

超宽带光电探测器研究进展

刘宇¹, 林志诚¹, 王鹏飞¹, 黄峰^{1*}, 孙家林²

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350000;

2. 清华大学 物理系, 北京 100084)

摘要: 光电探测器在许多应用中发挥着关键作用, 例如遥感、夜视、侦察、医学成像、热成像和化学检测。随着光电探测任务的逐渐复杂化, 工作在不同波段的光电探测器逐渐被集成用于对同一场景的宽光谱探测。受限于集成系统的体积和任务模块, 常规的宽光谱探测任务往往需要多个不同波段的探测器协同工作, 极大增加了系统复杂度, 因此具有超宽带探测(紫外-可见-红外-太赫兹)能力的光电探测器逐渐成为国际研究的前沿热点。但是迄今为止, 有关超宽带光电探测器的综述还没有见诸报道。因此, 本文系统整理了超宽带光电探测器在过去十年的研究进展。文章首先介绍了衡量光电探测器响应性能的指标以及常见光电探测器的主要类型, 在此基础上重点回顾了不同类型超宽带光电探测器的研究进展、发展现状、面临的挑战, 并展望了未来的研究方向。

关键词: 超宽带; 光电探测器; 响应机理; 器件类型

中图分类号: O437; O47; TN36

文献标识码: A

Research progress of ultra-broadband photodetectors

LIU Yu¹, LIN Zhi-Cheng¹, WANG Peng-Fei¹, HUANG Feng^{1*}, SUN Jia-Lin²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350000, China;

2. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Photodetectors play a key role in many applications, such as remote sensing, night vision, reconnaissance, medical imaging, thermal imaging, and chemical detection. With the increasing complexity of photoelectric detection tasks, photodetectors working in different bands are gradually integrated into broad spectral detection for the same scene. Limited by the volume and task module of the integrated system, conventional broad spectral detection tasks often require multiple detectors working in different bands to perform together, which greatly increases the complexity of detection system. Therefore, photodetector enabling to response ultra-broadband radiation (UV-vis-IR-THz) has gradually become a subject of great interest in recent years. However, there have been no reports on the review of ultra-broadband photodetectors so far. Hence, this review systematically summarizes the research progresses of ultra-broadband photodetectors in the past ten years. The factors affecting the response performance of photodetectors and the main types of common photodetectors are described first, and then the research progress, development status and challenges are reviewed and suggestions about the future research directions of ultra-broadband photodetectors are also provided.

Key words: ultra-broadband, photodetector, response performance, device type

引言

在过去的几十年里, 蓬勃发展的光电产业改变了世界, 并延伸到了生活的方方面面。作为最重要的光电器件之一, 具有光电转换能力的光电探测器(Photo Detector, PD)一直受到广泛关注。常规的光

电探测器一般按照工作波段划分类型, 而不同波段的光电探测器一般采用不同的光敏材料并且适用于不同的场景^[1-3]。例如, 紫外光电探测器一般采用第三代半导体, 如SiC、ZnO和GaN等宽禁带半导体, 其最重要的应用场景是处于紫外日盲范围的反导

收稿日期: 2022-10-26, 修回日期: 2023-01-06

基金项目: 福建省自然科学基金(2022J01072)

Foundation items: Natural Science Foundation of the Fujian Province, China(2022J01072)

作者简介(Biography): 刘宇(1990.07-), 男, 物理学博士, 硕士研究生导师, 研究领域包括新型光电探测材料与器件、光电探测与成像技术. E-mail: liuyu19@fzu.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: huangf@fzu.edu.cn

Received date: 2022-10-26, revised date: 2023-01-06

与追踪^[2,4];可见光探测器一般采用硅基材料,主要应用于真实场景的彩色成像,是现有摄影产业的基石;红外探测器又区分为短波红外、中波红外和长波红外,一般采用第二代半导体,如PbS、GaAs和In-GaAs等可调谐窄禁带半导体,主要应用于红外夜视、光通讯和国防制导与反导等领域,是应用范围最广的器件类型^[2,4,5];太赫兹探测器则一般借鉴无线电领域的天线阵列结构,由于其分子指纹的识别特性,在生物医学检测和安防具有重要的应用前景^[6-8]。

不同波段的光表现出截然不同的传输、吸收和散射特性,可以反映出目标场景更为丰富的内在信息^[9]。对同一场景的多波段光电探测需求,促进了多光谱联用以及交叉探测技术的发展,例如美国NASA正在研制的“大型紫外/光学/红外勘探者”(The Lager Ultraviolet/Optical/Infrared Surveyor, LUVOIR)探测器^[10]。随着宽谱探测应用场景的不断挖掘,工作在不同波长区域的光电探测系统被证明在转换通信^[11,12]、夜视^[13]、材料识别^[14]、生物医学检测^[15]等方面具有重要的应用价值。由于探测波段的不断拓展以及探测系统的空间和模块数量限制,传统的窄带光电探测器组合联用方案已经不能满足日益复杂的光电探测需求,因此开发具有超宽带探测能力的超宽带光电探测器(Ultra-Broadband Photo detector, UB-PD)逐渐成为本领域的国际前沿热点^[16]。UB-PD一般指能够覆盖紫外、可见光、短波红外、中波红外、长波红外和太赫兹波段中的至少三个波段的PD,现在距离UB-PD的概念提出不过10年时间,但是基于不同材料、不同类型的众多UB-PD已经见诸报道,而且器件的响应度、响应时间、噪声等效功率以及线性动态范围等性能参数也在不断优化^[17]。但是,现有的UB-PD的发展依旧面临诸多挑战,例如响应时间和响应度之间的矛盾、器件综合性能欠缺以及不同波段性能差异显著等问题。

本文首先介绍PD的相关性能评价指标,并对不同PD类型及其工作原理进行了描述。然后根据UB-PD的类型划分,从器件性能指标提升的角度,详细描述了相关器件的发展历程(尤其是近五年的发展过程)、发展现状、挑战以及将来的发展方向。最后,对各种类型的UB-PD的器件性能进行了总结,讨论了不同类型UB-PD的优劣,并给出了未来UB-PD的改进及优化方向。

1 光电探测器的相关性能和类型

1.1 光电探测器的性能

1.1.1 响应度

响应度又称灵敏度,是用来度量光电探测器的输出电信号与输入光功率之间关系的参数,代表了光电探测器的光-电转换能力。探测器的响应度定义为输出均方根(*rms*)电压 V_{ph} 或电流 I_{ph} 与入射的平均光功率 P_{in} 之比,分别用 R_V 和 R_I 表示:

$$R_V = \frac{V_{ph}}{P_{in}} \quad , \quad (1)$$

$$R_I = \frac{I_{ph}}{P_{in}} \quad . \quad (2)$$

1.1.2 噪声等效功率

以输出电流信号为例,光电探测器的输出信号不仅包括信号电流还包含了噪声电流。当入射光的功率持续减小时,信号电流也会持续下降,直至模糊到无法提取,这时信号电流完全被噪声淹没,器件就达到了其对入射光功率值的探测极限。噪声等效功率(Noise Equivalence Power, NEP)也称为最小可测功率,定义为信噪比为1时所需的入射光功率。它可以表示为:

$$NEP = \frac{V_n}{R_V} = \frac{I_n}{R_I} \quad , \quad (3)$$

其中, V_n 和 I_n 分别是1 Hz带宽下的噪声电压和噪声电流。 NEP 的单位是 $W \cdot Hz^{-1/2}$ 。

1.1.3 探测率

只用 NEP 还无法准确比较两个不同结构的光电探测器的性能优劣。为此,增加两个新的参数——探测率 D 和比探测率 D^* 。探测率是探测器在单位功率的入射光光照下获得的信噪比,在数值上等同于 NEP 的倒数,通常用符号 D 表示,其表达式为:

$$D = \frac{1}{NEP} \quad . \quad (4)$$

Jones发现 NEP 和探测率是探测器面积 A_d 和测量带宽 Δf 的函数^[18],因此比探测率定义为:

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{NEP} \quad , \quad (5)$$

D^* 以 $cm \cdot Hz^{1/2} \cdot W^{-1}$ (Jones)为单位,它描述了不同器件的光响应能力。

1.1.4 光电导增益

光电导增益为:

$$G = \frac{\tau_{life}}{\tau_{tran}} \quad , \quad (6)$$

其中, τ_{life} 是载流子寿命, τ_{tran} 是载流子漂移时间, 它取决于沟道长度 l 、载流子迁移率 μ 和施加的偏置电压 V_{bias} :

$$\tau_{tran} = \frac{l^2}{\mu V_{bias}}, \quad (7)$$

G 是单个入射光子产生的载流子数。从方程可以看出, 长载流子寿命可以增加增益, 但意味着器件响应时间增加。

1.1.5 光谱响应范围

探测器的光谱响应范围表征的是探测器能够产生光电响应的波长范围。对于光子探测器而言, 其光谱响应范围受限于禁带宽度, 例如典型的二维碳材料石墨烯的零带隙结构, 就使得其具有很宽的吸收光谱; 而常见的第三代半导体如氧化锌等, 由于其较大的禁带宽度则主要用于紫外波段的光探测^[19]。对于热探测器, 一般能够实现较大的光谱响应^[20]。

1.1.6 响应时间

响应时间描述了光电探测器对入射光的响应速度。当入射光照射到光电探测器之后或者入射光消失之后, 探测器的输出电信号从初始值上升到稳定值或从稳定值下降到照射前的初始值所需要的时间称为响应时间。当用一个光脉冲照射探测器时, 如果脉冲的上升时间和下降时间都很短, 例如方波, 则探测器的输出电信号由于器件的惰性而有延迟。把输出电信号从峰值的 10% 上升到峰值 90% 处所需要的时间定义为探测器上升时间 (t_r), 而把输出电信号从峰值的 90% 下降到峰值的 10% 处所需要的时间定义为下降时间 (t_f)。

1.2 光电探测器的类型

1.2.1 测辐射热计型器件 (Bolometric Effect, BE)

辐射热效应是由于热敏材料吸收光子形成均匀加热从而导致材料电阻率变化的效应, 受辐射热效应支配的光电流随偏置电压线性增加而增加。测辐射热计的关键参数是热阻 $R_h = dT/dP$ (dP 是吸收的入射辐射, dT 是升高的温度), 它决定了器件的灵敏度; 以及热容 C_h , 它们决定了器件的响应时间 $\tau = R_h C_h$, 工作方式如图 1(a) 所示^[17]。

1.2.2 光热电器件 (Photo thermoelectric Effect, PTE)

光热电效应 (塞贝克效应) 是由非均匀照明引起的热电效应。当光斑小于器件通道尺寸时, 局部光照射会在半导体通道中产生温度梯度, 导致不同

部位或两端产生温差 ΔT 。热电电压可以表示为 $V_{PTE} = (S_1 - S_2) \Delta T$, 其中, S_1, S_2 (单位 $V K^{-1}$) 是半导体西侧的塞贝克系数。PTE 和 BE 最重要的区别在于 PTE 产生光电流不需要像光伏器件那样的外部电压, 如图 1(b) 所示。

1.2.3 光电导器件 (Photo conductive Effect PCE)

吸收入射光子能量大于或等于带隙能量的半导体材料内部会产生可以自由移动的电子-空穴对, 导致载流子浓度增加, 半导体电导率增加, 这种现象称为光电导效应。光电导器件工作过程中需要提供外电场, 将光产生的载流子 (电子-空穴对) 分离, 形成光电流, 如图 1(c) 所示。

1.2.4 光伏型器件 (Photo voltaic Effect, PVE)

当光照射 p-n 结时, 样品吸收光子以产生光生载流子 (电子-空穴对)。p 区空穴扩散和 n 区电子扩散形成由 n 区指向 p 区的内建电场, 将光生电子空穴对分离, 导致光生电子在 n 区边界附近积累, 光生空穴在 p 区边界附近积累。它们产生与热平衡 p-n 结的内建电场相反方向的光生电场, 这就是光伏效应。因此, 光在界面层中产生的电子-空穴对越多, 电流就越大, 如图 1(d) 所示。

1.2.5 光门控器件 (Photo gating Effect, PGE)

光电门效应是光电导效应的一种特殊机制, 在光照下, 产生自由电子-空穴对, 如果电子或空穴被捕获在栅极材料陷阱态中, 则带电陷阱态可以充当局部浮栅, 增加沟道载流子浓度。因此, 可以通过这种方式有效地调节电导率。根据栅极材料的陷阱态类型可以分为空穴捕获, 即增加沟道电子浓度, 和电子捕获, 即增加沟道空穴浓度, 如图 1(e) 所示。

2 超宽带光电探测器的研究进展

常见的超宽带光电探测器的探测原理大部分是基于光子探测和热探测。基于光子探测的光电探测器类型有光电导器件、光伏型器件和光门控器件, 而基于热探测的光电探测器类型有测辐射热计和光热电^[17, 21, 22]。除了这些常见的光电探测器类型, 近些年来也发现许多基于其他物理机制的超宽带光电探测器, 例如热相变^[23]、热释电^[24], 以及多种探测机制复合器件^[25-27]。

