

## 红外探测器研究进展及其新技术应用

钟艳红<sup>1,2\*</sup>, 马建华<sup>1</sup>, 周炜<sup>3</sup>, 王旭东<sup>3</sup>, 黄志明<sup>3</sup>, 叶振华<sup>1</sup>, 林春<sup>1</sup>, 丁瑞军<sup>1</sup>,  
褚君浩<sup>1,3\*</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测全国重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京, 100049;

3. 中国科学院上海技术物理研究所 红外科学与技术全国重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 红外探测器在民用、军事和航空航天等重要领域扮演着不可或缺的角色, 其未来发展具有重大战略意义。文章概述了红外探测器的发展历程和现状, 重点介绍了碲镉汞、铟镓砷、锑化物、量子阱、硅基阻挡杂质带等传统光子型红外探测器, 以及胶体量子点、二维材料、电磁诱导势阱效应、铁电极化场调控等新型红外探测器的研究进展, 同时阐述了动态视觉传感、计算成像、微纳结构、三维集成新技术在红外探测领域的应用, 并探讨了红外探测器的未来发展趋势。

**关键词:** 红外探测器; 碲镉汞; 电磁诱导势阱; 铁电极化; 动态视觉传感; 计算成像; 三维集成

**中图分类号:** TN215; TN304.2

**文献标识码:** A

## Research progress and new technology applications of infrared detectors

ZHONG Yan - hong<sup>1,2\*</sup>, MA Jian - hua<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>3</sup>, WANG Xu - dong<sup>3</sup>, HUANG Zhi - ming<sup>3</sup>, YE  
Zhen - hua<sup>1</sup>, LIN Chun<sup>1</sup>, DING Rui - jun<sup>1</sup>, CHU Jun - hao<sup>1,3\*</sup>

(1. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. National Key Laboratory of Infrared Science and Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200083, China)

**Abstract:** Infrared detectors are indispensable in the civilian, military, and aerospace fields, and their future development is of great strategic significance. This paper reviews the history and current status of infrared detectors, focusing on traditional photon - type infrared detectors such as mercury cadmium telluride (HgCdTe), indium gallium arsenide (InGaAs), antimonides, quantum wells (QWs) and silicon - based blocked impurity band (BIB) detectors. It also covers novel detectors, including colloidal quantum dots (CQDs), two - dimensional (2D) material detectors, electromagnetic induced well (EIW) effect detectors, and ferroelectric polarization - regulated infrared detectors. Additionally, it discusses the applications of new technologies in infrared detection, such as event - based dynamic vision sensing, computational imaging, absorption enhanced micro/nanostructures, and three - dimensional (3D) integration. Finally, it explores future development trends of infrared detectors.

**Key words:** infrared detector, HgCdTe, EIW effect, ferroelectric polarization, dynamic vision sensing, computational imaging, three - dimensional integration

**PACS:**

收稿日期: 2025-09-04, 录用日期: 2025-12-03

Received date: 2025-09-04,

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (E422217120, E303197120)

Foundation items: Supported by the Key Deployment Project of the Chinese Academy of Sciences (E422217120, E303197120)

作者简介 (Biography): 钟艳红 (1984 - ), 女, 湖南益阳人, 副研究员, 博士研究生, 主要从事红外光电探测器技术研究。E - mail: amy\_zhong@mail. sitp. ac. cn.

\* 通讯作者 (Corresponding author): E - mail: jhchu@mail. sitp. ac. cn.

## 引言

红外线是指电磁波谱中波长位于  $0.78 - 1000 \mu\text{m}$  的电磁波,其波段介于可见光和微波之间。作为现代传感技术的核心组成部分,红外探测技术在航天遥感、环境监测、军事侦察、天文观测、医疗检测、工业检测和安防监控等领域都有着广泛的应用前景和发展潜力(图1)。自20世纪40年代起,红外探测技术便受到美欧等发达国家的高度重视和重点布局,成为衡量一个国家科技实力的重要标志之一。当前,以碲镉汞(HgCdTe)、铟镓砷(InGaAs)、碲化铟(InSb)等为代表的红外探测材料和器件已逐步实现规模化应用;与此同时,基于新材料、新原理、新结构的红外器件持续涌现,在国家重大需求领域发挥着愈发关键的作用<sup>[1-4]</sup>。本文梳理了红外探测器技术的发展历程和最新研究进展,阐述近几十年来红外探测材料与器件的技术突破,对比该领域国内外发展现状,剖析其在多波段覆盖、高灵敏度探测及智能感知等方面的发展趋势,以期对未来红外探测技术的创新与工程化应用提供理论参考和实践指导。

## 1 红外探测的发展历程与探测机理

红外探测技术作为感知红外辐射的核心手段,其发展历程已跨越两个多世纪。该技术伴随两次原理性突破实现跨越式进步,探测机理则围绕“热探测”与“光子型探测”两大核心展开。其中,“热探测”是利用红外光的波动性与玻尔兹曼分布物质系统的相互作用,“光子型探测”则依托红外光的粒子性与费米-狄拉克分布物质系统的作用,两者均通过光子能量转移引发粒子/准粒子分布及电输运性

质变化,实现光信号探测。如图2所示,红外探测技术历经220余年发展,核心突破集中在两次原理革新与对光本质属性的深化认知。

红外探测原理的第1次突破,是发现基于光热效应的红外“热探测”机制。1800年,赫歇尔(Herschel)发现了红外线的存在,这一发现直接带来了红外物理学与红外探测技术从无到有的突破,成为该领域发展的重要起点<sup>[5]</sup>。在其后100年左右的发展历程中,红外科学领域围绕“热探测”原理不断推进,涌现出一系列具有标志性意义的事件:

1821年,Seebeck发现了温差电效应(也称塞贝克效应),利用这一效应,成功制备出一种以半金属铋和碲为热电材料的温差电偶热敏型探测器,即真空温差电偶,实现了红外信号向电信号的转化。1829年,Nobili在前期真空温差电偶的基础上进一步改进,将单个电偶串联形成多偶结构,研制出温差电堆,进一步提升了探测器对红外辐射的响应能力。1833年,Melloni对温差电堆的材料进行优化,采用碲化铋作为热电堆核心材料。这一材料改进显著提升了探测灵敏度,使优化后的温差电堆比当时最灵敏的水银温度计还要灵敏40倍以上。得益于温差电探测器良好的红外探测性能,人类在天体红外探测领域取得重要进展:1856年,利用该类探测器首次实现对月球的红外探测;1915年,又进一步完成对约110颗星体的红外探测<sup>[6]</sup>。1880年,Langley创新探测器结构设计,以两条细铂条作为惠斯通电桥的两个桥腿,研制成功世界上首个测微热辐射计(Bolometer)。该探测器的灵敏度比此前的热电堆探测器高约30倍,实现了“热探测”技术的又一重要突破。在随后的20年内,Langley持续对该

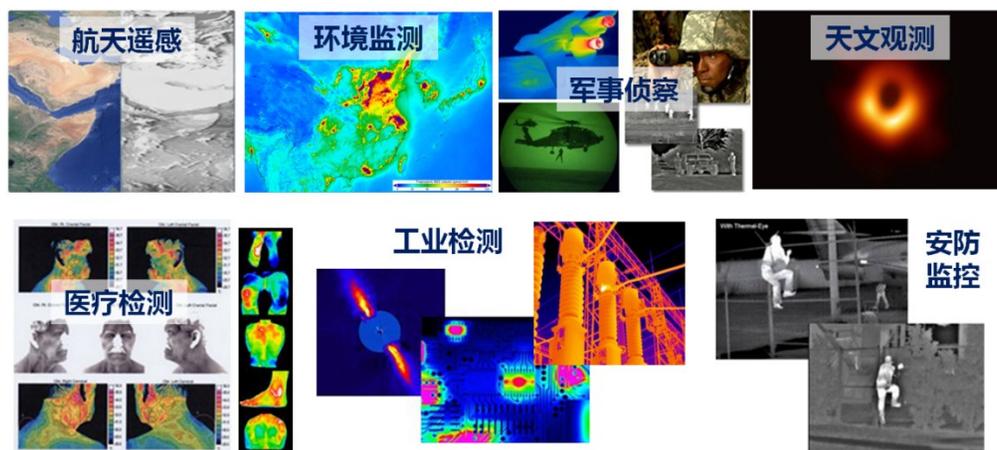


图1 红外探测技术的应用

Fig. 1 Applications of infrared detection technology

测微热辐射计的性能进行优化;到20世纪初,优化后的测微热辐射计被成功应用于天体红外探测,实现了对木星、土星、织女星、大角星等天体的红外探测,推动天体红外观测迈入新阶段。

