

## 引文格式:

欧阳杰, 冯松, 后林军, 等. 近红外波段光电探测器的研究进展 [J]. 集成技术, 2024, 13(6): 90-108.

Ouyang J, Feng S, Hou LJ, et al. Research progress of near-infrared band photodetectors [J]. Journal of Integration Technology, 2024, 13(6): 90-108.

## 近红外波段光电探测器的研究进展

欧阳杰 冯松\* 后林军 郭少凯 李浩杰 胡祥建 王迪  
陈梦林 刘勇 冯露露

(西安工程大学理学院 西安 710048)

**摘要** 硅基、石墨烯、碲化合物、过渡金属二卤代化合物和钙钛矿等新型材料具有独特的结构和性质, 是制备低功耗、高性能光电探测器的重要材料。作者主要综述了基于 PN、PiN 异质结结构的硅基近红外光电探测器的研究进展, 以及基于二维材料, 如石墨烯、碲化合物、过渡金属二卤代化合物和钙钛矿材料的近红外光电探测器的最新研究进展, 并对相关的近红外光电探测器的性能参数进行了对比分析, 可为后续研究高性能近红外光电探测器提供思路和参考。

**关键词** 光电探测器; 近红外光; 硅基; 二维材料; 钙钛矿

**中图分类号** TN362 **文献标志码** A **doi**: 10.12146/j.issn.2095-3135.20230606002

## Research Progress of Near-Infrared Band Photodetectors

OUYANG Jie FENG Song\* HOU Linjun GUO Shaokai LI Haojie HU Xiangjian  
WANG Di CHEN Menglin LIU Yong FENG Lulu

(School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

\*Corresponding Author: fengsong@xpu.edu.cn

**Abstract** Novel materials such as silicon-based, graphene, tellurium compounds, transition metal dihalogenated compounds and perovskites have unique structures and properties, and are important materials for the preparation of low-power and high-performance photodetectors. In this paper, silicon-based structures based on PN and PiN heterojunction structures are reviewed research progress of near-infrared photodetectors, as well as the latest research progress of near-infrared photodetectors based on two-dimensional materials, such

收稿日期: 2023-06-06 修回日期: 2023-10-20

**基金项目**: 国家重点研发计划项目 (2018YFB2200500); 国家自然科学基金项目 (61204080); 国家重点实验室基金项目 (SKL201804); 陕西省重点研发计划项目 (2022GY-012, 2020KW-011); 西安市科技计划项目 (2020KJRC0026)

**作者简介**: 欧阳杰, 硕士研究生, 研究方向为硅基光子器件; 冯松 (通讯作者), 教授, 研究方向为硅基光子器件及集成, E-mail: fengsong@xpu.edu.cn; 后林军, 硕士研究生, 研究方向为硅基光子器件; 郭少凯, 硕士研究生, 研究方向为数字集成电路 GPU 设计与验证; 李浩杰, 硕士研究生, 研究方向为硅基探测器; 胡祥建, 硕士研究生, 研究方向为中红外硅基光子调制器; 王迪, 硕士研究生, 研究方向为硅基光子器件; 陈梦林, 硕士研究生, 研究方向为中红外无源波导器件; 刘勇, 硕士研究生, 研究方向为硅基波导器件; 冯露露, 硕士研究生, 研究方向为硅基光电调制器。

as graphene, tellurium compounds, transition metal dihalogenated compounds and perovskite materials, and compare and analyze the performance parameters of related near-infrared photodetectors, which can provide ideas and references for the follow-up research of high-performance near-infrared photodetectors.

**Keywords** photodetectors; near-infrared light; silicon-based; two-dimensional materials; perovskite

**Funding** This work is supported by National Key Research and Development Program(2018YFB2200500); National Natural Science Foundation of China (61204080); State Key Laboratory Fund(SKL201804); Key Research and Development Program of Shanxi Province(2022GY-012,2020KW-011); Science and Technology Plan Project of Xi'an (2020KJRC0026)

## 1 引言

光电探测器是一种可以将光信号转换为电信号的装置。高性能光电探测器在光电显示器、环境监测、光通信、军事、安全检查等方面都发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。根据探测波长,红外光电探测器可分为近红外光电探测器( $0.75\sim 3\ \mu\text{m}$ )、中红外光电探测器( $3\sim 15\ \mu\text{m}$ )和远红外光电探测器( $15\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$ )<sup>[3]</sup>。光通信波段的信号强度较低,需要探测器具备高灵敏度,并能够有效捕捉和检测微弱的光信号。而近红外波段光电探测器符合此要求,同时也能迅速接收和处理传输数据信号。基于传统半导体材料的光电探测器功耗大、成本高、性能差。2019年,钱广等<sup>[4]</sup>研制了一种磷化铟(InP)光电探测器,但在 $1\ 550\ \text{nm}$ 的激光照射下,响应率仅 $0.3\ \text{A/W}$ 。2021年,韩孟序等<sup>[5]</sup>提出一种砷化镓铟/磷化铟(InGaAs/InP)台面型PiN光电探测器,但在波长为 $1\ 310\ \text{nm}$ 的激光照射下,响应率仅 $0.75\ \text{A/W}$ 。这些光电探测器在近红外波段的响应率和探测率极低,限制了探测器的应用领域,因此,研究新材料光电探测器成为必要趋势。

在研究基于新型材料的光电探测器时,硅基材料、二维材料和钙钛矿材料最具吸引力。这些材料不仅为光电探测器的设计提供了可能,还使

得研发出具有高响应率、高灵敏度、低成本、可柔性、重量轻和可调节的光电探测器成为可能,从而极大地拓宽了光电探测器在电子产品领域的应用范围。特别地,硅基光电探测器因成本较低而受到了广泛的研究和应用。此外,利用成熟的互补金属氧化物半导体制造工艺,硅基光电探测器已成功集成到单片电路中<sup>[6-7]</sup>,显著提升了集成度与性能。进一步地,绝缘体上硅(silicon-on-insulator, SOI)技术凭借漏电流低、寄生电容小等独特的优势,为先进的硅光子学提供了一个强有力的通用平台<sup>[8]</sup>。光电探测器可利用SOI波导的有效折射率和损耗特性<sup>[9-10]</sup>,对其性能进行优化。基于二维材料的光电探测器具有超高光响应、超宽探测波段和超灵敏度等优点,取得了许多令人瞩目的成就,引起科研人员巨大的研究兴趣<sup>[11]</sup>。由于钙钛矿的电学特性和光学特性优异,在非真空条件下的合成工艺简单、成本低<sup>[12-13]</sup>,因此,钙钛矿材料成为光电应用领域中较有前途的材料。

经过长时间的探索研究,近红外光电探测器在材料与器件结构等方面取得显著成就。本文综述了基于多样化材料和新颖结构设计的近红外光电探测器的研究进展。首先,开篇聚焦于硅基光电探测器,特别是采用PN异质结和PiN异质结结构的最新研究成果;其次,转向探索二维材料

和钙钛矿材料在近红外探测领域的独特优势和进展；最后，展望了融合硅基结构及上述两种材料的近红外光电探测器在通信波段器件中的潜在应用及未来面临的关键挑战与机遇。

## 2 硅基光电探测器

硅基材料的空穴迁移率好、禁带宽度小，有助于提升器件的能效和性能，已成为发展低电压器件的理想选择。硅基光电探测器具有制造成本低廉、易于集成和制造大规模芯片、响应速度快、噪声低、灵敏度高优点，在通信、光学仪器、医疗和军事等领域得到广泛应用。此外，硅基异质结光电探测器具有独特的结构特性，在光电子学应用中占据了较广泛的地位，这进一步强化了硅基光电探测器在多个关键领域的核心竞争力。本章分别论述了基于 PN 异质结和 PiN 异质结的光电探测器的研究进展。

### 2.1 基于 PN 异质结的光电探测器

由于 PN 异质结的光电转换特性较好，因此，光电探测器通常基于 PN 异质结实现。当光照射在 PN 异质结上时，会激发出电子和空穴对，并增加 PN 异质结的载流子浓度，因此可实现光信号到电信号的转换，从而实现探测器的功能。此外，PN 异质结对不同波长的光辐射响应不同。当光子能量与 PN 异质结禁带宽度相当时，就会发生光电效应，使得 PN 异质结中的导电电子和空穴被释放出来，因此，PN 异质结会流过一个可测量的电流。通过选择适当的材料和工艺参数构造 PN 异质结，可对不同波段的光信号进行高灵敏度和选通性的检测。此外，PN 异质结还具有快速响应、低噪声、易于制造等优点，因此，硅基 PN 异质结光电探测器在近红外波段得到广泛应用。

为使硅基光电探测器的探测波长变宽、响应率变高，2017 年，Dhyani 等<sup>[14]</sup>提出一种基

于二硫化钼/硅 (N-MoS<sub>2</sub>/P-Si) 异质结的光电探测器。如图 1 所示，该光电探测器在激光波长为 550 nm、偏置电压为 5 V 的条件下，响应率高达 9 A/W，比探测率高达 10<sup>14</sup> Jones (1 Jones = 1 cm·Hz<sup>1/2</sup>·W<sup>-1</sup>)。该器件的响应上升时间为 9 μs，下降时间为 7 μs，可在高频 50 kHz 下工作。高的界面势垒可有效增强电荷分离效率和光捕获性能，使得更多光子能被转化为电信号，从而使多孔硅上异质结结构的光探测性能较好，进而显著提高器件的响应率。

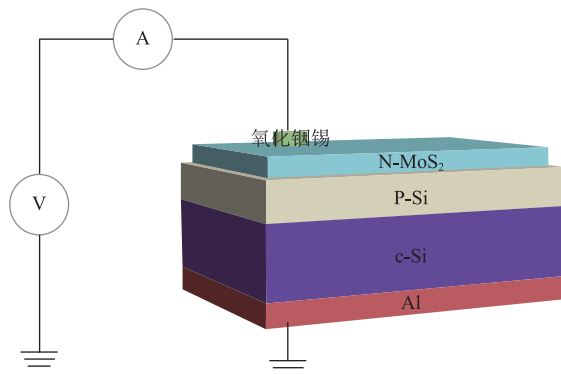


图 1 N-MoS<sub>2</sub>/P-Si 异质结器件结构

Fig. 1 Structure of N-MoS<sub>2</sub>/P-Si heterojunction device

2019 年，Chauhan 等<sup>[15]</sup>提出一种基于二氧化钛/硅 (N-TiO<sub>2</sub>/P-Si) 异质结结构的光电二极管。如图 2 所示，该光电二极管在入射光波长为 620 nm、功率为 1 mW/cm<sup>2</sup> 的条件下，响应率高达 23.07 A/W，比探测率高达 4.5 × 10<sup>12</sup> Jones。光电探测器的内部增益、响应率、检测率和灵敏