2.1 测辐射热计型器件

测辐射热计型探测器可以在宽波段的范围内以非制冷模式运行, 因此测辐射热计型光电探测器

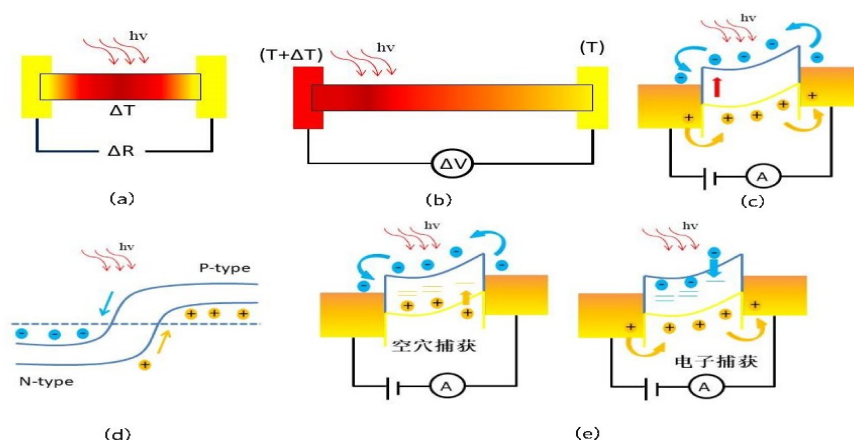


图1 (a) BE 器件原理示意图, (b) PTE 器件原理示意图, (c) PCE 器件原理示意图, (d) PVE 器件原理示意图, (e) PGE 器件原理示意图

Fig. 1 Principle schematic diagrams of (a) BE PD, (b) PTE PD, (c) PCE PD, (d) PVE PD and (e) PGE PD

的探测范围可以衍生到中红外和更长波段区域,并且在红外以上的区域提供超过光子探测器的探测效率,这对于超宽带探测器是非常有用的。然而测辐射热计型光电探测器其响应性能主要受限于材料的电阻温度系数(Temperature Coefficient of Resistance, TCR),同时也受限于焦耳热带来的热噪声和取决于热导率的响应速度,这些因素的存在限制了测辐射热计型光电探测器的发展。

2017年,Cao等人在200至1000 °C的各种退火温度下制备了一系列独立的还原氧化石墨烯(reduced Graphene Oxide, rGO)薄膜,并基于所制备的rGO薄膜,制造了完全悬浮的rGO光电探测器。该课题组为BE PD的发展提供了一种新的思路,利用不同的退火温度改变材料的物性,从而影响其TCR。Cao等通过系统研究退火温度对悬浮rGO光电探测器的*I-V*特性和光响应的影响,发现从紫外(375 nm)到近红外(1064 nm)的宽光谱范围内,随着退火温度的升高,光电探测器的光电流从正变为零再变为负,并且证明这可能源于对退火温度有依赖性的rGO的正光敏反应和Au叉指电极的负光导率之间的竞争。光电探测器的最大响应度出现在1000 °C的退火温度下,在0.5 V的小偏置电压下,最高响应度可达51.46 mA W⁻¹[28],如图2(a)所示。2018年,Liu等人报告了一种基于悬浮碳纳米管(Carbon NanoTube, CNT)薄膜的超宽带BE PD。因为采用的CNT薄膜具有丰富的管径分布和适当的形态(蜘蛛网状),显示出从紫外到太赫兹区域的强吸收光谱。当沟道长度减小到100 μm时,该器件表现出高性能,在0.2 V偏置电压下,紫外响应率高达

0.58 A W⁻¹,真空中响应时间短约150 μs。该课题组借助CNT薄膜较大的TCR和采用悬浮CNT薄膜的方法,实现只需要较小的偏置电压就可以获得较大的响应电流,并且利用较小的沟道,实现较快的响应速度[20],如图2(b)所示。2019年,Xie等人利用具有极低的热导率(6.0~0.6 mW m⁻¹ K⁻¹)、高孔隙率、超低密度(4 mg cm⁻³)和丰富的官能团(导致可调带隙)的还原石墨烯气凝胶薄膜在真空中制备从紫外到远红外的BE PD。在室温下,器件可以检测到来自405 nm激光的低至7.5 μW的激光功率和来自1550 nm激光的5.9 μW的激光功率[29]。Ji等人利用超黑碳气凝胶(Carbon Aerogel, CA)薄膜具有约为0.13~0.15%/K的负TCR的特性制备BE PD,使用厚度约为400 nm的超黑CA薄膜制备器件。由于热电子诱导的强吸收和高效光热转换,在紫外光、可见光、红外线和微波中表现出超宽带响应[30]。

优异的测辐射热计往往归结于材料较低的热导率、较大的比热容、较高的TCR和良好的热隔离。整体而言,测辐射热计型的光电探测器在紫外-近红外波段的劣势明显,而在中远红外和太赫兹波段可能会因为其简单方便的制备过程而具有一定的应用优势,例如近年来发展迅速的微测辐射热计型的红外焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)器件[31, 32]。具有超宽带光电响应的测辐射热计光敏层的热导率可以简单通过表面工程调节,热隔离可以通过良好的热结构实现,但是TCR作为材料的内禀性质难以优化。碳基材料由于光吸收度较大和高的TCR,在制备测辐射热计型光电探测器表现出较大的优势,所以未来基于碳基材料的测辐射热计在

实现超宽带探测的功能上具有重要的价值。

2.2 光热电器件

光热电器件基于光-热-电转换的探测原理,其工作范围可以涵盖 UV、可见光、红外和 THz 波段,因而在长波长辐射检测方面具有独特优势,特别适合于室温下检测长波红外和 THz 辐射。但是光热电器件的光响应时间和热耗散相关,通常这一类型器件的响应速度和响应度较低,和基于测辐射热计原理的超宽带探测器相当,但是其噪声明显小于测辐射

热计。

碳基材料作为常见的光敏层有非常显著的宽光谱吸收率,在光热电领域的运用十分广泛。2019 年, Wen 等人同样利用退火技术来实现材料的物性转变,从而达到最佳的性能。该课题组开发了基于在不同温度(200~1 000 °C)下退火的自支撑 rGO 薄膜的光热电光电探测器,实现从紫外(375 nm)到太赫兹(118.8 μm)区域的超宽带范围的响应。利用 200 °C 下退火的 rGO 薄膜制备的器件显示出最佳性

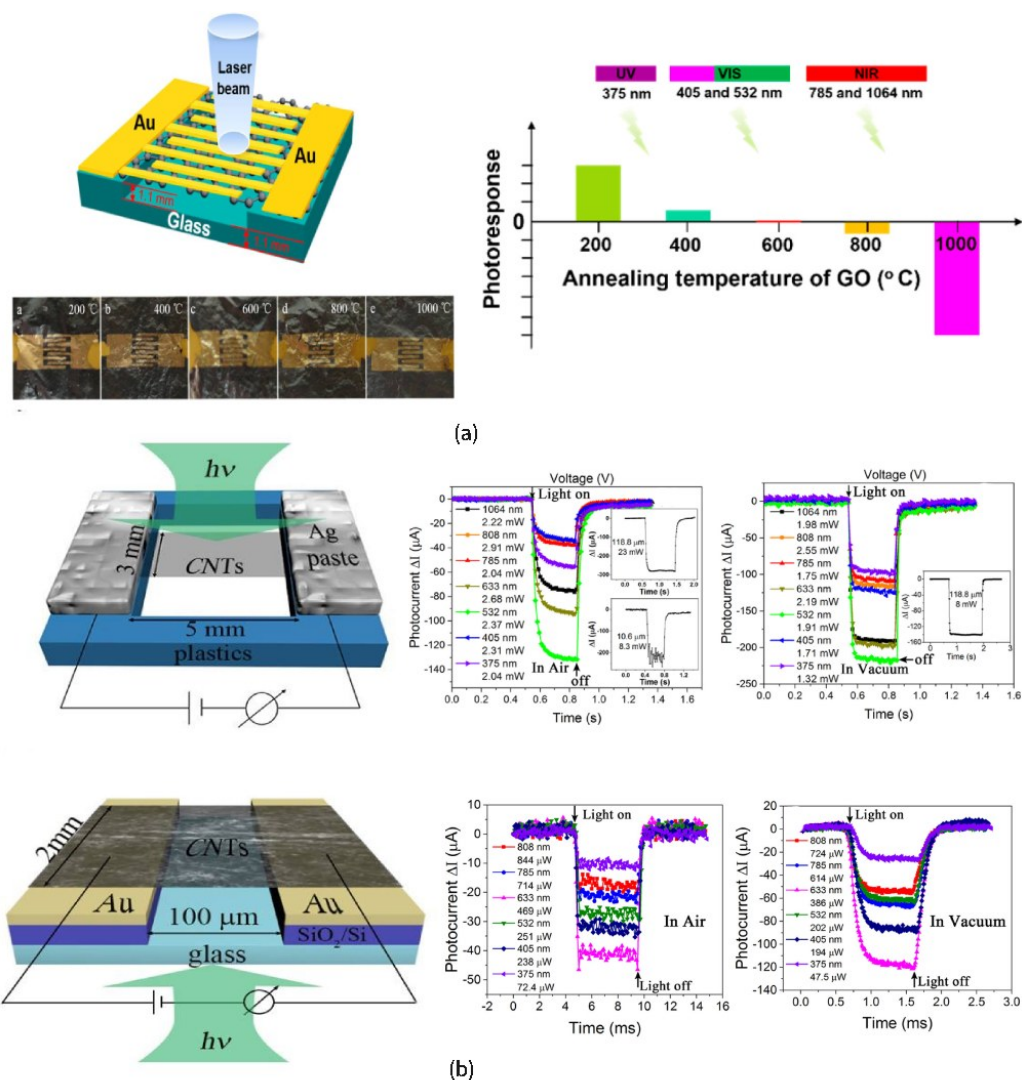


图2 (a)左图为完全悬浮的rGO光电探测器及分别在不同温度下进行热处理的实物图,右图为悬浮的rGO光电探测器不同退火温度下的响应特性,(b)左图为毫米级和微米级CNT薄膜光电探测器结构图,右图为毫米器件和微米器件分别在空气中和真空中的响应曲线

Fig. 2 (a) The left figures show the schematic diagram of suspended rGO photodetector and the optical images of samples after heat treatments under different temperature, the right figure shows the response characteristics of the suspended rGO photodetector at different annealing temperatures, (b) the left figures are the structure diagrams of a millimeter-lever CNT film photodetector and a micron-level CNT film photodetector, the right figures are the response curves of millimeter device and micron device in air and vacuum respectively

能,其在 375 nm 照明下的响应度为 87.3 mV W^{-1} ,响应时间为 34.4 ms ^[33](参见图 3(a))。

除了单一的同质薄膜器件,实际器件中,往往通过 p-n 结或非对称的电极结构等途径实现光热转换。2020 年, Li 等人开发了基于激光刻蚀还原氧化石墨烯(Laser-Scribed reduced Graphene oxide, LSG)/CsPbBr₃的高性能、自供电和柔性 PTE PD,器件在紫外到太赫兹范围内表现出超强的光电探测性能。在零偏置电压下, 405 nm 和 118 μm 的光响应度分别为 100 mA W^{-1} 和 10 mA W^{-1} ,在室温下获得了 18 ms 的响应时间^[34](参见图 3(b))。同年,该团队再次报告了具有不对称电极的三维(3D)石墨烯泡沫(Graphene Foam, GF)的光电探测器,该光电探测器显示了从紫外到微波的超宽带光响应,波长范围为 10^2 至 10^6 nm ,表现出超长宽带特性。器件具有 10^3 A W^{-1} 的高光响应度、43 ms 的响应时间和 80 Hz 的 3 dB 带宽,器件的高性能可归因于 3D GF 光电探测器中的光热电效应^[35]。

对于基于热效应的 PTE PD,如何实现有效的光热转换和减少热耗散是异常重要的。2021 年, Hu 等人报告了自供电悬浮钯-还原氧化石墨烯-钛(Pd-rGO-Ti)光电探测器。通过使用不同的退火温度来改 rGO 薄膜的性质,并分别通过蒸发钯和钛来实现 rGO 薄膜的 p 型掺杂和 n 型掺杂,从而能够制备基于 rGO 薄膜的 PTE PD。该课题组通过退火技术获得最优性能的 rGO 薄膜,并且采用悬浮法制备器件,极大地减少了热耗散,增强光热转换效率,由此提升探测器性能。该探测器在 375 nm 至 118.8 μm (2.52 THz) 的宽带照明波长范围内具有出色的光电响应。同时,通过改变通道宽度、激光光斑照射位置和实验大气压获得了最佳的响应性能,探测器的最大响应度为 142.08 mV W^{-1} ,响应时间约为 100~200 ms^[36](参见图 3(c))。2022 年,同课题组的 Liu 等人展示了一种具有复合纳米结构的高性能、超宽带光电探测器,该复合纳米结构使用悬浮的 CNT 薄膜,并把钛和钯沉积在薄膜上。在该器件中,将钛和钯蒸镀于 CNT 薄膜分别提供了 n 型掺杂和 p 型掺杂,并且沉积的金属纳米颗粒还提供了增强的热局部化效果。Liu 等人通过使用塞贝克系数相较于 rGO 薄膜更大的 CNT 薄膜,实现了器件的极大优化。器件表现出卓越的整体性能,包括紫外(UV)到太赫兹(THz)波段的响应范围、 157.9 V W^{-1} 的高响应度、7 ms 的短响应时间、30 dB 的大 LDR(linear dynamic

range)、 $0.05 \text{ nW Hz}^{-1/2}$ 的小 NEP 和大的 $5 \times 10^8 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 的比探测率^[37]。同年,该课题组的 Lv 等人通过范德华力将银纳米结构薄膜和 CNT 薄膜连接起来,形成异质结结构的光电器件,显示出优异的光热和光电转换性能。当异质结受到波长从紫外到太赫兹的激光照射时,局部温差和输出光电压迅速增加,最大温差达到 215.9 K。器件的光热响应和光电响应取决于激光的波长,分别为 175~601 K W^{-1} 和 $9.35 \sim 40.4 \text{ mV W}^{-1}$ 。Lv 等人还证明了局部表面等离子体能够增强碳纳米管的光吸收,且输出光电压受塞贝克效应支配^[38]。

