

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, (?:):??

Citing format

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

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: 新型材料如硅基、石墨烯、碲化合物、过渡金属二卤代化合物和钙钛矿具有独特的结构与性质, 是制备低功耗、高性能光电探测器的重要材料, 本文主要综述了基于PN、PiN异质结构的硅基近红外光电探测器研究进展, 介绍了基于二维材料, 如石墨烯、碲化合物、过渡金属二卤代化合物及钙钛矿材料的近红外光电探测器最新研究进展, 并对相关的近红外光电探测器性能参数进行了对比分析, 为后续研究高性能近红外光电探测器提供了思路和参考。

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 **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: FENG Song. School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, China.

Email: fengsong@xpu.edu.cn

Abstract: Compared with traditional compound semiconductor materials, new 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. This paper reviews recent research progress of silicon-based near-infrared photodetectors based on PN and PiN heterojunction structures, introduces the research progress of near-infrared photodetectors based on

来稿日期: 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, 研究方向为硅基电光调制器;

two-dimensional materials, including graphene, tellurium compounds, transition metal dihalogenated compounds and perovskite materials. Performance parameters of related near-infrared photodetectors are analyzed and compared in this review, which can provide reference for the subsequent research of high-performance near-infrared photodetectors.

Key words: Photodetectors; Near-infrared light; Silicon-based; Two-dimensional materials; Perovskite

Funding: National Key R&D Program(2018YFB2200500); National Natural Science Foundation of China (61204080); State Key Laboratory Fund(SKL201804); Key R&D Program of Shaanxi Province(2022GY-012, 2020KW-011); Xi'an Science and Technology Project(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的作用^[1,2]。根据探测波长,红外光电探测器可以分为近红外光电探测器(0.75-3 μm)、中红外光电探测器(3-15 μm)和远红外光电探测器(15-1000 μm)^[3]。光通信波段的信号强度较低,需要探测器具备高灵敏度,能够有效地捕捉和检测到微弱的光信号。而近红外波段光电探测器符合此要求,同时也能够迅速地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年南京电子器件研究所研制了一种磷化铟(InP)光电探测器^[4],在1550 nm的激光照射下响应度只有0.3 A/W。2021年电子科技集团公司第十三研究所提出了一种砷化镓/磷化铟(InGaAs/InP)台面型PiN光电探测器^[5],在波长为1310 nm的激光照射下响应度只有0.75 A/W。而这些光电探测器在近红外波段的响应度及探测率极低,限制了探测器的应用领域,研究新材料光电探测器成为了必要趋势。

在研究基于新型材料光电探测器中,硅基材料、二维材料和钙钛矿最具有吸引力。由于这些材料的物理化学性质与器件结构的设计可以研发出高响应率、高灵敏度,成本低,具有可柔性、重量轻、可调节等特点适应于多种电子产品领域。而考虑到低成本的材料,硅基光电探测器被广泛研究和利用^[11]。此外成熟的互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)制造工艺将硅基光电探测器集成到单片电路中^[6,7]。而且绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)技术有其独特的优势,包括漏电流低、寄生电容小等,为先进的硅光子学提供了一个通用的平台^[8],其可以利用SOI波导的有效折射率和损耗特性^[9,10],对光电探测器性能进行优化。基于二维材料光电探测器具有超高光响应、超宽探测波段和超灵敏度,取得了许多令人瞩目的成就,引起巨大研究兴趣^[11]。钙钛矿有优异的电学特性和光学特性,在非真空条件下的合成工艺简单、成本低^[12,13]。所以钙钛矿材料也成为光电应用领域中一种很有前途的材料。

经过长时间的探索与研究,近红外光电探测器的材料与器件结构等方面取得显著成就。在本文中,我们论述了基于不同材料与不同结构的近红外探测器的研究进展。首先阐述了基于PN、PiN异质结构的硅基光电探测器研究进展,然后分别论述了基于二维材料、钙钛矿材料的近红外光电探测器的研究进展,最后论述了基于三种材料的近红外光电探测器在通信波段器件领域的应用前景和未来挑战。

2 硅基光电探测器

硅基材料具有空穴迁移率大,禁带宽度较小等优点,有利于发展低电压器件。所以硅基

光电探测器在通信、光学仪器、医疗和军事等领域得到广泛应用。其探测器响应速度快、噪声低、灵敏度高等特点。同时，硅基光电探测器制造成本低廉，易于集成和制造大规模芯片。而硅基异质结探测器在光电子学领域利用最为广泛。下面分别论述了基于 PN、PiN 异质结光电探测器的研究进展。

2.1 基于 PN 异质结光电探测器

光电探测器通常基于 PN 结实现，PN 结具有良好的光电转换特性。当光照射在 PN 结上时，会激发出电子和空穴对，并增加 PN 结的载流子浓度。这样就可以实现光信号到电信号的转换，从而实现探测器的功能。而且 PN 结对不同波长的光辐射响应不同。当光子能量能够与 PN 结禁带宽度相当时，就会发生光电效应，使得 PN 结中的导电电子和空穴被释放出来，因此 PN 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来构造 PN 结，可以实现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 结还具有快速响应、低噪声、易于制造等优点，因此硅基 PN 结光电探测器在近红外波段得到了广泛的应用。

为使硅基光电探测器探测波长变宽，响应率变高，2017 年，印度理工学院 Dhyani 课题小组提出了一种基于二硫化钼/硅(N-MoS₂/P-Si)异质结光电探测器^[14]。如图 2-1 所示，该器件在 550 nm 激光下，偏置电压 5 V 下，响应率高达 9 A/W，比探测率高达 10¹⁴ Jones。响应上升时间为 9 μs，下降时间为 7 μs，并能够在高频 50 kHz 下工作。器件响应率的提高得益于多孔硅上的异质结的光探测性能提高了更高的界面势垒高度和光捕获性能。由于 P-Si 中的高吸收和低反射损耗，与横向 MoS₂/Si 的异质结相比，MoS₂有光响应范围宽、响应速度快和探测率高等方面表现出优异的光电传输效率。

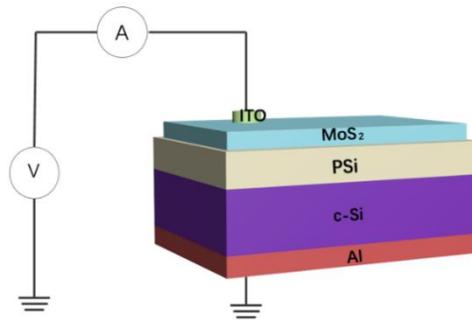


图2-1 N-MoS₂/P-Si异质结器件结构图

Figure 2-1 Structure diagram of N-MoS₂/P-Si heterojunction device

2019 年，印度拉夫里科技大学 Khushbu R 课题小组提出了一种基于二氧化钛/硅(N-TiO₂/P-Si)异质结结构光电二极管^[15]。如图 2-2 所示，其 N-TiO₂/P-Si 混合器件在 620 nm，功率为 1 mW/cm² 的入射光下，响应率高达 23.07 A/W，比探测率高达 4.5x10¹² Jones。光电探测器的内部增益、响应时间、响应率、检测率、灵敏度和噪声等参数的提高，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，产生与转移的电荷增加。

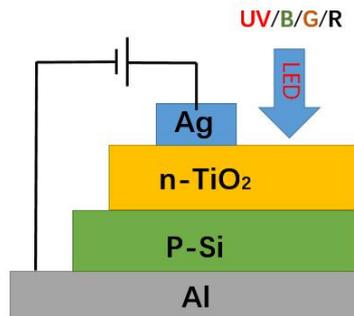


图2-2 N-TiO₂/P-Si异质结器件结构截面图

Figure 2-2 Cross-sectional view of N-TiO₂/P-Si heterojunction device

这两种探测器利用材料与结构的优势使其响应率得到非常高的提升,然而也有非常明显的缺点,探测波长太小而限制应用范围。为提高探测波长,2020年,上海科技大学 Xu 研究小组提出了一种基于硫化铅/硅(P-PbS/N-Si)异质结光电探测器^[16]。如图 2-3 所示,该探测器是一种倒置结构,与普通结构相比,它具有较低的能带偏移量,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,该器件在 1540 nm 入射光,响应率达到 264 mA/W,0 V 偏置电压下比探测率高达 1.47×10^{11} Jones。响应速度高达 29.8 kHz,上升时间为 2.04 μ s,下降时间为 5.34 μ s。