红外探测原理的第2次突破,是以光电效应为主导的“光子型探测”技术的崛起。20世纪初,光的波粒二象性理论的确立以及光电效应机理被证实,科学家们继热探测器后发明高性能光子型红外探测器,其探测效率有了大幅提升。在其后约110年的发展历程中,代表性技术突破不断涌现,这一阶段的技术演进呈现出清晰的迭代脉络:

1917年,Case首次利用红外辐射的光电导效应研制出 $Tl_2S$ 探测器<sup>[7]</sup>,其相比以往类型具有更高的灵敏度和显著提升的响应速度;1933年,Kutzscher开发出性能稳定、结构可靠的PbS薄膜探测器,成为近代红外技术领域的重要突破;第二次世界大战后,红外探测器从PbS逐步推进至PbTe和PbSe体系,在液氮冷却条件下最长响应波长拓展到 $7\mu m$ <sup>[8]</sup>;1950年代,半导体物理学的迅速发展推动光电型红外探测器进入新阶段:Burstein在1953年和1954年分别首次实现非本征半导体的Si:X、Ge:X探测器;III-V和II-VI族化合物同步引入该领域,如Mitchell于1955年研制的InSb红外探测器<sup>[9]</sup>、Woolfrey和Smith于1957年开发的InGaAs探测器、Lawson等人于1959年成功制备的HgCdTe(MCT)红外探测器<sup>[10]</sup>。其中,HgCdTe三元半导体材料通过调节Cd组分可实现带隙在 $-0.3\text{ eV} - 1.6\text{ eV}$ 内连续可调,能覆盖极宽探测波长范围,成为红外技术史上的重要里程碑。上海技术物理研究所汤定元等人于1964年率先开展对HgCdTe探测器的深入研究,经汤定元、方家熊、褚君浩等人及其团队半个多世纪的攻关,我国窄禁带半导体物理研究和HgCdTe探测器技术取得重大进展,极大推动了国内红外技术应用<sup>[11-17]</sup>。为弥补HgCdTe探测器制备困难、成本较高的缺陷,替代材料研究陆续开展:1983年Chiu等人基于“能带工程”和“波函数工程”实现量子阱红外光电探测器,探测波长覆盖 $6 - 20\mu m$ ,但受量子阱能带间量子吸收选择定则限制,需光栅耦合工作,存在量子效率不高、结构复杂等问题<sup>[18-19]</sup>;1987年Smith提出并研制的II类超晶格红外光电探测器(Type II IP)成功克服这一缺陷,利用重空穴子带至电子子带的带间量子跃迁机制实现高效吸收,无需光栅耦合即具备高量子效率,光谱响应范围覆

盖 $3 - 20\mu m$ ,成为与HgCdTe并行发展的重要技术路线<sup>[18-19]</sup>。

2017年,红外领域国际著名专家Rogalski总结了红外探测器发展历程,明确将其划分为四代。目前已形成前三代红外探测系统(图2):第一代探测器始于1958年,以线列扫描系统为核心,受限于技术原理,存在成像速度慢、视场范围小的不足;第二代探测器自1974年起,通过将红外焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)与CMOS读出电路相结合,实现了中等规模(约 $10^5$ 像元)的凝视成像,大幅提升了成像效率与实用性;第三代探测器从1999年开始发展,具备大面阵( $\geq 10^6$ 像元)、双波长响应的核心能力,进一步拓展了应用场景;第四代探测器目前仍处于快速发展阶段,正向高像素密度、高帧频、多维度信息处理的方向演进,其具体技术定义尚未形成统一标准<sup>[3,20-21]</sup>。

在红外光电新机理研究方面,X. F. Duan等人总结了1800年以来的7类主要光探测效应<sup>[22]</sup>,包括光热探测中的测热辐射效应(Bolometric effect)、光热电效应(Photothermoelectric effect)、光电探测中的光电导效应(Photoconductive effect)、光伏效应(Photovoltaic effect),以及二维半导体器件特有的光门控效应(Photogating effect)、电磁波诱导势阱效应(Electromagnetic Induced Well effect, EIW)、等离子体辅助的光探测效应(Plasma assisted effect)。其中,黄志明等人在国际上首次发现并通过严格公式推导与实验论证的EIW效应,是远红外光电探测新效应——通过构建亚波长金属-半导体-金属结构,入射光激发反对称势阱,诱导金属载流子注入半导体敏感元,可实现对能量远小于半导体禁带宽度的远红外光子信号的高灵敏探测,且已在HgCdTe、InSb、InGaAs、Si、 $Bi_2O_2Se$ 等数十种材料中验证了普适性<sup>[23-25]</sup>。

红外技术历经两个世纪发展,取得了瞩目成就,既推动了科学技术整体进步,也在实践中发挥关键作用。未来将持续向新材料、新机理、新器件等方向迈进,有望为气象遥感、医疗诊断、环境监测、工业检测等诸多领域带来更多可能。

## 2 红外探测器的分类

红外探测器的分类可依据不同维度划分,其中探测原理与工作环境是否需要制冷是最核心的两大分类标准。

按器件探测原理,红外探测器可明确分为热探

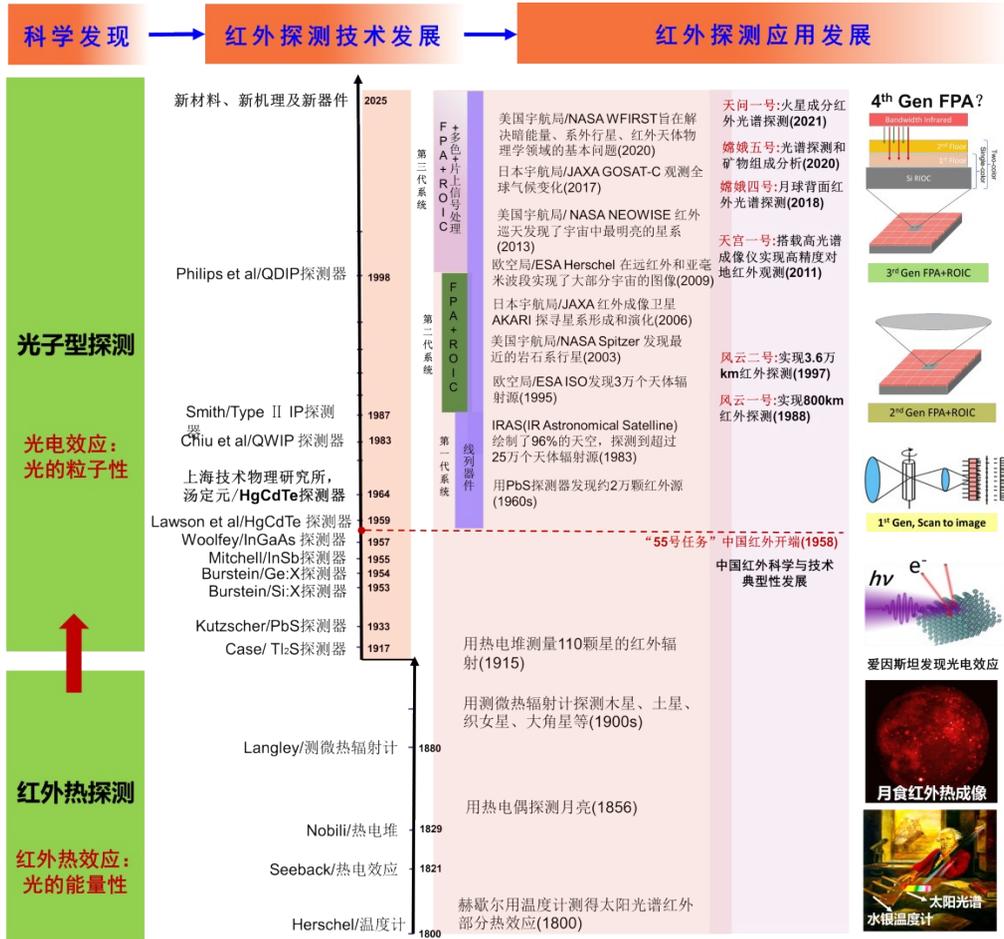


图2 红外探测技术的发展历程

Fig. 2 Development history of infrared detection technology

测器和光子探测器两类,二者的工作机制与性能特征存在本质差异:

**热探测器:**基于红外辐射的热效应工作——探测材料吸收红外辐射后产生温升,进而将温升转化为可测量的电信号,通过测量温升过程探测器电阻值的变化反演出材料吸收入射辐射的强度(图3a)。由于热效应具有全波段响应特性,热探测器无法区分红外辐射中包含的波长、相位等信息;同时,受限于热传导的延迟效应,其响应时间较长,通常为毫秒量级。

**光子探测器:**自光电效应被发现以来,基于该效应的光子探测器逐渐成为红外探测器发展的主流。这类探测器通过入射光子与材料相互作用产生的光电效应,将红外辐射信号转化为电学信息以实现探测,基本原理如图3(b-d)所示:图3b示出了半导体中基本光激发过程(本征吸收、非本征吸收和自由载流子吸收)。半导体材料吸收光子后,内部载流子发生带间跃迁和带内跃迁,多数光电探测

器均基于带间跃迁机制;量子阱探测器主要利用量子阱内子带间跃迁实现更长波长的探测(图3c);II类超晶格(Type II Superlattices, T2SL)探测器通过不同材料间的电子带间跃迁,实现电子和空穴的空间分离(图3d)。由于光电效应与电子跃迁直接相关,光子探测器通常需在低温环境下工作以抑制背景噪声干扰。

根据工作环境是否需要制冷,红外探测器可分为制冷型和非制冷型两种<sup>[6]</sup>。两类探测器的技术特征和代表性器件如下:

**制冷型探测器:**以光子探测器为绝对主体,需在低温环境下工作以保障性能。代表性器件包括:  
 i. 基于碲镉汞、铋化钢等窄禁带半导体的光导/光伏型探测器<sup>[26-28]</sup>; ii. 量子阱探测器(Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP)<sup>[29]</sup>; iii. 硅掺砷杂质阻挡层(Blocked Impurity Band Detector, BIB)探测器<sup>[30-31]</sup>。其核心特点为探测率高、响应速度快,但受制冷系统限制,存在体积较大、制备成本高的不足,

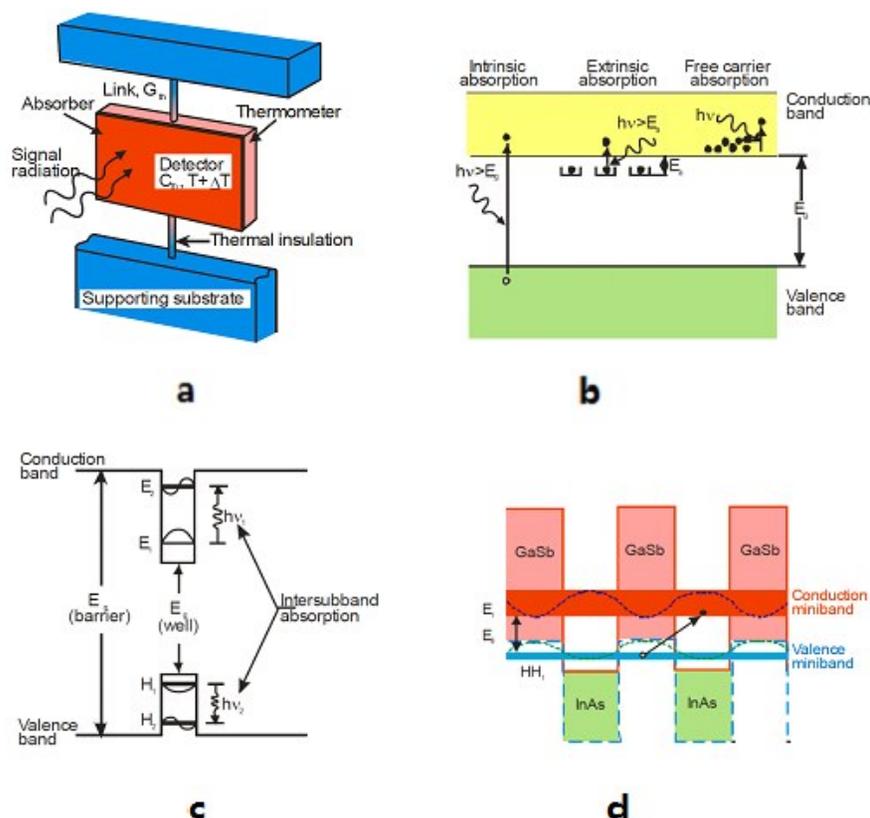


图3 热探测器(a)和光子探测器(b-d)原理图<sup>[3]</sup>:b.半导体基本光激发 c.量子阱 d. II类超晶格

Fig. 3 Schematic diagram of thermal detector (a) and photon detector (b - d)<sup>[3]</sup>: b. fundamental optical excitation of semiconductors c. quantum wells d. Type II Superlattices

主要应用于航天、军事等高端领域。

非制冷型探测器:以热探测器为核心,可在室温环境下工作。代表性器件包括:i. 热敏电阻探测器<sup>[32]</sup>;ii. 热释电探测器<sup>[33]</sup>;热电堆探测器等<sup>[34]</sup>。测微热辐射计(Bolometer)是热敏电阻探测器中技术最成熟、应用最广泛的一类,也是当前非制冷红外焦平面探测器的主流实现形式。这类器件具有质量轻、体积小、成本低的优势,但探测性能相对较低且响应速度慢,主要应用于监控、安防等民用领域。

### 2.1 非制冷型红外探测器

非制冷红外焦平面探测器是一种以焦平面阵列为核心结构的器件,测微热辐射计是其最主要的技术实现类型。目前可商业化的非制冷红外焦平面探测器主要基于三类技术路线,即氧化钒( $\text{VO}_x$ )基测微热辐射计、非晶硅(a-Si)基测微热辐射计和Si光电二极管<sup>[3]</sup>,其中 $\text{VO}_x$ 和a-Si体系的测微热辐射计占据非制冷红外探测器的主要商业市场。

美国Honeywell公司于20世纪80年代在美国国防部预研局(DARPA)的资助下,率先开展 $\text{VO}_x$ 基测微热辐射计的研制,推出一系列非制冷红外焦平面

产品,包括像元尺寸 $45\ \mu\text{m}$ 的 $160\times 120$ 、 $320\times 240$ 阵列,像元尺寸 $25\ \mu\text{m}$ 的 $320\times 240$ 和 $640\times 480$ 阵列,以及像元尺寸 $17\ \mu\text{m}$ 的 $640\times 512$ 阵列。随着红外技术的发展,探测器像元数已从早期数千个提升至百万级别,面阵规模持续扩大,探测视场也显著扩展。法国原子能委员会自1992年起致力于a-Si基测微热辐射计的研发。从综合性能看, $\text{VO}_x$ 基测微热辐射计的综合性能优于a-Si基产品,前者多应用于军工等对成像质量要求较高的领域,后者则广泛应用于民品等普通领域。

国外非制冷型红外探测器的研发与生产主要集中于美、法等发达国家。从事 $\text{VO}_x$ 体系测微热辐射计研制的核心企业包括美国Honeywell、FLIR、BAE、L-3/IR、DRS、Raytheon等,其中DRS推出的基于晶圆级封装的 $\text{VO}_x$ 测微热辐射计TENUM640机芯,像元尺寸达到 $10\ \mu\text{m}$ ;美国L-3/IR公司、法国SOFRADIR公司及其子公司ULIS公司则专注于a-Si体系测微热辐射计的研发。此外,日本NEC、以色列SCD、英国Thermoteknix等公司通过技术引进,也具备了较高的研制能力<sup>[35-36]</sup>。