除了碳基材料相关的光热电研究外,近几年来关于钙钛矿、拓扑绝缘体、EuBiSe₃ 单晶等相关材料在光热型光电探测器上的研究也深受关注。2019 年, Wang 等人报告了一种由 EuBiSe₃ 单晶合金制成的 PTE PD,该器件显示了从紫外(375 nm)到太赫兹(163 μm)的室温自供电光响应。由于 EuBiSe₃ 的大 TCR,在没有任何偏置电压的情况下,由入射(未吸收)功率得出的光电压响应度在 405 nm 处达到 1.69 V W^{-1} ,即使在太赫兹频率下也超过 0.59 V W^{-1} ,噪声等效功率低于 1 nW Hz^{-1} ,响应时间约为 200 ms^[39]。同年, Lu 等人展示了一种基于还原型 SrTiO₃(r-STO)的 PTE PD,其响应度为 1.2 V W^{-1} ,宽带光谱响应范围为 325 nm 至 10.67 μm 。r-STO PTE 光电探测器的高性能归因于其固有的高 TCR 和红外区域的声子增强光响应^[40](参见图 4(a))。2020 年, Li 等人报告了一种基于 CH₃NH₃PbI₃(MAPbI₃)和聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚(4 苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)复合材料的新型快速响应和自供电 NIR 和 THz PTE PD,在 1064 nm 和 2.52 THz 的激光照明下,该器件在室温零偏压下显示出稳定且可重复的光响应^[41](参见图 4(b))。Niu 等人开发了一种基于拓扑半金属 HfTe₅ 的超宽带光热自供电探测器。光响应在紫外(375 nm)到太赫兹(118.8 μm)波长的超宽带范围内,在室温下,其所有检测波长的响应度均大于 1 V W^{-1} ,响应时间短至 1 ms^[42]。Wu 等人报道了一种 NbS₃ 制成的 PTE PD,该器件在紫外到太赫兹范围内表现出优异的性能。对于所有的探测波长,器件的光响应度均大于 1 V W^{-1} ,而响应时间小于 10 ms^[43](参见图 4(c))。2021 年, Li 等人制备了基于 PdSe₂ 薄片的 PTE PD,其具备 405~940 nm 的光电响应。探测器在波长为 532 nm 的激光下获得了 4 μs 的响应速度,且由于 PTE 效应,可实现

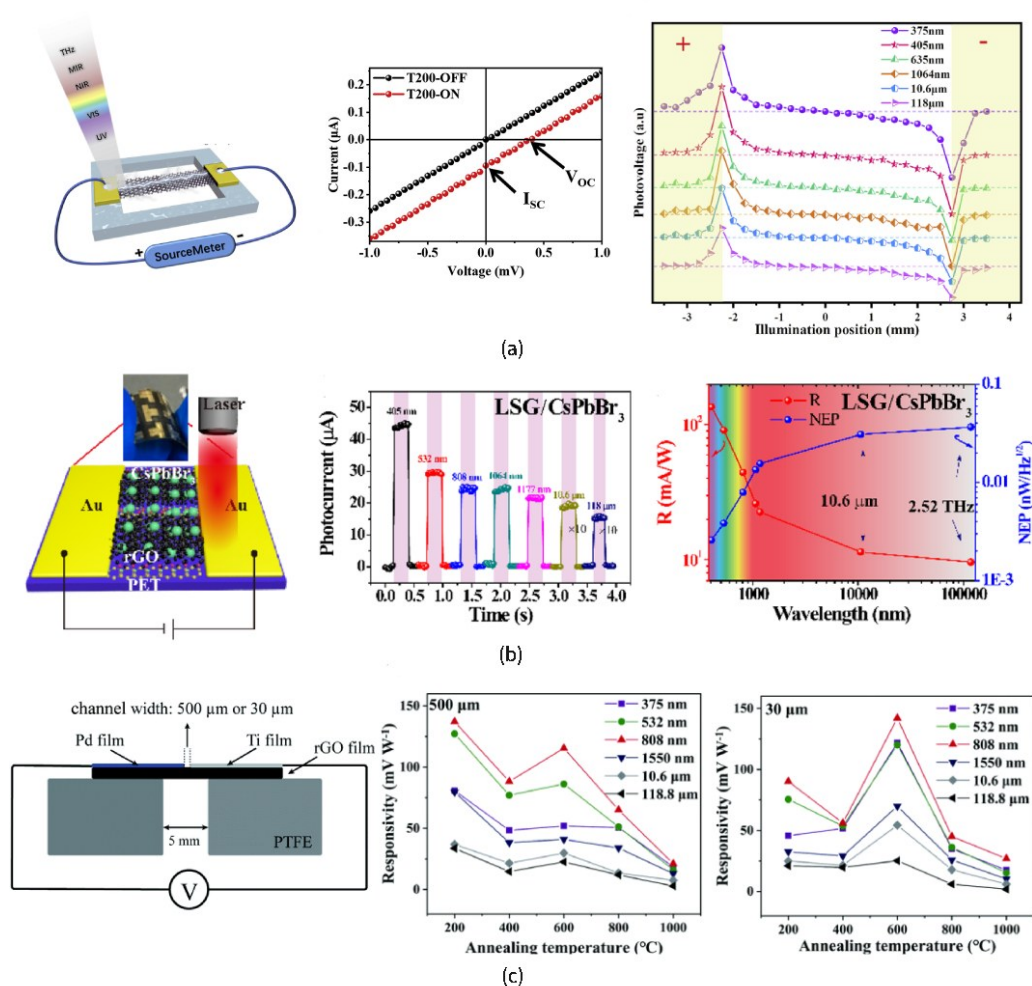


图3 (a)基于自支撑rGO薄膜的PTE UB-PD,及其 $I-V$ 曲线图和扫描光电压结果,(b)基于LSG/CsPbBr₃的PTE UB-PD,及其多波长光开关光电流曲线和光谱响应图,(c)悬浮Pd还原氧化石墨烯-Ti(Pd-rGO-Ti)光电探测器,及其不同沟道下的退火温度对器件响应度的影响

Fig. 3 (a) PTE UB-PD based on self-supported rGO films, and its $I-V$ curve and results of scanning photovoltage, (b) PTE UB-PD based on reduced graphene oxide/CsPbBr₃, and its multi-wavelength photocurrent curve and spectral response, (c) suspended Pd-rGO-Ti photodetector and multi-wavelength responsivities under different annealing temperature for devices with different channel widths

1.3 mA W⁻¹的响应度^[44]。2022年,Gu等人制造了基于无铅Cs₃Cu₂I₅纳米层薄膜的PTE PD,该薄膜使用双源共蒸发技术制备。PTE PD的自供电光响应波长范围从可见光(532 nm)到近红外(980 nm)再到太赫兹(119 μm),在532 nm、980 nm和119 μm激光照射下,器件的最大响应度分别为49.2、1.1和3.7 mA W⁻¹^[45](参见图4(d))。

虽然光热电器件和测辐射热计型器件都是基于热探测原理,想要获得优异的响应性能,二者都需要较低的热导率、高的光吸收、大的光热转换能力。但是光热电器件与测辐射热计不同的是,光热电器件原则上可以在零电流或零电压下工作,而

无需消耗外部功率,这样可以减小偏压带来的散粒噪声以及由焦耳热产生的额外的热噪声,因此光热电器件在超宽带光电探测器的研究颇受关注。但是由于极大地依赖于光热转换,光热电器件的响应速度较于光子探测器而言往往较慢,并且响应度受限于材料的塞贝克系数和热导率。热导率高,材料达到热平衡的时间短,但光敏层的温差减小,不利于提高响应度,所以需要通过提高塞贝克系数抵消由热导率增加导致的低温差。

2.3 光电导器件

光电导器件的实质是一个光敏电阻,相应的 $I-V$ 曲线形状与暗电流相同。为实现较大的响应电

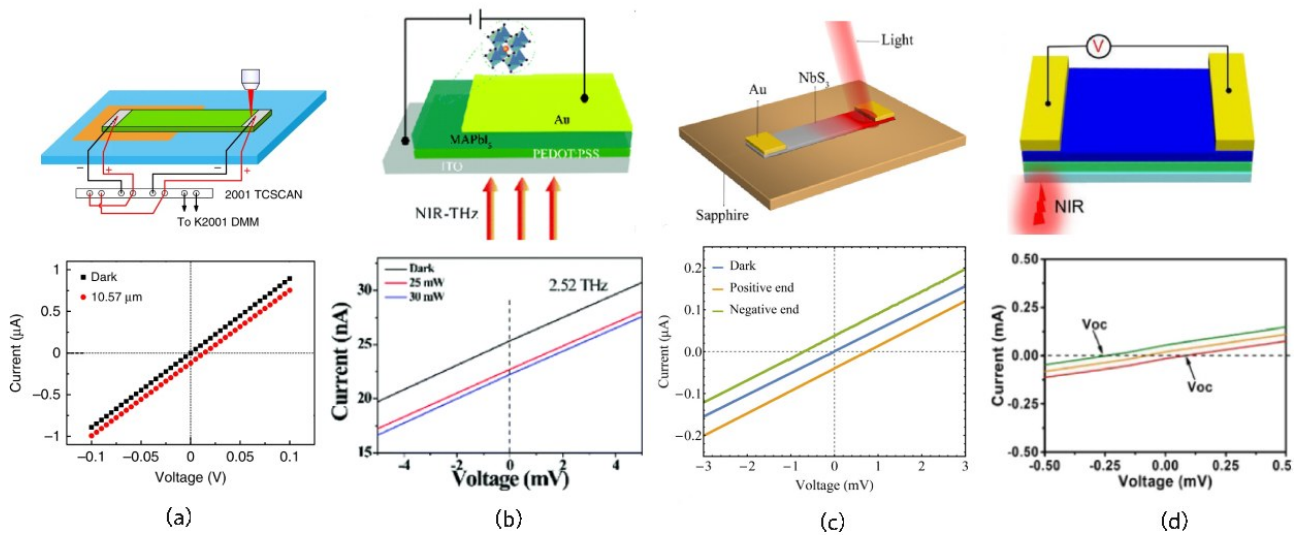


图4 (a)基于还原型SrTiO₃(r-STO)的PTE光电探测器及其*I-V*曲线图,(b)基于CH₃NH₃PbI₃(MAPbI₃)和聚(3,4-乙炔二氧噻吩):聚(4-苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)复合材料的光电探测器及其IV曲线图,(c)基于NbS₃的光热电探测器及其IV曲线图,(d)基于无铅Cs₃Cu₂I₅纳米层薄膜的PTE光电探测器及其IV曲线图

Fig. 4 (a) PTE PD based on reduced SrTiO₃ (R-STO) and its *I-V* curve, (b) PDs based on CH₃NH₃PbI₃ (MAPbI₃) and poly (3, 4-ethylenedioxythiophene): poly (4 styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) composites and their *I-V* curves, (c) NBS₃-based PTE PD and its *I-V* curves, (d) PTE PD based on lead-free Cs₃Cu₂I₅ nanolayer film and its *I-V* curves

流,需要给予较大的偏置电压,大的偏压往往会产生大的暗电流。由于器件的响应速度和材料的载流子迁移率密切相关,所以光电导器件的响应速度一般来说能够达到微秒甚至纳秒。

光电导探测器件的响应机制是当比带隙能量大的光子被吸收,所产生电子-空穴对改变了半导体的电导率,引起电流和电压的变化,因此如何有效地分离电子-空穴是提高光电导型光电探测器的主要研究方向。对于结合能较大的光电材料,需要增大电离能,因此利用其他材料复合形成异质结,增强电子-空穴对的解离,是光电导器件性能提升的有效方法。2017年,Zhang等人利用NaYF₄:Yb,Er QDs对α-CsPbI₃ QDs进行表面改性后制备横向结构光电探测器,实现了从UV到可见光到NIR(260~1100 nm)的宽带响应,且器件具有良好的光响应性(1.5 A W⁻¹)、高开/关比(高达10⁴)和较短的上升/衰减时间(小于5 ms)^[46]。

虽然形成异质结是增强光电导的一个重要方法,但是对于光电导器件而言,利用窄带隙材料制备器件亦为重要,单一的材料制备光电器件减少了复合材料的制备过程,从而提升效益。2017年,Niu等人利用EuSbTe₃制备PCE PD,器件具有紫外到太赫兹的超宽光谱响应。EuSbTe₃探测器拥有8 A W⁻¹

的光响应度,在532 nm激光下具有150 pW Hz^{-1/2}的噪声等效功率和在118.8 μm激光下具有0.6 nW Hz^{-1/2}的噪声等效功率^[47],如图5(a)所示。2018年,Niu等人制备基于新型材料EuBiTe₃的宽带PCE PD。器件在室温下的工作波长范围从紫外(370 nm)到近红外(1550 nm)。实验结果表明,在紫外、可见光和近红外区域的光电响应度大于1 A W⁻¹,并且记录的响应时间为40 ms^[48],如图5(b)所示。

