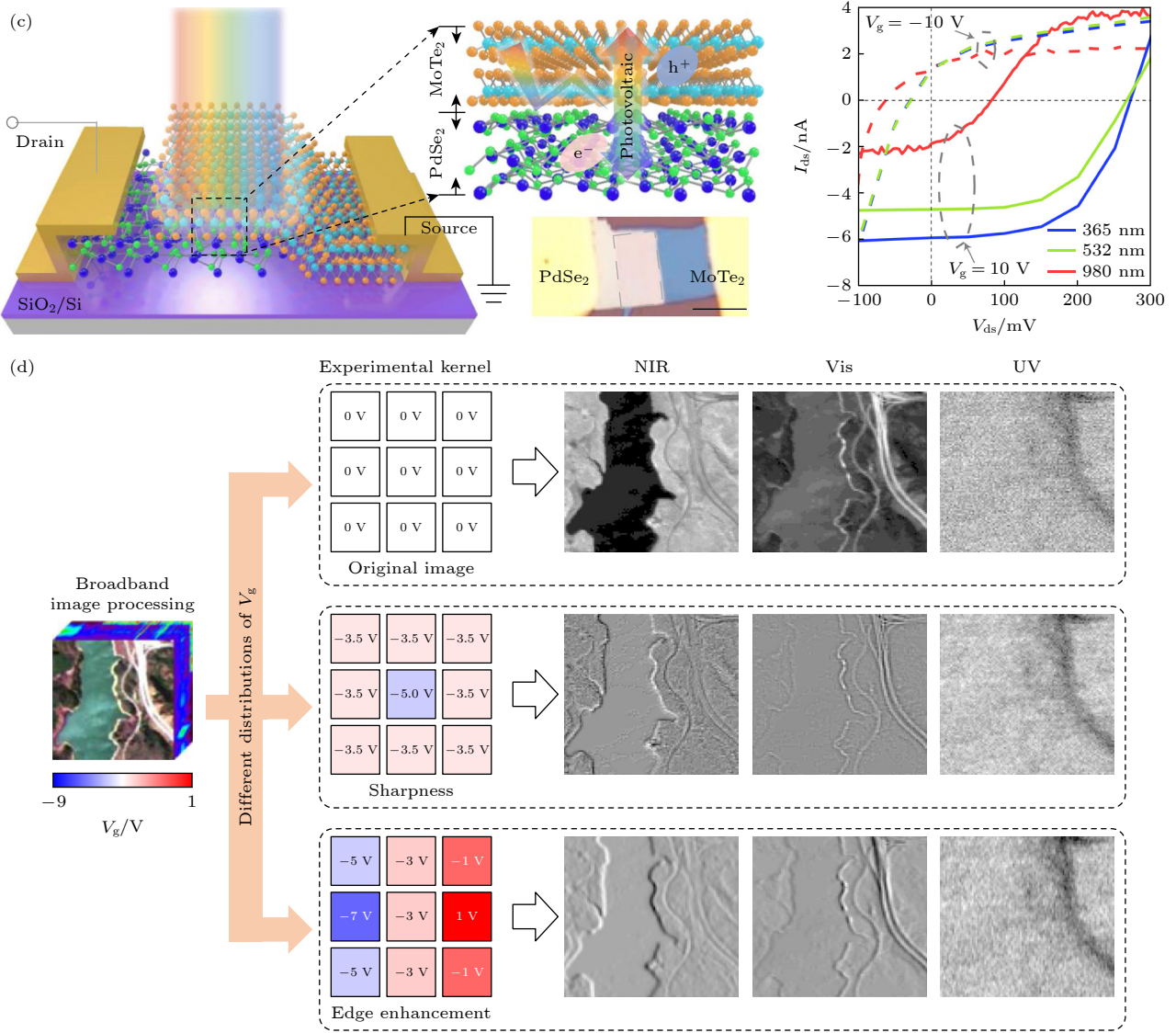


图 8 面向视觉前处理卷积应用器件 (a) WSe_2/BN 异质结栅极可调双极性器件^[30]; (b) 模拟人眼的信息前处理过程^[30]; (c) $\text{PdSe}_2/\text{MoTe}_2$ 栅极可调内建电场反向型双极性探测器^[29]; (d) 边缘处理^[29]. 引用图片已获相关授权

Fig. 8. Visual preprocessing-oriented convolutional application devices: (a) WSe_2/BN heterojunction gate-tunable ambipolar device^[30]; (b) simulation of the information preprocessing process in the human eye^[30], reproduced with permission from American Association for the Advancement of Science; (c) $\text{PdSe}_2/\text{MoTe}_2$ gate-tunable built-in electric field reversed ambipolar photodetector^[29]; (d) edge processing^[29]. Reproduced with permission from Nature Publishing Group.

功实现图像识别功能 (如图 8(b) 所示). 在此基础上, Wang 等^[30] 进一步结合忆阻器与卷积阵列, 实现了光学字母识别与运动目标追踪, 为神经形态视觉硬件提供了新范式.

此外, Han 等^[47,48] 于 2021 年利用石墨烯的可调栅极特性与有机半导体材料耦合, 实现了一系列近红外波段卷积处理功能, 验证了异质有机-二维材料体系在宽波段视觉计算中的优势. 此外, Pi 等^[29] 构建的窄带隙 $\text{PdSe}_2/\text{MoTe}_2$ 异质结可通过能带对齐变化实现正负光伏响应切换 (如图 8(c) 所示), 使器件在 UV-Vis-NIR 宽波段范围内实现

卷积处理能力, 从而在多光谱遥感成像中同时提取关键光谱与空间特征 (如图 8(d) 所示). 该工作充分展示了可重构异质结能带工程在多波段视觉系统中的巨大潜力. 为进一步提升在强光与弱光场景下的目标识别精度, Yang 等^[49] 提出了一种混维异质结 (graphene/Ge) 结构, 并结合动态可变卷积核机制, 与传统的固定门控卷积核不同, 该结构可通过电场调制实现卷积核形态的动态重构, 从而对低对比度目标或暗场边缘信息进行高精度提取. 这种自适应卷积单元在不同光照条件下仍能保持稳定的特征提取能力, 显著提高了系统在复杂环境下的

鲁棒性与通用性.