国内非制冷型红外探测器领域,出现了浙江大立、武汉高德、广州飒特、北京广微积电、烟台睿创等一批红外探测器研制企业,其技术水平近年来有了很大提升——核心探测性能参数已与国外主流先进水平基本持平,且在像元最小尺寸、总规模等指标上实现领先。例如,烟台艾睿光电科技有限公司于2019年8月发布像元尺寸 $10\ \mu\text{m}$ 的 $1280\times 1024$ 规模VO<sub>2</sub>测微热辐射计;2020年底进一步推出世界首款像元中心距 $8\ \mu\text{m}$ 的 $1920\times 1080$ 红外热成像探测器芯片,可满足高端红外热成像仪轻量化、高性能的需求,有效提升空间分辨率与运动目标捕捉能力<sup>[37]</sup>。同时,清华大学、电子科技大学、昆明物理研究所和中国科学院上海技术物理研究所等高校与科研院所也深度参与研发,推动了非制冷红外探测器的民用化进程<sup>[38-40]</sup>。

## 2.2 制冷型红外探测器

在全球制冷型红外探测器研发领域,美国Raytheon、Teledyne,法国Lynred,英国SELEX、BAE,德国AIM等企业处于技术领先地位。以应用最广泛的HgCdTe红外焦平面探测器为例,当前像元尺寸 $15\ \mu\text{m}$ 、器件规模 $4\text{k}\times 4\text{k}$ 且噪声等效温差(NETD)优于 $20\ \text{mK}$ 的产品已趋于成熟;在航空航天、国防安全等领域高分辨率需求的推动下,焦平面器件规模正进一步向 $8\text{k}\times 8\text{k}$ 、 $14\text{k}\times 14\text{k}$ 等更高规格发展<sup>[3]</sup>。

鉴于红外探测器在国防、安全等领域的重要战略地位,我国自20世纪60年代起开启红外探测材料和器件技术的独立研发进程。在制冷型探测器领域,上海技物所、昆明物理研究所、中国电子科技集团公司第十一研究所等国有科研单位,武汉高德等民营企业是主要研发力量。近年来,我国在大面积HgCdTe薄膜外延、全晶圆级芯片工艺、大面阵与超长线列焦平面等关键技术上取得显著突破,推动第三代超大规模Si基碲镉汞红外焦平面组件实现技术成熟与应用落地,该类器件已在导弹预警卫星、红外侦察系统、载人航天工程及精确制导装备等国家重大领域发挥核心支撑作用。本文后续将重点介绍制冷型红外探测器的具体研究进展。

## 3 传统红外探测器的研究进展

制冷型红外探测器的核心为光子探测器,这类器件因具备响应速度快、探测性能高的显著优势,在航天遥感、国防军事等国家重大需求领域至关重要。长期以来,红外探测器的研究与发展始终围绕两大核心目标:一是实现尺寸、重量、功耗与成本的

优化;二是进一步提升探测灵敏度、响应速度等核心性能。当前,主流的传统光子型红外探测器已形成多技术路线并存的格局,前文已梳理HgCdTe、InGaAs、锑化物基(含InSb基探测器及II类超晶格探测器)、量子阱等光子型红外探测器的诞生背景与发展脉络,以下将聚焦各类探测器的核心性能及最新技术进展,展开详细介绍。

### 3.1 碲镉汞(HgCdTe)探测器

HgCdTe是红外探测的核心材料,通过调节合金组分实现带隙连续调控,响应波长覆盖 $0.4 - 20\ \mu\text{m}$ ,兼具吸收系数大、量子效率高(70 - 80%)、响应速度快等优势,在短、中、长及甚长波红外探测领域广泛应用。自1959年首次报道以来,HgCdTe材料制备与焦平面技术不断成熟,探测器性能持续提升,特别是进入21世纪以来,作为最具发展潜力的第三代焦平面探测器,更是得到快速发展。随着像素尺寸减小,焦平面芯片像素规模逐步增大;美国RVS公司采用分子束外延(MBE)技术在硅衬底上生长HgCdTe材料,成功制备 $4\text{k}\times 4\text{k}$ 、 $8\text{k}\times 8\text{k}$ 像元规模的焦平面阵列<sup>[41]</sup>。硅衬底的低成本、大面积制备优势,结合缓冲层外延工艺缓解晶格失配导致的热应力问题,成为大面阵红外焦平面的重要实现途径。图4为RVS制备像元中心距 $20\ \mu\text{m}$ 的 $4\text{k}\times 4\text{k}$ 红外焦平面阵列。

在碲镉汞超大面阵红外焦平面技术方面,国内与国外存在一定的差距。近年来,国内代表性研究机构已得到快速发展和成功应用。上海技物所研制的短波、中波 $2\text{k}\times 2\text{k}$  Si基HgCdTe红外焦平面组件已服务于重大航天工程,目前正推进 $6\text{k}\times 6\text{k}$ 、 $8\text{k}\times 8\text{k}$ 超大规模组件研发。图5示出了国内外代表性研究机构研制碲镉汞焦平面探测器的发展历程。未来,HgCdTe红外探测器将向大面阵、小像元、双/多波段探测、高工作温度、雪崩探测、片上偏振集成等方向持续演进<sup>[42-45]</sup>。

### 3.2 铟镓砷(InGaAs)探测器

近红外波段光电传感器以铟镓砷(InGaAs)探测器为主导。国际上,Sofradir、UTC Aerospace Systems等公司已公开相关研究成果;国内上海技物所在高性能常规波长( $1 - 1.7\ \mu\text{m}$ )及延伸波长( $1 - 2.5\ \mu\text{m}$ )InGaAs焦平面探测器研制方面取得多项突破(图6)<sup>[46]</sup>。

通过外延低缺陷材料、优化芯片制备工艺及结合低噪声读出电路技术,上海技物所实现系列化成

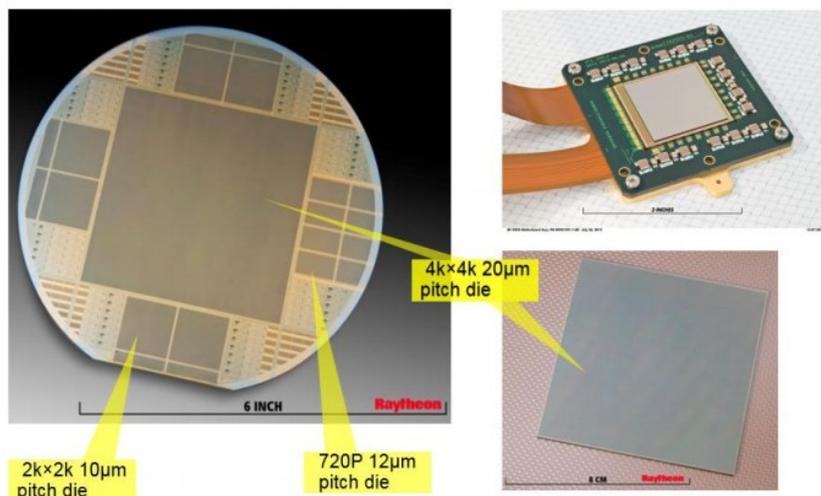


图4 美国RVS公司制备的碲镉汞焦平面阵列<sup>[4]</sup>

Fig. 4 HgCdTe focal plane array prepared by RVS company in the United States<sup>[4]</sup>

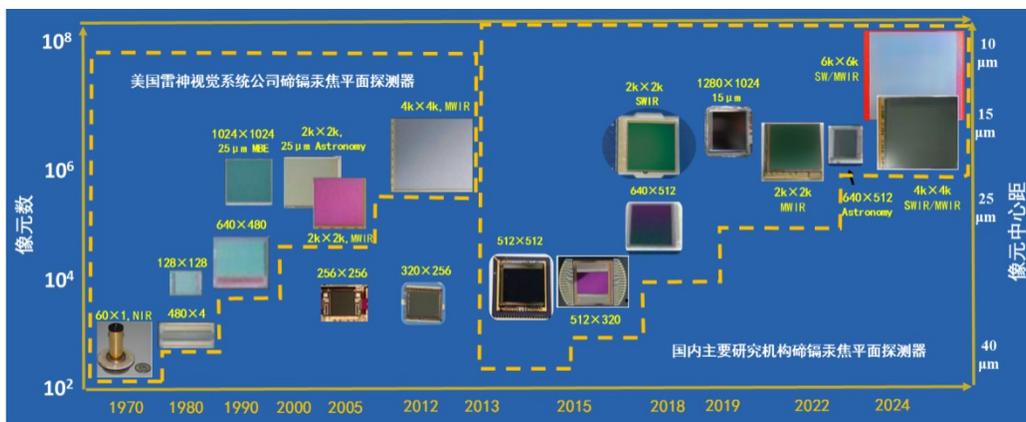


图5 国内外代表性研究机构碲镉汞红外焦平面探测器发展历程<sup>[42-45]</sup>

Fig. 5 The development history of mercury cadmium telluride infrared focal plane detectors in representative research institutions at home and abroad<sup>[42-45]</sup>