通过在器件表面设计金属光栅、阵列或设计光学微腔等结构的方法能够增加光吸收,并且能够拓宽响应波段^[49]。2018年,Cakmakyapan等人提出了基于镀金石墨烯纳米条纹的光电导型纳米结构,它同时实现宽带和快速光探测。探测器在0.8 μm的波段下具有0.6 A W⁻¹的光响应度,在20 μm的波段下有11.5 A W⁻¹的光响应度^[50]。2022年,Wang等报道了一个完全耗尽的自对准MoS₂-BP-MoS₂ vdW(van der Waals)异质结,异质结构设置在底部镜面电极上,以增强光吸收。这种新型光电探测器在MWIR区域具有0.77 A W⁻¹的光响应度和2.0×10⁻¹⁴ W Hz^{-1/2}的低噪声等效功率。在室温下,MWIR区在黑体辐射下的峰值比探测率为8.61×10¹⁰ cm Hz^{1/2} W⁻¹。此外,该器件在可见光和短波红外波段均具有4 μs的快速响应^[51]。

对于超宽带探测器而言,另一种有效的拓宽带宽的方法是利用其他材料将紫外或者红外转换为可见光从而被材料进一步吸收,达到超宽带响应的目的。2022年,Ding等人分别采用UV发光聚光器(Luminescent Concentrators, LC)、碘基钙钛矿量子点(Perovskite Quantum Dots, PQD)和有机体异质结(Bulk HeteroJunction, BHJ)作为UV、可见光和NIR光敏层,以构建一个宽带异质结PD。通过 Er^{3+} 掺杂可以显著提高 CsPbI_3 PQDs的光电性能和稳定性,这主要是由于降低了缺陷密度、提高了电荷迁移率、增加了形成能、容差因子等。 $\text{CsPbI}_3:\text{Er}^{3+}$ PQDs的窄带隙作为PD的可见光敏感层,并且考虑到可匹配的能隙,选择BHJ(BTP-4Cl:PBDB-TF)作为近红外吸收层,制备 $\text{CsPbI}_3:\text{Er}^{3+}$ PQDs混合结构。最后,UV LC将紫外光(200~400 nm)转换为可见光(400~700 nm),进一步被 $\text{CsPbI}_3:\text{Er}^{3+}$ PQD吸收^[52]。

硒化物在光电导领域的应用是十分常见的。2020年,Xu等人报告了一种基于高质量单硒化锡(SnSe)薄膜的新型UB-PD,该探测器是将 SnSe 薄膜剥离并转移到聚对苯二甲酸乙二醇酯(PolyEthylene Terephthalate, PET)基底上制备。探测器能在光电导模式下对UV-Vis-NIR进行灵敏检测,并在室温下对长波红外显示异常响应。在 $10.6 \mu\text{m}$ 的中红外光下,制造的光电探测器表现出 0.16 A W^{-1} 的光响应度^[53],如图5(c)所示。2022年,Nawaz等人制备了

一种通过蒸汽传输途径获得的多组分合金一维镉-硫-硒($\text{Cd}_x\text{Se}_{1-x}$)微纳米结构的高性能PD,该器件具有卓越的光响应度($5.8 \times 10^4 \text{ A W}^{-1}$),比原始 CdSe 纳米带PD的响应度高几个数量级,不仅能如此,该器件还具有高比检测率(2×10^{15} Jones)、高光增益(1.2×10^5)、大外部量子效率(EQE, $1.4 \times 10^7\%$)和快速响应速度(13 ms),且能够实现200~800 nm的宽带范围的响应^[54],如图5(d)所示。

光电导器件和测辐射热计都需要工作在一定的偏压下,一般情况下,光电导器件的NEP与偏压负相关,而响应度与偏压正相关。因为不同器件工作在不同偏压下,会导致器件之间的纵向比较无法准确进行。另外,部分研究工作中所展示的器件性能参数缺少规范的评定标准,在低偏压下测量NEP,而在高偏压下测量响应度,这也会对本领域其他研究者产生误导。光电导器件作为光子器件,相比于热效应器件,具备较快的响应速度和较大的响应度,对于那些需要高灵敏度的探测任务而言,光电导器件是一个合适的选择。但是由于需要施加偏压,相比于自供电器件,光电导器件会表现出较大的暗电流和功耗。未来,光电导型的超宽带光电探测器需要克服其不同波段显著的响应性能差异问题,这有可能通过设计特定的复合结构解决。

2.4 光伏型器件

相比于热探测原理的光电器件,光伏型器件的

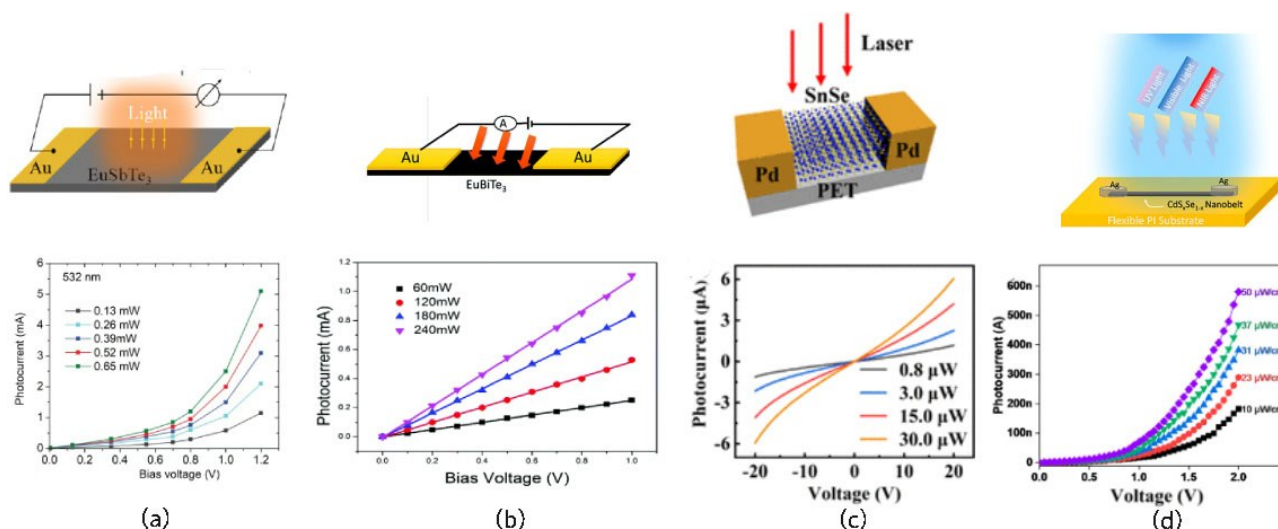


图5 (a)EuSbTe₃光电导型光电探测器及其响应电流曲线,(b)EuBiTe₃光电探测器及其响应电流曲线,(c)SnSe/PET光电探测器结构示意图及其响应电流曲线,(d)基于多组分合金一维镉-硫-硒($\text{Cd}_x\text{Se}_{1-x}$)微纳米结构光电探测器及其响应电流曲线

Fig. 5 (a) The PCE photodetector based on EuSbTe₃ and its response current curve, (b) the schematic diagram based on EuBiTe₃ photodetector and its response current curve, (c) the schematic diagram of SnSe/PET photodetector structure and its response current, (d) one-dimensional $\text{Cd}_x\text{Se}_{1-x}$ micro-nano-structure photodetector based on multi-component alloy and its response current curve

响应速度更快,灵敏度更高。光子探测器的作用机理分为两个部分,首先是材料受光激发产生电子-空穴对,这个过程受到材料的带隙影响,并最终能够影响探测器的光谱响应范围和光谱吸收率;第二个部分是电子-空穴对在外加电场的作用下解离成自由的电子和空穴,这个过程受到探测器的结构影响,并且决定探测器的灵敏度和响应度。常见的光伏型器件结构包括p-n结、肖特基结和异质结等。

石墨烯具有独特的无间隙能带结构,因此其可以在非常宽的光谱范围(UV到THz波段内通过光激发产生电荷载流子(电子-空穴对),从而实现宽带光吸收,因此近年来关于石墨烯异质结PVE PD陆续被报道^[55]。2014年,Cao等人通过在SiNW(Si nanowire)阵列顶部简单滴铸GO(Graphene Oxide)纳米片悬浮液,然后进行热处理来形成rGO-SiNW阵列异质结PD,探测器在室温下对VIS(532 nm)、NIR(1064 nm)、MIR(10.6 μm)和2.52 THz(118.8 μm)辐射具有光响应性^[56],这是具有可见光至太赫兹波响应能力的UB-PD首次被报道。2017年,Xu等人制备了石墨烯-InSb异质结构PD,设备可以检测从可见光到远红外区域的波段,在1.7 μm 的波长下表现出70 mA W^{-1} 的响应度^[57]。

压电效应在增强光电探测器响应度上被视为一种有效且简单的途径,2018年,Yu等通过旋涂法制备了CdS纳米棒阵列/rGO薄膜异质结,提供了从紫外到红外区域(365~1450 nm)的超宽带自供电光响应,与单组分CdS纳米棒阵列或rGO薄膜单独相比,CdS纳米棒阵列/rGO薄膜异质结表现出快速和稳定的自供电光响应(响应时间小于1.7 ms)。当施加4%的压缩应变时,光电流在紫外辐射下的响应可增加11%以上,这归因于应变诱导的压电势引起CdS和rGO之间的肖特基势垒高度的改变^[58]。等离子体增强效应对于增加超宽带光电探测器的光吸收是一个非常好的策略,同时可以拓宽器件的光吸收带宽^[59-63]。2019年,Sarkar等人通过在p-Si上集成CQD、rGO和AgNPs(Ag nanoparticles)等材料制备PVE PD,通过用rGO和AgNPs浸渍CQD来提高光响应,rGO的优化掺入有助于增强光响应,而AgNPs由于局部表面等离子体共振而增强了光吸收。最终器件在紫外的最高响应度和检测率分别为1 A W^{-1} 和 2×10^{12} Jones^[64],如图6(a)所示。同年,该团队制备了无机-有机(GaN/rGO:Ag NP)混合异质结PD,在360 nm光的照射下,PD表现出优

异的光响应,具有高开/关比(10^4)、高响应度(0.266 A W^{-1})和高比探测率(2.62×10^{11} Jones)。利用Ag NPs对rGO的还原效应及其局部表面等离子体共振,增强了器件在NIR和可见区域的响应,此外由于异质结处的高内建电位差,器件在整个紫外至近红外(360~980 nm)范围内具有优异的响应^[64]。

拓扑绝缘体(TI)由于其类似狄拉克的表面状态,理论上能够实现从红外到太赫兹的宽带光电探测。2015年,Yao等制备了一种基于TI Bi_2Te_3 -Si异质结构的垂直构造的UB-PD,器件具有从紫外(370.6 nm)到太赫兹(118 μm)的响应范围。在偏置电压条件下,可见光响应度达到1 A W^{-1} 。作为一种自供电PD,它具有接近 $7.5 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ W}^{-1}$ 的极高光敏度和高达 $2.5 \times 10^{11} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 的比探测率^[65],如图6(b)所示。2019年,Yang等人制造了一种基于n型3D TIs Bi_2Te_3 结合p型并五苯薄膜的自供电无机/有机异质结PD。 Bi_2Te_3 /并五苯异质结PD在450至3500 nm范围内表现出快速的宽带响应。光电探测器优化后的响应度达到14.89 A W^{-1} ,响应时间为1.89 ms,超高外量子效率达到2840%。此外,在中红外3500 nm处,器件表现出1.55 A W^{-1} 的响应度^[66],如图6(c)所示。

WS_2 、 PtSe_2 和 WSe_2 在内的层状过渡金属二硫化物由于具有高载流子迁移率、可调带隙、高稳定性和柔韧性等独特优势,是光电器件的优秀潜在候选者。2018年,Zeng等人报道了基于垂直排列的 PtSe_2 -GaAs异质结的高性能PD,该探测器表现出从深紫外到近红外光的宽带光响应,峰值光响应在650至810 nm波段。光电探测器在808 nm光照和零偏置电压下测量的开光比和响应度为 3×10^4 和262 mA W^{-1} ,响应时间为5.5/6.5 μs ^[67]。同年,该团队设计 PtSe_2 /Si纳米线阵列异质结构PD,其响应度为12.65 A W^{-1} ,在-5 V的偏压下具有 $2.5 \times 10^{13} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 的比探测率^[68],如图7(a)所示。2018年,Zhang等构建了由多层 PtSe_2 和Cs掺杂的 FAPbI_3 组成的异质结,它可以在从紫外到近红外区域的宽波段范围用作自驱动PD,异质结器件表现出出色的光敏特性,具有 5.7×10^3 的大开关比、117.7 mA W^{-1} 的响应度和 $2.91 \times 10^{12} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 的良好比探测率(零偏压下)^[69],如图7(b)所示。2020年,Jia等报告了一种 WS_2 /GaAs II型范德华异质结组成的高灵敏度室温PD,它对200至1550 nm的宽带光照射表现出明显的光响应。器件表现出约59.7 pA的低噪声电