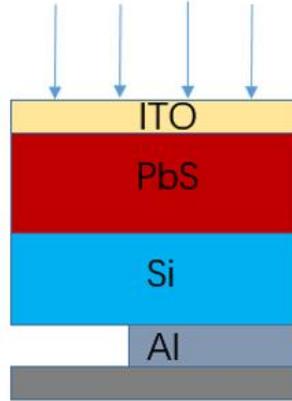


图2-3 P-PbS/N-Si异质结器件结构截面图

Figure 2-3 Cross-sectional view of P-PbS/N-Si heterojunction device structure

上述基于硅基 PN 异质结光电探测器可以将探测波段增至 1540nm,而且可以通过器件优化降低暗电流,从而使器件有更高的探测率。但是由于硅材料量子效率相对较低,仅能将一部分入射光子转化为电子,限制了其响应率。且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受到环境的影响,而使其光电探测器应用范围受到影响,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 异质结光电探测器有着更好的性能。

2.2 基于 PiN 异质结光电探测器

高性能光电探测器也常常基于 PiN 结构,PiN 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高的探测效率,光电探测器通常基于 PiN 结来增加探测器对光信号的响应度。此外,PiN 结在工作过程中几乎没有反向饱和电流和噪声,所以电荷载流子不会产生重复噪声源。这使得基于 PiN 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,可以利用 PiN 结构优势提高探测器响应率以及探测波长。2015年,日本金泽大学 Li 课题小组提出一种结合 SOI 和 CMOS 兼容的横向 PiN 光电二极管^[17],如图 2-4 所示,该器件在 10 V 的偏置电压下获得 12.6 GHz 的带宽,在 850 nm 波长光照下响应率高达 7.5 mA/W。相同条件下,衬底尺寸较小光电探测器,带宽高达 13.6 GHz,且光电探测器的电容低于 65 fF。

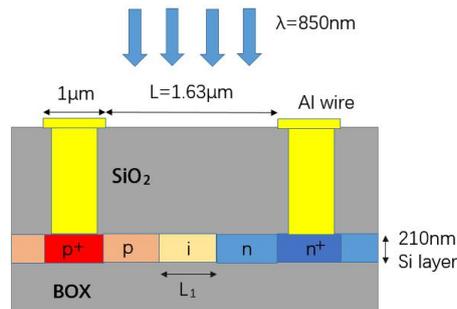
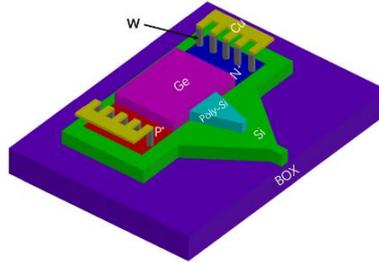


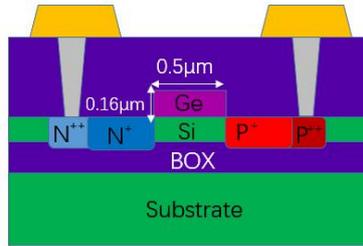
图2-4 PiN光电二极管截面图

Figure 2-4 Cross-sectional view of PiN photodiode

虽然上述光电二极管带宽高，但是探测波长及响应率偏低，为提高 PiN 结构光电探测器探测波长及响应率，有团队利用不同材料制作 PiN 结构探测器。2017 年，比利时根特大学 Chen 研究小组提出一种硅锗 PiN 光电探测器^[18]。如图 2-5 所示，该探测器结构 14 μm 长时，在 1550 nm 照射光，偏置电压为 1 V 下，探测器 3 dB 带宽增强到 67 GHz，响应率高达 0.74 A/W，暗电流低至 4 nA。处于该长度的探测器仍受到传输时间限制，然后将探测器结构长度改制达到 20 μm 时，其响应率得到提高。在 1550 nm 照射光下，响应率高达 0.92 A/W。



(a) 光电探测器三维图



(b) 光电探测器截面图

图2-5 硅锗PiN光电探测器结构图

Figure 2-5 Structure diagram of silicon germanium PiN photodetector

2018 年，美国特拉华大学 Li 等人提出了一种石墨烯-硅 PiN 光电二极管^[19]，如图 2-6 所示，该器件实现了可见、近红外、零偏压光电检测。在零偏置条件下，器件在 1550 nm 光照下其响应时间为 15 ps，光电信号进行转化信噪比高达 52.9dB。主要得益于利用载流子在石墨烯材料流动速度快和嵌入内置电场的优势提高了器件性能。

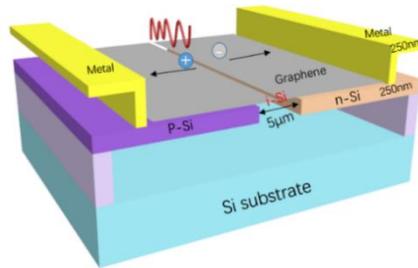


图2-6 石墨烯-硅PiN光电二极管结构图

Figure 2-6 Graphene-silicon PiN photodiode structure diagram

2020 年，法国格勒诺布尔阿尔卑斯大学 Aliane 研究小组提出了一种圆形、直径为 10 μm 的锗 PiN 光电二极管^[20]。如图 2-7 所示，该器件是在硅衬底上外延生长锗形成垂直 PiN 光电二极管，利用光谱椭圆偏振法、x 射线衍射和拉曼光谱来量化这种锗层中存在的拉伸应变。这种内置的拉伸应变改变对光的吸收，探测波段扩展到 1700 nm。在 1310 nm 和 1550 nm 照射光下，器件响应率分别为 0.275 AW^{-1} 和 0.133 AW^{-1} 。在 1310 nm 和 1550 nm 处内部量子效

率分别为 66%和 52%。

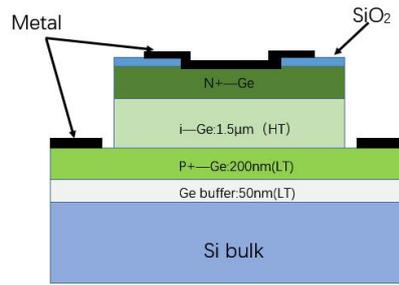


图2-7 锗PiN光电二极管结构图

Figure 2-7 Structure diagram of germanium PiN photodiode

上述探测器合理利用 PiN 异质结的特性，使硅基光电探测器的探测波段增至 1700nm，同时响应度也有所提高，可知光电探测器基于 PiN 异质结是器件优化的一个基本策略，其器件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，表1列出近几年性能较好的基于PN、PiN和其它异质结结构的硅基光电探测器的性能参数，并进行分析对比。

表 1 近几年较好性能的硅基近红外光带探测器

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 ₂ /P-Si	550	9000	10 ¹⁴	16μs	[14]
N-TiO ₂ /P-Si	620	23070	4.5×10 ¹²	-	[15]
P-PbS/N-Si	1540	264	1.47×10 ¹¹	7.38μs	[16]
PtSe ₂ /Si	808	520	3.26×10 ¹³	55.3/170.5μs	[21]
Gr/N-Si	808	456	7.96×10 ¹¹	-	[22]
MoS ₂ /Si	808	300	10 ¹³	3/40μs	[23]
Graphene/ Si	890	730	4.08×10 ¹³	320/750μs	[24]
SnO ₂ /SiO ₂ /P-Si	365-980	285-355	1.7×10 ¹²	<0.1s	[25]
Ag/SiN _x /Si/Ag	800	1880	3.14×10 ¹¹	<40ms	[26]
GQDs/WSe ₂ /Si	740	707	4.51×10 ⁹	0.2ms	[27]
GeSi(P-i-N)	1550	920	-	-	[18]
Graphene/Si(P-i-N)	1550	11	-	15ps	[19]
Ge on Si(P-i-N)	1550	133	-	-	[20]
Ge-On-Insulator(P-i-N)	1550	390	-	-	[28]
Si(P-i-N)	850	440	-	-	[29]