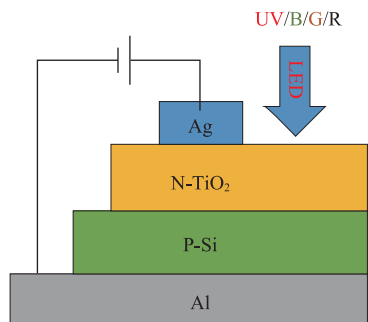


图 2 N-TiO<sub>2</sub>/P-Si 异质结器件结构截面

Fig. 2 Cross-sectional of N-TiO<sub>2</sub>/P-Si heterojunction device structure

度等参数的提高主要得益于二氧化钛与硅形成同型异质结, 二氧化钛纳米晶体导致的隧穿长度减少, 产生和转移的电荷增加。

上述两种探测器利用材料和结构的优势使其响应率得到较高的提升, 然而也有较明显的缺点, 如探测波长太小而限制应用范围。为提高探测波长, 2020 年, Xu 等<sup>[16]</sup>提出一种基于硫化铅/硅(P-PbS/N-Si)异质结的光电探测器。如图 3 所示, 该探测器呈倒置结构, 与普通结构相比, 它的能带偏移量较低, 为器件提供了更高的电荷提取效率。在硅晶片表面钝化和硅掺杂密度优化下, 当入射光的波长为 1 540 nm、偏置电压为 0 V 时, 该器件的响应率高达 264 mA/W, 比探测率高达  $1.47 \times 10^{11}$  Jones, 响应速度高达 29.8 kHz, 上升时间为 2.04  $\mu$ s, 下降时间为 5.34  $\mu$ s。

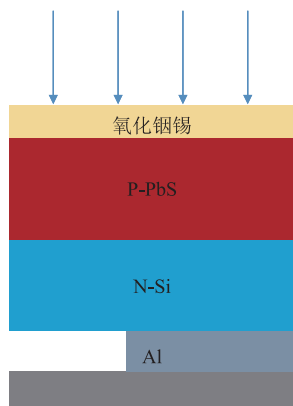


图 3 P-PbS/N-Si 异质结器件结构截面

Fig. 3 Cross-sectional of P-PbS/N-Si heterojunction device structure

上述基于硅基 PN 异质结的光电探测器可将探测波段增至 1 540 nm, 并可通过器件优化降低暗电流, 从而使器件有更高的比探测率。但是, 由于硅材料的量子效率较低, 仅能将一部分入射光子转化为电子, 因此限制了上述光电探测器的响应率。此外, 硅材料具有一定的温度敏感性, 相关光电探测器的性能可能会因环境的影响而使其应用范围发生变化, 但通过合理的材料结合和精妙的器件结构优化, 未来的硅基 PN 异质结光

电探测器的性能将更好。

## 2.2 基于 PiN 异质结的光电探测器

PiN 异质结是一种具有高电荷载流子收集率和低噪声系数的半导体器件结构, 具有快速的响应时间和较高的探测效率。因此, 光电探测器通常利用 PiN 异质结增加探测器对光信号的响应度。此外, PiN 异质结在工作过程中几乎没有反向饱和电流噪声, 所以电荷载流子不会产生重复噪声源。这使得基于 PiN 异质结的光电探测器具有较低的噪声系数, 并能够检测非常小的光信号。因此可利用 PiN 结构的优势提高探测器的响应率和探测波长。2015 年, Li 等<sup>[17]</sup>提出一种与绝缘体上硅和互补金属氧化物半导体技术兼容的横向 PiN 光电二极管, 如图 4 所示, 该器件在 10 V 的偏置电压下获得了 12.6 GHz 的带宽, 在波长为 850 nm 的光照下, 响应率高达 7.5 mA/W。在相同的测试条件下, 即 10 V 的偏置电压和波长为 850 nm 的光照, 当光电探测器的衬底尺寸被缩小后, 其带宽性能得到了显著提升, 达到了 13.6 GHz, 与原器件的 12.6 GHz 带宽相比, 有了明显提高, 且光电探测器的电容低于 65 fF。

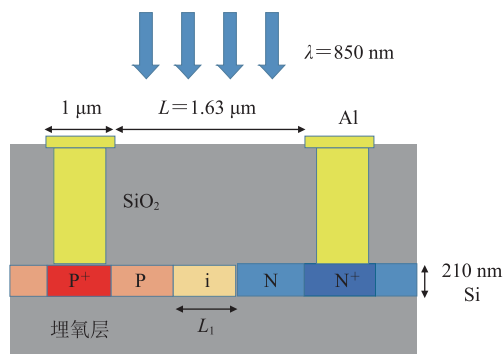


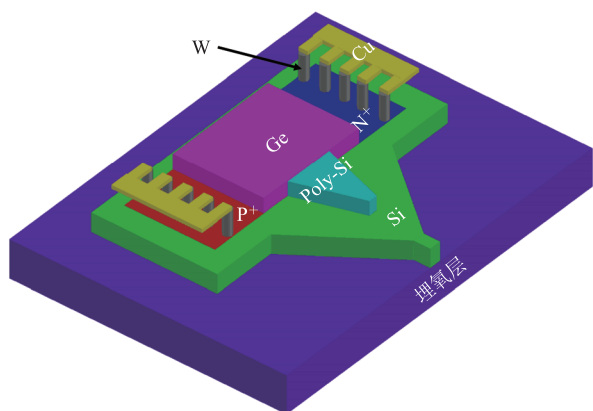
图 4 PiN 光电二极管截面

Fig. 4 Cross-sectional of PiN photodiode

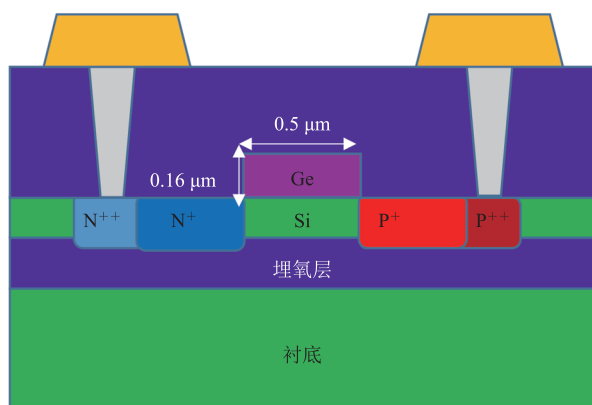
虽然上述光电二极管的带宽较高, 但探测波长和响应率偏低。因此, 为提高 PiN 结构光电探测器的探测波长和响应率, 某些团队利用不同材料制作 PiN 结构探测器。2016 年, Chen 等<sup>[18]</sup>提出一种硅锗 PiN 光电探测器。如图 5 所示, 当该



探测器结构的长度为  $14\ \mu\text{m}$  时, 在照射光波长为  $1\ 550\ \text{nm}$ 、偏置电压为  $1\ \text{V}$  的条件下, 响应率高达  $0.74\ \text{A/W}$ , 暗电流低至  $4\ \text{nA}$ 。处于该长度的探测器仍受传输时间限制, 当将探测器结构长度调整至  $20\ \mu\text{m}$  时, 其响应率得到提高, 在  $1\ 550\ \text{nm}$  的照射光下, 响应率高达  $0.92\ \text{A/W}$ 。



(a) 光电探测器三维图



(b) 光电探测器截面图

图 5 硅锗 PiN 光电探测器结构

Fig. 5 Structure of silicon germanium PiN photodetector

2018 年, Li 等<sup>[19]</sup>提出一种石墨烯-硅 PiN 光电二极管, 如图 6 所示, 该器件实现了可见、近红外、零偏压光电检测。当照射光波长为  $1\ 550\ \text{nm}$ 、偏置电压为  $0$  时, 器件的响应时间为  $15\ \text{ps}$ , 光电信号进行转化, 信噪比高达  $52.9\ \text{dB}$ 。主要原因是石墨烯材料中的载流子流动速度快和内置电场的有效嵌入共同提升了器件在光电信号转换过程中的性能。

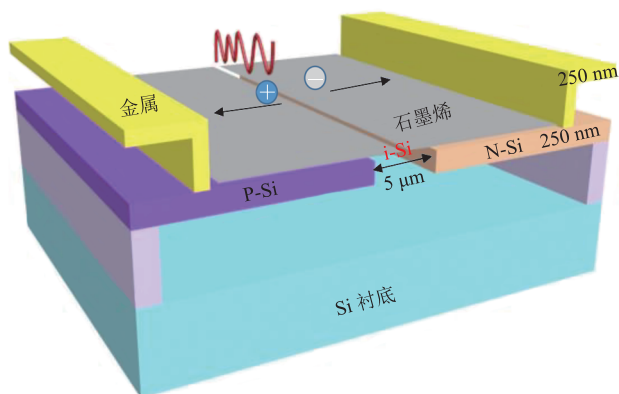


图 6 石墨烯-硅 PiN 光电二极管结构图

Fig. 6 Structure of graphene-silicon PiN photodiode

2020 年, Aliane 等<sup>[20]</sup>提出一种直径为  $10\ \mu\text{m}$  的圆形锗 PiN 光电二极管。如图 7 所示, 该器件处于低温条件下 (LT) 在硅衬底上外延生长锗, 通过掺杂硼在生长 P 型锗层, 然后在高温条件下 (HT) 生长本征锗层, 形成垂直 PiN 光电二极管, 利用椭圆偏振光谱、X 射线衍射和拉曼光谱量化锗层中存在的拉伸应变。这种内置的拉伸应变改变了器件对光的吸收特性, 不仅提升了器件的光捕获能力, 还将探测波段有效扩展至  $1\ 700\ \text{nm}$ 。当照射光的波长分别为  $1\ 310\ \text{nm}$  和  $1\ 550\ \text{nm}$  时, 器件响应率分别为  $0.275\ \text{A/W}$  和  $0.133\ \text{A/W}$ , 内部量子效率分别为  $66\%$  和  $52\%$ 。