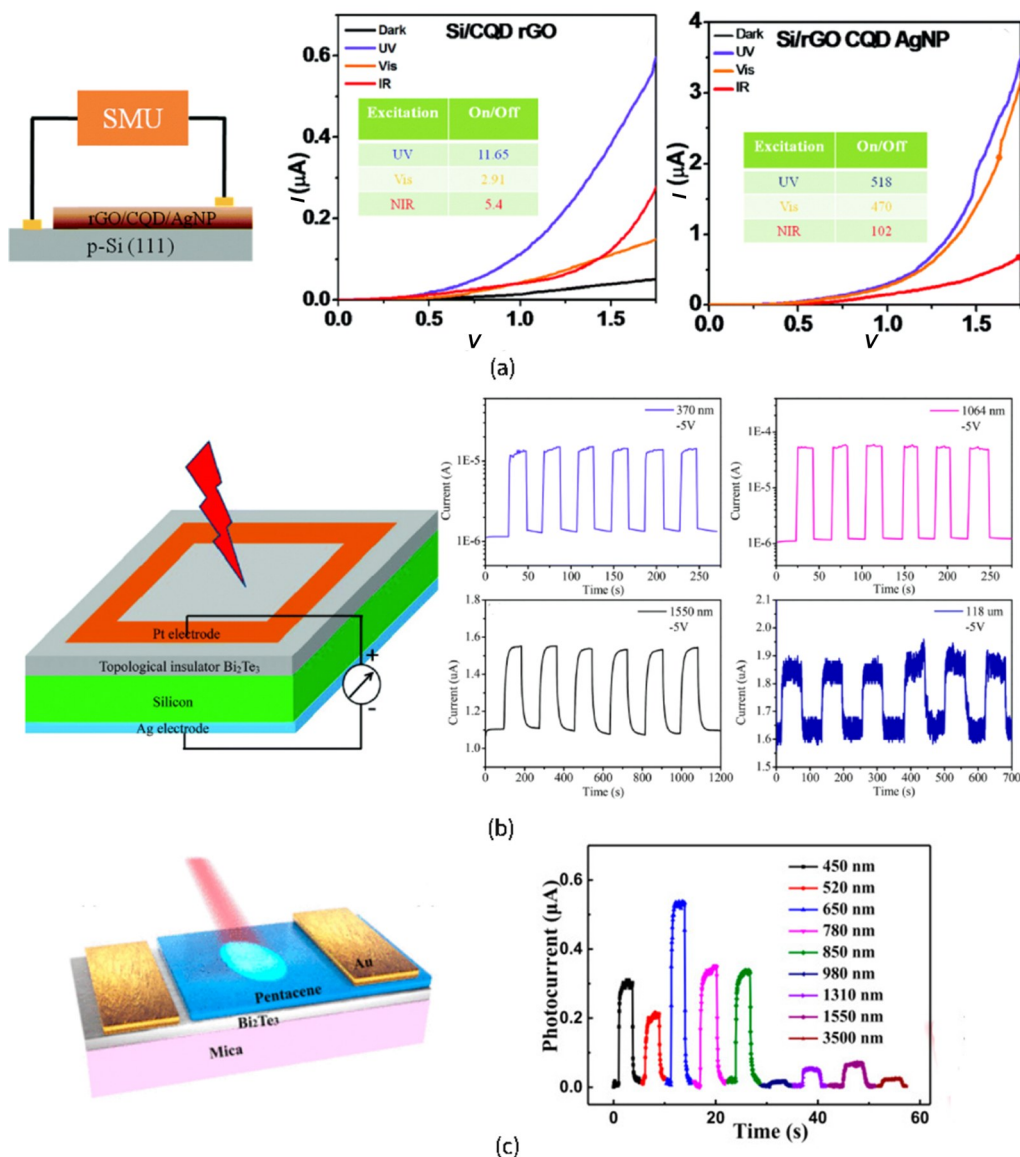


图6 (a)p-Si上集成CQD、rGO和AgNPs等材料制备PVE PD,及其I/V曲线对比,(b)基于TI Bi₂Te₃-Si垂直异质结构的UB-PD,及其不同波段下的响应电流,(c)Bi₂Te₃/并五苯异质结PD,及其不同波段下的响应电流

Fig. 6 (a) Heterojunction PD by integrating CQD, rGO and AgNP materials with p-Si, and I/V curve comparison, (b) UB-PD with vertical heterostructure based on TI Bi₂Te₃-Si, and its response current in different wave bands, (c) Bi₂Te₃/pentacene heterojunction PD, and its response current in different wave bands

流、527 mA W⁻¹的响应度、10⁷的超高开关比、1.03×10¹⁴ cm Hz^{1/2} W⁻¹的大比探测率、最小检测光强度为17 nW cm⁻²,外部量子效率(EQE)达到80%^[70],如图7(c)所示。

以上几种材料因为其独特的物理性质,在光电探测器领域被大量的研究,但是还有一些材料通过构建异质结或者是p-n结后有着优异的效果,也被运用在光伏型光电探测器。2015年,Zhou等人通过在n型Si分层结构上涂敷一层超薄的氧化钼(MoO_{3-x})空穴选择层来制造PVE PD,通过使用甲基

钝化界面获得了优异且稳定的光响应性能。异质结PD对300至1100 nm的宽光谱表现出高灵敏度。器件显示出高比探测率(6.29×10¹² cm Hz^{1/2} W⁻¹)和快速响应时间(1.0 μs)^[71],如图7(d)所示。2017年,Kumar等将简单的AgNWs(Ag nanowires)溶液旋涂在Si衬底上以形成肖特基结,从而制备PVE PD。器件具有200至800 nm波长范围的响应,且具有上升和下降时间分别为784 ns和92 μs的快速响应能力^[72],如图7(e)所示。2019年,Chen等人报道了通过简单的两步工艺(旋涂和硒化处理)首次制备p-

CuIn_{0.7}Ga_{0.3}Se₂纳米粒子/n-Si纳米线阵列核壳结构,并将其集成到自驱动PD中。探测器对从紫外光到可见光到近红外光的宽波长范围敏感,具有高达 1.6×10^{13} Jones的高比探测率、 0.33 A W^{-1} 的响应度和 $356 \mu\text{s}$ 的短响应时间^[73]。2020年,Liu等展示了基于半串联结构的有机光电探测器(Organic Photo Detectors, OPDs),半串联结构直接将两个活性层叠加,使器件具有互补的吸收光谱,实现宽光谱响应。它提供了从紫外到红外范围的响应光谱,而550–950 nm光谱范围内的外部量子效率保持70%。高电子和空穴注入势垒可实现在 -0.1 V 时低至 $6.51 \times 10^{-5} \text{ mA cm}^{-2}$ 的暗电流密度,从而在70 Hz时产生 $3.91 \times 10^{-13} \text{ A Hz}^{-1/2}$ 的噪声电流,比单结光电探测器低近三倍^[74]。同年,Li等展示了基于MAPbI₃和有机BHJ(Bulk Hetero Junction)溶液处理的UB-PD,该探测器实现了 $1 \mu\text{m}$ 的宽光谱响应,在850 nm处的最高外部量子效率约为54%,超快响应速度为5.6 ns, LDR为191 dB^[75],如图7(f)所示。

近年来新发展一类新型宽光谱响应光子探测器,它们是基于横向光伏效应的CdTe/PbTe和ZnTe/PbTe异质结二维电子气探测器,具有室温工作、宽响应光谱、高速、高灵敏和低噪音等优势,响应波长覆盖从可见光到中波红外($4.0 \mu\text{m}$)^[76, 77];并且与常规的PbTe pn结光伏探测器相比^[78],工作温度从77 K提高到了室温工作。

光伏型超宽带光电探测器的发展始终受限于两个关键问题:(i)如何有效地将电子-空穴对分离为自由载流子,以及(ii)如何增加器件的光吸收。针对于这两个问题,基于光伏型的超宽带光电探测器在未来的发展方向将注重于形成高势垒的异质结和制备具有垂直结构的探测器。由于光伏型光电探测器在零偏压下能够运行,可以制备快速响应的自供电光电探测器,并且能够实现低噪声探测,因此光伏型超宽带光电探测器的研究近年来成果瞩目。

2.5 光门控器件

光电门效应通过在空穴(电子)复合前将通道中的电子(空穴)不断循环传输,从而实现超高的光学增益。然而,由于电荷转移和俘获过程较慢,因此相较于其他两类光子型的PD,基于光电门效应的PD响应速度通常比较慢。

依赖于强光吸收、有效的电荷分离、长载流子寿命和通道中的高载流子迁移率,具有高增益的光

门控器件在光检测方面具有极大的灵敏度。2017年,Ni等报告了一种B掺杂的Si QD/石墨烯PGE PD,通过B掺杂的Si QD的局域表面等离子体共振(Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR)增强了石墨烯的MIR吸收。B掺杂的Si QD在UV到NIR区域中基于电子跃迁的光学吸收还导致了石墨烯的光门控。QD/石墨烯混合PGE PD在UV到MIR的超宽带范围内具有超高响应度(10^9 A W^{-1})、超高增益增益(10^{12})和比探测率(高达 10^{13} Jones)^[79](参见图8(a))。同年,Xie等报告了基于钙钛矿/有机半导体垂直异质结的低压高增益PGE PD,该PD从紫外到近红外的宽带区域显示出 10^9 A W^{-1} 的超高响应和 10^{14} Jones的比探测率^[80](参见图8(b))。

增强光电响应的一种方法是使器件吸收更多的入射光,而二维平面的光吸收较三维立体而言明显较低,因此Deng等人报告了一种将二维(2D)掩埋栅GFET(Graphene Field-Effect Transistors)转变为三维(3D)管状GFET的自卷起方法。由于管状谐振微腔内的光场增强,光-石墨烯相互作用面积增加,因此所得3D GFET的光响应性显著提高。3D GFET PD在紫外、可见光、中红外和THz区域实现了室温光电探测,紫外和可见光的光响应度均超过 1 A W^{-1} ,在3.11 THz时的光响应度为 0.232 A W^{-1} ^[81](参见图8(c))。另一种增强光吸收的方法是添加量子点,2021年,Groteven等人通过采用HgTe QD和石墨烯制备了QD/石墨烯PGE PD,器件的响应范围高达 $3 \mu\text{m}$ 。在 $2.5 \mu\text{m}$ 波长和80 K温度下的比探测率为 $6 \times 10^8 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ^[82](参见图8(d))。

二维贵金属过渡金属硫化物(Noble-Transition-Metal Chalcogenides, NTMCs)具有超高的空气稳定性、大的带隙可调谐性和高的光响应性,是一类极有前途的光电材料。2021年,Yu等人利用二维贵金属过渡金属硫族化物NTMC:Ta₂PdS₆制备PGE PD,器件在波长为633 nm,功率为 0.025 W m^{-2} 的激光照射下具有 $1.42 \times 10^6 \text{ A W}^{-1}$ 的超高光响应度、 $7.1 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 的比探测率和 2.7×10^6 的高光电导增益^[83]。

实现超宽带光电探测器高灵敏度的关键策略是实现高增益,传统的高增益光电探测器,包括雪崩光电二极管和光电倍增器,需要严格控制其复杂的制造过程。光门控效应与场门控效应类似,是指通过光照明对载流子密度调制,从而对通道中的电导率进行调制,可以实现非常高的增益效果,而且