从表中可知，硅基光电探测器的结构有多种，而基于PN、PiN结构的光电探测器相比于基于其他异质结光电探测器的性能参数要优越，下面主要分析对比PN、PiN结构光电探测器。对基于PN结光电探测器文献[16]由上海科技大学提出的光电探测器相比于其它PN结光电探测器的探测波段要宽，可探测到1540 nm，这得益于该探测器是一种倒置结构，与普通结构相比，它具有较低的能带偏移量，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，且具有良好排列的带结构和高效的载流子分离和提取。但该探测器响应率较低，文献[15]由拉夫里科技大学提出的PN结光电探测器与相同结构的光电探测器响应率要高，高达23.07 A/W，这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，电荷产生与转移增加，提高了响应率和探测率。从表中数据可知，对基于PiN结光电探测器的探测波段相差无几，更能体现出文献[18]由比利时根特大学提出的光电探测

器,该探测器相比于其它相同结构光电探测器而言响应率较高。这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,减少载流子在电极之间的传输距离并提升载流子的移动速度,提高了载流子的数目以及收集率,导致其响应率的提高。通过对比PN和PiN两种结构,虽然PN结构在比探测率有优势,但是在探测波长及响应率却受到限制, PiN结构探测器探测波长更长、响应率更高、性能更优,此对比也为后续研究高性能硅基光电探测器提供参考方向。

3 基于二维材料光电探测器

二维材料具有独特的光学、电学和力学性能使其在许多重要的光电应用成为可能。特别是具有高的载流子迁移率、强的物质-光相互作用、强的机械韧性和强的栅极控制性等优点,可应用在穿戴、便携式高性能电子和光电器件上。二维材料光电探测器有独特的结构和优良的电子和光电性能而吸引了许多研究项目。到目前为止,已经有数百个基于二维材料的光电探测器被报道过^[30]。下面主要对基于石墨烯、碲化合物、过渡金属硫族化合物三种材料探测器进行分析对比。

3.1 基于石墨烯材料光电探测器

石墨烯材料具有高电子迁移率、高光学透明性、高电导率等显著的光学和电子特性,在电子和光电器件的开发中引起了越来越多的关注。该材料是一种很好的候选材料,且有极高的载流子迁移率和较宽的波长吸收范围,因此通常被用来制作高性能探测器。许多研究人员利用石墨烯的优势与其他材料结合形成不同结构来提高探测器探测波长与响应率。2018年意大利那不勒斯费德里科二世大学 Casalino 等人提出一种石墨烯/硅肖特基结近红外光电探测器^[31]。如图 3-1 所示,在零偏置与照射光波长在 $2\ \mu\text{m}$ 条件下,光电探测器在室温下的外部响应率为 $0.16\ \text{mA/W}$ 。

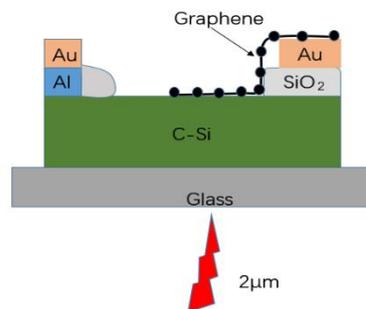


图3-1 石墨烯/硅肖特基近红外光电探测器结构图

Figure 3-1 Graphene/silicon Schottky near-infrared photodetector structure

2020年浙江大学 Guo 等人提出一种硅-石墨烯混合等离子体波导光电探测器^[32]。如图 3-2 所示,该探测器引入了一个顶部带有金属帽的硅脊核心区。这种设计增强了石墨烯的光吸收,同时降低了金属的吸收损失。这种设计极大地促进了石墨烯的有效光吸收。金属-石墨烯-金属电极也被引入,以降低金属-石墨烯接触电阻,这有助于提高响应速度。当入射光在 $1.55\ \mu\text{m}$ 时,该探测器的频率响应 3 dB 带宽超过 40 GHz。当入射光波长在 $2\ \mu\text{m}$,输入功率为 $0.28\ \text{mW}$ 时,本光电探测器的响应率为 $70\ \text{mA/W}$ 。

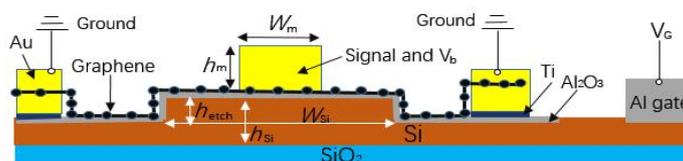


图 3-2 硅-石墨烯混合等离子体波导光电探测器结构图

Figure 3-2 Structure diagram of silicon-graphene hybrid plasma waveguide photodetector

2021年,韩国浦项科技大学 Kim 等人提出一种石墨烯/锗肖特基结光电探测器^[33]。如图 3-3 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来抑制暗电流。提高了石墨烯/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,在波长为 1550 nm 的照射光下,光-暗电流比高达 $4.3 \times 10^7 \text{ W}^{-1}$,比探测率提高到 1.8×10^{10} Jones,响应率高达 1.2 AW^{-1} ,比其它锗光电探测器高 10-100 倍。

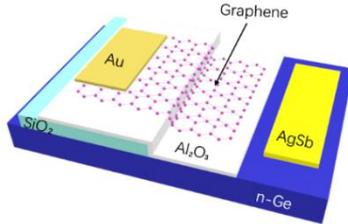


图 3-3 石墨烯/锗肖特基结光电探测器结构图

Figure 3-3 Graphene/germanium Schottky junction photodetector structure

然而上述基于石墨烯近红外光电探测器探测波段长,响应速度快,这得益于石墨烯优越的载流子迁移率和零带隙的线性色散。却受到响应率低的限制,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,国防科技大学 Luo 等人提出了一种基于单层石墨烯具有简单器件结构的光电探测器^[34]。如图 3-4 所示,该结构利用 n 型重掺杂的硅/二氧化硅(Si/SiO₂)作为衬底,石墨烯作为吸收光区域。衬底对光的吸收导致了较大的光电流和高响应率,Si/SiO₂界面的弯曲引起电场有效地分离了硅中光子诱导的电子空穴对。光在重掺杂 Si/SiO₂衬底中被吸收产生额外的光电压,有效地调节石墨烯的电导,室温下该探测器在 450 nm 波长光照下响应度高达 500 A/W,在 1064 nm 波长照射光下响应度高达 4 A/W。

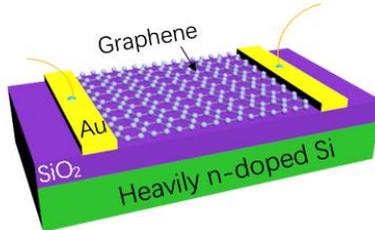


图 3-4 单层石墨烯光电探测器结构图

Figure 3-4 Structure diagram of single-layer graphene photodetector

2020年,苏州大学 Zhang 等人报道了一种石墨烯/磷化铟(Graphene/P-InP)肖特基结近红外光电探测器^[35]。如图 3-5 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_x)分离层,之后利用离子刻蚀法刻出一个窗口,在窗口生长一层 3 nm 氧化铝钝化层,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复合概率,其氧化层优化了器件性能。最后以导电银条作为电极。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,对波长 808 nm 近红外光的响应和比探测率高达 5.2 mA/W 和 1.3×10^{10} Jones。