基于双极性响应机制的视觉卷积器件通过可调极性与栅压重构实现了硬件层面的卷积运算, 将传统 CNN 的数字卷积过程前移至光电探测端, 不仅有效降低了数据传输与功耗, 同时具备高响应速度与宽光谱适应性. 这种面向视觉前处理的卷积探测阵列作为智能视觉系统提供了从“感知-预处理-识别”一体化的解决方案, 为未来无人系统、自动驾驶及类脑视觉芯片的实现奠定了重要的物理基础.

3.3 面向视觉事件运动探测应用器件

传统帧式成像系统以固定帧率采集全图像, 造成大量冗余数据, 难以捕捉快速运动或高对比场景^[50]. 事件相机通过检测局部亮度变化触发脉冲输出, 从而实现对动态场景的稀疏编码. 双极性响应光电器件具有“信号符号变化”特征, 是实现事件视觉硬件化的理想选择. 利用二维材料 (如 WSe₂, BP, MoS₂) 构建的异质结或浮栅结构, 可获得亚微秒级响应速度和高信噪比的正负脉冲输出, 满足实时动态成像需求.

Zhang 等^[31]通过 BP 浮栅结构实现了 3×3 非易失性事件视觉阵列 (如图 9(a) 所示), 在输入动态图像序列时可自动输出运动轨迹的探测 (如

图 9(b) 所示), 实现接近 100% 的运动目标识别率^[31]. 随后, Pang 等^[32]实现了 18×18 MoS₂ 阵列, 其基于波纹辅助的非易失性双极性光电响应 (如图 9(c) 所示), 可实现全天候运动检测, 覆盖 405—940 nm 光谱区间 (如图 9(d) 所示). 与传统 CMOS 事件相机相比, 该体系的能耗降低约 2 个数量级.

为进一步优化特征变化提取、提升后端计算效率并减少冗余数据的生成, 研究者提出了基于事件驱动机制的尖峰编码视觉系统. 该体系通过直接在像素层面感知亮度变化并输出离散脉冲信号, 实现了信息的稀疏化表达, 既能保留重要动态特征, 又显著降低了数据传输与计算负担.

Zhou 等^[51]基于 WSe₂ 同质结光电探测器构建了一种事件驱动视觉传感器, 其核心在于利用器件内部两支通道在光响应时间上的差异, 在光强发生变化时自动产生电学尖峰信号. 当入射光强增大时, 一支通道迅速产生正光电流响应; 而另一支通道则因载流子滞后或陷阱再俘获形成相反极性的延迟响应. 两支信号在时间上形成差分, 从而在光强突变瞬间输出脉冲电流, 实现事件触发功能. 这一尖峰不仅能标识亮度变化, 还可直接作为输入尖峰信号用于后续数据处理与神经网络学习. 该器件的响应时间约为 5 μs, 具备极快的时域分辨率;

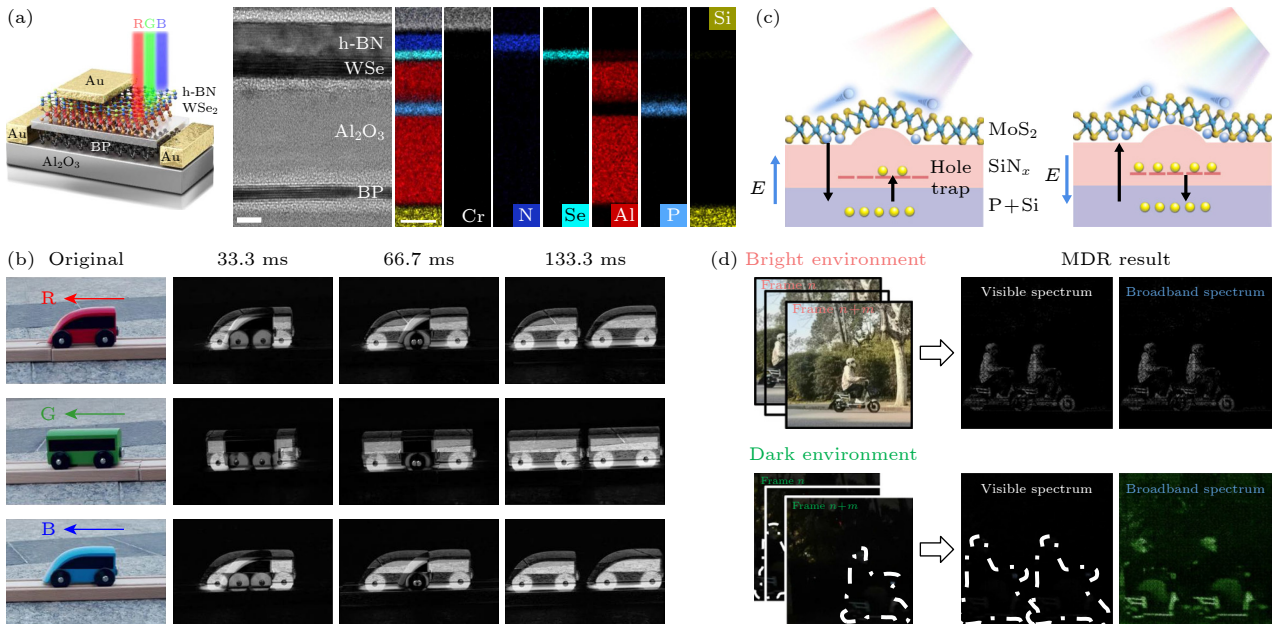


图 9 面向视觉事件运动探测应用器件 (a) BP 浮栅记忆器件结构示意图^[31]; (b) 针对 RGB 三色的小车运动探测^[31]; (c) 波纹辅助的非易失性 MoS₂ 探测器^[32]; (d) 全天候运动探测效果^[32]. 引用图片已获相关授权