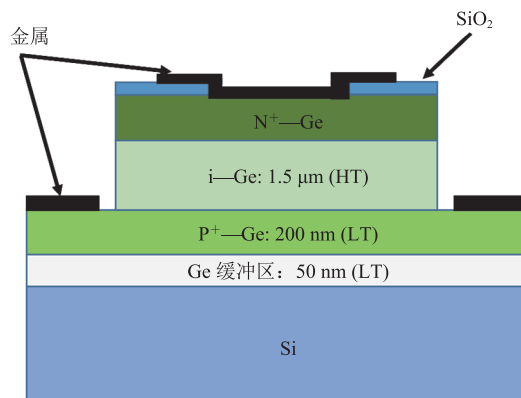


图 7 锗 PiN 光电二极管结构

Fig. 7 Structure of germanium PiN photodiode

上述探测器通过合理利用 PiN 异质结的特性, 使硅基光电探测器的探测波段增至  $1\ 700\ \text{nm}$ ,

并使响应度得到一定提高。由此可知, 基于 PiN 异质结是光电探测器优化的一个基本策略, 有望在中红外波段得到应用。

为进一步了解硅基光电探测器, 本文列出了近年来性能较好的基于 PN、PiN 和其他异质结结构的硅基光电探测器的性能参数, 并进行了对比分析, 如表 1 所示。

由表 1 可知, 硅基光电探测器的结构有多种, 而与其他异质结光电探测器相比, 基于 PN、PiN 结构的光电探测器的性能较优, 本文主要对比分析基于 PN、PiN 结构的光电探测器。Xu 等<sup>[16]</sup>提出一种基于 PN 异质结的光电探测器, 与传统 PN 异质结光电探测器相比, 该探测器的探测波段较宽。独特的倒置结构设计使得该光电探测器的探测范围拓宽至 1 540 nm, 这一特性在其他常规 PN 异质结光电探测器中较为罕见。与普通结构相比, 这种结构的能带偏移量较低, 有利于光电探测器的载流子采集, 为器件提供了更高的电荷提取效率, 并具有良好排列的带结构和高效的载流子分离与提取, 但该探测器的响应率较低。Chauhan 等<sup>[15]</sup>提出的 PN 异质结光

电探测器比其他 PN 异质结光电探测器的响应率高, 为 23.07 A/W, 主要得益于二氧化钛与硅形成同型异质结, 二氧化钛纳米晶体导致的隧穿长度减少, 电荷产生和转移增加, 提高了响应率和探测率。由表 1 可知, 对于基于 PiN 异质结的光电探测器在探测波段上未展现出显著的差异。然而, 与其他 PiN 异质结光电探测器相比, Chen 等<sup>[18]</sup>提出的光电探测器的响应率更高, 主要得益于探测器采用了 SOI 技术, 将硅器件层和衬底分离, 降低了底部漏电流的影响, 从而提高了探测器的灵敏度, 减少了载流子在电极之间的传输距离, 并提升了载流子的移动速度, 进而提高了载流子的数目和收集率, 综合作用之下, 显著提高了探测器的响应率。通过对比基于 PN 异质结与 PiN 异质结的两种光电探测器, 本文发现, PN 结构虽然在比探测率方面展现出一定优势, 但在探测波长范围和响应率上却相对受限。相比之下, PiN 结构探测器则能探测更长的波长, 展现出更高的响应率, 整体性能更优。这一对比分析不仅揭示了两种结构的各自特点, 还为后续探索高性能硅基光电探测器的研发方向提

表 1 近年来性能较好的硅基近红外光电探测器

Table 1 Silicon-based near-infrared band detectors with good performance in recent years

| 探测器类型                                    | 探测波长 (nm) | 响应度 (mA/W) | 比探测率 (Jones)            | 响应时间             | 参考文献 |
|------------------------------------------|-----------|------------|-------------------------|------------------|------|
| N-MoS <sub>2</sub> /P-Si                 | 550       | 9 000      | 10 <sup>14</sup>        | 16.00 μs         | [14] |
| N-TiO <sub>2</sub> /P-Si                 | 620       | 23 070     | 4.50 × 10 <sup>12</sup> |                  | [15] |
| P-PbS/N-Si                               | 1 540     | 264        | 1.47 × 10 <sup>11</sup> | 7.38 μs          | [16] |
| PtSe <sub>2</sub> /Si                    | 808       | 520        | 3.26 × 10 <sup>13</sup> | 55.30/170.50 μs  | [21] |
| Gr/N-Si                                  | 808       | 456        | 7.96 × 10 <sup>11</sup> |                  | [22] |
| MoS <sub>2</sub> /Si                     | 808       | 300        | 10 <sup>13</sup>        | 3.00/40.00 μs    | [23] |
| 石墨烯/ Si                                  | 890       | 730        | 4.08 × 10 <sup>13</sup> | 320.00/750.00 μs | [24] |
| SnO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> /P-Si | 365~980   | 285~355    | 1.70 × 10 <sup>12</sup> | <0.10 s          | [25] |
| Ag/SiN <sub>x</sub> /Si/Ag               | 800       | 1 880      | 3.14 × 10 <sup>11</sup> | <40.00 ms        | [26] |
| 石墨烯量子点/WSe <sub>2</sub> /Si              | 740       | 707        | 4.51 × 10 <sup>9</sup>  | 0.20 ms          | [27] |
| GeSi(P-i-N)                              | 1 550     | 920        |                         |                  | [18] |
| 石墨烯/Si(P-i-N)                            | 1 550     | 11         |                         | 15.00 ps         | [19] |
| Ge/Si(P-i-N)                             | 1 550     | 133        |                         |                  | [20] |
| 绝缘体上的锗结构(P-i-N)                          | 1 550     | 390        |                         |                  | [28] |
| Si(P-i-N)                                | 850       | 440        |                         |                  | [29] |

供了有价值的参考。

### 3 基于二维材料的光电探测器

二维材料具有独特的光学、电学和力学性能,为众多至关重要的光电应用领域中的光电探测器研发提供了新的机遇与可能。此外,还具有载流子迁移率高、物质-光相互作用强、机械韧性和栅极控制好等优点,可应用在穿戴、便携式高性能电子和光电器件上。基于二维材料的光电探测器的结构独特、光电性能优良,吸引了许多研究项目。目前为止,已经有数百个基于二维材料的光电探测器被报道过<sup>[11]</sup>。本章主要对基于石墨烯、碲化合物、过渡金属硫族化合物 3 种材料的探测器进行对比分析。

#### 3.1 基于石墨烯材料的光电探测器

石墨烯材料的光学和电子特性较好,如高电子迁移率、高光学透明性、高电导率等,在电子和光电器件的开发中受到越来越多的关注,所以,石墨烯材料是一种很好的光电应用候选材料。由于石墨烯的载流子迁移率较高、波长吸收范围较宽,因此通常被用来制作高性能探测器。一些研究人员利用石墨烯优异的物理和化学性质与其他材料结合形成不同结构,提高探测器的探测波长和响应率。2018 年, Casalino 等<sup>[30]</sup>提出一种石墨烯/硅肖特基结近红外光电探测器。如图 8 所示,在零偏置和照射光波长为  $2\ \mu\text{m}$

的条件下,光电探测器在室温下的外部响应率为  $0.16\ \text{mA/W}$ 。

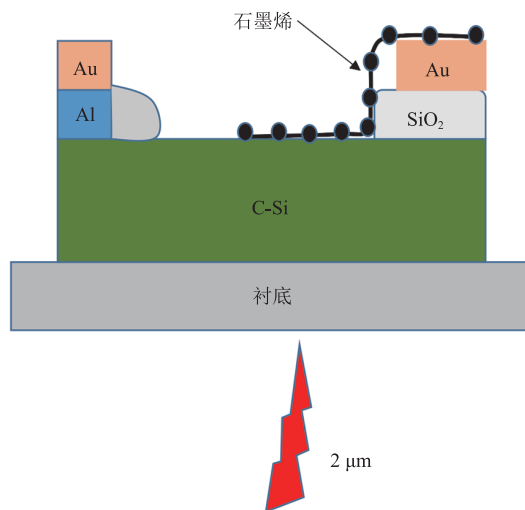


图 8 石墨烯/硅肖特基近红外光电探测器结构

Fig. 8 Graphene/silicon Schottky near-infrared photodetector structure

2020 年, Guo 等<sup>[31]</sup>提出一种硅-石墨烯混合等离子体波导光电探测器,该探测器引入了一个顶部带有金属帽的硅脊核心区,如图 9 所示。其中,  $W_m$  和  $h_m$  分别代表中间电极金属的宽度和厚度;  $W_{\text{Si}}$  和  $h_{\text{etch}}$  分别表示中间电极 Si 层的宽度和厚度;  $h_{\text{Si}}$  代表中间电极 Si 层与衬底 Si 层的总厚度;  $V_G$  表示栅极电压;  $V_b$  表示偏置电压。这种设计增强了石墨烯的光吸收,降低了金属的吸收损失,极大地促进了石墨烯的有效光吸收。此外,该设计中还引入了金属-石墨烯-金属电极结构,降低了金属与石墨烯之间的接触电阻,进而实

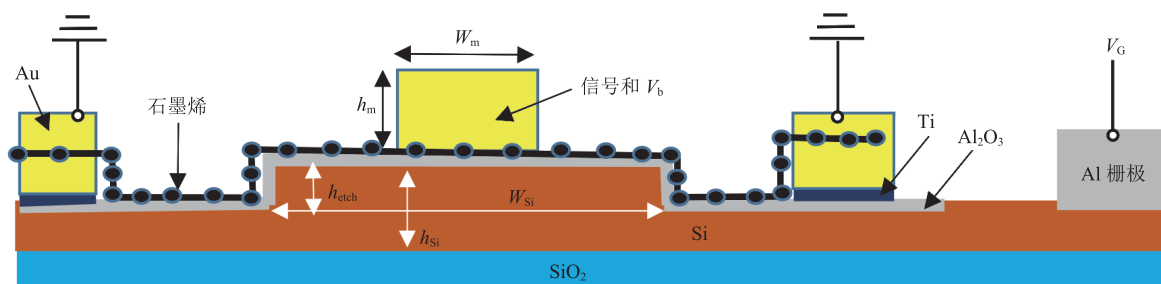


图 9 硅-石墨烯混合等离子体波导光电探测器结构

Fig. 9 Structure of silicon-graphene hybrid plasma waveguide photodetector

现了更快的响应速度。当入射光波长为  $1.55\ \mu\text{m}$  时, 该探测器的频率响应 3 dB 带宽超过 40 GHz。当入射光波长为  $2\ \mu\text{m}$ , 输入功率为 0.28 mW 时, 该光电探测器的响应率为 70 mA/W。

2021 年, Kim 等<sup>[32]</sup>提出一种石墨烯/锗肖特基结光电探测器。如图 10 所示, 该结构通过在石墨烯和锗之间插入一层较薄的氧化铝界面层, 增加低能载流子的隧穿距离, 降低界面上的费米能级钉扎效应, 抑制暗电流, 提高石墨烯/锗肖特基结光电探测器的性能。通过此做法, 暗电流降低了两个数量级, 当照射光波长为  $1\ 550\ \text{nm}$  时, 光-暗电流比高达  $4.3 \times 10^7\ \text{W}^{-1}$ , 比探测率升至  $1.8 \times 10^{10}$  Jones, 响应率高达 1.2 A/W, 比其他锗光电探测器高 10~100 倍。