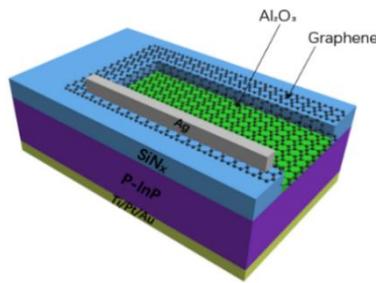


图 3-5 石墨烯/磷化铟肖特基结光电探测器结构图

Figure 3-5 Graphene/indium phosphide Schottky junction photodetector structure

2021 年，伊朗克尔曼沙希德·巴霍纳大学 Yousefi 等人提出了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^[36]。如图 3-6 所示，该光电探测器工作于 O 和 U 的光通信波段，具有高响应率，这是利用石墨烯层和等离子体纳米结构的优势。且石墨烯单层和等离子体结构的结合增强光-石墨烯的相互作用，从而提高光电探测器的响应率。该光电探测器在波长为 1310 nm 和 1675 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 60GHz。

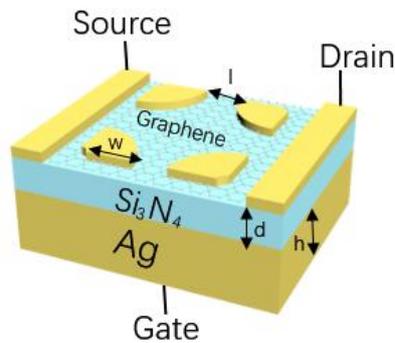


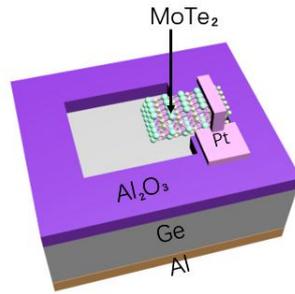
图 3-6 石墨烯等离子体光电探测器结构图

Figure 3-6 Structure diagram of graphene plasma photodetector

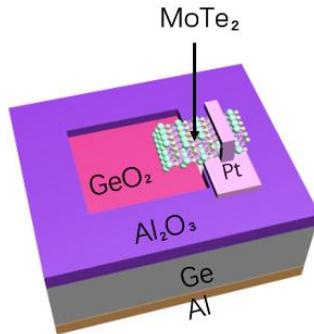
通过上述分析可知基于石墨烯的异质结构和杂化结构在实际应用中具有很高的光响应性潜力。可以充分利用石墨烯的超高载流子迁移率特性，提高光电探测器的探测波段。在器件结构中合理增加氧化层来抑制暗电流，同时提高响应率，不失为提高器件结构的一个好方法。且石墨烯光电探测器具有高灵敏度而实现高质量的光场成像，所以石墨烯光电探测器可以促进热门领域智能机器人和电影产业的发展。

3.2 基于碲化合物光电探测器

由于碲化物具有较高的灵活性、较高的频率响应和高信噪比等特点，其带隙较窄且有较高的载流子迁移率和较长的载流子寿命。在研究高性能光电探测器方面引起相当大的关注。为研究宽探测波长、高响应率近红外探测器，2019 年，清华大学 Chen 等人提出了碲化钼/锗(MoTe₂/Ge)异质结和碲化钼/二氧化锗/锗(MoTe₂/GeO₂/Ge)异质结两种近红外光电探测器^[37]。如图 3-7 所示，在 915 nm 激光照射下的 MoTe₂/Ge 异质结光电探测器的响应率高达 12460 AW⁻¹，响应时间短到 5 ms，比探测率为 3.3×10¹² Jones。由于 MoTe₂ 和 Ge 之间的势垒较低，MoTe₂/Ge 异质结存在较大的反向电流。因此，为了降低反向电流，在 MoTe₂/Ge 异质结中引入了由臭氧氧化沉积的超薄二氧化锗层。MoTe₂/GeO₂/Ge 异质结的反向电流从 0.44 μA/μm² 下降到 0.03 μA/μm²，降低了 4 个数量级以上。在 915 nm 激光照射下 MoTe₂/GeO₂/Ge 异质结近红外光电外探测器响应率达到 15.6 AW⁻¹，响应时间也为 5 ms，比探测率高达 4.86×10¹¹ Jones。



(a) MoTe₂/Ge 光电探测器结构图



(b) MoTe₂/GeO₂/Ge 光电探测器结构图

图 3-7 两种碲化钼结构光电探测器示意图

Figure 3-7 Schematic diagram of two molybdenum telluride structure photodetectors

2022 年，北京理工大学 Song 研究小组报道了一种碲化锡(SnTe)纳米膜近红外光电探测器和一种碲化锡/锗(SnTe/Ge)异质结近红外光电探测器。SnTe 纳米膜近红外光电探测器结构如图 3-9 所示^[38]，在 400-1050 nm 的宽光谱范围内有光电响应。在 940 nm 的近红外波段，在光功率密度为 0.2 mWcm⁻² 的情况下，光电探测器的比探测率和响应率分别为 3.46×10¹¹ Jones 和 1.71 A/W。SnTe/Ge 异质结近红外光电探测器如图 3-10 所示^[39]，在 850 nm、光功率密度为 13.81 mWcm⁻² 的近红外照明下，SnTe/n-Ge 光电探测器显示出 0.05 V 的小开路电压，上升时间与下降时间分别为 206 ms、267 ms，在偏置电压为 0.5 V 时响应率高达 617.34 mA/W，在零偏置下比探测率高达 2.33×10¹¹ Jones。

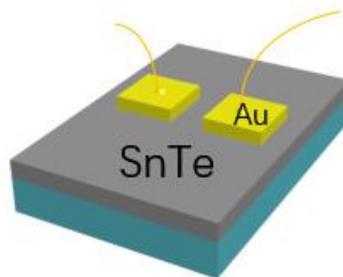


图 3-9 碲化锡纳米膜光电探测器结构图

Figure 3-9 Structure diagram of tin telluride nanomembrane photodetector

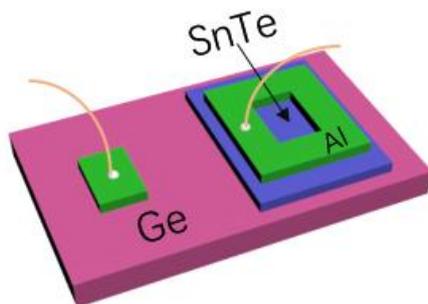


图 3-10 碲化锡/锗异质结光电探测器结构图

Figure 3-10 Structure diagram of tin telluride/germanium heterojunction photodetector

上述探测器利用碲化物与锗材料形成异质结构，使探测器的响应率得到提高，主要得益于碲化物材料信噪比和频率响应较高，但其探测波长却受到了限制，而抑制了其通信应用范围，为研究探测波长宽的光电探测器。2020 年，合肥科技大学 Tong 等人报道了一种二碲化铂/硅(PtTe₂/Si)异质结近红外光电探测器^[40]。如图 3-8 所示，该探测器由 PtTe₂ 和 Si 的结合形成了 PtTe₂/Si 异质结来制备，即表现出优越的稳定性。其探测器对 200–1650 nm 波段内的入射光均有光响应。在波长为 980 nm 入射光照下，基于 PtTe₂ 光电探测器的响应度和比探测率分别为 0.406 AW⁻¹ 和 3.62×10¹² Jones，且量子效率高达 32.1%。另一方面，上升和下降的响应时间分别为 7.51 μs 和 36.7 μs。

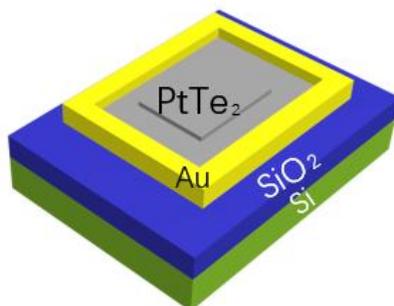


图 3-8 二碲化铂/硅异质结光电探测器结构图

Figure 3-8 Structure diagram of platinum telluride/silicon heterojunction photodetector

2023 年，四川大学 Zheng 等人报道了一种金属-半导体-金属结构近红外光电探测器^[41]。如图 3-11 所示，在 1550 nm 光照下，探测器在室温下的响应率分别为 3.4×10⁵ V/W 和 170 mA/W，比探测率高达 4×10⁹ Jones。该探测器工作耐温高，稳定性好，响应速度快达到 33 ms，且探测器对 1550 nm 处的偏振光具有优越的灵敏度，得益于 Te 微丝的高度各向异性结构，器件在 1550 nm 照射下的偏振二向色性比可以达到 2.1。