Fig. 9. Motion detection devices for visual event applications: (a) Schematic structure of a BP floating-gate memory device^[31]; (b) motion detection of a small vehicle for RGB three-color channels^[31]; (c) ripple-assisted non-volatile MoS₂ photodetector^[32]; (d) all-day motion detection effect^[32]. Reproduced with permission from Nature Publishing Group.

在基于脉冲神经网络的运动识别任务中, 其识别准确率高达 92%, 充分验证了事件差分编码在动态视觉中的有效性^[51]. 在此基础上, Wu 等^[52]于 2024 年进一步构建了类人视觉系统, 将事件驱动脉冲光电探测器与人工光突触相结合, 形成视网膜皮层一体化的视觉信号处理架构. 该系统采用石墨烯等二维异质结构, 实现了从光信号捕获、事件脉冲生成、突触加权调制到神经层决策输出的全链路整合. 在动态成像测试中, 该视觉芯片能够实现移动目标的实时捕获与图像重构, 展现出与生物视觉系统相近的功能模式, 实现感知-编码-学习一体化智能视觉处理.

3.4 面向多维度光电探测应用器件

自然光本身包含强度、偏振、时间、空间、相位和光谱等多维信息, 但传统强度探测器在接收信号时通常进行维度压缩, 导致大部分多维数据丢失^[10]. 随着探测目标、环境和任务的复杂性增大, 迫切需要具备多维探测能力及高分辨率与还原能力

的探测器, 以提升对隐藏或伪装目标的识别精度. 为突破单维信息局限, 研究者探索了体光伏效应、人工体光伏效应和光热电效应等偏振依赖的双极性响应^[53,54]. 基于双极性响应的多维探测器主要分为两类: 一是通过简单正负响应产生的同心圆图案实现线性偏振-功率多维探测^[53]; 二是利用物理量子态产生的复杂正负响应分布实现全斯托克斯偏振-波长多维探测^[41].

近期, Dai 等^[33]采用圆自旋霍尔耦合器与热电材料结合 (如图 10(a) 所示), 实现了与角动量相关的正负光热电响应, 通过双极性响应显著提升了角动量模式识别的精度 (如图 10(b) 所示)^[33]. 此外, 功率-线性偏振多维探测器通常需要 3 个独立单元分别进行偏振检测和功率校准, 导致工艺复杂且器件尺寸较大. 此外, Wei 等^[55]提出基于石墨烯/超表面结构的人工体光伏效应, 通过偏振依赖的双极性响应实现了无需功率校准的线性偏振探测器. 接着, Jiang 等^[56]进一步通过优化双臂等离子体结构与石墨烯的集成, 在 1–8 μm 光谱范围内

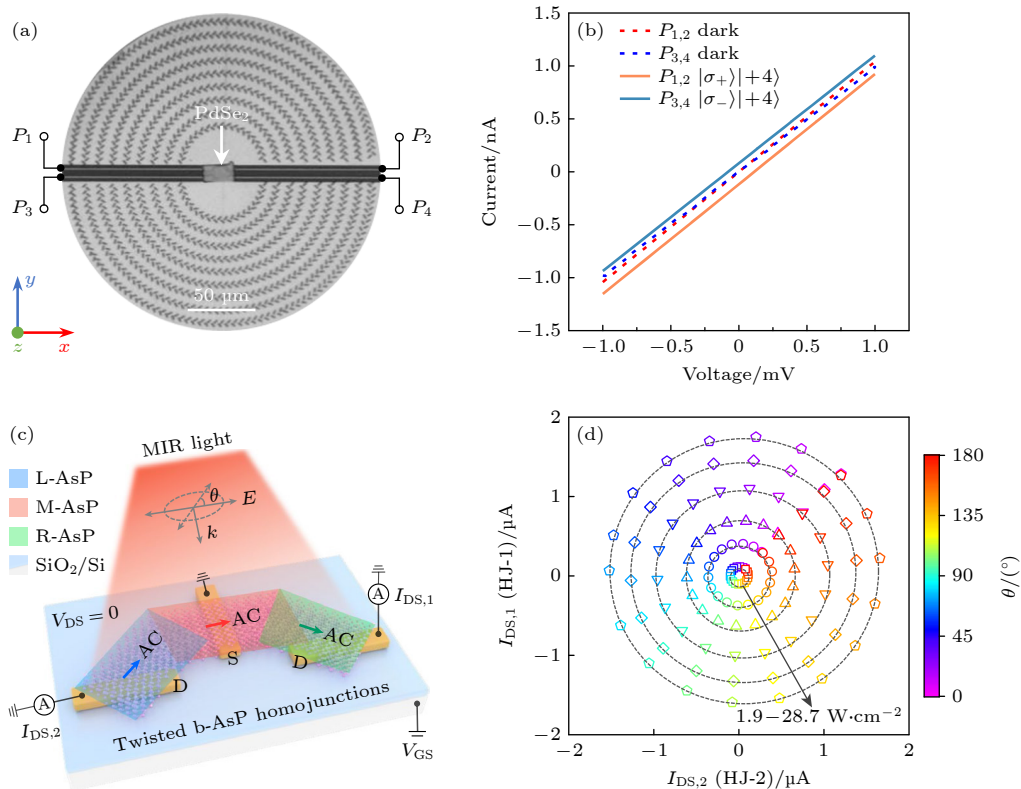


图 10 面向多维度光电探测应用器件 (a) PdSe₂ 的涡旋光耦合器^[33]; (b) 涡旋光引起的 PTE 正负响应^[33]; (c) 三转角 Asp 多维度偏振探测器^[34]; (d) 偏振-功率探测图^[34]. 引用图片已获相关授权