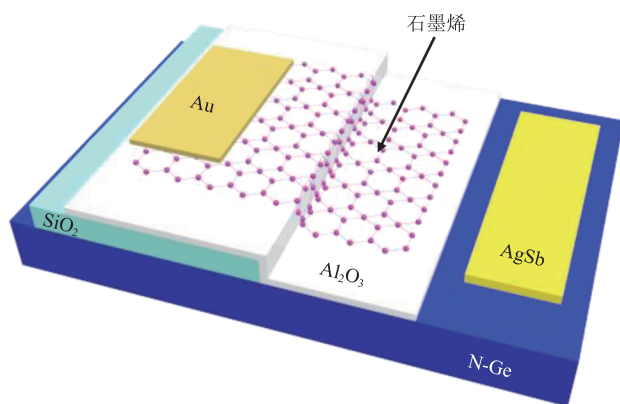


图 10 石墨烯/锗肖特基结光电探测器结构

Fig. 10 Graphene/germanium Schottky junction photodetector structure

上述基于石墨烯的近红外光电探测器的探测波段长、响应速度快, 得益于石墨烯优越的载流子迁移率和零带隙的线性色散。然而, 尽管具备这些优点, 但该探测器仍受响应率较低的限制, 在很多通信领域难以应用。为实现超高响应率光电探测器, 2018 年, Luo 等<sup>[33]</sup>提出一种基于单层石墨烯的、具有简单器件结构的光电探测器。如图 11 所示, 该结构将 N 型重掺杂的硅/二氧化硅(Si/SiO<sub>2</sub>)作为衬底, 将石墨烯作为吸收光区域。在光电探测器中, 衬底有效地吸收光能,

进而产生了显著的光电流, 提升了探测器的响应率。此外, Si/SiO<sub>2</sub> 界面因弯曲效应而产生了一个有效的电场, 该电场能够高效地分离硅中由光子激发产生的电子空穴对。这一机制进一步促进光在重掺杂 Si/SiO<sub>2</sub> 衬底中的吸收, 从而使探测器产生了额外的光电压, 有效地调节了石墨烯的导电性。室温下, 当照射光波长为 450 nm 时, 该探测器的响应率高达 500 A/W; 当照射光波长为 1 064 nm 时, 响应率高达 4 A/W。

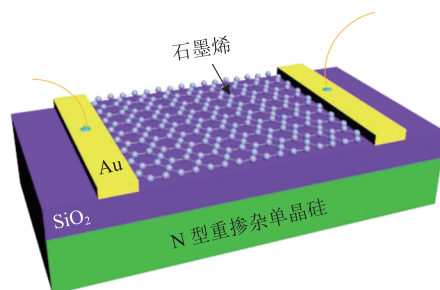


图 11 单层石墨烯光电探测器结构

Fig. 11 Structure of single-layer graphene photodetector

2020 年, Zhang 等<sup>[34]</sup>报道了一种石墨烯/磷化铟(Graphene/P-InP)肖特基结近红外光电探测器。如图 12 所示, 该探测器以 P-InP 半导体为衬底, 然后通过等离子体化学气相沉积工艺在 P-InP 底物上沉积了一个 200 nm 的氮化硅(SiN<sub>x</sub>)分离层, 之后利用离子刻蚀法刻出一个窗口, 并在窗口上生长一层 3 nm 的氧化铝钝化层。氧化

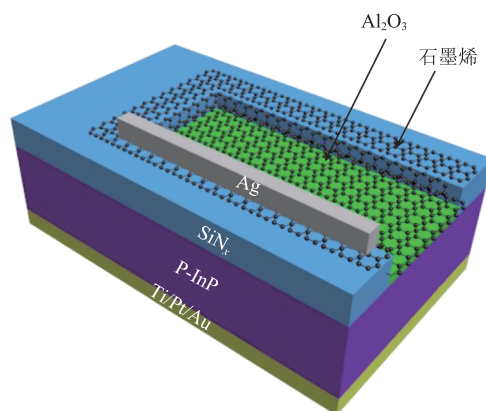


图 12 石墨烯/磷化铟肖特基结光电探测器结构

Fig. 12 Graphene/indium phosphide Schottky junction photodetector structure



铝钝化层厚度的进一步增加会阻碍载流子的转移和分离；相反，厚度的进一步减小会增加载流子的复合概率。因此，氧化铝钝化层优化了器件性能。该近红外光电探测器在偏置电压为 0 V 时，肖特基势垒可达到 0.89 eV，且在反向偏置电压为 0.4 V 时，对波长 808 nm 近红外光的响应和比探测率高达 5.2 mA/W 和  $1.3 \times 10^{10}$  Jones。

2021 年，Yousefi 等<sup>[35]</sup>提出一种在两个光通信波段(O 波段和 U 波段)中具有高响应率的石墨烯等离子体光电探测器。如图 13 所示，该光电探测器在光通信领域中的 O 波段与 U 波段展现出卓越的工作性能，其高响应率特性得益于器件结构巧妙结合了石墨烯层和等离子体纳米结构的双重优势。图中， $h$  代表 Ag 的厚度； $d$  为  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的厚度； $w$  为中间结构 Ag 的宽度； $l$  表示 Ag 与 Ag 之间的距离。石墨烯单层和等离子体结构的结合可增强光-石墨烯的相互作用，从而提

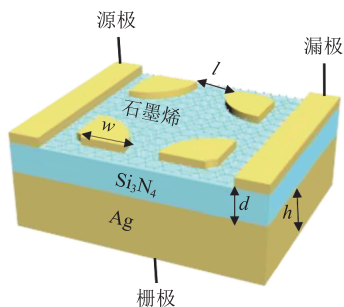
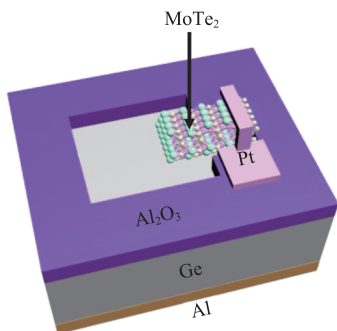
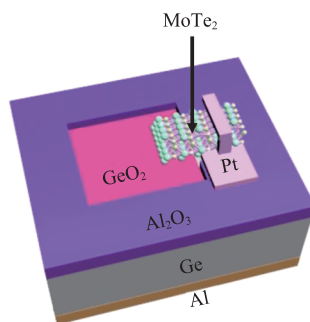


图 13 石墨烯等离子体光电探测器结构

Fig. 13 Structure of graphene plasma hotodetector



(a) MoTe<sub>2</sub>/Ge 光电探测器结构图



(b) MoTe<sub>2</sub>/GeO<sub>2</sub>/Ge 光电探测器结构图

图 14 两种碲化钼结构光电探测器示意图

Fig. 14 Schematic diagram of two molybdenum telluride structure photodetectors

高光电探测器的响应率。该光电探测器在波长为 1 310 nm 和 1 675 nm 时的响应率分别为 348 mA/W 和 460 mA/W，且在 0.2 eV 电势下，对光的吸收率分别高达 95% 和 97%，结构的带宽高达 60 GHz。

综上所述，光电探测器基于石墨烯的异质结构和杂化结构在实际应用中展现出了较高的光响应，主要得益于石墨烯的超高载流子迁移率，该特性使得石墨烯在光电转换过程中能迅速而有效地传输载流子，从而显著提升了光电探测器的性能。通过在器件结构中合理增加氧化层，可抑制暗电流，并可提高响应率，是提高器件结构的好方法。此外，由于石墨烯光电探测器的灵敏度较高，在光场成像领域展现出了巨大的应用潜力，因此，可促进热门领域智能机器人和电影产业的发展。

### 3.2 基于碲化化合物的光电探测器

碲化物的灵活性较高、频率响应较好、信噪比优异、带隙较窄、载流子迁移率较高、载流子寿命较长，在高性能光电探测器领域被广泛关注。为研究宽探测波长、高响应率近红外探测器，2020 年，Chen 等<sup>[36]</sup>提出了碲化钼/锗 (MoTe<sub>2</sub>/Ge) 异质结和碲化钼/二氧化锗/锗 (MoTe<sub>2</sub>/GeO<sub>2</sub>/Ge) 异质结两种近红外光电探测器。如图 14 所示，在 915 nm 的激光照射下，MoTe<sub>2</sub>/Ge 异质结光电探测器的响应率高达 12 460 A/W，响应时间短至 5 ms，比探测率为

$3.3 \times 10^{12}$  Jones。由于  $\text{MoTe}_2$  和 Ge 之间的势垒较低, 因此,  $\text{MoTe}_2/\text{Ge}$  异质结存在较大的反向电流。为降低反向电流, 在  $\text{MoTe}_2/\text{Ge}$  异质结中引入由臭氧氧化沉积的超薄二氧化锗层。 $\text{MoTe}_2/\text{GeO}_2/\text{Ge}$  异质结的反向电流从  $0.44 \mu\text{A}/\mu\text{m}^2$  降至  $0.03 \mu\text{A}/\mu\text{m}^2$ 。在  $915 \text{ nm}$  激光照射下,  $\text{MoTe}_2/\text{GeO}_2/\text{Ge}$  异质结近红外光电探测器的响应率为  $15.6 \text{ A/W}$ , 响应时间为  $5 \text{ ms}$ , 比探测率高达  $4.86 \times 10^{11}$  Jones。

2022 年, Song 等<sup>[37-38]</sup>提出了一种碲化锡( $\text{SnTe}$ )纳米膜近红外光电探测器和一种碲化锡/锗( $\text{SnTe}/\text{Ge}$ )异质结近红外光电探测器。 $\text{SnTe}$  纳米膜近红外光电探测器的结构如图 15 所示, 在  $400 \sim 1050 \text{ nm}$  的宽光谱范围内有光电响应。在  $940 \text{ nm}$  的近红外波段, 在光功率密度为  $0.2 \text{ mW}/\text{cm}^2$  的情况下, 该光电探测器的比探测率和响应率分别为  $3.46 \times 10^{11}$  Jones 和  $1.71 \text{ A/W}$ 。 $\text{SnTe}/\text{Ge}$  异质结近红外光电探测器如图 16 所示, 在波长为  $850 \text{ nm}$ 、光功率密度为  $13.81 \text{ mW}/\text{cm}^2$  的近红外照明下,  $\text{SnTe}/\text{n-Ge}$  光电探测器显示出  $0.05 \text{ V}$  的小开路电压, 上升时间和下降时间分别为  $206 \text{ ms}$  和  $267 \text{ ms}$ , 在偏置电压为  $0.5 \text{ V}$  时, 响应率高达  $617.34 \text{ mA/W}$ , 在零偏置下, 比探测率高达  $2.33 \times 10^{11}$  Jones。