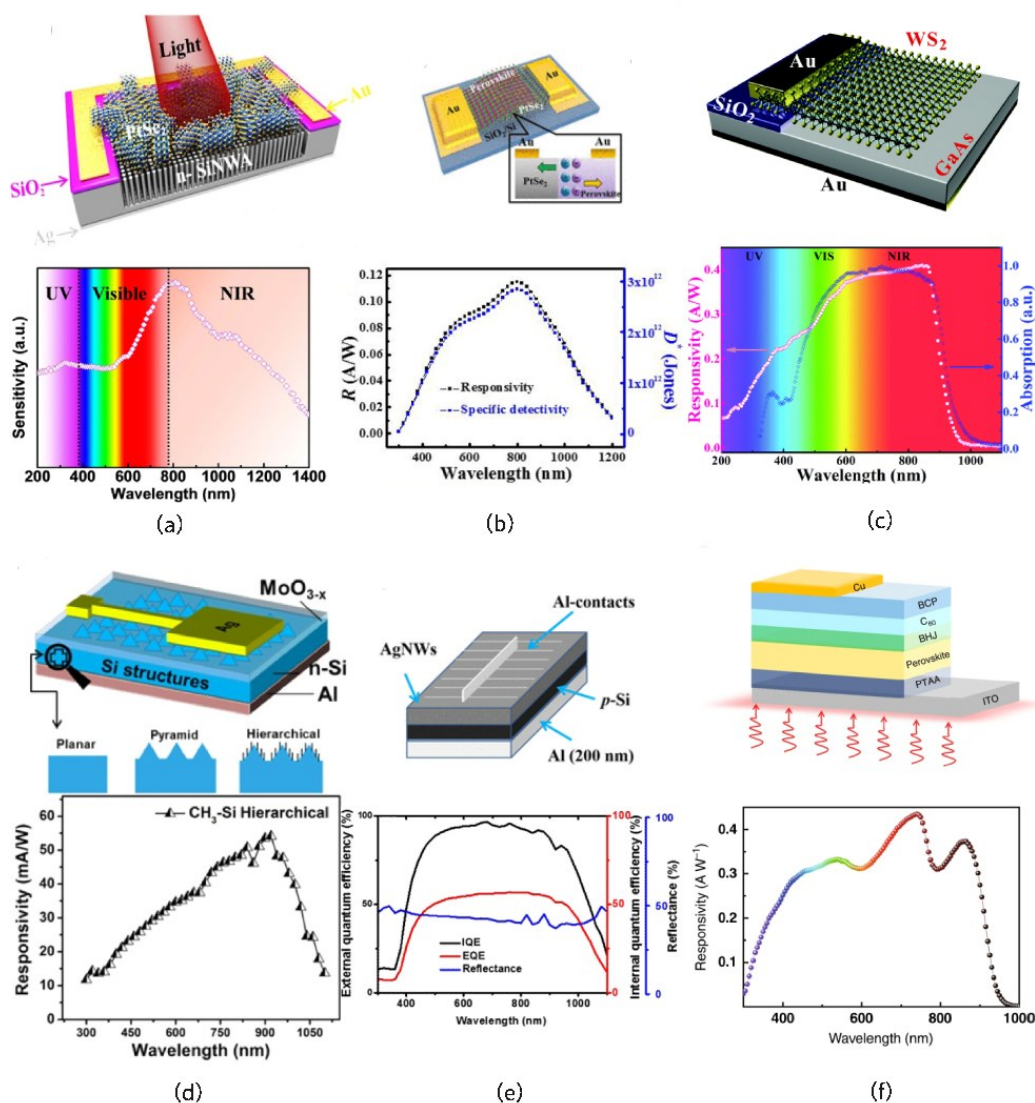


图7 (a)基于垂直排列的 PtSe_2 -GaAs异质结的UB-PD,及其光谱响应图,(b)多层 PtSe_2 和Cs掺杂的 FAPbI_3 组成的UB-PD,及其光谱响应图,(c) WS_2 /GaAs II型范德华异质结PD,及其光谱响应图,(d)n型Si分层结构上涂敷一层超薄的氧化钼(MoO_{3-x})空穴选择层构建的UB-PD,及其光谱响应图,(e)AgNW/Si肖特基结PD,及其光谱响应图,(f)基于 MAPbI_3 和有机BHI溶液处理的UB-PD,及其光谱响应图

Fig. 7 (a) UB-PD based on vertically arranged PtSe_2 -GaAs heterojunction, and its spectral response, (b) heterojunction PD of multilayer PtSe_2 and CS-doped FAPbI_3 , and its spectral response, (c) PD based on WS_2 /GaAs II van der Waals heterojunction, and its spectral response, (d) heterojunction PD constructed by coating an ultra-thin molybdenum oxide (MoO_{3-x}) hole-selective layer on the N-type Si layered structure, and its spectral response, (e) PD based on Schottky junction of AgNW/Si, and its spectral response, (f) UB-PD based on MAPbI_3 and organic BHI solution treatment, and its spectral response

加工与制备相对简单。更重要的是,光门控型的器件不仅仅用做光探测,还可以作为光电晶体管,应用于光计算光存储等领域。所以在未来,基于光门控的超宽带探测器的研究将会更加深入,在实际的应用也会更加广泛。

2.6 非常规类型器件

除了常见几种光电探测器类型,近年来还有一些基于其他物理机制的UB-PD。2016年,Fang等人

展示了一种集成在 $0.72\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.28\text{Pb-TiO}_3$ (PMN-28PT)单晶上的自供电UB-PD。通过结合光热和热释电效应,多功能PMN-28PT单晶可以实现从紫外到THz的宽波长范围的响应^[24](参见图9(a))。2018年,Wu等人利用 1T-TaS_2 的CDW集体激发,实现从可见光到THz的高性能光探测,在室温下光响应度约为 1 A W^{-1} ^[23](参见图9(b))。

相较于特殊物理机制的PD,复合效应类型的

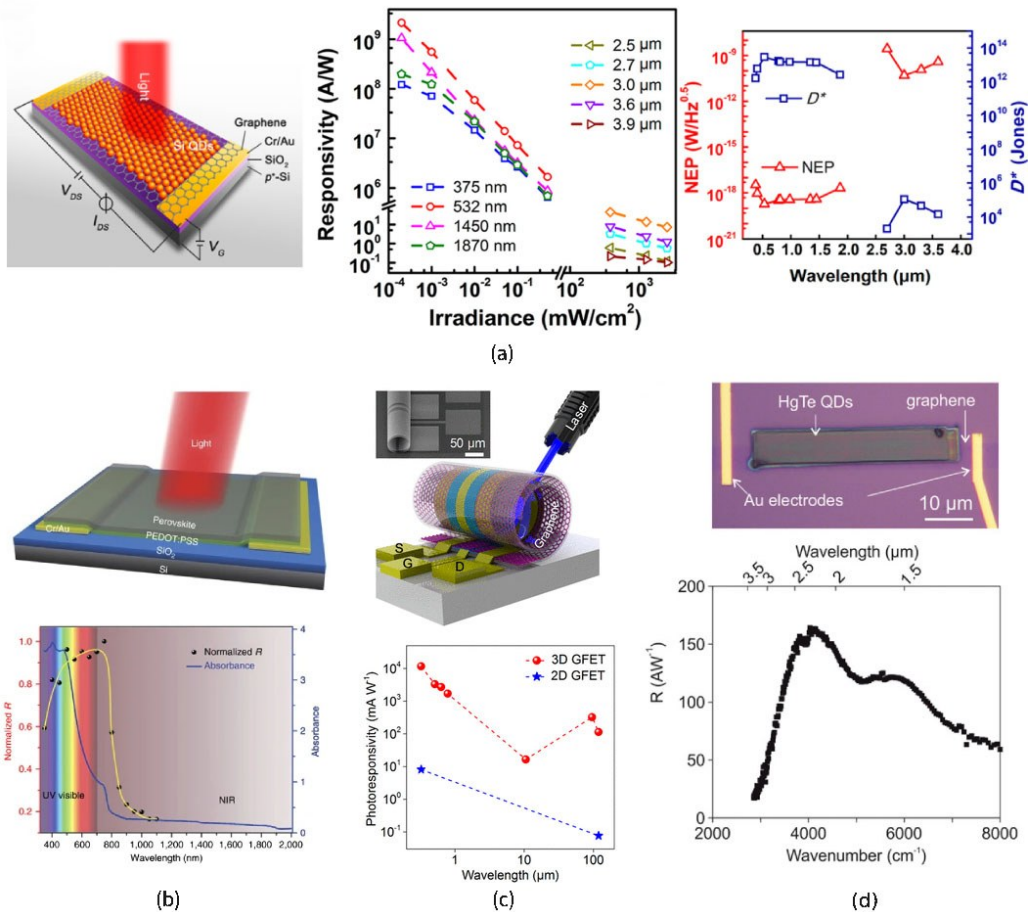


图8 (a)基于B掺杂的Si QD和石墨烯的混合光电晶体管的结构示意图,及其器件性能表征,(b)基于钙钛矿/有机半导体垂直异质结的光电晶体管器件示意图,及其器件性能表征,(c)三维管状GFET光电探测器的结构示意图,及其光谱响应图,(d)HgTe量子点/石墨烯光电晶体管实物图,及其光谱响应图

Fig. 8 (a) The structure diagrams of hybrid phototransistor based on B-doped Si QD and graphene, and device photoresponse performance, (b) the diagram of phototransistor based on a vertical perovskite/organic semiconductor heterojunction, and device photoresponse performance, (c) the diagram of three-dimensional tubular GFET photodetector, and its spectral response, (d) the diagrams of HgTe QDS/graphene phototransistors, and its spectral response

PD的研究更令人关注。通过复合机制,可以将原有的响应波段进一步拓宽,2018年,Wu等人制备了基于MoS₂的光电晶体管,光电晶体管分别在可见光和红外光照射下表现出相反的光响应行为。在454 nm处,它表现出最高的响应度,高达10⁵ A W⁻¹,最低的检测光功率约为17 pW,这表明它适用于非常微弱的光信号检测。在红外范围内,器件显示负光电流,其绝对值比可见光小两个数量级。最高红外响应度达到2.3 A W⁻¹,响应时间约为50 ms。通过实验证明负光响应归因于辐射热效应,辐射热系数为-33 nA K⁻¹[26]。2019年,Wang等人制备一种由有机铁电聚偏氟乙烯-三氟乙烯(P(VDF-TrFE))与MoS₂的混合准悬空结构构成的PD。超薄结构的二维MoS₂为热释电PD带来了极大的散热效益。通过耦

合热释电、光电导和光晶体管效应的机理,实现了从紫外(375 nm)到长波长红外(10 μm)的超光谱响应。在2.76~10 μm光谱范围内,利用二维MoS₂读取并放大P(VDF-TrFE)热释电效应诱导的光电流。该探测器具有140 mA W⁻¹的响应度,开关比为10³,响应时间为5.5 ms。此外,铁电极化场显著提高了MoS₂的光电导性能,抑制了暗电流和噪声^[84](参见图9(c))。

复合机制类型的PD的工作原理可以是协同或者在不同的波段分别运行,2020年,Li等人报告了一种基于CH₃NH₃PbI₃薄膜的UV-THz双机制PD。器件在紫外-可见和近红外-THz波段的光响应主要分别由光电导效应和辐射热效应引起。在室温下1 V偏置电压下,在UV-THz波段内获得了10²至

10^5 mA W^{-1} 的高响应度。此外,该器件还在 $1\ 064 \text{ nm}$ 激光照射下分别显示出 76 和 126 ns 的超短上升和衰减时间^[27](参见图 9(d))。同年,Yin 等通过空间受限的 CVD 方法合成了非层状超薄 Fe_3O_4 纳米片,并制备成具有 UV 到 LWIR 的 UB-PD。当被 $10.6 \mu\text{m}$ 激光照射时,该器件的光响应度、外量子效率和比探测率分别达到 561.2 mA W^{-1} 、 $6.6 \times 10^3\%$ 和 $7.42 \times 10^8 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。光电导效应和辐射热效应的多机制协同作用导致该器件对宽动态范围内的光都具有高灵敏度^[25]。2020 年,Jiang 等揭示了具有超薄二氧化钒薄膜和二硫化钼纳米薄片的混合异质结构。异质结构可以实现三种不同的功能模式:(i)p-n 结表现出超灵敏检测($450 \text{ nm} \sim 2 \mu\text{m}$),暗电流低至 0.2 pA ,响应时间为 $17 \mu\text{s}$,(ii)肖特基结工作在极端条件下稳定,例如 400 K 的高温下稳定运行,(iii)辐射热计显示超过 $10 \mu\text{m}$ 的超光谱检测^[85]。同年,Jiang 等人设计了基于 CdS core-Au/MXene 的 PD,器件能够检测从深紫外到红外的波段。在 405 nm 的可见光照射下,由于热机制,观察到具有响应度 (86 mA W^{-1}) 和大比探测率 (1.34×10^{11} Jones) 的负光响应。而在深紫外光照射下,光电探测器表现出正光响应^[86]。

非常规类型的超宽带光电探测器发展主要分为两条技术路线,一是借鉴其他领域光电材料特殊的物理机制实现超宽带光电响应,这类器件结构简单,但受限于材料性质,在不同波段可能表现出截

然相反的性能;二是构建具有特殊复合结构的器件,此类器件能够突破单一器件的响应机理限制,通过多响应机理协同的方式实现超宽带光电探测,但是这一类器件的结构复杂,加工制备的难度较大。未来,根据超宽带光电探测器的性能要求,寻找新的光电响应材料、探索新的光电响应机理,并结合不同的器件结构设计,将成为非常规类型的超宽带光电探测器发展的主要方向。

3 结论

本文总结最近十年,尤其是近五年以来常规和非常规 UB-PD 的发展过程,可以发现,不同类型器件之间的优缺点差异明显,而这些优缺点与器件的光电响应原理紧密关联。表 1 汇总了近五年各种类型器件的典型代表的光电响应性能参数。因为光子型器件的响应机制以载流子受激激发为根本,虽然响应度和比探测率普遍较高,但是光谱响应范围受限于材料的带隙,一般难以突破中波红外波段,但是现在发展迅速的二维异质结和人工超表面为光子型器件的超宽带光电响应提供了新的策略^[50, 51, 76, 77];而热效应器件的响应机制以吸收光子能量之后的非辐射热弛豫为根本,通过选择适当的材料可以实现宽谱甚至全光波段的有效光吸收,因此光谱响应范围最宽,普遍能实现紫外或者可见光至太赫兹波段的超宽带光电响应。