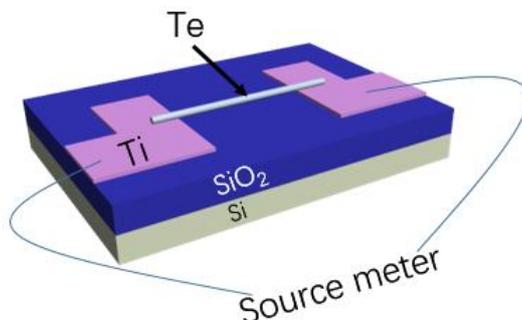


图 3-11 金属-半导体-金属光电探测器结构图

Figure 3-11 Metal-semiconductor-metal photodetector structure diagram

基于碲化物材料光电探测器有效利用金属与半导体材料界面处的 p-n 结或肖特基结产生的内嵌电场来抑制暗电流的方式,降低噪声功率,提高响应效率,是实现高性能光电探测器的一个基本策略。构建人工金属微结构和谐振腔是提高材料光吸收率的一个重要手段。

3.3 基于过渡金属硫族化合物光电探测器

二维金属硫族化合物因其独特的结构和非凡的物理性质引起越来越多人们的关注。它们表现出了优异的红外检测性能,高响应度和高探测率、工作性稳定,为红外光电探测器开辟了新的前景。为研究基于硫化物高性能的近红外光电探测器,2018年,郑州大学 Wang 等人提出一种基于二硫化钼/碲化镉(MoS_2/CdTe)PN 异质结光电探测器^[42]。如图 3-12 所示,其光电探测器在 200 nm 到 1700 nm 波段之间表现出光响应,该探测器在 780 nm 波长光照下响应率高达 36.6 mA/W,比探测率高达 6.1×10^{10} Jones,表明 MoS_2/CdTe P-N 异质结在室温红外检测中具有很大的潜力。

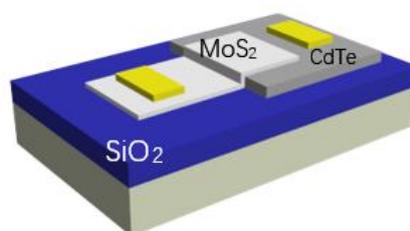


图 3-12 二硫化钼/碲化镉 PN 异质结光电探测器结构图

Figure 3-12 Structure diagram of molybdenum disulfide/cadmium telluride PN heterojunction photodetector

2020年,深圳大学 Jiang 等人提出一种二硫化锡/纤锌矿($\text{SnS}_2/\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$)异质结光电探测器^[43]。如图 3-13 所示,该探测器探测波段覆盖了紫外到近红外波段。 $\text{SnS}_2/\text{ZnO}_{0.7}\text{S}_{0.3}$ 异质结光电探测器在 365 nm 波长光照射下,其响应率为 8.28 mA W^{-1} ,比探测率为 5.09×10^{10} Jones,开关比为 1.08×10^5 。且响应速度较快,上升时间为 49.51 ms,下降时间为 25.93 ms。因为 S 的掺杂可以提高氧化锌价带最大值和导带最小值。氧化锌能带结构的改变可以减少界面上载流子的复合,从而提高 $\text{SnS}_2/\text{ZnO}_{0.7}\text{S}_{0.3}$ 器件的性能。

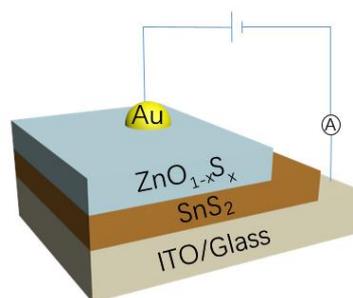


图 3-13 二硫化锡/纤锌矿异质结光电探测器结构图

Figure 3-13 Structure diagram of tin disulfide/zinc heterojunction photodetector

虽然上述探测器利用硫化物与其它材料结合的优势提高了探测波段,但是其响应率过低限制了其探测器的应用发展,为研究高响应率硫化物探测器,2021年,印度克什米尔大学 Kharadi 等人提出了一种硅/二硫化钼(Si/MoS_2)异质结光电探测器^[44]。如图 3-14 所示,该探测器以 MoS_2 半导体层作为光吸收层, Si 层作为高载流子运输路径。在 650 nm 光照射下,其响应率高达 $5.66 \times 10^5 \text{ AW}^{-1}$,比探测率高达 4.76×10^{10} Jones,在 1 V 偏置电压下,光电导增益高达 2.5×10^{11} 。因为载流子在硅中的高迁移率,减少了光电探测器的传输时间,所以光电导增益较高。

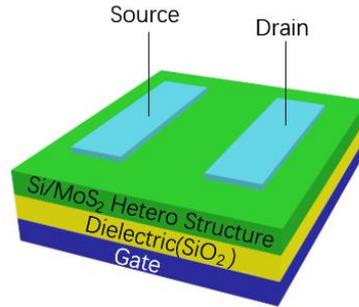


图 3-14 硅/二硫化钼异质结光电探测器结构图

Figure 3-14 Structure diagram of silicon/molybdenum disulfide heterojunction photodetector

为实现高性能金属硫族化合物光电探测器,可以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来提高器件的探测波长及响应率。而这种方式会增加异质结面的缺陷以及晶格不匹配问题,而限制载流子的迁移率和瞬态响应,但是可以通过优化材料制备方法、界面工程等手段来优化器件性能。

为了更进一步了解基于二维材料近红外光电探测器的研究进展,表 2 列出近几年较为先进的近红外光电探测器。

表 2 近几年基于二维材料较先进的近红外光电探测器

Table 2 In recent years, near-infrared photodetectors based on two-dimensional materials have been more advanced

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
Graphene/Ge	1550	1200	1.8×10^{10}	-	[33]
Graphene/P-InP	808	5.2	1.3×10^{10}	-	[35]
Graphene/Si ₃ N ₄	1675	460	-	-	[36]
MoTe ₂ / graphene/SnS ₂	405-1550	1.17×10^4	1.06×10^9	-	[45]
MoTe ₂ /graphene/SnS ₂	1064	2.6×10^3	1.1×10^{13}	28.6 ms	[46]
Graphene/MoTe ₂ /Graphene	473-1064	0.20	-	0.07ms	[47]
Ge/Graphene	350-1650	6.62×10^4	-	-	[48]
MoTe ₂ /Ge	915	1.246×10^7	3.3×10^{12}	5ms	[37]
MoTe ₂ /GeO ₂ /Ge	915	1.56×10^4	4.86×10^{11}	5ms	[37]
PtTe ₂ /Si	980	406	3.62×10^{12}	44.21μs	[38]
SnTe/Ge	940	1710	3.46×10^{11}	-	[39]
GaTe/InSe	1550	150	10^{12}	0.8 s	[49]
MoTe ₂ /Si	980	190	6.8×10^{13}	150 ns	[50]
Te	1700	1.6×10^4	2×10^9	-	[51]
2H-MoTe ₂	1260-1360	400	-	-	[52]
MoS ₂ /CdTe	200-1700	36.6	6.1×10^{10}	-	[42]
Si/MoS ₂	650	5.66×10^8	4.76×10^{10}	-	[44]
MoS ₂ /Graphene/GaAs	808	19.9	4.86×10^{10}	46.8/55μs	[53]
MoS ₂	637	3.26×10^6	9×10^{14}	480 μs	[54]
MoS ₂ /GaN/Si	300-1100	23810	1.18×10^{12}	1.166ms	[55]
SnS/Si	980	1170	10^{12}	11/11.ms	[56]
SnS	1030	190	9.213×10^{11}	2s	[57]
Graphene/SnS ₂	1064	1460	1.28×10^{10}	-	[58]