由于碲化物材料的信噪比和频率响应较高, 因此, 上述探测器利用碲化物与锗材料形成的异

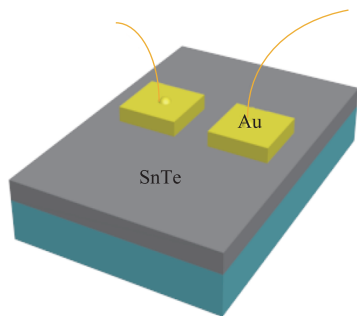


图 15 碲化锡纳米膜光电探测器结构

Fig. 15 Structure of tin telluride nanomembrane photodetector

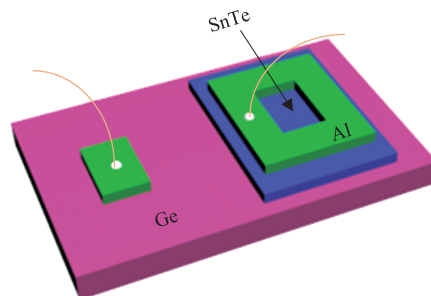


图 16 碲化锡/锗异质结光电探测器结构

Fig. 16 Structure of tin telluride/germanium heterojunction photodetector

质结构提高响应率, 但上述探测器的探测波长受限制, 抑制其通信应用范围。为研究探测波长宽的光电探测器, 2020 年, Tong 等<sup>[39]</sup>提出了一种二碲化铂/硅( $\text{PtTe}_2/\text{Si}$ )异质结近红外光电探测器。如图 17 所示, 该探测器通过  $\text{PtTe}_2/\text{Si}$  异质结(由  $\text{PtTe}_2$  和  $\text{Si}$  结合形成)制备, 稳定性较好。该探测器对  $200 \sim 1650 \text{ nm}$  波段内的入射光均有响应。当入射光波长为  $980 \text{ nm}$  时, 基于  $\text{PtTe}_2$  的光电探测器的响应度和比探测率分别为  $0.406 \text{ A/W}$  和  $3.62 \times 10^{12}$  Jones, 量子效率高达  $32.1\%$ , 上升和下降的响应时间分别为  $7.51 \mu\text{s}$  和  $36.7 \mu\text{s}$ 。

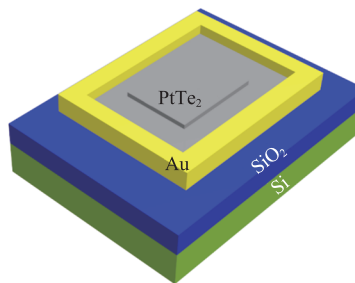


图 17 二碲化铂/硅异质结光电探测器结构

Fig. 17 Structure of platinum telluride/silicon heterojunction photodetector

2023 年, Shui 等<sup>[40]</sup>提出了一种金属-半导体-金属结构近红外光电探测器。如图 18 所示, 当照射光波长为  $1550 \text{ nm}$  时, 该探测器在室温下的电压响应率和电流响应率分别为  $3.4 \times 10^5 \text{ V/W}$  和  $170 \text{ mA/W}$ , 比探测率高达  $4 \times 10^9$  Jones, 偏振二向色性比可达 2.1。此外, 该探测器的工作

耐温高、稳定性好、响应速度快(响应时间快至 33 ms), 对 1 550 nm 偏振光的探测灵敏度高, 得益于 Te 微丝的高度各向异性结构。

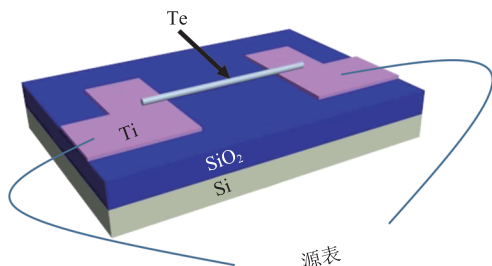


图 18 金属-半导体-金属光电探测器结构

Fig. 18 Structure of metal-semiconductor-metal photodetector

在研发基于碲化物材料的光电探测器时, 一个关键策略在于巧妙地利用金属与半导体材料界面处形成的 P-N 结或肖特基结所产生的强大内嵌电场。这一机制不仅能够有效抑制暗电流的产生, 从而显著降低噪声功率, 还能大幅提升探测器的响应效率, 因此被视为构建高性能光电探测器的坚实基础。此外, 为了进一步增强材料的光吸收能力, 研究者还采取了构建人工金属微结构以及设计谐振腔等创新手段, 这些措施在提升光吸收率方面发挥着举足轻重的作用。

### 3.3 基于过渡金属硫族化合物的光电探测器

二维金属硫族化合物的结构和物理性质较好, 如红外检测性能好、响应率和探测率高、工作性稳定等, 引起越来越多的关注, 为红外光电探测器开辟了新前景。为研究基于硫化物的高性能近红外光电探测器, 2018 年, Wang 等<sup>[41]</sup>提出一种基于二硫化钼/碲化镉( $\text{MoS}_2/\text{CdTe}$ )PN 异质结的光电探测器。如图 19 所示, 该光电探测器在 200~1 700 nm 表现出光响应, 在波长为 780 nm 的光照下, 响应率高达 36.6 mA/W, 比探测率高达  $6.1 \times 10^{10}$  Jones, 表明  $\text{MoS}_2/\text{CdTe}$  PN 异质结在室温红外检测中的潜力较大。

2020 年, Jiang 等<sup>[42]</sup>提出一种二硫化锡/纤锌矿( $\text{SnS}_2/\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ )异质结光电探测器。如图 20 所

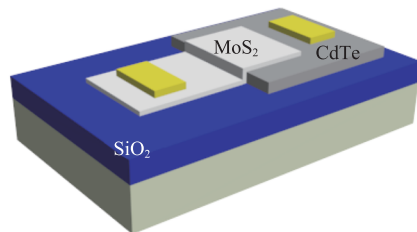


图 19 二硫化钼/碲化镉 PN 异质结光电探测器结构

Fig. 19 Structure of molybdenum disulfide/cadmium telluride PN heterojunction photodetector

示, 该探测器的探测范围覆盖了紫外到近红外波段。在波长为 365 nm 的光照射下,  $\text{SnS}_2/\text{ZnO}_{0.7}\text{S}_{0.3}$  异质结光电探测器的响应率为 8.28 mA/W, 比探测率为  $5.09 \times 10^{10}$  Jones, 开关比为  $1.08 \times 10^5$ , 且响应速度较快, 上升时间为 49.51 ms, 下降时间为 25.93 ms。上述优异性能得益于 S 元素的掺杂对氧化锌能带结构的优化。通过掺杂, 氧化锌的价带最大值和导带最小值被提升, 有效减少了异质结界面上载流子的复合过程, 显著提升了  $\text{SnS}_2/\text{ZnO}_{0.7}\text{S}_{0.3}$  器件的整体性能。

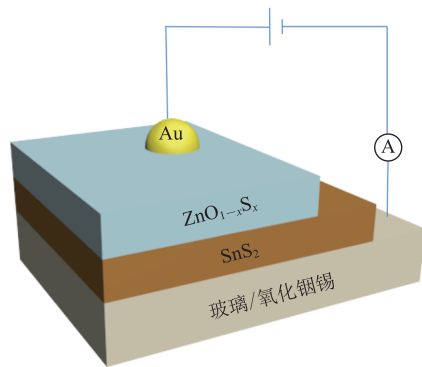


图 20 二硫化锡/纤锌矿异质结光电探测器结构

Fig. 20 Structure of tin disulfide/wurtzite heterojunction photodetector

上述探测器虽然通过将硫化物与其他材料结合拓宽了探测范围, 但其响应率较低, 限制了其应用发展。为研究高响应率硫化物探测器, 2020 年, Kharadi 等<sup>[43]</sup>提出一种硅/二硫化钼( $\text{Si}/\text{MoS}_2$ )异质结光电探测器。如图 21 所示, 该探测器以  $\text{MoS}_2$  半导体层为光吸收层, 以 Si 层为高载流子

运输路径。在波长为 650 nm 的光照下, 该探测器的响应率高达  $5.66 \times 10^5$  A/W, 比探测率高达  $4.76 \times 10^{10}$  Jones, 在 1 V 偏置电压下, 光电导增益高达  $2.5 \times 10^{11}$ 。由于载流子在硅中的高迁移率

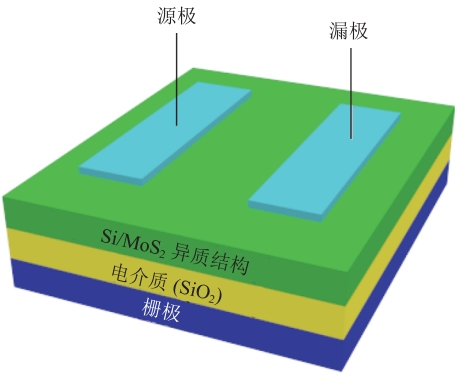


图 21 硅/二硫化钼异质结光电探测器结构

Fig. 21 Structure of silicon/molybdenum disulfide heterojunction photodetector

减少了光电探测器的传输时间, 因此, 光电导增益较高。

为提高金属硫族化合物光电探测器的性能, 可通过金属硫族化合物与其他二维材料或者半导体材料结合形成异质结的方式, 提高器件的探测波长范围和响应率。上述方式会增加异质结面的缺陷及晶格不匹配问题, 从而限制载流子的迁移率和瞬态响应, 但可通过优化材料制备方法、界面工程等手段优化器件性能。

为进一步了解基于各种二维材料的近红外光电探测器的研究进展, 本文列出了近年来较为先进的近红外光电探测器, 其性能参数如表 2 所示。

由表 2 可知, 在基于石墨烯材料的光电探测器中, Yousefi 等<sup>[35]</sup>所报道的光电探测器比

表 2 近年来基于二维材料较先进的近红外光电探测器

Table 2 Advanced near-infrared photodetectors based on two-dimensional materials in recent years