果: 常规波长领域, 成功研制 2560×2048 像元探测器 (中心距为 10 μm), 峰值探测率优于 1.0×10<sup>13</sup> cm·Hz<sup>1/2</sup>/W, 有效像元率超 99.7%; 延伸波长领域, 实现了 1280×1024 像元探测器 (中心距为 15 μm), 峰值探测率大于 5.0×10<sup>11</sup> cm·Hz<sup>1/2</sup>/W; 此外, 还发展了消光比优于 37:1 的单片集成四向偏振探测功能的 160×128 像元偏振焦平面器件, 及时间分辨率达 0.8 ns 的 64×64 像元盖革模式雪崩焦平面探测器<sup>[46-47]</sup>。

### 3.3 碲化物 (InSb 基及其 II 类超晶格) 探测器

碲化物探测器覆盖短波、中波和长波红外, 主要包括 InSb、InAsSb、InAlSb 以及 InAs/GaSb II 类超晶格 (T2SL) 等, 是当前主流类型之一。

针对 3 - 5 μm 中波红外波段的 InSb 红外探测器于上世纪 90 年代发展成熟, 广泛应用于民用 (工

业检测、监视、安防、医疗等)、航天 (气象卫星、气候监测、空间红外望远镜等) 和军事 (精确制导、侦察、告警等) 领域。相较于 HgCdTe 材料, InSb 具有缺陷密度低、位错密度小、晶圆尺寸大、均匀性好等优势, 无组分不均匀导致的响应不一致问题, 且作为标准晶圆材料可实现芯片自动化生产, 制备成本低、长期稳定性高, 在大规模应用中具备显著市场竞争力。

通过 MBE 技术对 InSb 材料掺杂 As 和 Al, 可分别制备 InAsSb 和 InAlSb 三元合金材料, 二者均为高工作温度红外探测器的重要材料, 且制备工艺相对简单、成本较低: InAsSb 通常在 GaSb 衬底上外延, 工作温度约 150 K, 响应截止波长 4.2 μm; InAlSb 多在重掺杂 InSb 衬底上生长, 工作温度高于 110 K, 响应截止波长可达 4.8 μm, 覆盖中波红外大气窗口。

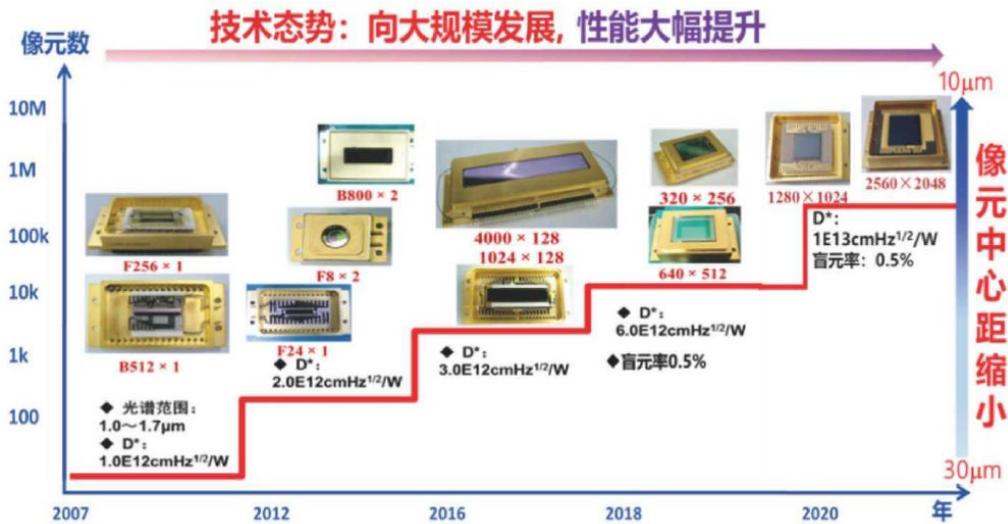


图6 上海技物所InGaAs红外焦平面探测器的发展历程<sup>[46]</sup>

Fig. 6 Development of InGaAs infrared focal plane detectors by Shanghai Institute of Technical Physics (SITP)<sup>[46]</sup>

前文提及的II类超晶格(T2SL)红外焦平面器件,通过MBE技术在晶格匹配的GaSb衬底上交替生长多周期半导体薄膜,可自由调节红外响应光谱;其属于6.1Å(埃)材料体系,器件结构和材料可根据需求灵活设计,具有非常高的设计自由度。其晶格稳定性好、暗电流低,兼具大面阵、多色成像能力,成为HgCdTe的有力竞争者<sup>[48]</sup>。国际上锑化物已进入第三代技术阶段。美国通过VISTA项目推进T2SL工程化,形成“InSb主导中波、HgCdTe主导长波、T2SL逐步替代”的格局。国内已实现第二代锑化物探测器批量生产,第三代大面阵样机在研,已建立全链条技术体系,典型性能参数如表1所示<sup>[20]</sup>。

表1 国内锑化物红外探测器的性能参数<sup>[20]</sup>

Table.1 Performance parameters of domestic antimonide infrared detectors<sup>[20]</sup>

材料	阵列规模	中心距/ $\mu\text{m}$	工作波段	截止波长/ $\mu\text{m}$	工作温度/ $\text{K}$	有效像元/%	帧频/Hz	NETD/mK	F#
InSb	128×128	50	MW	4.8	80	>99.5	≥100	—	2.2
	320×256	30	MW	4.8	80	>99.5	≥300	≤20	2/4
	640×512	25	MW	4.8	80	>99.5	≥120	≤25	4
	1280×1024	25	MW	4.8	80	—	—	—	—
InAlSb	InAlSb	30	MW	4.8	110	—	—	—	—
InAs/GaSb	320×256	30	MW	4.8	80	>99	≥300	≤20	2/4
T2SL	640×512	15/25	MW	4.8	80	>99	≥120	≤25	5.5
	1024×1024	15	MW	4.8	80	>99	≥60	≤25	4
	2048×2048	18	LW	12.5	60	>98	—	≤50	—
	320×256	30	MW/SW	5.0/3.0	77	>97	—	≤30	—
	320×256	30	MW/LW	5.0/10.0	77	>97	—	—	—

### 3.4 量子阱(Quantum Well, QW)探测器

量子阱(Quantum Well, QW)红外探测器,通过调整势阱宽度和势垒高度等结构参数可灵活调控响应波段,光谱响应范围覆盖3 - 18  $\mu\text{m}$ 甚至更长,适用于中长波红外探测。

该类探测器通常以带隙较宽的III - V族材料(GaAs/AlGaAs光导型或InAs/InGaSb、InAs/InAsSb光伏型)为吸收层,采用MBE工艺制备,相较于HgCdTe具有暗电流低、均匀性好、制备成本低、适于大规模生产等优点。其工作原理如图7所示:量子阱材料吸收红外光子后,将载流子(电子)从量子阱的基态激发到扩展态中,在外加电场的作用下产生光电流;图7同时示意了三种与工作温度相关的暗

电流机制——过程①为基态隧穿,在 30 K 以下温度起主要作用;过程②为热辅助隧穿,在 30 - 45 K 之间起主要作用;过程③为热激发,在更高温度下起主要作用。但受子带间跃迁定则限制,传统 QW 探测器量子效率通常低于 10%,光谱响应范围较窄。

传统量子阱红外探测器多采用对称结构,重掺杂势阱层可改善其性能,但过高掺杂浓度会增大暗电流,降低探测率。为突破这一局限,研究人员采用非对称量子阱结构,增强红外光吸收,优化器件性能:  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  非对称结构凭借强波函数重叠效应,可突破跃迁选择定则的限制,显著提升子带间吸收率与响应率;增加  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  中 In 的浓度可拓展后截止波长,但需控制浓度以保证材料晶格质量。