从表中我们更清楚地了解近年基于各种二维材料光电探测器的性能参数,由表 2 可知,

在基于石墨烯材料光电探测器中文献[36]巴霍纳大学所报道的光电探测器比其它的石墨烯光电探测器探测波段更宽，高达 1650 nm，这得益于该探测器利用石墨烯单层和等离子体结构的结合来增强光-石墨烯的相互作用，但其结构是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；而文献[48]中国科学院所报道石墨烯探测器响应率高达 66.2 A/W，这得益于器件结构中锗和石墨烯之间异质结构有效地阻止了器件表面和界面上的载体组合，以及锗和石墨烯界面上的光电生载流子的有效分离和转移，使响应率和导电增益都得到提高。在基于碲化物材料光电探测器中文献[51]加州大学报道的光电探测器相比于其他碲化物光电探测器探测波段更宽，高达 2400 nm，这得益于结构中 Al_2O_3 腔的厚度可以进行改变，从而影响器件对光的吸收，但该探测器的探测率比较低，而文献[37]由清华大学所报道的光电探测器响应率高达 12460 A/W，比探测率高 3.3×10^{12} Jones，这得益于器件结构中 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，提高响应速度，也制约少数载流子的流动，从而减小热噪声的影响并提高探测率。在基于金属硫族化合物光电探测器中，文献[44]由克什米尔大学提出的光电探测器相比于其它基于金属硫族化合物光电探测器的响应率更高，高达 $5.66 \times 10^5 \text{ AW}^{-1}$ ，这得益于 Si/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 MoS_2 具有较高的光吸收速率以及大量的边界和缺陷，这些特征都有利于吸附目标分子，并增强系统的感知能力，提高系统的响应率与探测率。综上所述，可以利用二维材料中的载流子数量比较少的优势，将暗电流降低到一个相对较低的水平，同时提高探测器的响应效率。但仍有一些缺点有待克服，如单层石墨烯的弱光吸收特性、原子级薄二维材料容易受到环境条件的影响，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。所以应用领域也非常的广泛，特别是二维材料的柔性特性对于柔性 and 可穿戴电子领域、生物医学、航空通信方面具有重大意义。

4 基于钙钛矿材料光电探测器

金属卤化物钙钛矿材料因其电子空穴扩散长度大^[59,60]，迁移率高和优异的光伏能量转换能力而在光电应用中得到广泛关注^[61-63]。许多基于钙钛矿的光电探测器已经被制造出来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。为此解决此问题，许多研究者对钙钛矿光电探测器进行研究。2019 年，印度理工学院 Upadhyay 研究小组报道了一种碘化铅甲胺/铁酸铋($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{BiFeO}_3$)异质结近红外光电探测器^[64]。如图 4-1 所示，其钙钛矿异质结光电探测器在 400-900 nm 近红外光照射下都有响应，且为一种双波段响应，这是因为异质结的 BiFeO_3 和 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 钙钛矿单独对光的吸收特性。在 800 nm 激光照射下，功率为 $44.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，反向偏置电压为 2 V 时，其响应率高达 2 AW^{-1} ，比探测率高达 7.8×10^{12} Jones。响应速度也快，上升时间和下降时间分别为 0.74 s 和 0.088 s。这得益于探测器以 BiFeO_3 作为滤光层和孔阻挡层，采用铟掺杂氧化锡和 BiFeO_3 孔阻塞层来提高响应率。

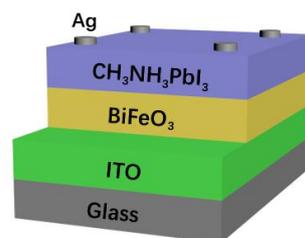


图 4-1 碘化铅甲胺/铁酸铋异质结光电探测器结构图

Figure 4-1 Structure diagram of lead methylamine iodide/bismuth ferrite heterojunction photodetector

2020年，北京科技大学 Guo 等人提出一种基于碘化铅甲胺/二硒化铜铜 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{CuInSe}_2$)量子点近红外光电探测器^[65]。如图 4-2 所示，该探测器以 CuInSe_2 量子点/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜作为光活性层增强光电流，而抑制暗电流。由于 CuInSe_2 量子点与卤化物钙钛矿的联合光吸收效应，提高了光电转换能力。且 CuInSe_2 量子点作为一种电子阻挡层，可以有效地阻挡电子进入空穴输运层，来降低热噪声。优化后的光电探测器在 580 nm 激光照射下其响应率超过 150 mAW^{-1} ，比探测率超过 $7.0 \times 10^{12} \text{ Jones}$ ；在 850 nm 激光照射下其响应率超过 20 mAW^{-1} ，比探测率超过 $7.7 \times 10^{11} \text{ Jones}$ 。而且 CuInSe_2 量子点层使钙钛矿密度更大，更防水，从而提高了探测器的环境稳定性和热稳定性，甚至将工作温度扩展到 150°C 以上。

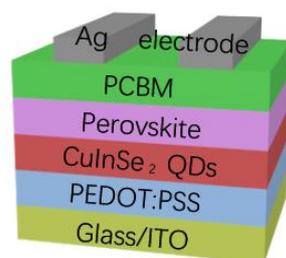


图 4-2 碘化铅甲胺/铁酸铋异质结光电探测器结构图

Figure 4-2 Structure diagram of lead methylamine iodide/bismuth ferrite heterojunction photodetector

由于上述钙钛矿探测器利用材料参杂与量子点结构提高了探测器探测波段，但是其响应率较低，这就限制了探测器的应用发展。因此，研究如何提高钙钛矿探测器的响应率成为主要的问题。2021年，加拿大国家科学研究所 Asuo 等人提出了一种基于碘化铅甲胺/硅纳米线 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{SiNW}$)异质结光电探测器^[66]，可探测紫外光到近红外光。如图 4-3 所示，该探测器的制备基于碘化物钙钛矿和 SiNW 阵列的组合。利用 n 型硅晶片的金属辅助镀锌蚀刻技术，通过浸没法制造了密集垂直排列的 SiNW 阵列。然后，将硫氰酸铅 ($\text{Pb}(\text{SCN})_2$) 掺杂的钙钛矿溶液在周围环境中通过旋转直接沉积在 SiNW 上。钙钛矿随后被转化为纳米纤维或薄膜。优化后的 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{SiNW}$ 异质结光电探测器在 532 nm 光照下响应率高达 13 AW^{-1} ，比探测率高达 10^{13} Jones ，上升/下降时间为 22.2/17.6 μs 。该装置有着非常好的环境稳定性。

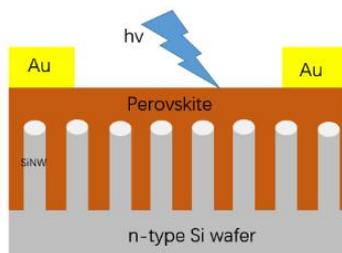


图 4-3 碘化铅甲胺/硅纳米线异质结光电探测器结构图

Figure 4-3 Structure diagram of lead methylamine iodide/silicon nanowire heterojunction photodetector

2022年，华中科技大学 Yang 研究小组提出了一种银/钛酸钡/银 ($\text{Ag}/\text{BaTiS}_3/\text{Ag}$)光电探测器^[67]，如图 4-4 所示。该探测器经过适当的硫化后，表面硫空位缺陷被钝化， BaTiS_3 光电探测器的暗电流被抑制。因此，该器件开关比与响应率高。此外，由于缺陷的冻结和晶格振动散射效应的减弱，器件在 80 K 下的响应速度得到了显著提高。在波长 780 nm，功率为 12.8 mWcm^{-2} 的光照下，偏置电压为 1 V 时，硫化 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 780 nm，功率为 $16.4 \mu\text{Wcm}^{-2}$ 的光照下，其响应率和比探测率分别高达 1.22 AW^{-1} 和 $3.8 \times 10^{10} \text{ Jones}$ 。其探测波长可达到 365-1550 nm。