| 探测器类型                                   | 探测波长 (nm)   | 响应率 (mA/W)         | 比探测率 (Jones)          | 响应时间           | 参考文献 |
|-----------------------------------------|-------------|--------------------|-----------------------|----------------|------|
| 石墨烯/Ge                                  | 1 550       | 1 200.00           | $1.80 \times 10^{10}$ |                | [32] |
| 石墨烯/P-InP                               | 808         | 5.20               | $1.30 \times 10^{10}$ |                | [34] |
| 石墨烯/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>      | 1 675       | 460.00             |                       |                | [35] |
| MoTe <sub>2</sub> /石墨烯/SnS <sub>2</sub> | 405~1 550   | $1.17 \times 10^4$ | $1.06 \times 10^9$    |                | [44] |
| 石墨烯/MoTe <sub>2</sub> /石墨烯              | 473~1 064   | 0.20               |                       | 0.07 ms        | [45] |
| Ge/石墨烯                                  | 350~1 650   | $6.62 \times 10^4$ |                       |                | [46] |
| MoTe <sub>2</sub> /Ge                   | 915         | $1.24 \times 10^7$ | $3.30 \times 10^{12}$ | 5.00 ms        | [36] |
| MoTe <sub>2</sub> /GeO <sub>2</sub> /Ge | 915         | $1.56 \times 10^4$ | $4.86 \times 10^{11}$ | 5.00 ms        | [36] |
| PtTe <sub>2</sub> /Si                   | 980         | 406.00             | $3.62 \times 10^{12}$ | 44.21 μs       | [37] |
| SnTe/Ge                                 | 940         | 1 710.00           | $3.46 \times 10^{11}$ |                | [38] |
| GaTe/InSe                               | 1 550       | 150.00             | $10^{12}$             | 0.80 s         | [47] |
| MoTe <sub>2</sub> /Si                   | 980         | 190.00             | $6.80 \times 10^{13}$ | 150.00 ns      | [48] |
| Te                                      | 1 700       | $1.60 \times 10^4$ | $2.00 \times 10^9$    |                | [49] |
| 2H-MoTe <sub>2</sub>                    | 1 260~1 360 | 400.00             |                       |                | [50] |
| MoS <sub>2</sub> /CdTe                  | 200~1 700   | 36.60              | $6.10 \times 10^{10}$ |                | [41] |
| Si/MoS <sub>2</sub>                     | 650         | $5.66 \times 10^8$ | $4.76 \times 10^{10}$ |                | [43] |
| MoS <sub>2</sub> /石墨烯/GaAs              | 808         | 19.90              | $4.86 \times 10^{10}$ | 46.80/55.00 μs | [51] |
| MoS <sub>2</sub>                        | 637         | $3.26 \times 10^6$ | $9.00 \times 10^{14}$ | 480.00 μs      | [52] |
| MoS <sub>2</sub> /GaN/Si                | 300~1 100   | 23 810.00          | $1.18 \times 10^{12}$ | 1.16 ms        | [53] |
| SnS/Si                                  | 980         | 1 170.00           | $10^{12}$             | 11.00/11.00 ms | [54] |
| SnS                                     | 1 030       | 190.00             | $9.21 \times 10^{11}$ | 2.00 s         | [55] |
| 石墨烯/SnS <sub>2</sub>                    | 1 064       | 1 460.00           | $1.28 \times 10^{10}$ |                | [56] |



其他石墨烯光电探测器的探测波长范围宽, 最大探测波长能达到 1 675 nm, 原因是该探测器利用石墨烯单层和等离子体结构的结合, 增强了光-石墨烯的相互作用, 但该探测器的结构通过调节栅极电压来调整石墨烯化学势, 随着栅极电压的增加, 石墨烯的化学势也增加, 导致石墨烯单分子层的吸收降低, 从而降低了响应率; 而 Yang 等<sup>[46]</sup>报道的石墨烯探测器的响应率高达 66.2 A/W, 原因是器件结构中的铌和石墨烯之间的异质结构有效阻止了器件表面和界面上的载体组合, 以及铌和石墨烯界面上的光生载流子的有效分离和转移, 从而使响应率和导电增益都得到提高。在基于碲化物材料的光电探测器中, Amani 等<sup>[49]</sup>报道的光电探测器比其他基于碲化物材料的光电探测器的探测波段更宽, 高达 1 700 nm, 原因为该探测器结构中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  腔的厚度可以进行改变, 从而影响器件对光的吸收, 但该探测器的比探测率较低; 而 Chen 等<sup>[36]</sup>报道的光电探测器的响应率高达  $1.24 \times 10^4$  A/W, 比探测率高达  $3.3 \times 10^{12}$  Jones, 原因是该探测器中的  $\text{MoTe}_2$  和 Ge 与金属 (Al 和 Pt) 之间形成肖特基势垒, 可以实现快速的电子传输, 提高了响应速度, 但也制约少数载流子的流动, 从而减小了热噪声的影响, 并提高了比探测率。在基于金属硫族化合物的光电探测器中, Kharadi 等<sup>[43]</sup>提出的光电探测器比其他基于金属硫族化合物的光电探测器的响应率高, 高达  $5.66 \times 10^5$  A/W, 原因是  $\text{Si}/\text{MoS}_2$  异质结存在很高的界面结合能, 有助于保持良好的电子传输性能, 且  $\text{MoS}_2$  具有较高的光吸收速率及大量的边界和缺陷, 有利于吸附目标分子和增强系统的感知能力, 因此可提高系统的响应率和探测率。综上所述, 可利用二维材料中载流子数量较少的优势, 将暗电流降至较低水平, 以提高探测器的响应。但仍有一些缺点有待克服, 例如: 单层石墨烯的弱光吸收特性; 原子级薄二维材料容易受环境的影响, 特别是

窄带隙材料, 在环境空气中不稳定, 但是可以合理利用二维材料的异质结构和杂化结构来优化器件性能。因此, 二维材料的应用领域较广泛, 特别地, 二维材料的柔性特性对柔性 and 可穿戴电子领域、生物医学、航空通信等意义重大。

#### 4 基于钙钛矿材料的光电探测器

金属卤化物钙钛矿材料具有电子空穴扩散长度大<sup>[57-58]</sup>、迁移率高、光伏能量转换能力好等优点, 在光电应用中得到广泛关注<sup>[59-61]</sup>。许多基于钙钛矿的光电探测器已被制造出来, 并被用于高灵敏度的检测。然而, 在近红外探测波段中, 钙钛矿固有的光学带隙限制了光谱探测的发展。为解决此问题, 许多研究者对钙钛矿光电探测器进行了研究。2019 年, Upadhyay 等<sup>[62]</sup>提出了一种基于碘化铅甲胺/铁酸铋 ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{BiFeO}_3$ ) 异质结结构的近红外光电探测器。如图 22 所示, 该钙钛矿异质结光电探测器在波长为 400~900 nm 的近红外光照射下, 展现出广泛的响应能力, 而且具备双波段响应特性。这一独特性能归因于构成异质结的两种材料—— $\text{BiFeO}_3$  和  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  钙钛矿各自独特的光吸收特性。在波长为 800 nm 的激光照射下, 当反向偏置电压为 2 V 时, 该探测器的响应率高达 2 A/W, 比探

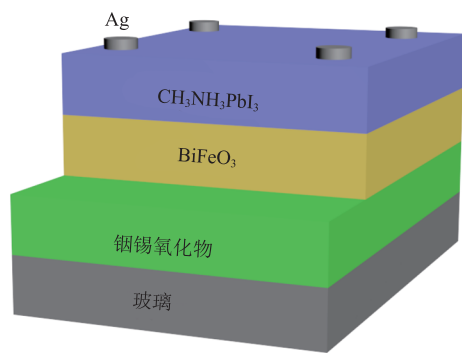


图 22 碘化铅甲胺/铁酸铋异质结光电探测器结构

Fig. 22 Structure of lead methylamine iodide/bismuth ferrite heterojunction photodetector

测率高达  $7.8 \times 10^{12}$  Jones, 响应速度也较快, 上升时间和下降时间分别为 0.740 s 和 0.088 s, 核心原因在于该探测器将  $\text{BiFeO}_3$  作为滤光层和孔阻挡层。这种设计不仅通过  $\text{BiFeO}_3$  在特定光谱区域的光吸收特性筛选和增强了所需波段的光信号, 还通过结合铟掺杂氧化锡与  $\text{BiFeO}_3$  孔阻挡层, 进一步提升了探测器的响应率。

2020 年, Guo 等<sup>[63]</sup>提出一种基于碘化铅甲胺/二硒化铜铟( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{CuInSe}_2$ )量子点的近红外光电探测器。如图 23 所示, 该探测器以  $\text{CuInSe}_2$  量子点/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  薄膜为光活性层, 以增强光电流、抑制暗电流。 $\text{CuInSe}_2$  量子点与卤化物钙钛矿的联合光吸收效应可提高光电转换能力, 且  $\text{CuInSe}_2$  量子点作为一种电子阻挡层, 可有效阻挡电子进入空穴输运层, 因此可降低热噪声。在波长为 580 nm 的激光照射下, 优化后的光电探测器的响应率大于 150 mA/W, 比探测率大于  $7.0 \times 10^{12}$  Jones; 在 850 nm 激光照射下, 优化后的光电探测器的响应率大于 20 mA/W, 比探测率大于  $7.7 \times 10^{11}$  Jones。此外,  $\text{CuInSe}_2$  量子点层使钙钛矿的密度更大、更防水, 因此可提高探测器的环境稳定性和热稳定性, 甚至可将工作温度扩展到 150 °C 以上。

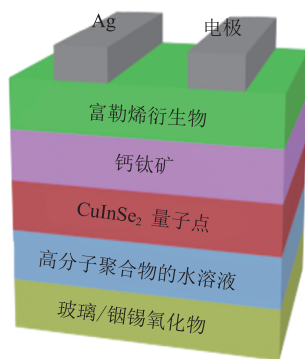


图 23 碘化铅甲胺/二硒化铜铟量子点光电探测器结构

Fig. 23 Structural of lead iodide/copper indium diselenide quantum dot photodetector

上述钙钛矿探测器虽然利用材料掺杂和量子点结构提高了探测器的探测波段, 但响应率

较低, 限制了该探测器的应用发展。因此, 如何提高钙钛矿探测器的响应率成为当前研究领域的主要问题。2021 年, Asuo 等<sup>[64]</sup>提出一种基于碘化铅甲胺/硅纳米线( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{Silicon Nanowires, SiNW}$ )异质结的光电探测器, 可探测紫外光、近红外光。如图 24 所示, 该探测器的制备基于碘化物钙钛矿和 SiNW 阵列的组合。具体而言, 该制备流程首先将 N 型硅晶片作为基底, 随后使用金属辅助镀锌蚀刻技术, 通过浸没法制造密集垂直排列的 SiNW 阵列。然后, 将硫氰酸铅( $\text{Pb}(\text{SCN})_2$ )掺杂的钙钛矿溶液通过旋涂直接沉积在 SiNW 上, 随后, 钙钛矿被转化为纳米纤维或薄膜。在波长为 532 nm 的光照下, 优化后的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{SiNW}$  异质结光电探测器的响应率高达 13 A/W, 比探测率高达  $10^{13}$  Jones, 上升/下降时间为 22.2/17.6  $\mu\text{s}$ 。

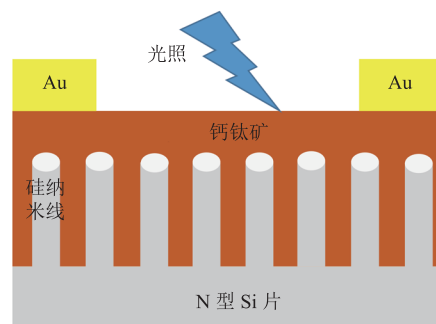


图 24 碘化铅甲胺/硅纳米线异质结光电探测器结构

Fig. 24 Structure of lead methylamine iodide/silicon nanowire heterojunction photodetector