如果将 UB-PD 的响应性能与现有成熟窄带探

表 1 近十年具有优异性能的超宽带光电探测器汇总

Table 1 Summary of UB-PD with excellent performance in recent ten years

器件类型	材料	响应度 [A W^{-1} (V W^{-1})]	比探测率 [$\text{cm Hz}^{1/2}$ W^{-1}]	响应时间	响应范围
BE	CNT ^[20]	0.58	N/A	$150 \mu\text{s}$	$375 \text{ nm} \sim 118.8 \mu\text{m}$
	3D GF ^[35]	10^3	N/A	43 ms	$300 \text{ nm} \sim 1.36 \text{ mm}$
PTE	Pd/CNT/Ti ^[37]	(157.9)	5×10^8	7 ms	$375 \text{ nm} \sim 118.8 \mu\text{m}$
	NbS ₃ ^[43]	(1)	17.6×10^5	7 ms	$375 \text{ nm} \sim 118.8 \mu\text{m}$
PCE	NaYF ₄ :Yb,Er QDs/ α -CsPbI ₃ QDs ^[46]	1.5	N/A	5 ms	$260 \text{ nm} \sim 1100 \text{ nm}$
	CdS _x Se _{1-x} ^[54]	5.8×10^4	2×10^{15}	13 ms	$200 \text{ nm} \sim 800 \text{ nm}$
	p-Si/CQD, rGO, AgNP ^[64]	1	2×10^{12}	N/A	$360 \text{ nm} \sim 980 \text{ nm}$
PVE	Ti Bi ₂ Te ₃ -Si ^[65]	1	2.5×10^{11}	100 ms	$370.6 \text{ nm} \sim 118 \mu\text{m}$
	PtSe ₂ /Si ^[68]	12.65	2.5×10^{13}	$19.5 \mu\text{s}$	$200 \text{ nm} \sim 1550 \text{ nm}$
	(MoO _{3-x})/S ^[71]	N/A	6.29×10^{12}	$1 \mu\text{s}$	$300 \text{ nm} \sim 1100 \text{ nm}$
	MAPbI ₃ /BHJ ^[75]	0.43	2.3×10^{11}	5.6 ns	$300 \text{ nm} \sim 1000 \text{ nm}$
PGE	CH ₃ NH ₃ PbI _{3-x} Cl _x / PEDOT:PSS ^[80]	10^9	10^{14}	N/A	$350 \text{ nm} \sim 1100 \text{ nm}$
热相变	1T-TaS ₂ ^[23]	1	N/A	1.5 ns	$532 \text{ nm} \sim 118.8 \mu\text{m}$
PCE+BE	CH ₃ NH ₃ PbI ₃ ^[27]	100	32×10^9	76 ns	$400 \text{ nm} \sim 118 \mu\text{m}$

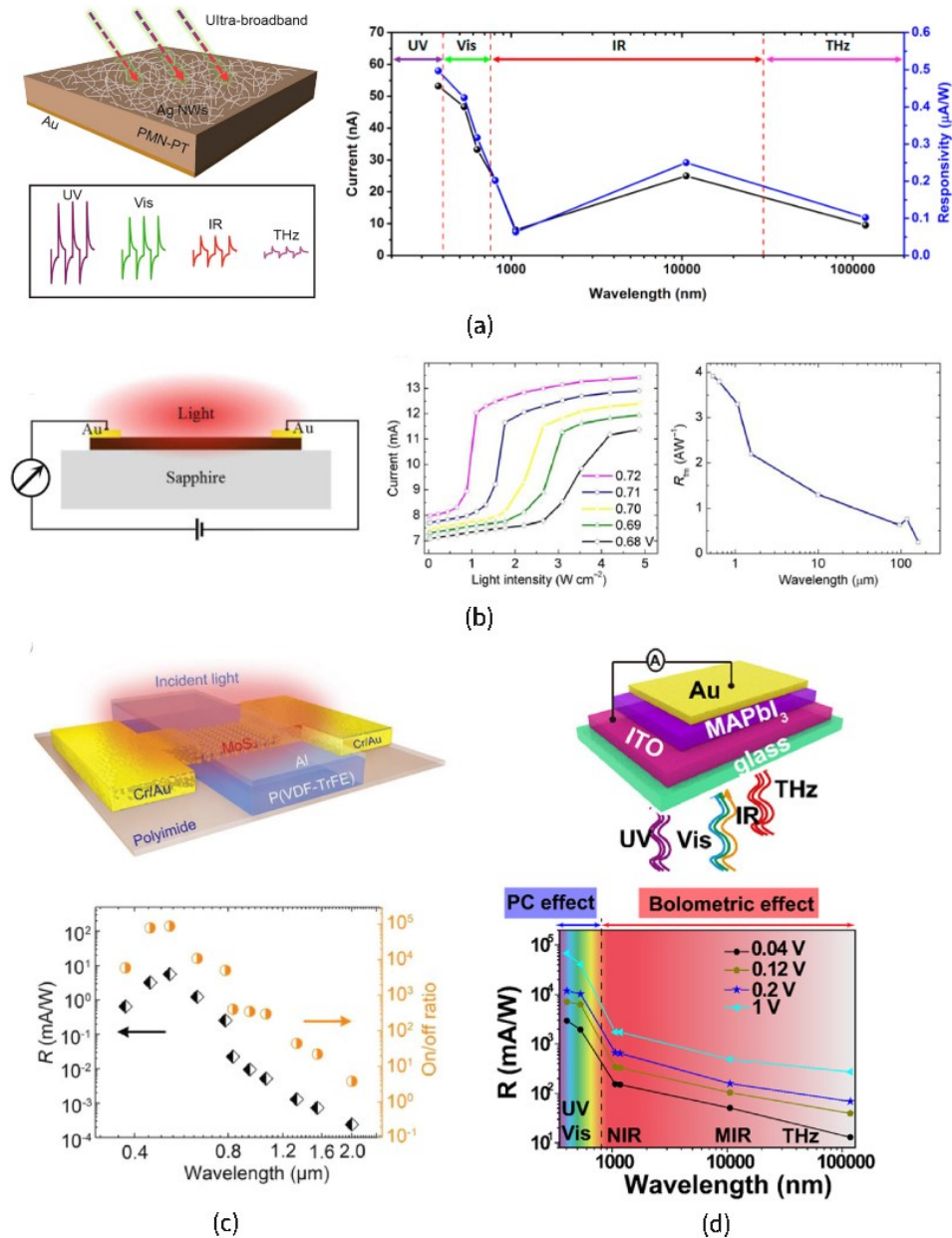


图9 (a)基于PMN-28PT单晶的热释电型光电探测器,及其器件性能表征,(b)基于1T-TaS₂的热相变光电探测器,及其器件性能表征,(c)P(VDF-TrFE)与MoS₂的混合准悬空结构PD,及其器件性能表征,(c)基于CH₃NH₃PbI₃薄膜的UV-THz双机制光电探测器,及其器件性能表征

Fig. 9 (a) Pyroelectric PD based on PMN-28Pt single crystal, and device photoresponse performance, (b) thermal phase transition PD based on 1T-TAS₂, and device photoresponse performance, (c) quasi-suspended PD with mixed P(VDF TrFE) and MoS₂, and device photoresponse performance, (c) UV-THz double-mechanism photodetector based on CH₃NH₃PbI₃ film, and device photoresponse performance

探测器进行比较,UB-PD在特定波段的整体光电响应性能较差,导致UB-PD虽然能实现超宽带光响应,但是在特定波段的响应性能又达不到具体要求,这严重限制了UB-PD的应用范围。如,PCE、PVE和PGE型的器件难以兼顾紫外/可见光/近红外波段的响应和中远红外波段的响应;而BE和PTE型的器件在紫外、可见光和近红外难以实现与光子器件比拟

的响应性能。因此,根据实际的应用需求,针对特定类型UB-PD的特定波段的光响应进行选择增强,以弥补其整体响应性能的不足将是未来UB-PD发展的重要方向。具体而言,除了调控现有光敏材料的性质或者设计更加复杂的器件结构之外,还可以在器件三维空间上设计特殊的复合结构或者复合材料,增强常规器件在特定波段的吸收。例如,

对于 PCE 和 PVE 型的器件,设计自下而上的结构,上层材料吸收短波长光子,而长波长光子通过之后可以被下层材料吸收,从而增强器件在长波长范围的光响应;对于 BE 和 PTE 型的器件,因其制备过程适用于特殊隔热结构,结合超表面的基底设计思路,不仅可以起到隔热作用还可以利用超表面强烈的光增强效应提高器件的光吸收,从而选择性地提升器件在特定波段的响应性能。另外,UB-PD 作为一种特殊的光电器件,发掘其适用的应用场景也十分重要。现有一些整体性能较好的 UB-PD,或者在某些特定波段性能优异的 UB-PD 已经可以满足某些不需要快速响应的应用场景需求,尤其是对于非动态场景的宽光谱探测需求,但是相关的研究还处于性能验证的初始阶段,距离应用还有较大的难度。因此,进一步探索 UB-PD 的应用场景,使其真正发挥作用,对于推动 UB-PD 的发展具有重要的意义。

References

- [1] LONG M, WANG P, FANG H, *et al.* Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, **29** (19): 1803807.
- [2] WANG G, ZHANG Y, YOU C, *et al.* Two dimensional materials based photodetectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **88**: 149–73.
- [3] FANG J, ZHOU Z, XIAO M, *et al.* Recent advances in low-dimensional semiconductor nanomaterials and their applications in high-performance photodetectors [J]. *Info-Mat*, 2020, **2**(2): 291–317.
- [4] MONROY E, OMNÈS F, CALLE F. Wide-bandgap semiconductor ultraviolet photodetectors [J]. *Semiconductor science and technology*, 2003, **18**(4): R33 – R51.
- [5] ROGALSKI A. Infrared detectors: an overview [J]. *Infrared physics & technology*, 2002, **43**(3–5): 187–210.
- [6] TONOUCI M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature photonics*, 2007, **1**(2): 97–105.
- [7] SIZOV F. THz radiation sensors [J]. *Opto-electronics review*, 2010, **18**(1): 10–36.
- [8] KE W, YU JIAN C, DJERAFI T, *et al.* Substrate-Integrated Millimeter-Wave and Terahertz Antenna Technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, **100**(7): 2219–32.
- [9] RIEKE G. Detection of Light: from the Ultraviolet to the Submillimeter [M]. Cambridge University Press, 2003.
- [10] ROBERGE A, MOUSTAKAS L A. The large ultraviolet/optical/infrared surveyor [J]. *Nature Astronomy*, 2018, **2** (8): 605–7.
- [11] GEIS M W, SPECTOR S J, GREIN M E, *et al.* CMOS-Compatible All-Si High-Speed Waveguide Photodiodes With High Responsivity in Near-Infrared Communication Band [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19** (3): 152–4.
- [12] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H J I C M. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, **49**(9): 56–62.
- [13] WAXMAN A M, GOVE A N, FAY D A, *et al.* Color night vision: opponent processing in the fusion of visible and IR imagery [J]. *Neural Networks*, 1997, **10**(1): 1–6.
- [14] STUART B H. Infrared spectroscopy: fundamentals and applications [M]. John Wiley & Sons, 2004.
- [15] HUANG X, EL-SAYED I H, QIAN W, *et al.* Cancer cell imaging and photothermal therapy in the near-infrared region by using gold nanorods [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, **128**(6): 2115–20.
- [16] CHEN H, LIU H, ZHANG Z, *et al.* Nanostructured Photodetectors: From Ultraviolet to Terahertz [J]. *Advanced Materials*, 2016, **28**(3): 403–33.
- [17] QIU Q, HUANG Z. Photodetectors of 2D Materials from Ultraviolet to Terahertz Waves [J]. *Adv Mater*, 2021, **33** (15): e2008126.
- [18] JONES R C. Phenomenological Description of the Response and Detecting Ability of Radiation Detectors [J]. *Proceedings of the IRE*, 1959, **47**(9): 1495–502.
- [19] KIND H, YAN H, MESSER B, *et al.* Nanowire Ultraviolet Photodetectors and Optical Switches [J]. *Advanced Materials*, 2002, **14**(2): 158–60.
- [20] LIU Y, YIN J, WANG P, *et al.* High-Performance, Ultra-Broadband, Ultraviolet to Terahertz Photodetectors Based on Suspended Carbon Nanotube Films [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2018, **10**(42): 36304–11.
- [21] HE X, LÉONARD F, KONO J. Uncooled Carbon Nanotube Photodetectors [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, **3**(8): 989–1011.
- [22] YANG L H, ZHANG J Z, XU H, *et al.* Progress in carbon nanotube films based photodetectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (杨露寒, 张家振, 徐煌, 等. 碳纳米管薄膜制备及其光电探测应用进展 [J]. *红外与毫米波学报*), 2021, **40**(4): 439.
- [23] WU D, MA Y, NIU Y, *et al.* Ultrabroadband photosensitivity from visible to terahertz at room temperature [J]. *Science advances*, 2018, **4**(8): eaao3057.
- [24] FANG H, XU C, DING J, *et al.* Self-Powered Ultrabroadband Photodetector Monolithically Integrated on a PMN-PT Ferroelectric Single Crystal [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, **8**(48): 32934–9.
- [25] YIN C, GONG C, CHU J, *et al.* Ultrabroadband photodetectors up to 10.6 μm based on 2D Fe_3O_4 nanosheets [J]. *Advanced Materials* 2020, **32**(25): e2002237.
- [26] WU J Y, CHUN Y T, LI S, *et al.* Broadband MoS_2 Field-Effect Phototransistors: Ultrasensitive Visible-Light Photoresponse and Negative Infrared Photoresponse [J]. *Advanced Materials*, 2018, **30**(7): 1705880.
- [27] LI Y, ZHANG Y, LI T, *et al.* Ultrabroadband, Ultraviolet to Terahertz, and High Sensitivity $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Perovskite Photodetectors [J]. *Nano Letters*, 2020, **20** (8): 5646–54.
- [28] CAO Y, YANG H, ZHAO Y, *et al.* Fully Suspended Reduced Graphene Oxide Photodetector with Annealing Temperature-Dependent Broad Spectral Binary Photoresponses [J]. *ACS Photonics*, 2017, **4**(11): 2797–806.