Fig. 10. Devices designed for multidimensional optoelectronic detection applications: (a) Vortex light coupler based on PdSe₂^[33]; (b) positive and negative PTE responses induced by vortex light^[33]; (c) triple-twisted-angle Asp multidimensional polarization detector^[34]; (d) polarization-power detection mapping^[34]. Reproduced with permission from Nature Publishing Group.

实现了基于双极性偏振光电流的偏振-波长多维信息解耦. 除超表面与二维材料结合外, 纯范德瓦耳斯器件也在双极性多维探测领域取得进展. 2024年, Wang等^[34]构建了三转角Asp器件(如图10(c)所示), 利用每个同质结产生的偏振依赖光热电双极性响应, 形成了光电流输出特性的同心圆曲线效应. 该设计在不同功率下具有无交集的同心圆曲线, 可实现功率-线性偏振多维度探测的唯一解(如图10(d)所示), 同时还能实现波长-线性偏振分辨.

然而上述多维探测存在局限性: 自然界偏振光多为随机偏振, 需通过全斯托克斯探测器(需要4个自由度信息)解决该问题^[57]. Ma等^[58]通过双层转角石墨烯实现的莫尔量子态与偏振-光谱对应关系, 结合上下栅调控产生的体光伏高阶非线性双极性光电流谱, 绕过复杂物理动力学模型, 利用机器学习算法重建了输入中红外光的全斯托克斯偏振-光谱信息.

4 未来发展与展望

在双极性响应光电探测器的研究不断深入的同时, 如何实现大面积制备与高密度集成, 已成为推动其片上实用化和产业化的关键环节^[59]. 虽然二维材料体系在器件性能和可调性上具有显著优势, 但其制备仍面临晶格缺陷、应力累积及可重复性不足等问题. 目前, 研究者正通过化学气相沉积、分子束外延及范德瓦耳斯外延等方法实现石墨烯、MoS₂、WSe₂等材料的晶圆级生长, 其中石墨烯与部分过渡金属二硫属化物(transition metal dichalcogenides, TMD)材料已成功实现4英寸级单晶连续膜^[60]. 这些进展为构建大面积阵列型双极性探测器提供了可行的材料基础.

此外, 钙钛矿与有机半导体的引入也为大面积双极性响应提供了新的路径^[61]. 钙钛矿薄膜具有可溶液加工、低温制备及高吸收系数等特点, 可实现柔性、透明及卷对卷生产, 从而突破二维材料在面积与一致性方面的瓶颈. 此外, 钙钛矿/二维材料、量子点/二维材料等混合异质结结构通过能带耦合和陷阱调控, 实现了光谱依赖或功率依赖的双极性响应, 为多波段成像和功率自适应视觉感知奠定了基础. 相比之下, 体材料在大面积柔性器件制备方面具有明显优势, 并与互补金属氧化物(com-

plementary metal oxides, CMOS)工艺高度兼容. 近年来, 钙钛矿与有机材料的进展进一步实现了规模化双向光响应, 并支持诸如先进通信编码、具备颜色感知的边缘检测, 以及位置追踪等复杂功能. 因此, 二维材料所固有的双极性机制为体材料系统提供了重要的设计启发, 而体材料将在双极性响应技术的工程化与规模化应用中发挥关键作用. 这类材料体系在兼顾高灵敏度和可制造性方面展现出巨大潜力.

随着CMOS兼容工艺的引入, 二维材料异质结与传统硅电路的共集成已成为可行方案, 使双极性探测阵列能够直接嵌入现有成像与计算平台, 并且有望应用在红外去伪装成像中^[62,63]. 近年来, 双极性响应光电探测器的研究不断深入, 其在材料体系、物理机制与器件架构方面均取得了显著进展, 为智能光电子学、类脑计算与自适应视觉系统的实现奠定了重要基础. 然而, 从实验室验证到大规模应用仍面临诸多挑战. 未来的发展趋势将主要集中在以下几个方面: 材料体系的可控制备与新机理拓展, 器件性能的集成化与多维化, 以及面向智能计算的系统级融合与自主演化.

此外, 在材料体系与物理机制方面, 如何实现高均匀性、低缺陷密度的二维材料及其异质结的大面积可控生长, 仍是双极性响应器件实用化的关键. 当前的机械剥离与小面积气相外延沉积(chemical vapor deposition, CVD)方法虽然能够验证物理机制, 但难以满足片上集成需求^[64]. 未来可通过范德瓦耳斯外延、生长应力调控以及界面原位钝化技术, 实现晶圆级高质量二维材料制备^[60,65-71].

另外一点需要注意的是, 某些双极性响应机制是通过正负响应抵消实现的, 对器件本身的性能也有抵消作用, 在实现双极性产生的多功能与探测器灵敏度方面存在平衡问题, 一些双极性响应存在波长串扰、亚稳态问题, 使得某些应用在实际中无法真正地开展.