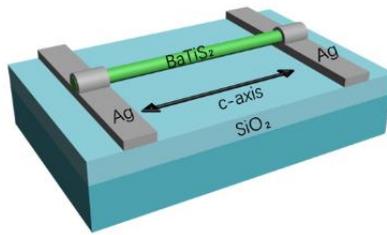


图 4-4 银/钛酸钡/银光电探测器结构图

Figure 4-4 Structure diagram of silver/barium titanate/silver photodetector

为更进一步了解基于钙钛矿近红外光电探测器的研究进展,表 3 列出近几年较为先进光电探测器的性能参数,下面进行了各光电探测器性能参数对比分析。

表 3 近几年基于钙钛矿较先进的近红外光电探测器

Table 3 In recent years, the more advanced near-infrared photodetector based on perovskite

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
CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /BiFeO ₃	800	2000	7.8×10 ¹²	0.828s	[64]
CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /CuInSe ₂	850	20	7.7×10 ¹¹	-	[65]
Ag/BaTiS ₃ SCs /Ag	780	1220	3.8×10 ¹⁰	-	[67]
MAPb(I _{1-x} Br _x) ₃	740	331	4.2×10 ¹⁰	380μs	[68]
FA _{0.66} MA _{0.34} Pb _{0.5} Sn _{0.5} I ₃	940	500	2.5×10 ¹²	1.67μs	[69]
MAPbI ₃ /CdS	730	430	2.3×10 ¹¹	-	[70]
MAPbI _{2.5} Br _{0.5} /CQD	975	100	4×10 ¹²	10μs	[71]
FAPb _{0.5} Sn _{0.5} I ₃ /SnS QDs	850	522	2.57×10 ¹²	41μs	[72]

从表 3 可知,基于钙钛矿光电探测器中文献[64]由印度理工学院提出的钙钛矿光电探测器相比于其它钙钛矿光电探测器的性能参数较好,响应率高达 2 A/W,比探测率高达 7.8×10¹² Jones,这得益于探测器中 BiFeO₃ 和 CH₃NH₃PbI₃ 钙钛矿对光的吸收特性,以及采用 BiFeO₃ 作为滤光层和孔阻挡层来提高响应率,但其探测器的响应速度相比于其它的钙钛矿光电探测器较低。文献[69]由埃因霍温理工大学提出的钙钛矿光电探测器响应速度相比于其它钙钛矿探测器要快,这主要得益于该探测器通过调整钙钛矿界面处的阻挡层能级来控制暗电流密度,使电子阻断层和钙钛矿之间的界面势垒最大化,降低反向暗电流密度,提高响应速度。综上可知,为实现高性能钙钛矿光电探测器,可以合理利用异质结构或量子点结构的方式来增强载流子分离、提高响应效率和优化器件其它性能。但是这方式也存在一些缺点,如界面缺陷、制备复杂、容易受到环境条件影响等问题,但可以通过材料优化、工艺优化、封装保护等方式来克服这些缺点。所以在不同的新型、精细电子和医疗设备的前景非常可观。

5 结论

近红外光电探测器是一种能够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几年基于不同材料近红外光电探测器的研究进展,首先讨论了基于 PN、PiN 异质结的硅基光电探测器。然后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近红外光电探测器的研究进展。最后阐述了基于钙钛矿材料的光电探测器。以及对多种材料的近红外光电探测器性能参数进行分析比较,并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。

由于硅材料能够实现高速电子载流子传输和快速响应,对可见光和近红外光具有很高的灵敏度,可以检测到较低的光信号,且成本低廉,微结构加工技术也已经非常成熟,可以制造出非常小的硅基光电探测器。对于其结构对比分析可知 PiN 结构相比于 PN 结构更有利于光电探测器性能的提升,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，硅基光电探测器具有很快的响应速度，适用于高速光通信、虹膜识别、光电转换和图像采集等领域。二维材料具有高光电转换效率和低暗电流，使得二维材料光电探测器具有更快的响应速度。对基于二维材料石墨烯、过渡金属硫化物、碲化物光电探测器进行性能对比分析可知，石墨烯光电探测器具有高灵敏度和快速响应速度，且单层石墨烯具有高透光率和低暗电流噪声，有利于提高探测器的信噪比，但是吸收率相对较低，因此需要使用较厚的材料层以提高探测器的吸收率。而基于过渡金属硫化物与碲化物光电探测器却具有较高的吸收率和灵敏度，使其能够在较薄的材料层中实现高效的光吸收和光电转换。但其载流子迁移率相对较低，导致响应速度较慢。但是钙钛矿具有较高的载流子迁移率和快速响应速度，适用于高速光电探测。而钙钛矿材料的稳定性相对较差，易受潮和氧化，降低了器件的长期稳定性。二维材料石墨烯、过渡金属硫化物、碲化物和钙钛矿在近红外光电探测器中各有优劣。研究高性能探测器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。不同种类的二维材料具有不同的能带结构，所以不同的二维材料光电探测器具有不同波长响应，可以实现宽波段响应。因此，二维材料光电探测器可以在光通信、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，不同材料探测器有不同缺陷，为解决缺陷可以采用等离子体集成技术、量子点杂化或利用异质结构等方法进一步优化器件设计和制造技术来提高器件的质量，采用PN结或肖特基势垒的结构来抑制暗电流和其它噪声源，为后续实现高性能光电探测器提供方法思路。

而基于不同材料的光电探测器有不同的性能，应用于不同的领域。综上所述的光电探测器有着优越性能，但同时也存在着不足，如何在提高响应率的同时，尽量减少对器件其他参数的影响，均衡提升器件性能非常具有挑战性，这为我们未来继续研究高性能、低成本的光电探测器提供了一个参考与思路。

参考文献

- [1] Lin Q, Armin A, Burn PL, et al. Filterless narrowband visible photodetectors[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(10): 687-694.
- [2] Li Q, Guo Y, Liu Y. 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]. *固体电子学研究与进展*, 2019, 39(04): 313.
QIAN G, LI GY, NIU Bin, et al. High-speed InP-based electro-optical modulator and photodetector[J]. *Research and Progress in Solid State Electronics*, 2019, 39(04): 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(03): 196-200.
HAN MX, QI LF, YIN SZ. InGaAs/InP countertop pin high-speed photodetector[J]. *Micro-nano Electronics Technology*, 2021, 58(03): 196-200.
- [6] Lockwood DJ, Pavesi L. Silicon photonics II: Components and integration[J]. *Topics in applied physics*, 2011, 119.
- [7] Harjanne M, Kapulainen M, Ylinen S, et al. Hybrid integration of InP photodetectors with SOI waveguides using thermocompression bonding[C]//*Silicon Photonics and Photonic Integrated Circuits II*. SPIE, 2010, 7719: 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]. *固体电子学研究与进展*, 2015, 35(1): 71-75.
FENG S, GAO Y, XUE B. Design of micro-nano SiGe-SOI curved waveguide[J]. *Research and Progress in Solid State Electronics*, 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 M, Wang P, Fang H, et al. Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(19): 1803807.
- [12] Li C, Ma Y, Xiao Y, 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 MoS₂/porous silicon heterojunction[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(19): 191107.
- [15] Chauhan KR, Patel DB. Functional nanocrystalline TiO₂ thin films for UV enhanced highly responsive silicon photodetectors[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 792: 968-975.
- [16] Xu K, Xiao X, Zhou W, 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 H, Galili M, Verheyen P, et al. 100-Gbps RZ data reception in 67-GHz Si-contacted germanium waveguide pin photodetectors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 35(4): 722-726.
- [19] Li T, Mao D, Petrone NW, et al. Spatially controlled electrostatic doping in graphene pin 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 PiN germanium photodiodes as infrared detectors[J]. *Semiconductor science and technology*, 2020, 35(3):035013.1-035013.10.
- [21] Xie C, Zeng L, Zhang Z, et al. High-performance broadband heterojunction photodetectors based on multilayered PtSe₂ directly grown on a Si substrate[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(32): 15285-15293.
- [22] Tang Y, Chen J. High responsivity of Gr/n-Si Schottky junction near-infrared photodetector[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2021, 150: 106803.
- [23] Wang L, Jie J, Shao Z, et al. MoS₂/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 X, Zhu M, Du M, et al. High detectivity graphene - silicon heterojunction photodetector[J]. *Small*, 2016, 12(5): 595-601.
- [25] Ling C, Guo T, Lu W, et al. Ultrahigh broadband photoresponse of SnO₂ nanoparticle thin film/SiO₂/p-Si heterojunction[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(25): 8848-8857.
- [26] Xu M, Xu Z, Sun Z, et al. Surface Engineering in SnO₂/Si for High-Performance Broadband Photodetectors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023.
- [27] Sun M, Fang Q, Xie D, et al. Heterostructured graphene quantum dot/WSe₂/Si photodetector with suppressed dark current and improved detectivity[J]. *Nano Research*, 2018, 11: 3233-3243.
- [28] Lin Y, Lee KH, Bao S, et al. High-efficiency normal-incidence vertical pin 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] Long M, Wang P, Fang H, et al. Progress, Challenges, and Opportunities for 2D Material Based Photodetectors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(19):1803807.1-1803807.28.
- [31] Casalino M, Russo R, Russo C, et al. Free-space schottky graphene/silicon photodetectors operating at 2 μm[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(11): 4577-4585.
- [32] Guo J, Li J, Liu C, et al. High-performance silicon– graphene hybrid plasmonic waveguide photodetectors beyond 1.55 μm[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 29.
- [33] Kim C, Yoo TJ, Chang KE, et al. Highly responsive near-infrared photodetector with low dark current using graphene/germanium Schottky junction with Al₂O₃ interfacial layer[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(5): 1573-1579.
- [34] Luo F, Zhu M, Tan Y, et al. High responsivity graphene photodetectors from visible to near-infrared by photogating effect[J]. *AIP Advances*, 2018, 8(11): 115106.
- [35] Zhang T, Chen J. Graphene/InP Schottky junction near-infrared photodetectors[J]. *Applied*