- [29] XIE Y, HAN M, WANG R, *et al.* Graphene Aerogel Based Bolometer for Ultrasensitive Sensing from Ultraviolet to Far-Infrared [J]. *ACS Nano*, 2019, **13** (5): 5385–96.
- [30] JI X, WANG H, CHEN T, *et al.* Intrinsic negative TCR of superblack carbon aerogel films and their ultrabroad band response from UV to microwave [J]. *Carbon*, 2020, **161**: 590–8.
- [31] JANG D, KIMBRUE M, YOO Y-J, *et al.* Spectral Characterization of a Microbolometer Focal Plane Array at Terahertz Frequencies [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, **9**(2): 150–4.
- [32] MORENO M, FERRUSCA D, RANGEL J, *et al.* Towards an infrared camera based on polymorphous silicon-germanium microbolometer arrays [Z]. 2022 IEEE Latin American Electron Devices Conference (LAEDC). 2022: 1–4. 10.1109/laedc54796.2022.9908199
- [33] WEN J, NIU Y, WANG P, *et al.* Ultra-broadband self-powered reduced graphene oxide photodetectors with annealing temperature-dependent responsivity [J]. *Carbon*, 2019, **153**: 274–84.
- [34] LI Y, ZHANG Y, CHEN Z, *et al.* Self-powered, flexible, and ultrabroadband ultraviolet-terahertz photodetector based on a laser-reduced graphene oxide/CsPbBr₃ composite [J]. *Photonics Research*, 2020, **8**(8): 1301–8.
- [35] LI Y, ZHANG Y, YU Y, *et al.* Ultraviolet-to-microwave room-temperature photodetectors based on three-dimensional graphene foams [J]. *Photonics Research*, 2020, **8** (3): 368–74.
- [36] HU Q, CAO Y, LIU Y, *et al.* Ultra-wideband self-powered photodetector based on suspended reduced graphene oxide with asymmetric metal contacts [J]. *RSC Advances*, 2021, **11**(32): 19482–91.
- [37] LIU Y, HU Q, CAO Y, *et al.* High-Performance Ultra-broadband Photodetector Based on Photothermoelectric Effect [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, **14** (25): 29077–86.
- [38] LV B, LIU Y, WU W, *et al.* Local large temperature difference and ultra-wideband photothermoelectric response of the silver nanostructure film/carbon nanotube film heterostructure [J]. *Nature communications*, 2022, **13** (1): 1835.
- [39] WANG Y, NIU Y, CHEN M, *et al.* Ultrabroadband, Sensitive, and Fast Photodetection with Needle-Like EuBiSe₃ Single Crystal [J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(4): 895–903.
- [40] LU X, JIANG P, BAO X. Phonon-enhanced photothermoelectric effect in SrTiO₃ ultra-broadband photodetector [J]. *Nature communications*, 2019, **10**(1): 138.
- [41] LI Y, ZHANG Y, LI T, *et al.* A fast response, self-powered and room temperature near infrared-terahertz photodetector based on a MAPbI₃/PEDOT:PSS composite [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, **8** (35): 12148–54.
- [42] NIU Y, WANG Y, WU W, *et al.* Ultrabroadband, Fast, and Flexible Photodetector Based on HfTe₃ Crystal [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, **8**(20): 2000833.
- [43] WU W, WANG Y, NIU Y, *et al.* Thermal Localization Enhanced Fast Photothermoelectric Response in a Quasi-One-Dimensional Flexible NbS₃ Photodetector [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, **12**(12): 14165–73.
- [44] LI G, YIN S, TAN C, *et al.* Fast Photothermoelectric Response in CVD-Grown PdSe₂ Photodetectors with In-Plane Anisotropy [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, **31**(40).
- [45] GU Y, YAO X, GENG H, *et al.* Large-Area, Flexible, and Dual-Source Co-Evaporated Cs₃Cu₂I₃ Nanolayer to Construct Ultra-Broadband Photothermoelectric Detector from Visible to Terahertz [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2022, **4**(2): 663–71.
- [46] ZHANG X, WANG Q, JIN Z, *et al.* Stable ultra-fast broad-bandwidth photodetectors based on α -CsPbI₃ perovskite and NaYF₄: Yb, Er quantum dots [J]. *Nanoscale*, 2017, **9**(19): 6278–85.
- [47] NIU Y Y, WU D, SU Y Q, *et al.* Uncooled EuSbTe₃ photodetector highly sensitive from ultraviolet to terahertz frequencies [J]. *2D Materials*, 2017, **5**(1): 011008.
- [48] NIU Y, WANG B, CHEN J, *et al.* Ultra-broadband and highly responsive photodetectors based on a novel EuBiTe₃ flake material at room temperature [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, **6**(4): 713–6.
- [49] HAO-NAN G, RUN-ZHANG X, JIA-XIANG G, *et al.* Artificial micro-and nano-structure enhanced long and very long-wavelength infrared detectors br [J]. *ACTA PHYSICA SINICA*, 2022, **71**(11).
- [50] CAKMAKYAPAN S, LU P K, NAVABI A, *et al.* Gold-patched graphene nano-strips for high-responsivity and ultrafast photodetection from the visible to infrared regime [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, **7**: 20.
- [51] WANG F, LIU Z, ZHANG T, *et al.* Fully Depleted Self-Aligned Heterosandwiched Van Der Waals Photodetectors [J]. *Advanced Materials*, 2022, **34**(39): e2203283.
- [52] DING N, WU Y, XU W, *et al.* A novel approach for designing efficient broadband photodetectors expanding from deep ultraviolet to near infrared [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, **11**(1): 91.
- [53] XU H, HAO L, LIU H, *et al.* Flexible SnSe Photodetectors with Ultrabroad Spectral Response up to 10.6 μm Enabled by Photobolometric Effect [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2020, **12**(31): 35250–8.
- [54] NAWAZ M Z, XU L, ZHOU X, *et al.* High-Performance and Broadband Flexible Photodetectors Employing Multi-component Alloyed 1D CdS_xSe_{1-x} Micro-Nanostructures [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, **14**(17): 19659–71.
- [55] MAK K F, JU L, WANG F, *et al.* Optical spectroscopy of graphene: From the far infrared to the ultraviolet [J]. *Solid State Communications*, 2012, **152**(15): 1341–9.
- [56] CAO Y, ZHU J, XU J, *et al.* Ultra-broadband photodetector for the visible to terahertz range by self-assembling reduced graphene oxide-silicon nanowire array heterojunctions [J]. *Small*, 2014, **10**(12): 2345–51.
- [57] XU J, HU J, WANG R, *et al.* Ultra-broadband graphene-InSb heterojunction photodetector [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **111**(5): 051106.
- [58] YU X-X, YIN H, LI H-X, *et al.* A novel high-performance self-powered UV-vis-NIR photodetector based on a CdS nanorod array/reduced graphene oxide film heterojunction and its piezo-phototronic regulation [J]. *Journal*

- of *Materials Chemistry C*, 2018, **6**(3): 630–6.
- [59] HUANG H, WANG F, LIU Y, *et al.* Plasmonic Enhanced Performance of an Infrared Detector Based on Carbon Nanotube Films [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2017, **9**(14): 12743–9.
- [60] HUANG H, ZHANG D, WEI N, *et al.* Plasmon-Induced Enhancement of Infrared Detection Using a Carbon Nanotube Diode [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, **5**(6): 1600865.
- [61] MAHJOURI-SAMANI M, ZHOU Y S, HE X N, *et al.* Plasmonic-enhanced carbon nanotube infrared bolometers [J]. *Nanotechnology*, 2013, **24**(3): 035502.
- [62] ZHOU C, WANG S, SUN J, *et al.* Plasmonic enhancement of photocurrent in carbon nanotube by Au nanoparticles [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(10): 103102.
- [63] LIU Y, CHENG R, LIAO L, *et al.* Plasmon resonance enhanced multicolour photodetection by graphene [J]. *Nature communications*, 2011, **2**: 579.
- [64] SARKAR K, DEVI P, LATA A, *et al.* Engineering carbon quantum dots for enhancing the broadband photoresponse in a silicon process-line compatible photodetector [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, **7**(42): 13182–91.
- [65] YAO J, SHAO J, WANG Y, *et al.* Ultra-broadband and high response of the Bi_2Te_3 -Si heterojunction and its application as a photodetector at room temperature in harsh working environments [J]. *Nanoscale*, 2015, **7**(29): 12535–41.
- [66] YANG M, WANG J, ZHAO Y, *et al.* Three-Dimensional Topological Insulator Bi_2Te_3 /Organic Thin Film Heterojunction Photodetector with Fast and Wideband Response from 450 to 3500 Nanometers [J]. *ACS Nano*, 2019, **13**(1): 755–63.
- [67] ZENG L-H, LIN S-H, LI Z-J, *et al.* Fast, Self-Driven, Air-Stable, and Broadband Photodetector Based on Vertically Aligned $\text{PtSe}_2/\text{GaAs}$ Heterojunction [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, **28**(16): 1705970.
- [68] ZENG L, LIN S, LOU Z, *et al.* Ultrafast and sensitive photodetector based on a PtSe_2 /silicon nanowire array heterojunction with a multiband spectral response from 200 to 1550 nm [J]. *NPG Asia Materials*, 2018, **10**(4): 352–62.
- [69] ZHANG Z X, LONG-HUI Z, TONG X W, *et al.* Ultrafast, Self-Driven, and Air-Stable Photodetectors Based on Multilayer PtSe_2 /Perovskite Heterojunctions [J]. *The journal of physical chemistry letters*, 2018, **9**(6): 1185–94.
- [70] JIA C, HUANG X, WU D, *et al.* An ultrasensitive self-driven broadband photodetector based on a 2D- WS_2/GaAs type-II Zener heterojunction [J]. *Nanoscale*, 2020, **12**(7): 4435–44.
- [71] ZHAO C, LIANG Z, SU M, *et al.* Self-Powered, High-Speed and Visible-Near Infrared Response of MoO_3/n -Si Heterojunction Photodetector with Enhanced Performance by Interfacial Engineering [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, **7**(46): 25981–90.
- [72] KUMAR M, PATEL M, KIM H S, *et al.* High-Speed, Self-Biased Broadband Photodetector-Based on a Solution-Processed Ag Nanowire/Si Schottky Junction [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2017, **9**(44): 38824–31.
- [73] CHEN L, TIAN W, MIN L, *et al.* Si/CuIn $_{0.7}$ Ga $_{0.3}$ Se $_2$ Core-Shell Heterojunction for Sensitive and Self-Driven UV-vis-NIR Broadband Photodetector [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, **7**(10): 1900023.
- [74] LIU J, WEN H, SHEN L. Highly sensitive, broadband, fast response organic photodetectors based on semi-tandem structure [J]. *Nanotechnology*, 2020, **31**(21): 214001.
- [75] LI C, WANG H, WANG F, *et al.* Ultrafast and broadband photodetectors based on a perovskite/organic bulk heterojunction for large-dynamic-range imaging [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, **9**: 31.
- [76] MA S, LI K, XU H, *et al.* Lattice-Mismatched PbTe/ZnTe Heterostructure with High-Speed Midinfrared Photoresponses [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2019, **11**(42): 39342–50.
- [77] ZHU J, XU H, WANG Z, *et al.* Lateral photovoltaic mid-infrared detector with a two-dimensional electron gas at the heterojunction interface [J]. *Optica*, 2020, **7**(10).
- [78] WEI X D, CAI C F, ZHANG B P, *et al.* PbTe photovoltaic mid-IR detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (魏晓东, 蔡春峰, 张兵坡, 等. PbTe 中红外光伏探测器 [J]. 红外与毫米波学报), 2011, **30**(4): 293.
- [79] NI Z, MA L, DU S, *et al.* Plasmonic Silicon Quantum Dots Enabled High-Sensitivity Ultrabroadband Photodetection of Graphene-Based Hybrid Phototransistors [J]. *ACS Nano*, 2017, **11**(10): 9854–62.
- [80] XIE C, YOU P, LIU Z, *et al.* Ultrasensitive broadband phototransistors based on perovskite/organic-semiconductor vertical heterojunctions [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, **6**(8): e17023.
- [81] DENG T, ZHANG Z, LIU Y, *et al.* Three-Dimensional Graphene Field-Effect Transistors as High-Performance Photodetectors [J]. *Nano letters*, 2019, **19**(3): 1494–503.
- [82] GROTEVENT M J, HAIL C U, YAKUNIN S, *et al.* Colloidal HgTe Quantum Dot/Graphene Phototransistor with a Spectral Sensitivity Beyond 3 μm [J]. *Advanced Science*, 2021, **8**(6): 2003360.
- [83] YU P, ZENG Q, ZHU C, *et al.* Ternary Ta $_2$ PdS $_6$ Atomic Layers for an Ultrahigh Broadband Photoresponsive Phototransistor [J]. *Advanced Materials*, 2021, **33**(2): e2005607.
- [84] WANG X, SHEN H, CHEN Y, *et al.* Multimechanism synergistic photodetectors with ultrabroad spectrum response from 375 nm to 10 μm [J]. *Advanced science*, 2019, **6**(15): 1901050.
- [85] JIANG W, ZHENG T, WU B, *et al.* A versatile photodetector assisted by photovoltaic and bolometric effects [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, **9**: 160.
- [86] JIANG T, HUANG Y, MENG X. CdS core-Au/MXene-based photodetectors: Positive deep-UV photoresponse and negative UV-Vis-NIR photoresponse [J]. *Applied Surface Science*, 2020, **513**: 145813.