同时, 双极性响应已经变得越来越复杂, 除了简单的正负响应光电导信号带来的方向判断, 现在已经逐步发展为抑制-增加的时间动力学变化过程, 以及物理拓扑态的复杂非线性光响应表象, 通过各种能带以及束缚形成了各类复杂的弛豫过程^[72-76]. 新的双极性物理过程, 如自旋极化光伏效应、界面热电子调制及多子带协同输运等, 将为器件提供

新的响应通道^[77,78]. 通过结合超晶格、扭转异质结及量子几何相位调控, 可进一步实现波长拓展^[79], 可编程极性翻转与多维信号映射^[80,81], 从而构建具备非线性调制能力的高自由度光电响应平台^[33,41,53,58,82,83].

参考文献

- [1] Schuman C D, Kulkarni S R, Parsa M, Mitchell J P, Date P, Kay B 2022 *Nat. Comput. Sci.* **2** 10
- [2] Hu W D, Li Q, Chen X S, Lu W 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 120701 (in Chinese) [胡伟达, 李庆, 陈效双, 陆卫 2019 物理学报 **68** 120701]
- [3] Cui Y Y, Song J M, Zhao W W, Yang F, Liu H W, Ni Z H, Lyu J P 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 228503 (in Chinese) [崔月赢, 宋俊明, 赵伟玮, 杨昉, 刘宏微, 倪振华, 吕俊鹏 2025 物理学报 **74** 228503]
- [4] Zhou Y P, Li F J, Che C, Tan L Y, Ran Q W, Yu S Y, Ma J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 148501 (in Chinese) [周彦平, 黎发军, 车驰, 谭立英, 冉启文, 于思源, 马晶 2014 物理学报 **63** 148501]
- [5] Zhu S Q, Lin Z G, Wang Z, Jia L M, Zhang N J, Zheng W 2024 *Photonix* **5** 5
- [6] Hu W D, Ye Z H, Liao L, Chen H L, Chen L, Ding R J, He L, Chen X S, Lu W 2014 *Opt. Lett.* **39** 5184
- [7] Zhao K L, Guo Q, Jiang L, Zhang Y S, Jiao S H, Hu J, Cheng Q, Cao X, Han W N 2025 *Photonix* **6** 42
- [8] Lei W, Antoszewski J, Faraone L 2015 *Appl. Phys. Rev.* **2** 041303
- [9] Hu W D, Chen X S, Ye Z H, Lu W 2011 *Appl. Phys. Rev.* **99** 091101
- [10] Han J Y, Fu Z Y, Wei J X, Han S, Deng W J, Hu F C, Wang Z, Zhou H X, Yu H, Gou J, Wang J 2025 *Light Sci. Appl.* **14** 362
- [11] Chen Y F, Wang Y, Wang Z, Gu Y, Ye Y, Chai X L, Ye J F, Chen Y, Xie R Z, Zhou Y, Hu Z G, Li Q, Zhang L L, Wang F, Wang P, Miao J S, Wang J L, Chen X S, Lu W, Zhou P, Hu W D 2021 *Nat. Electron.* **4** 357
- [12] Han J Y, Wang J 2025 *Acta Opt. Sin.* **2** 0102001 (in Chinese) [韩嘉悦, 王军 2025 光学学报 **2** 0102001]
- [13] Zhou F C, Chai Y 2020 *Nat. Electron.* **3** 664
- [14] Zeng G, Ma S, Wan T, Chen H, Chen J, Chai Y 2025 *Nat. Protocols* **19** 9
- [15] Zhang S F, Hu A Q, Liu Q L, Xu L, Ren X S, Wang B, Ren Y L, Liu W Y, Zhou X Y, Chen S S, Guo X 2023 *Adv. Electron. Mater.* **9** 2300243
- [16] Li J Q, Mao X R, Xie S, Geng Z X, Chen H D 2020 *Photon. Res.* **8** 39
- [17] Wang F K, Zhu S, Chen W, Duan R H, Dai T F, Ma H, Yan C L, Fang S, Yu J B, Zhang Y, Dong Q K, Deng W J, Liu Z, Wang Q J 2025 *Light Sci. Appl.* **14** 246
- [18] Zhou C, Deng J J, Zhang J L, Xiong J X, Yang Y X, Wu N S, Li J B, Li S N 2025 *J. Phys. Chem. Lett.* **16** 9202
- [19] Zhao X Y, Zhang N, Qi L J, Wang B, Tan F, Chang C L, Liu M X, Che M Q, Shi Y R, Li Y H, Feng Y Z, Li D B, Li S J 2024 *ACS Photonics* **11** 4854
- [20] Che M Q, Wang B, Zhao X Y, Li Y H, Chang C L, Liu M X, Du Y, Qi L J, Zhang N, Zou Y T, Li S J 2024 *ACS Nano* **18** 30884
- [21] Ding Y, Qi R X, Wang C L, Wu Q Q, Zhang H Z, Zhang X M, Lin L L, Cai Z Y, Xiao S Q, Gu X F, Nan H Y 2023 *J. Phys. Chem. C* **127** 20072
- [22] Agnihotri P, Dhakras P, Lee J U 2016 *Nano Lett.* **16** 4355