2023 年, Yang 等<sup>[65]</sup>提出一种银/钛酸钡/银 ( $\text{Ag}/\text{BaTiS}_3/\text{Ag}$ ) 光电探测器, 该探测器的探测波长范围为 365~1 550 nm, 如图 25 所示。该探测器经过适当的硫化后, 表面硫空位缺陷被钝化,  $\text{BaTiS}_3$  光电探测器的暗电流被抑制。因此, 该器件的开关比和响应率较高。此外, 缺陷的冻结和晶格振动散射效应的减弱使得器件在 80 K 下的响应速度得到了显著提高。在波长为 780 nm、功率为  $12.8 \text{ mW}/\text{cm}^2$  的光照下, 当偏置电压为 1 V 时, 硫化  $\text{BaTiS}_3$  器件的上升时间和下降时间分别

为 263.8 ms 和 180.5 ms。在波长为 780 nm、功率为  $16.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  的光照下, 该探测器的响应率和比探测率分别高达  $1.22 \text{ A}/\text{W}$  和  $3.8 \times 10^{10} \text{ Jones}$ 。

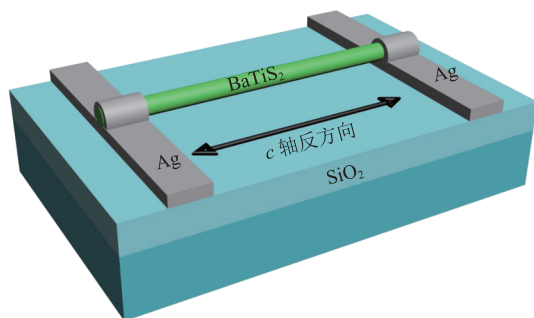


图 25 银/钛酸钡/银光电探测器结构

Fig. 25 Structure of silver/barium titanate/silver photodetector

为进一步了解基于钙钛矿近红外光电探测器的研究进展, 本文列出了近年来较为先进的光电探测器的性能参数, 并对各光电探测器的性能参数进行对比分析, 如表 3 所示。

由表 3 可知, 在基于钙钛矿的光电探测器中, Upadhyay 等<sup>[62]</sup>提出的钙钛矿光电探测器比其他钙钛矿光电探测器的性能参数好, 响应率高达  $2 \text{ A}/\text{W}$ , 比探测率高达  $7.8 \times 10^{12} \text{ Jones}$ , 原因是探测器中的  $\text{BiFeO}_3$  和  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  钙钛矿对光的吸收特性, 以及  $\text{BiFeO}_3$  作为滤光层和孔阻挡层提高了响应率, 但该探测器的响应速度比其他钙钛矿光电探测器低。Ollero 等<sup>[67]</sup>提出的钙钛矿光电探测器的响应速度比其他钙钛矿探测器

快, 原因是该探测器通过调整钙钛矿界面处的阻挡层能级, 控制了暗电流密度, 使电子阻断层和钙钛矿之间的界面势垒最大化, 降低了反向暗电流密度, 提高了响应速度。综上所述, 为实现高性能钙钛矿光电探测器, 可以合理利用异质结结构或量子点结构, 增强载流子分离, 提高响应率, 并优化器件的其他性能。但是上述方式还存在一些缺点, 如界面缺陷、制备复杂、容易受环境条件影响等, 可以通过材料优化、工艺优化、封装保护等方式克服上述缺点。因此, 钙钛矿光电探测器在新型、精细电子和医疗设备等领域的应用前景较好。

## 5 结 论

近红外光电探测器是一种可针对近红外光波段进行高灵敏度检测的光电传感器。本文综述了国内外近年来基于不同材料的近红外光电探测器的研究进展, 讨论了基于 PN、PiN 异质结的硅基光电探测器, 介绍了基于二维材料, 即石墨烯、碲化合物、过渡金属二卤代化合物的近红外光电探测器的研究进展, 阐述了基于钙钛矿材料的光电探测器。本文对多种材料的近红外光电探测器的性能参数进行比较分析, 说明了各近红外光电探测器在红外光电系统的潜在应用前景。

由于硅材料具备高速电子载流子传输和快速

表 3 近年来基于钙钛矿较先进的近红外光电探测器

Table 3 Advanced near-infrared photodetectors based on perovskite materials in recent years

| 探测器类型                                                                      | 探测波长 (nm) | 响应率 (mA/W) | 比探测率 (Jones)          | 响应时间               | 参考文献 |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|-----------------------|--------------------|------|
| $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{BiFeO}_3$                        | 800       | 2 000      | $7.80 \times 10^{12}$ | 828 ms             | [62] |
| $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{CuInSe}_2$                       | 850       | 20         | $7.70 \times 10^{11}$ |                    | [63] |
| Ag/BaTiS <sub>3</sub> SCs /Ag                                              | 780       | 1 220      | $3.80 \times 10^{10}$ |                    | [65] |
| $\text{MAPb}(\text{I}_{1-x}\text{Br}_x)_3$                                 | 740       | 331        | $4.20 \times 10^{10}$ | 380 $\mu\text{s}$  | [66] |
| $\text{FA}_{0.66}\text{MA}_{0.34}\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}\text{I}_3$ | 940       | 500        | $2.50 \times 10^{12}$ | 1.67 $\mu\text{s}$ | [67] |
| $\text{MAPbI}_3/\text{CdS}$                                                | 730       | 430        | $2.30 \times 10^{11}$ |                    | [68] |
| $\text{MAPbI}_{2.5}\text{Br}_{0.5}$ /碳量子点                                  | 975       | 100        | $4.00 \times 10^{12}$ | 10 $\mu\text{s}$   | [69] |
| $\text{FAPb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}\text{I}_3/\text{SnS}$ 量子点                | 850       | 522        | $2.57 \times 10^{12}$ | 41 $\mu\text{s}$   | [70] |



响应的能力,同时对可见光和近红外光具有较高的灵敏度,能够检测到较低的光信号,加之成本低廉,微结构加工技术已高度成熟,因此能制造出体积小且性能优异的硅基光电探测器。由上述对比分析 PN 和 PiN 结构可知, PiN 结构更有利于光电探测器的性能提升,特别是在提高探测波段时, PiN 结构光电探测器通过优化能带结构和载流子的运动特性,提高了探测器的探测波段范围和性能指标,因此,硅基光电探测器的响应速度较快,适用于高速光通信、虹膜识别、光电转换和图像采集等领域。二维材料的高光电转换效率和低暗电流使得基于二维材料的光电探测器的响应速度更快。对基于二维材料(如石墨烯、过渡金属硫化物、碲化物、钙钛矿等)的光电探测器进行性能对比分析可知:基于石墨烯的光电探测器灵敏度高、响应速度快,且单层石墨烯的透光率高、暗电流噪声低,有利于提高探测器的信噪比,但是吸收率较低,需要利用较厚的材料层提高探测器的吸收率;而基于过渡金属硫化物和碲化物的光电探测器却具有较高的吸收率和灵敏度,能在较薄的材料层中实现高效的光吸收和光电转换,但其载流子迁移率较低,响应速度较慢;钙钛矿具有较高的载流子迁移率和较快的响应速度,适用于高速光电探测,但钙钛矿材料的稳定性较差,易受潮和氧化,因此,基于钙钛矿材料的光电探测器的长期稳定性较差。综上所述,二维材料(如石墨烯、过渡金属硫化物、碲化物、钙钛矿等)在应用于近红外光电探测器时,各有优劣。在研究高性能探测器时,可以根据具体需求和应用场景,选择合适的材料用于近红外光电探测器。由于不同的二维材料具有不同的能带结构,基于不同二维材料的光电探测器具有不同的波长响应,因此可实现宽波段响应,并可在光通信、生物医学、柔性电子、光电子、机器人等领域广泛应用。综上所述,基于不同材料的探测器具有不同缺陷,为解决缺陷,可利用等

离子体集成技术、量子点杂化、异质结构等进一步优化器件设计和制造技术,以提高器件的质量。此外,利用 PN 异质结或肖特基势垒的结构抑制暗电流和其他噪声源,为后续实现高性能光电探测器提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] Lin QQ, Armin A, Burn PL, et al. Filterless narrowband visible photodetectors [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(10): 687-694.
- [2] Li QY, Guo YL, Liu YQ. Exploration of near-infrared organic photodetectors [J]. *Chemistry of Materials*, 2019, 31(17): 6359-6379.
- [3] Wang FK, Zhang Y, Gao Y, et al. 2D metal chalcogenides for IR photodetection [J]. *Small*, 2019, 15(30): 1901347.
- [4] 钱广, 李冠宇, 牛斌, 等. 高速 InP 基电光调制器和光电探测器 [J]. *固体电子学研究进展*, 2019, 39(4): 313.  
Qian G, Li GY, Niu B, et al. High-speed InP-based electro-optic modulator and photodetector [J]. *Research & Progress of SSE*, 2019, 39(4): 313.
- [5] 韩孟序, 齐利芳, 尹顺政. InGaAs/InP 台面型 pin 高速光电探测器 [J]. *微纳电子技术*, 2021, 58(3): 196-200.  
Han MX, Qi LF, Yin SZ. InGaAs/InP Mesa pin high-speed photodetector [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2021, 58(3): 196-200.
- [6] Lockwood DJ, Pavesi L. *Silicon Photonics II: Components and Integration* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 119.
- [7] Harjanne M, Kapulainen M, Ylinen S, et al. Hybrid integration of InP photodetectors with SOI waveguides using thermocompression bonding [C] // *Proceedings of the Silicon Photonics and Photonic Integrated Circuits II*, 2010: 169-179.
- [8] Parihar MS, Lee KH, Park HJ, et al. Insight into carrier lifetime impact on band-modulation devices [J]. *Solid-State Electronics*, 2018, 143: 41-48.
- [9] 冯松, 高勇, 薛斌. 微纳米 SiGe-SOI 弯曲波导的设计 [J]. *固体电子学研究进展*, 2015, 35(1): 71-75.  
Feng S, Gao Y, Xue B. Design of micro-nano SiGe-SOI bending waveguide [J]. *Research & Progress*