量子阱红外探测器兼具功耗低、响应快的优点,适合大面阵焦平面阵列制造,在可生产性和成本方面具有潜在优势。近年来,研究人员通过微腔耦合、结构参数优化和能态调控等手段进一步提升其性能:李志锋等提出金属/介质/金属等离激元微腔结构,将量子阱激活层嵌入微腔,通过双层金属近场耦合形成横向法布里-珀罗共振模式,成功将垂直入射光转为横向传播并被量子阱吸收,显著增强长波红外(13.5  $\mu\text{m}$ )探测能力,偏振消光比从 10:1 提升至 100:1 以上<sup>[49]</sup>。李天信等人提出全介电方案,将多个量子阱探测器制作成连接的微柱阵列,使器件在 12.55  $\mu\text{m}$  的响应率比 45° 台面器件提高 2.3 倍,在 2.5 V 偏压、50 K 温度下的暗电流密度降

低 5.7 倍,助力将背景限制红外光探测(BLIP)温度提高 4.0 K<sup>[50]</sup>。

### 3.5 硅基阻挡杂质带(Blocked Impurity Band, BIB)探测器

红外天文探测是人类研究宇宙演化、探索星系形成、探测暗物质、寻找未知星球及地外生命的重要手段,而硅基阻挡杂质带(BIB)红外探测器的应用,极大推动了红外天文探测与红外天文学的发展。

BIB 探测器(又称杂质带电导(Impurity Band Conduction, IBC)型探测器)光谱响应覆盖 5 - 300  $\mu\text{m}$ ,主要应用于各类大型天基或地基天文探测平台。目前主流天文用红外探测器中,5  $\mu\text{m}$  以下波段以 HgCdTe 或 InSb 为主,5  $\mu\text{m}$  以上波段则主要采用 BIB 红外焦平面探测器<sup>[54]</sup>。图 8 对比了硅基 BIB 红外探测器与其他类型探测器的探测波长及工作温度。

硅基 BIB 红外探测器具有量子效率高、暗电流低、抗辐射性能强等特点,相较于 HgCdTe 探测器,在天文探测领域表现出更优异的响应均匀性和稳定性。

国际上,美欧等发达国家已成功将砷掺杂硅(Si:As)、锑掺杂硅(Si:Sb)、镓掺杂硅(Si:Ga)等 BIB 探测器成功应用于多项天文探测任务,其中 Si:As BIB 探测器应用最为广泛,如“起源太空望远镜技术计划”已将其列为关键发展目标之一<sup>[55]</sup>。我国在硅基 BIB 红外探测器领域尚处于技术研发早期,尚未

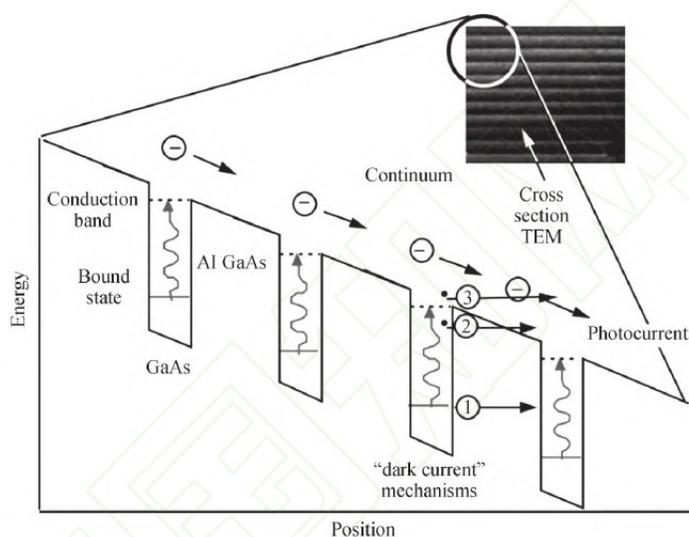


图 7 量子阱红外探测器的工作原理<sup>[4]</sup>

Fig. 7 Schematic diagram of working principle of the quantum well infrared detectors<sup>[4]</sup>

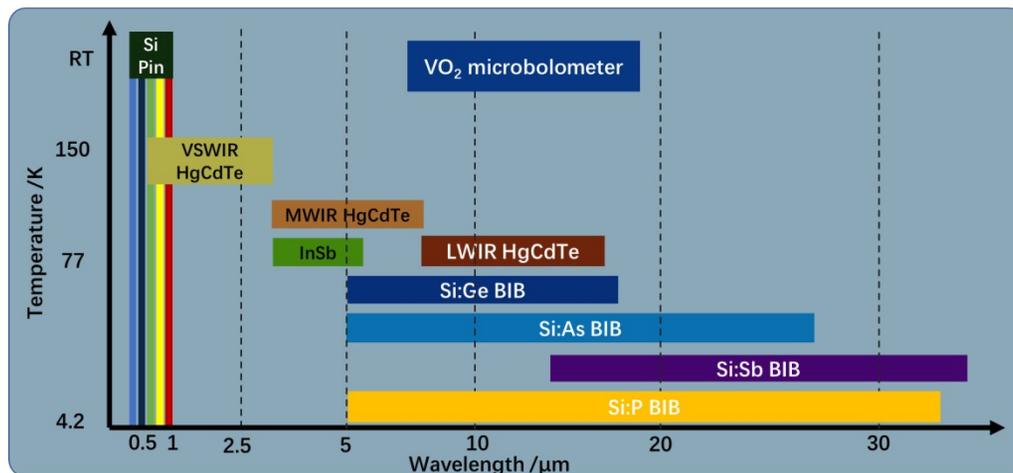


图8 硅基BIB红外探测器和其他类型探测器的探测波长及工作温度对比<sup>[54]</sup>

Fig. 8 Comparison of detection wavelength and operating temperature between silicon - based BIB and other types of infrared detectors<sup>[54]</sup>

实现天文应用,但已取得多项重要进展:中国电子科技集团王晓东等人报道了GaAs基BIB探测器中与受体浓度相关的暗电流运输机制,证明载流子运输模式分为电子电流和跳变电流(以电子电流为主),暗电流主要由漂移-扩散电流和产生复合电流主导,且二者均为受体浓度的单调递减函数<sup>[56]</sup>。上海技物所王鹏、胡伟达团队基于MBE生长动力学提出温度调控掺杂界面构筑方法,利用Si与Ga原子热敏感性差异,抑制腔体记忆效应和表面迟滞效应,实现Si:Ga掺杂浓度 $10^{14} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的可调可控,掺杂界面尺度小于百纳米尺度。团队澄清了Ga原子负温度黏附系数,计算得出表观活化能为2.25 eV,并探究了耗尽区稳态电场分布与界面宽度的关系;证实尖端界面电场的存在,且陡峭界面可有效拓宽吸收层耗尽区宽度、提升电场强度,显著抑制产生-复合暗电流;所制备的窄界面BIB红外探测器,探测波长达 $20 \mu\text{m}$ ,暗电流低至pA量级<sup>[57]</sup>。后续,该团队通过模拟与实验,阐明界面层势垒分布模型及其对器件暗电流和响应特性的影响,同时制备出具有陡峭和渐变型界面的磷掺杂硅BIB结构。结果表明,针对 $28.3 \mu\text{m}$ 波长,陡峭界面BIB光电探测器的暗电流降低5个量级,即使在2.7 V正向偏压下,暗电流仍保持1 pA以下;而渐变界面光电探测器则提升了对长波低能量光子的检测能力<sup>[58]</sup>。这些研究为BIB探测器的界面工程与探测性能优化提供了关键基础,将有力推动其在长波红外探测中的未来应用。

## 4 新型红外探测器的研究进展

在半导体技术持续突破与材料研究不断精进的背景下,近年来涌现出多种新型的红外探测器,如胶体量子点探测器、二维材料探测器、电磁诱导势阱效应探测器以及铁电极化场调控的红外探测器等。这些新型红外探测器是传统红外探测器的技术延伸与发展。下面重点介绍这几种新型红外探测器的研究发展情况。

### 4.1 胶体量子点 (Colloidal Quantum Dot, CQD) 探测器

量子点,是指由少量原子组成、三个维度尺寸通常在1 - 100 nm的零维纳米结构,也称为半导体纳米晶。量子点可分为两类:一类是能够稳定分散于有机或无机溶剂中,称为胶体量子点(CQD);另一类是外延量子点,通常采用分子束外延技术生长。