- [23] Zhou C J, Zhang S Y, Lv Z, Ma Z C, Yu C, Feng Z H, Chan M S 2020 *npj 2D Mater. Appl.* **4** 46
- [24] Aftab S, Eom J 2019 *2D Mater.* **6** 035005
- [25] Wang J, Han J Y, Chen X Q, Wang X R 2019 *InfoMat* **1** 33
- [26] Han J Y, Deng W J, Hu F C, Han S C, Wang Z, Fu Z Y, Zhou H X, Yu H X, Gou J, Wang J 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2423360
- [27] Yang C M, Chen T C, Verma D, Li L J, Liu B, Chang W H, Lai C S 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 2001598
- [28] Hou Y X, Li Y, Zhang Z C, Li J Q, Qi D H, Chen X D, Wang J J, Yao B W, Yu M X, Lu T B, Zhang J 2021 *ACS Nano* **15** 1497
- [29] Pi L J, Wang P F, Liang S J, Luo P, Wang H Y, Li D Y, Li Z X, Chen P, Zhou X, Miao F, Zhai T Y 2022 *Nat. Electron.* **5** 248
- [30] Wang C Y, Liang S J, Wang S, Wang P, Li Z A, Wang Z, Gao A, Pan C, Liu C, Liu J, Yang H, Liu X, Song W, Wang C, Cheng B, Wang X, Chen K, Wang Z, Watanabe K, Taniguchi T, Yang J J, Miao F 2020 *Sci. Adv.* **6** eaba6173
- [31] Zhang Z H, Wang S Y, Liu C S, Xie R Z, Hu W D, Zhou P 2022 *Nat. Nanotechnol.* **17** 27
- [32] Pang X C, Wang Y, Zhu Y Y, Zhang Z H, Xiang D, Ge X, Wu H Q, Jiang Y B, Liu Z Z, Liu X X, Liu C S, Hu W D, Zhou P 2024 *Nat. Commun.* **15** 1613
- [33] Dai M J, Wang C W, Sun F Y, Wang Q J 2024 *Nat. Commun.* **15** 5396
- [34] Wang F K, Zhu S, Chen W D, Han J Y, Duan R H, Wang C W, Dai M J, Sun F Y, Jin Y H, Wang Q J 2024 *Nat. Nanotechnol.* **19** 455
- [35] Nalwa H S 2020 *RSC Adv.* **10** 30529
- [36] Shu Y T, Zhang Y W, Wang S 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 177301 (in Chinese) [舒衍涛, 张有为, 王顺 2021 物理学报 **70** 177301]
- [37] Wu P S, Ye L, Tong L, Wang P, Wang Y, Wang H L, Ge H N, Wang Z, Gu Y, Zhang K, Yu Y Y, Peng M, Wang F, Huang M, Zhou P, Hu W D 2022 *Light Sci. Appl.* **11** 6
- [38] Li T X, Miao J S, Fu X, Song B, Cai B, Ge X, Zhou X H, Zhou P, Wang X R, Jariwala D, Hu W D 2023 *Nat. Nanotechnol.* **18** 1303
- [39] Yan T T, Li Z Q, Cao F, Chen J X, Wu L M, Fang X S 2022 *Adv. Mater.* **34** 2201303
- [40] Ng S E, Yantara N, Tu N A, Erdenebileg E, Li P W F, Sharma D, Lam Y M, Mhaisalkar S, Basu A, Chattopadhyay A, Mathews N 2024 *Adv. Mater.* **36** 2406568
- [41] Yuan S F, Ma C, Fetaya E, Mueller T, Naveh D, Zhang F, Xia F N 2023 *Science* **379** eade1220
- [42] Fu J T, Nie C B, Sun F Y, Li G L, Shi H F, Wei X Z 2024 *Sci. Adv.* **10** eadk8199
- [43] Ahmed T, Tahir M, Low M X, Ren Y, Tawfik S A, Mayes E L H, Kuriakose S, Nawaz S, Spencer M J S, Chen H, Bhaskaran M, Sriram S, Walia S 2021 *Adv. Mater.* **33** 2004207
- [44] Lian Y L, Han J Y, Yang M, Peng S L, Zhang C Y, Han C, Zhang X C, Liu X C, Zhou H X, Wang Y, Lan C Y, Gou J, Jiang Y D, Liao Y L, Yu H, Wang J 2022 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2205709
- [45] Yang F, Jang Y, Wang C, Liang J G, Li Y 2025 *Adv. Funct. Mater.* **36** e15213
- [46] Mennel L, Symonowicz J, Wachter S, Polyushkin D K, Molina-Mendoza A J, Mueller T 2020 *Nature* **579** 62
- [47] Han J Y, Du X Y, Zhang Z H, He Z Y, Han C, Xie R Z,