Physics A, 2020, 126: 1-6.

- [36] 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.
- [37] Chen W, Liang R, Zhang S, et al. Ultrahigh sensitive near-infrared photodetectors based on MoTe₂/germanium heterostructure[J]. Nano Research, 2020, 13: 127-132.
- [38] Song L, Tang L, 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.
- [39] Song L, Tang L, Hao Q, et al. Broadband photodetector based on SnTe nanofilm/n-Ge heterostructure[J]. Nanotechnology, 2022, 33(42): 425203.
- [40] Tong XW, Lin YN, Huang R, et al. Direct tellurization of Pt to synthesize 2D PtTe₂ for high-performance broadband photodetectors and NIR image sensors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(48): 53921-53931.
- [41] Shui ZD, Wang S, Yang Z, et al. Polarization-sensitive self-powered tellurium microwire near-infrared photodetector[J]. Applied Physics Letters, 2023, 122(10).
- [42] Wang Y, Huang X, Wu D, et al. A room-temperature near-infrared photodetector based on a MoS₂/CdTe p-n heterojunction with a broadband response up to 1700 nm[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(18): 4861-4865.
- [43] Jiang J, Huang J, Ye Z, et al. Self - Powered and Broadband Photodetector Based on SnS₂/ZnO_{1-x}S_x Heterojunction[J]. Advanced Materials Interfaces, 2020, 7(20): 2000882.
- [44] Kharadi MA, Malik GFA, Khanday FA, et al. Silicene/MoS₂ heterojunction for high-performance photodetector[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 68(1): 138-143.
- [45] Li A, Chen Q, Wang P, et al. Ultrahigh - sensitive broadband photodetectors based on dielectric shielded MoTe₂/Graphene/SnS₂ p-g-n junctions[J]. Advanced Materials, 2019, 31(6): 1805656.
- [46] Li A, Chen Q, Wang P, et al. Ultrahigh - sensitive broadband photodetectors based on dielectric shielded MoTe₂/Graphene/SnS₂ p-g-n junctions[J]. Advanced Materials, 2019, 31(6): 1805656.
- [47] Zhang K, Fang X, Wang Y, et al. Ultrasensitive near-infrared photodetectors based on a graphene-MoTe₂-graphene vertical van der Waals heterostructure[J]. ACS applied materials & interfaces, 2017, 9(6): 5392-5398.
- [48] 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.
- [49] Qi T, Gong Y, Li A, et al. Interlayer transition in a vdW heterostructure toward ultrahigh detectivity shortwave infrared photodetectors[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(3): 1905687.
- [50] Lu Z, Xu Y, Yu Y, et al. Ultrahigh speed and broadband few - layer MoTe₂/Si 2D-3D heterojunction - based photodiodes fabricated by pulsed laser deposition[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(9): 1907951.
- [51] Amani M, Tan C, Zhang G, et al. Solution-synthesized high-mobility tellurium nanoflakes for short-wave infrared photodetectors[J]. ACS nano, 2018, 12(7): 7253-7263.
- [52] Ma P, Flory N, Salamin Y, et al. Fast MoTe₂ waveguide photodetector with high sensitivity at

-
- telecommunication wavelengths[J]. *Acs Photonics*, 2018, 5(5): 1846-1852.
- [53] Qu J, Chen J. Graphene/GaAs Schottky Junction Near-Infrared Photodetector With a MoS₂ Quantum Dots Absorption Layer[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(8): 4331-4336.
- [54] 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.
- [55] Singh DK, Pant RK, Nanda KK, et al. Differentiation of ultraviolet/visible photons from near infrared photons by MoS₂/GaN/Si-based photodetector[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(12): 121102.
- [56] Li X, Ruan S, Zhu H. Easy fabrication of performant and broadband response SnS/Si photodetector[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, 151: 106991.
- [57] Vinoth E, Archana J, Harish S, et al. Hydrothermally Derived Layered 2D SnS Nanosheets for Near Infra-Red (NIR) Photodetectors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(24): 1499-1502.
- [58] Zhao Y, Tsai TY, Wu G, et al. Graphene/SnS₂ van der Waals photodetector with high photoresponsivity and high photodetectivity for broadband 365–2240 nm detection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(39): 47198-47207.
- [59] Zhang F, Yang B, Li Y, et al. Extra long electron–hole diffusion lengths in CH₃NH₃PbI_{3–x}Cl_x perovskite single crystals[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(33): 8431-8435.
- [60] Li Y, Yan W, Li Y, et al. Direct observation of long electron-hole diffusion distance in CH₃NH₃PbI₃ perovskite thin film[J]. *Scientific reports*, 2015, 5(1): 14485.
- [61] Lian Z, Yan Q, Gao T, et al. Perovskite CH₃NH₃PbI₃ (Cl) single crystals: rapid solution growth, unparalleled crystalline quality, and low trap density toward 10⁸ cm⁻³[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 138(30): 9409-9412.
- [62] Wang B, Chen T. Exceptionally stable CH₃NH₃PbI₃ films in moderate humid environmental condition[J]. *Advanced Science*, 2016, 3(2): 1500262.
- [63] Huang J, Tan S, Lund PD, et al. Impact of H₂O on organic–inorganic hybrid perovskite solar cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10(11): 2284-2311.
- [64] Upadhyay RK, Singh AP, Upadhyay D, et al. BiFeO₃/CH₃NH₃PbI₃ perovskite heterojunction based near-infrared photodetector[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(12): 1961-1964.
- [65] Guo R, Bao C, 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.
- [66] 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.
- [67] Yang F, Li K, Fan M, et al. Strongly Anisotropic Quasi - 1D BaTiS₃ Chalcogenide Perovskite for Near - Infrared Polarized Photodetection[J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(5): 2201859.
- [68] Qiao S, Liu Y, Liu J, 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.

-
- [69] Ollearo R, Wang J, 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.
- [70] García de Arquer FP, Gong X, Sabatini RP, et al. Field-emission from quantum-dot-in-perovskite solids[J]. *Nature communications*, 2017, 8(1): 14757.
- [71] Li Z, Li H, Jiang K, et al. Self-powered perovskite/CdS heterostructure photodetectors[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2019, 11(43): 40204-40213.
- [72] Liu Z, Zhang Z, Zhang X, et al. Achieving High Responsivity and Detectivity in a Quantum-Dot-in-Perovskite Photodetector[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(4): 1181-1188.