得益于外延技术的进步,具有量子结构的光电探测器已取得了巨大进展。量子阱红外光电探测器(QWIP)的发展,不仅推动了传统红外探测技术的革新,还造就了新型器件——量子点红外光电探测器(Quantum Dot Infrared Photodetector, QDIP)。QDIP的结构设计类似于QWIP,不同之处在于量子点在三个维度存在尺寸限制。该探测器于1998年首次被提出并论证。量子点的三维量子限制效应,使得该探测器具有较低的暗电流,进而表现出高探测率,同时还具备较高的工作温度。此外,通过调控量子点的尺寸,还可实现对红外响应波段的调节。上述特性使得量子点红外探测器在诸多方面展现出优异性能,已成为量子阱红外探测器的重要

替代品。

胶体量子点(CQD)半导体材料,诸如 HgTe、PbS、InSb、InAsSb、HgCdTe、InGaAs、T2SL 等,具有尺寸可调、制备工艺简单、成本低廉等优点。与外延量子点材料相比,胶体量子点纳米颗粒有助于提升光电探测器的性能。目前,从性能上看,PbS 胶体量子点短波红外探测器已实现与商用 InGaAs 探测器相当的探测率,在热电冷却温度下能保持快速响应。胶体量子点红外探测器最大的优势在于,胶体量子点材料的制备工艺与半导体工业中广泛使用的 CMOS 相机相兼容。采用在硅基 CMOS 读出电路上集成胶体量子点薄膜的方式制备短波红外相机,已投入实际使用。

自 1998 年首次提出并论证以来,经过二十多年的发展,尤其是近年来,胶体量子点红外探测器的研究取得了重大突破。2023 年,北京理工大学报道了一款百万像素级 HgTe 胶体量子点短波红外探测器<sup>[51]</sup>。研究人员将 HgTe 胶体量子点与 CMOS 读出电路直接片上电学互联,同时利用 CMOS 读出电路表面的钝化层与金属层构建谐振腔,进一步提升了量子点薄膜的光学吸收效率。该量子点焦平面阵列包含  $1280 \times 1024$  (约 133 万个)像元,截止波长为  $2.5 \mu\text{m}$ ,可在室温下运行,能够实现高分辨率、高灵敏度的短波红外成像(图 9)。巴塞罗那科学技术研究所则报道了基于 InSb 胶体量子点短波红外光电探测器相关研究<sup>[52-53]</sup>。研究人员通过设计 InSb/InP 核壳结构来钝化表面缺陷,研制出性能指标优异的短波红外光电探测器,其暗电流降低至  $4 \mu\text{A cm}^{-2}$ 、线性动态范围超过 140 dB,响应时间 70 - 90 ns;该

探测器的光致发光量子产率达到 10%,加之其在零偏压下具有高外量子效率,这证实了通过抑制带尾陷阱态和钝化表面缺陷,能够制备出高质量的碲化铟胶体量子点光电探测器。

胶体量子点可直接生长在 CMOS 读出电路上,实现探测器芯片的片上集成,这避免了传统红外探测器所需的吸收层结构与读出电路之间的倒装芯片(Flip Chip)互连及后续的底部填充胶(Underfill)工艺,减少了工艺步骤,降低了生产成本,同时能有效提高电路导通率、降低盲元率。但需要指出的是,由于胶体量子点红外探测器存在载流子迁移率低、暗电流较大等不足,目前其性能和响应速度仍落后于 InGaAs、HgCdTe、InSb 及 II 类超晶格等主流红外探测器。不过,随着半导体制备工艺技术的提升和材料研究的不断深入,胶体量子点红外探测器性能有望继续改善,其被认为是一种极具发展前景的低成本、高集成度、小像元、大面阵焦平面红外探测器。

#### 4.2 二维(2D)材料探测器

随着半导体微纳加工技术与层状材料组装工艺的持续发展,以石墨烯、硒化物、黑磷及黑磷烯(b-P/b-PAs)等为代表的二维材料及其异质结构,凭借优异的光电性能与可调控的能带特性,在红外探测领域展现出广阔的应用潜力<sup>[29]</sup>。

目前,针对二维材料在红外探测器研制中的应用,相关研究已广泛发展,并取得了一系列创新性成果。基于二维材料的光电转换过程,涉及 Seebeck 效应、光诱导局域场调控等多种物理机制,这为设计和研制具有高量子效率、高灵敏度的高性能红外

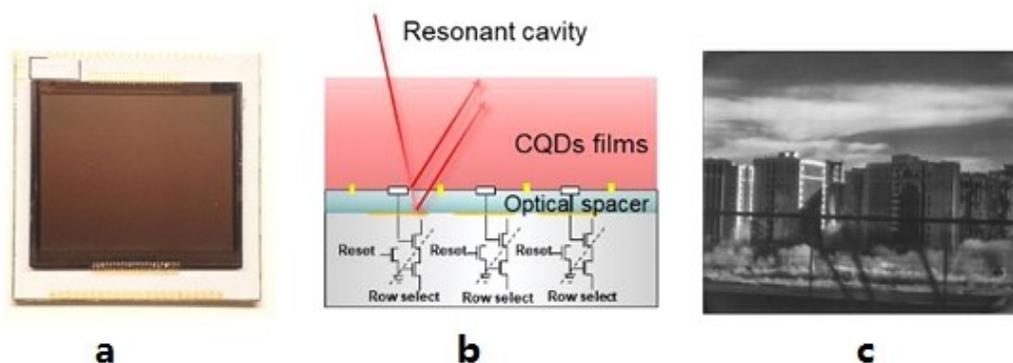


图 9 北京理工大学研制的百万像素级( $1280 \times 1024$ )HgTe 胶体量子点短波红外探测器<sup>[51]</sup>: a. 探测器芯片实物图 b. 结构原理示意图 c. 短波红外成像图

Fig. 9 The megapixel - level ( $1280 \times 1024$ ) HgTe colloidal quantum dot short - wave infrared detector developed by Beijing Institute of Technology<sup>[51]</sup>: a. the physical image of the detector chip b. the schematic diagram of the structure principle c. the short - wave infrared imaging picture)

探测器提供了理论基础。而石墨烯材料,由于其自身的零带隙特征,其光电响应率受到限制。通过构建异质结构可有效调控电荷传输过程并降低暗电流,例如石墨烯/砷化铟(InAs)纳米线异质结构,其光电响应率可达传统石墨烯结构的5000倍;将石墨烯与硅波导结构复合,或制备石墨烯基法布里-珀罗(Fabry-Perot)微腔,均能显著提升探测器的光增益。此外,基于二维材料的单极势垒光电探测器,能够实现超低暗态电流和超快响应速度;将石墨烯与量子点复合,也可获得超高增益——基于石墨烯-半导体量子点的红外探测器展现出极高的响应率,在宽光谱、高灵敏度红外成像阵列器件领域具有广阔的应用前景<sup>[59]</sup>。

除上述研究外,二维材料领域的研究热点之一是:利用材料中贝里曲率与量子度量(如能带拓扑特性)带来的显著增强非线性光学响应,通过光激发电子在动量空间的分布不对称性诱导纵向光电流,从而实现新机制的红外光电探测。例如,J. Lai等人报道了基于第二类外尔半金属Td-MoTe<sub>2</sub>实现的宽带自供电光电探测器<sup>[60]</sup>。其中金属-MoTe<sub>2</sub>-金属光电探测器原型在532 nm波长下的响应率为0.40 mA W<sup>-1</sup>,探测率1.07×10<sup>8</sup> Jones,响应时间为43 μs;该探测器经测试可实现532 nm到10.6 μm波长范围的宽带响应,其潜在探测范围还可扩展至远红外与太赫兹波段,且其各向异性与波长有关——激发波长越接近外尔节点,各向异性程度越高。袁洪涛等人研究了贝里偶极矩的通用产生策略,通过实现界面晶体结构对称性破缺与能带结构人工修饰,在WSe<sub>2</sub>/SiP异质界面观察到由贝里偶极矩诱导的栅极可调自旋极化光电流,且发现异质界面圆偏振自旋光电流幅值可通过栅极电压调控<sup>[61]</sup>。耶鲁大学的C. Ma等人则针对新兴的石墨烯或摩尔纹系统,于2022年率先报道了在扭曲双双层石墨烯(TD-BG)中观察到的5 μm和7.7 μm波长的可调中红外体光伏效应现象,并解释该现象源于摩尔纹引起的强对称破缺与量子几何贡献;文章指出,器件光响应在很大程度上取决于激发光的偏振态,且可通过外部电场进行高度调控<sup>[62]</sup>。