- Wang F, Tao S L, Hu W D, Shan C X, Yang M, Gou J, Wu Z M, Jiang Y D, Wang J 2022 *J. Mater. Chem. C* **10** 9198
- [48] Han C, Liu X C, Han X W, He M Y, Han J Y, Zhang H, Hou X, Zhou H X, Yu H, Wu Z M, Gou J, Wang J 2022 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2209680
- [49] Yang Y K, Pan C, Li Y X, Yangdong X J, Wang P F, Li Z A, Wang S, Yu W T, Liu G Y, Cheng B, Di Z F, Liang S J, Miao F 2024 *Nat. Electron.* **7** 225
- [50] Chakravarthi B, Verma A A, Daniilidis K, Fermuller C, Yang Y 2024 *Computer Vision—ECCV Workshops* (Cham: Springer) pp342–376
- [51] Zhou Y, Fu J W, Chen Z R, Zhuge F W, Wang Y S, Yan J M, Ma S J, Xu L, Yuan H M, Chan M S, Miao X S, He Y H, Chai Y 2023 *Nat. Electron.* **6** 870
- [52] Wu Y, Deng W J, Li K X, Wang X T, Liu B, Li J Z, Chen Z J, Zhang Y Z 2024 *Adv. Mater.* **36** 2312094
- [53] Wei J X, Chen Y, Li Y, Li W, Xie J, Lee C, Novoselov K S, Qiu C W 2023 *Nat. Photonics* **17** 171
- [54] Xiong Y F, Wang Y S, Zhu R Z, Xu H T, Wu C H, Chen J H, Ma Y, Liu Y, Chen Y, Watanabe K, Taniguchi T, Shi M Z, Chen X H, Lu Y Q, Zhan P, Hao Y F, Xu F 2022 *Sci. Adv.* **8** eabo0375
- [55] Wei J X, Li Y, Wang L, Liao W G, Dong B W, Xu C, Zhu C X, Ang K W, Qiu C W, Lee C 2020 *Nat. Commun.* **11** 6404
- [56] Jiang H, Chen Y, Guo W, Zhang Y, Zhou R, Gu M, Zhong F, Ni Z, Lu J, Qiu C W, Gao W 2024 *Nat. Commun.* **15** 8347
- [57] Deng J, Shi M D, Liu X S, Zhou J, Qin X Y, Wang R W, Zhen Y R, Dai X, Chen Y Z, Wei J X, Ni Z H, Gao W B, Qiu C W, Chen X S 2024 *Nat. Electron.* **7** 1004
- [58] Ma C, Yuan S F, Cheung P, Watanabe K, Taniguchi T, Zhang F, Xia F N 2022 *Nature* **604** 266
- [59] He T, Ma H, Wang Z, Li Q, Liu S N, Duan S K, Xu T F, Wang J C, Wu H T, Zhong F, Ye Y T, Wu J H, Lin S, Zhang K, Martyniuk P, Rogalski A, Wang P, Li L, Lin H T, Hu W D 2024 *Nat. Photonics* **18** 60
- [60] Li T T, Guo W, Ma L, Li W S, Yu Z H, Han Z, Gao S, Liu L, Fan D X, Wang Z X, Yang Y, Lin W Y, Luo Z Z, Chen X Q, Dai N X, Tu X C, Pan D F, Yao Y G, Wang P, Nie Y F, Wang J L, Shi Y, Wang X R 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 1201
- [61] Sun X, Huang F, Liu G X, Su Z S 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 178102 (in Chinese) [孙雪, 黄锋, 刘桂雄, 苏子生 2022 物理学报 **71** 178102]
- [62] Huang Y X, Zhu H Z, Zhou Y W, Dai C Z, Zhu R X, Ghosh P, Qiu M, Li Q 2025 *Photon X* **6** 25
- [63] Zhang D H, Li Y H, Geng J M, Kim H M, Ma M, Wang S F, Kim I, Wijaya T J, Higashitarumizu N, Rahman I K M R, Urmossy D, Bullock J, Ozcan A, Javey A 2025 *Science* **390** eady6571
- [64] Liu L, Li T T, Gong X S, Wen H D, Zhou L Q, Feng M W, Zhang H T, Zou N M, Wu S Q, Li Y H, Zhu S T, Zhuo F L, Zou X L, Hu Z H, Ding Z Y, Fang S S, Xu W G, Hou X G, Zhang K, Long G, Tang L, Jiang Y C, Yu Z H, Ma L, Wang J L, Wang X R 2025 *Nat. Mater.* **24** 1195
- [65] Liu C S, Jiang Y B, Shen B Q, Yuan S C, Cao Z Y, Bi Z Y, Wang C, Xiang Y T, Wang T J, Wu H Q, Liu Z Z, Wang Y, Wang S Y, Zhou P 2025 *Nature* **646** 1081
- [66] Ao M R, Zhou X C, Kong X J, Gou S F, Chen S F, Dong X Q, Zhu Y X, Sun Q C, Zhang Z J, Zhang J S, Zhang Q R, Hu Y, Sheng C M, Wang K X, Wang S Y, Wan J, Han J, Bao W Z, Zhou P 2025 *Nature* **640** 654
- [67] Liu L, Li T T, Ma L, Li W S, Gao S, Sun W J, Dong R K, Zou X L, Fan D X, Shao L W, Gu C Y, Dai N X, Yu Z H, Chen X Q, Tu X C, Nie Y F, Wang P, Wang J L, Shi Y, Wang X R 2022 *Nature* **605** 69
- [68] Xia Y, Chen X Y, Wei J C, Wang S Y, Chen S Y, Wu S M, Ji M B, Sun Z Z, Xu Z H, Bao W Z, Zhou P 2023 *Nat. Mater.* **22** 1324
- [69] Jiang Y B, Liu C S, Cao Z Y, Li C H, Liu Z H, Wang C, Xiang Y T, Zhou P 2024 *Nat. Electron.* **7** 868
- [70] Yi K Y, Qin W, Huang Y M, Wu Y, Feng S P, Fang Q Y, Cao X, Deng Y, Zhu C, Zou X L, Ang K W, Li T T, Wang X R, Lou J, Lai K J, Hu Z L, Zhang Z H, Dong Y M, Kalantar-Zadeh K, Liu Z 2024 *Nat. Electron.* **7** 1126
- [71] Hong J X, Liu M H, Liu Y X, Shang S C, Wang X Y, Du C S, Gao W Q, Hua C Y, Xu H L, You Z W, Liu Y Q, Chen J Y 2024 *Angew. Chem. Int. Edit.* **63** e202317876
- [72] Wang F K, Hu F C, Dai M J, Zhu S, Sun F Y, Duan R H, Wang C W, Han J Y, Deng W J, Chen W D, Ye M, Han S, Qiang B, Jin Y H, Chua Y D, Chi N, Yu S H, Nam D, Chae S H, Liu Z, Wang Q J 2023 *Nat. Commun.* **14** 1938
- [73] Li D Y, Li Z X, Sun Y, Zhou J, Xu X, Wang H Y, Chen Y X, Song X Y, Liu P B, Luo Z T, Han S T, Zhou X, Zhai T Y 2024 *Adv. Mater.* **36** 2407010
- [74] Li L, Li S S, Wang W H, Zhang J L, Sun Y M, Deng Q R, Zheng T, Lu J T, Gao W, Yang M M, Wang H Y, Pan Y, Liu X T, Yang Y N, Li J B, Huo N J 2024 *Nat. Commun.* **15** 6261
- [75] Wen W, Liu G C, Wei X F, Huang H J, Wang C, Zhu D L, Sun J Z, Yan H J, Huang X, Shi W K, Dai X J, Dong J C, Jiang L, Guo Y L, Wang H L, Liu Y Q 2024 *Nat. Commun.* **15** 2397
- [76] Liao F Y, Zhou Z, Kim B J, Chen J W, Wang J L, Wan T Q, Zhou Y, Hoang A T, Wang C, Kang J F, Ahn J H, Chai Y 2022 *Nat. Electron.* **5** 84
- [77] Liu C Y, Zhang H, Ding K, Zhao J, Yan A J, Luo J S, Ye L J, Tang Y, Pang D, Li H L, Dong K L, Li W J, Cheng Z X, Yu P 2025 *Adv. Mater.* e16019 DOI: [10.1002/adma.202516019](https://doi.org/10.1002/adma.202516019)
- [78] Wang H Y, Li Y, Gao P, Wang J, Meng X F, Hu Y, Yang J H, Huang Z H, Gao W, Zheng Z Q, Wei Z M, Li J B, Huo N J 2024 *Adv. Mater.* **36** 2309371
- [79] Zhang R, Guo X G, Cao J C 2011 *Adv. Mater.* **60** 050705 (in Chinese) [张戎, 郭旭光, 曹俊诚 2011 物理学报 **60** 050705]
- [80] Yang Z, Albrow-Owen T, Cui H, Alexander-Webber J, Gu F, Wang X, Wu T C, Zhuge M, Williams C, Wang P, Zayats A V, Cai W, Dai L, Hofmann S, Overend M, Tong L, Yang Q, Sun Z, Hasan T 2019 *Science* **365** 1017
- [81] Liang Z H, Zhou X, Zhang L, Yu X L, Lv Y, Song X F, Zhou Y H, Wang H, Wang S, Wang T H, Shum P P, He Q, Liu Y, Zhu C, Wang L, Chen X L 2023 *Nat. Commun.* **14** 4230
- [82] Wang F, Fang S, Zhang Y, Wang Q J 2025 *Nat. Commun.* **16** 6791
- [83] Cao Z J, Sun S W, Wei J X, Liu Y 2025 *Light Sci. Appl.* **14** 90