- of SSE, 2015, 35(1): 71-75.
- [10] Feng S, Xue B. Research into two photonic-integrated waveguides based on SiGe material [J]. *Materials*, 2020, 13(8): 1877.
- [11] Long MS, Wang P, Fang HH, et al. Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(19): 1803807.
- [12] Li CL, Ma Y, Xiao YF, et al. Advances in perovskite photodetectors [J]. *InfoMat*, 2020, 2(6): 1247-1256.
- [13] Pradhan B, Kumar GS, Sain S, et al. Size tunable cesium antimony chloride perovskite nanowires and nanorods [J]. *Chemistry of Materials*, 2018, 30(6): 2135-2142.
- [14] Dhyani V, Dwivedi P, Dhanekar S, et al. High performance broadband photodetector based on MoS<sub>2</sub>/porous silicon heterojunction [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(19): 191107.
- [15] Chauhan KR, Patel DB. Functional nanocrystalline TiO<sub>2</sub> thin films for UV enhanced highly responsive silicon photodetectors [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 792: 968-975.
- [16] Xu KM, Xiao XB, Zhou WJ, et al. Inverted Si: PbS colloidal quantum dot heterojunction-based infrared photodetector [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(13): 15414-15421.
- [17] Li G, Maekita K, Mitsuno H, et al. Over 10 GHz lateral silicon photodetector fabricated on silicon-on-insulator substrate by CMOS-compatible process [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2015, 54(4S): 04DG06.
- [18] Chen HT, Galili M, Verheyen P, et al. 100-Gbps RZ data reception in 67-GHz Si-contacted germanium waveguide p-i-n photodetectors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 35(4): 722-726.
- [19] Li TT, Mao D, Petrone NW, et al. Spatially controlled electrostatic doping in graphene p-i-n junction for hybrid silicon photodiode [J]. *npj 2D Materials and Applications*, 2018, 2(1): 36.
- [20] Aliane A, Ouvrier-Buffet JL, Ludurczak W, et al. Fabrication and characterization of sensitive vertical P-i-N germanium photodiodes as infrared detectors [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2020, 35(3): 035013.
- [21] Xie C, Zeng LH, Zhang ZX, et al. High-performance broadband heterojunction photodetectors based on multilayered PtSe<sub>2</sub> directly grown on a Si substrate [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(32): 15285-15293.
- [22] Tang YL, Chen J. High responsivity of Gr/ n-Si Schottky junction near-infrared photodetector [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2021, 150: 106803.
- [23] Wang L, Jie JS, Shao ZB, et al. MoS<sub>2</sub>/Si heterojunction with vertically standing layered structure for ultrafast, high-detectivity, self-driven visible-near infrared photodetectors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(19): 2910-2919.
- [24] Li XM, Zhu M, Du MD, et al. High detectivity graphene-silicon heterojunction photodetector [J]. *Small*, 2016, 12(5): 595-601.
- [25] Ling CC, Guo TC, Lu WB, et al. Ultrahigh broadband photoresponse of SnO<sub>2</sub> nanoparticle thin film/SiO<sub>2</sub>/p-Si heterojunction [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(25): 8848-8857.
- [26] Xu M, Xu ZH, Sun ZH, et al. Surface engineering in SnO<sub>2</sub>/Si for high-performance broadband photodetectors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(2): 3664-3672.
- [27] Sun MX, Fang QY, Xie D, et al. Heterostructured graphene quantum dot/WSe<sub>2</sub>/Si photodetector with suppressed dark current and improved detectivity [J]. *Nano Research*, 2018, 11(6): 3233-3243.
- [28] Lin YD, Lee KH, Bao SY, et al. High-efficiency normal-incidence vertical p-i-n photodetectors on a germanium-on-insulator platform [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(6): 702-709.
- [29] Chatterjee A, Sikdar SK, Selvaraja SK. High-speed waveguide integrated silicon photodetector on a SiN-SOI platform for short reach datacom [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(7): 1682-1685.
- [30] Casalino M, Russo R, Russo C, et al. Free-space schottky graphene/silicon photodetectors operating at 2  $\mu\text{m}$  [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(11): 4577-4585.
- [31] Guo JS, Li J, Liu CY, et al. High-performance silicon-graphene hybrid plasmonic waveguide photodetectors beyond 1.55  $\mu\text{m}$  [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 29.

- [32] Kim C, Yoo TJ, Chang KE, et al. Highly responsive near-infrared photodetector with low dark current using graphene/germanium Schottky junction with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  interfacial layer [J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(5): 1573-1579.
- [33] Luo F, Zhu MJ, Tan Y, et al. High responsivity graphene photodetectors from visible to near-infrared by photogating effect [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(11): 115106.
- [34] Zhang T, Chen J. Graphene/InP Schottky junction near-infrared photodetectors [J]. *Applied Physics A*, 2020, 126: 832.
- [35] Yousefi S, Pourmahyabadi M, Rostami A. Highly efficient dual band graphene plasmonic photodetector at optical communication wavelengths [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2021, 20: 255-261.
- [36] Chen WJ, Liang RR, Zhang SQ, et al. Ultrahigh sensitive near-infrared photodetectors based on  $\text{MoTe}_2$ /germanium heterostructure [J]. *Nano Research*, 2020, 13(1): 127-132.
- [37] Song LY, Tang LB, Hao Q, et al. Large-area SnTe nanofilm: preparation and its broadband photodetector with ultra-low dark current [J]. *Optics Express*, 2022, 30(9): 14828-14838.
- [38] Song LY, Tang LB, Hao Q, et al. Broadband photodetector based on SnTe nanofilm/n-Ge heterostructure [J]. *Nanotechnology*, 2022, 33(42): 425203.
- [39] Tong XW, Lin YN, Huang R, et al. Direct tellurization of Pt to synthesize 2D  $\text{PtTe}_2$  for high-performance broadband photodetectors and NIR image sensors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(48): 53921-53931.
- [40] Shui ZD, Wang SY, Yang ZH, et al. Polarization-sensitive self-powered tellurium microwire near-infrared photodetector [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122(10): 101902.
- [41] Wang YG, Huang XW, Wu D, et al. A room-temperature near-infrared photodetector based on a  $\text{MoS}_2$ /CdTe p-n heterojunction with a broadband response up to 1 700 nm [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(18): 4861-4865.
- [42] Jiang JC, Huang JY, Ye ZZ, et al. Self-powered and broadband photodetector based on  $\text{SnS}_2/\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$  heterojunction [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 7(20): 2000882.
- [43] Kharadi MA, Malik GFA, Khanday FA, et al. Silicene/ $\text{MoS}_2$  heterojunction for high-performance photodetector [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 68(1): 138-143.
- [44] Li AL, Chen QX, Wang PP, et al. Ultrahigh-sensitive broadband photodetectors based on dielectric shielded  $\text{MoTe}_2$ /graphene/ $\text{SnS}_2$  p-g-n junctions [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(6): 1805656.
- [45] Zhang K, Fang X, Wang YL, et al. Ultrasensitive near-infrared photodetectors based on a graphene- $\text{MoTe}_2$ -graphene vertical van der Waals heterostructure [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(6): 5392-5398.
- [46] Yang F, Cong H, Yu K, et al. Ultrathin broadband germanium-graphene hybrid photodetector with high performance [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(15): 13422-13429.
- [47] Qi TL, Gong YP, Li AL, et al. Interlayer transition in a vdW heterostructure toward ultrahigh detectivity shortwave infrared photodetectors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(3): 1905687.
- [48] Lu ZJ, Xu Y, Yu YQ, et al. Ultrahigh speed and broadband few-layer  $\text{MoTe}_2$ /Si 2D-3D heterojunction-based photodiodes fabricated by pulsed laser deposition [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(9): 1907951.
- [49] Amani M, Tan CL, Zhang G, et al. Solution-synthesized high-mobility tellurium nanoflakes for short-wave infrared photodetectors [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(7): 7253-7263.
- [50] Ma P, Flory N, Salamin Y, et al. Fast  $\text{MoTe}_2$  waveguide photodetector with high sensitivity at telecommunication wavelengths [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1846-1852.
- [51] Qu JQ, Chen J. Graphene/GaAs Schottky junction near-infrared photodetector with a  $\text{MoS}_2$  quantum dots absorption layer [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(8): 4331-4336.
- [52] Wang XD, Shen H, Chen Y, et al. Multimechanism synergistic photodetectors with ultrabroad spectrum response from 375 nm to 10  $\mu\text{m}$  [J]. *Advanced Science*, 2019, 6(15): 1901050.

- [53] Singh DK, Pant RK, Nanda KK, et al. Differentiation of ultraviolet/visible photons from near infrared photons by  $\text{MoS}_2/\text{GaN}/\text{Si}$ -based photodetector [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(12): 121102.
- [54] Li XY, Ruan SC, Zhu HO. Easy fabrication of performant and broadband response  $\text{SnS}/\text{Si}$  photodetector [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, 151: 106991.
- [55] Vinoth E, Archana J, Harish S, et al. Hydrothermally derived layered 2D  $\text{SnS}$  nanosheets for near infrared (NIR) photodetectors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(24): 1499-1502.
- [56] Zhao Y, Tsai TY, Wu G, et al. Graphene/ $\text{SnS}_2$  van der Waals photodetector with high photoresponsivity and high photodetectivity for broadband 365–2 240 nm detection [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(39): 47198-47207.
- [57] Zhang FY, Yang B, Li YJ, et al. Extra long electron-hole diffusion lengths in  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  perovskite single crystals [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(33): 8431-8435.
- [58] Li Y, Yan WB, Li YL, et al. Direct observation of long electron-hole diffusion distance in  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite thin film [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14485.
- [59] Lian ZP, Yan QF, Gao TT, et al. Perovskite  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  (Cl) single crystals: rapid solution growth, unparalleled crystalline quality, and low trap density toward  $10^8 \text{ cm}^{-3}$  [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 138(30): 9409-9412.
- [60] Wang BH, Chen T. Exceptionally stable  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  films in moderate humid environmental condition [J]. *Advanced Science*, 2016, 3(2): 1500262.
- [61] Huang JB, Tan SQ, Lund PD, et al. Impact of  $\text{H}_2\text{O}$  on organic-inorganic hybrid perovskite solar cells [J]. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10(11): 2284-2311.
- [62] Upadhyay RK, Singh AP, Upadhyay D, et al.  $\text{BiFeO}_3/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite heterojunction based near-infrared photodetector [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(12): 1961-1964.
- [63] Guo RQ, Bao CX, Gao F, et al. Double active layers constructed with halide perovskite and quantum dots for broadband photodetection [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(17): 2000557.
- [64] Asuo IM, Banerjee D, Pignolet A, et al. Perovskite/silicon-nanowire-based hybrid heterojunctions for fast and broadband photodetectors [J]. *Physica Status Solidi (RRL)—Rapid Research Letters*, 2021, 15(4): 2000537.
- [65] Yang FF, Li KH, Fan MZ, et al. Strongly anisotropic quasi-1D  $\text{BaTiS}_3$  chalcogenide perovskite for near-infrared polarized photodetection [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(5): 2201859.
- [66] Qiao S, Liu Y, Liu JH, et al. High-responsivity, fast, and self-powered narrowband perovskite heterojunction photodetectors with a tunable response range in the visible and near-infrared region [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(29): 34625-34636.
- [67] Ollearo R, Wang JK, Dyson MJ, et al. Ultralow dark current in near-infrared perovskite photodiodes by reducing charge injection and interfacial charge generation [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 7277.
- [68] García de Arquer FP, Gong XW, Sabatini RP, et al. Field-emission from quantum-dot-in-perovskite solids [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 14757.
- [69] Li ZB, Li HN, Jiang K, et al. Self-powered perovskite/ $\text{CdS}$  heterostructure photodetectors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(43): 40204-40213.
- [70] Liu ZR, Zhang ZG, Zhang XN, et al. Achieving high responsivity and detectivity in a quantum-dot-in-perovskite photodetector [J]. *Nano Letters*, 2023, 23(4): 1181-1188.