SPECIAL TOPIC—Semiconductor physics and devices

Development and application of bipolar response in two dimensional material based photodetectors*

HAN Jiayue¹⁾²⁾ WANG Jun^{1)2)†}

1) (*School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*)

2) (*State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*)

(Received 23 November 2025; revised manuscript received 29 December 2025)

Abstract

Bipolar response has emerged in recent years as a novel operational mechanism for photodetectors. By producing switchable positive and negative photocurrents under different external conditions, it enables multidimensional mapping and multiplexing of optical signals, supporting applications such as neuromorphic vision and on-chip computing. Two-dimensional materials have seen rapid development in the field of bipolar photoresponse in recent years due to their unique optoelectronic properties, including atomic-scale thickness, tunable band structures, and strong light–matter interactions. In detector architectures based on two-dimensional materials and their van der Waals heterostructures, various types of bipolar behaviors can be engineered through external stimuli including electric field, wavelength, polarization, and incident power. These functionalities have been widely employed in brain-inspired vision, convolutional pre-processing, event-based imaging, and multidimensional spectral analysis. This review focuses on the development and applications of bipolar photoresponse in photodetectors, providing a systematic summary of its physical mechanisms, material systems, device architectures, and representative advancements. Beyond enhancing device performance, bipolar photoresponse endows photodetectors with intrinsic computational and learning capabilities, enabling functions such as logic operations, feature extraction, and adaptive perception at the device level. Furthermore, the integration of bipolar-response devices with large-scale arrays and neuromorphic hardware platforms is expected to significantly reduce system complexity and power consumption. Despite the remaining challenges in device uniformity, stability, and large-area integration, bipolar photoresponse offers new pathways for multidimensional optical information fusion, low-power visual computing, and the evolution of next-generation intelligent optoelectronic systems.

Keywords: bipolar photoresponse, visual applications, multidimensional detection, two-dimensional materials

DOI: [10.7498/aps.75.20251589](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251589)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251589](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251589)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFB3611400).

† Corresponding author. E-mail: wjun@uestc.edu.cn

二维材料光电探测器的双极性响应与应用

韩嘉悦 王军

Development and application of bipolar response in two dimensional material based photodetectors

HAN Jiayue WANG Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 080704 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251589

CSTR: 32037.14.aps.75.20251589

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251589>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于二维材料光电器件的传感器内计算与应用进展

Progress in in-sensor computing and applications based on photodetectors of two-dimensional materials

物理学报. 2025, 74(22): 228501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251093>

二维材料与人工视觉系统的多维融合: 前沿突破与范式革新

Multidimensional heterogeneous integration of two-dimensional materials and artificial visual systems: Frontier innovations and paradigm-shifting advancements

物理学报. 2025, 74(17): 178502 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250703>

二维材料宽谱光电探测器研究进展

Research progress of broadband photodetectors based on two-dimensional materials

物理学报. 2025, 74(22): 228503 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251115>

基于二维材料的集成与应用

Integration and applications of two-dimensional materials

物理学报. 2026, 75(1): 228503 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251386>

硅基底上二维硒氧化铋的化学气相沉积法合成及其光电探测应用

Synthesis of two-dimensional Bi₂O₂Se on silicon substrate by chemical vapor deposition and its photoelectric detection application

物理学报. 2022, 71(16): 166101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220388>

基于拓扑/二维量子材料的自旋电子器件

Spintronic devices based on topological and two-dimensional materials

物理学报. 2024, 73(1): 017505 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231166>