拓扑半金属二维材料凭借贝里曲率增强特性,在长波红外探测领域展现出良好前景。北京大学孙栋于2017年将二维拓扑半金属引入红外光电探测领域<sup>[63]</sup>,这类材料具备零带隙线性色散能带结构,理论上可在宽光谱范围内均实现光电响应,因

此其在低能区的光响应特性受到广泛关注<sup>[64]</sup>。层状三元化合物TaIrTe<sub>4</sub>二维材料是近年来被预测为打破洛伦兹不变性的第二类外尔费米子的重要候选材料;依托外尔半金属的拓扑保护带结构,基于该材料的光电探测器在高灵敏度、宽带响应和自供电工作机制方面实现了优异性能。赖佳伟等人报道,金属-TaIrTe<sub>4</sub>-金属光电探测器在10.6 μm下响应时间为27 μs,响应率20 μA W<sup>-1</sup>(或比探测率达1.8×10<sup>6</sup> Jones),且通过线性偏振光的偏振角测量,确定了TaIrTe<sub>4</sub>探测器各向异性响应<sup>[65]</sup>。在中红外波段,拓扑半金属对位移电流的增强效应已在4 μm零偏光电探测实验中首次得到证实,这为非偏置拓扑半金属光电探测器提供了有效的电荷分离机制。上海技物所与东南大学、苏州纳米所合作,探索了拓扑半金属材料PdTe<sub>2</sub>、PtTe<sub>2</sub>室温甚长波红外-太赫兹探测器光电流产生机制,以及节线拓扑材料锆锗硒Zr-Ge-Se甚长波红外-太赫兹探测机制<sup>[66-68]</sup>。这些新的物理现象的发现表明,拓扑半金属体系在非平衡态光生载流子高效转换与高灵敏度探测等方面具有重要应用潜力。

低成本以及高稳定性是二维材料红外探测器能够大规模市场应用的必要条件。然而,此类探测器目前仍处于实验室研究与发展阶段——尽管已在红外探测领域取得显著进展,其实际应用仍面临诸多挑战。自二维材料概念提出以来,相关器件研制主要依赖机械剥离或化学气相沉积(CVD)制备的纳米片,大面积、高质量和高可靠性的二维材料较为匮乏;此外,传统CVD或金属有机化学气相沉积(MOCVD)生长方法通常需要600-1000°C的高温,易导致现有材料与器件在集成过程中受热损伤,而机械转移方法易引入污染或机械缺陷。上述问题不仅造成二维材料探测器规模化制作的难题,还限制了异质结构的可控构建和大规模应用<sup>[59]</sup>。为推动二维材料阵列探测器的研制,科研人员采取了一系列创新性工艺,代表性进展如下:

美国加州大学段镶锋团队报道了一种二维材料异质结构阵列的通用合成方法,创新性地提出利用金属性过渡金属硫化物与半导体性过渡金属硫化物来制备二维范德瓦尔斯异质结构阵列<sup>[69]</sup>。该研究通过激光烧蚀技术,在二维半导体原子晶体基底上定点制造缺陷阵列作为核位点,诱导金属纳米片优先生长;随后,通过精确调控超薄金属的生长条件,最终形成均匀的“超薄材料/原子级厚度的半

导体”垂直异质结阵列;最后,以二维金属材料作为电极,采用气相沉积合成二维金属纳米片/二维半导体垂直异质结阵列,构建出高质量的范德华电极-半导体界面。研究人员还在连续 MoS<sub>2</sub> 单层膜上成功制备出超过 12 万个 VSe<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub> 垂直异质结阵列,良率高达 99%,为实现大规模、高性能二维阵列探测器件提供了重要工艺基础。张克难等人则研究开发了一种普适性低温外延替代策略,通过两步法解决上述高温与机械转移难题<sup>[70]</sup>:第一步在低温 (<400 °C) 下外延生长金属碘化物(MI)层,第二步通过低能垒(0.2 - 0.5 eV)碘-硫属元素取代反应,将 MI 转化为过渡金属硫化物二维材料(MCs)。该方法既避免了高温对基底材料(如 MoS<sub>2</sub>、WS<sub>2</sub>)的破坏,又抑制了层间扩散,实现了异质结构原子级洁净界面;同时,新方法克服了机械转移的污染和结构缺陷问题,为高质量异质结构原位生长提供了新途径。作者成功合成了 17 种二维 MCs(包括硫化物、硒化物、碲化物等),其中在 280 °C 下生长的 In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/MoS<sub>2</sub> 异质结构光电探测器性能(响应率 1.65 × 10<sup>4</sup> A/W)与传统高温(700 - 1000 °C)制备的材料相当。通过理论计算和原子分辨表征,证实 MI 向 MC 的取代反应能垒极低,且异质界面为范德华接触,基底材料的完整性得以保持。进一步地,该团队结合掩模技术,展示了多种 MCs(如 In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>、SnS<sub>2</sub> 等)及有机钙钛矿(CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>)阵列的图案化集成,为多功能二维材料器件单片集成提供了可行方案。

目前,二维材料探测器在空间应用等国家重大需求领域方面仍面临诸多挑战,主要包括材料稳定性不足、耐辐射及抗原子氧性能有待验证等问题<sup>[71]</sup>。尽管二维材料探测器技术尚未达到替代传统焦平面探测器的成熟度,但其发展潜力巨大。未来研究需聚焦国家重大战略需求,尤其在空间遥感等领域开展应用基础研究,以突破技术瓶颈,推动其走向工程应用。

### 4.3 电磁诱导势阱效应探测器

近年来,黄志明、褚君浩等人提出一种可室温探测的光电效应,并将其命名为电磁诱导势阱(EIW)效应。当入射至金属-半导体-金属包覆结

构(图 10a)的光子满足准静态、反对称条件时,光会直接在半导体材料中诱导出势阱,将金属内的电子有效注入半导体,导致材料中载流子浓度发生改变(图 10b),进而实现新型光电探测。EIW 效应区别于传统的光电效应、热效应与等离子体效应,其突破了“能量小于半导体带隙能量的光子无法产生光电效应”这一物理限制。

黄志明、褚君浩等通过联合求解麦克斯韦方程组和输运方程,构建了 EIW 效应光电转换理论体系<sup>[23-24]</sup>。其中,在半导体材料中诱导产生的载流子浓度改变量  $\Delta n$  可表示为<sup>[24]</sup>:

$$\Delta n = \frac{4\varepsilon_0\eta E_0 V_b \tau_c \mu_c}{\pi^3 q a d \sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{(\pi/a)^2 - k_0^2} [1 - \exp(-d\sqrt{\varepsilon_r} \sqrt{(\pi/a)^2 - k_0^2})] \quad (1)$$

相应的光电器件响应率  $R_V$  可表示为<sup>[23]</sup>:

$$R_V = \frac{4\varepsilon_0\eta V_b^2 \tau_c \mu_c}{\pi^3 q^2 a d n c_0 \sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - k_0^2} \left[ 1 - \exp\left(-d\sqrt{\varepsilon_r} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - k_0^2}\right) \right] \quad (2)$$

通过分析可得到 EIW 效应与材料及器件关键参数的内在关系,这些参数包括材料层面的载流子寿命  $\tau_c$ 、迁移率  $\mu_c$ 、载流子浓度  $n$ 、介电函数  $\varepsilon_r$ ,以及器件层面的宽度  $a$ 、厚度  $d$ 、偏压  $V_b$ ,此外还涉及光速  $c_0$ 、入射光波矢  $k_0$  等物理参数。由于基于 EIW 效应的器件存在高截止频率  $f_r = \frac{c_0}{2a\varepsilon}$ ,这一特性有效消除了红外与可见光辐射带来的强烈背景干扰(图 10c)。需要强调的是,该截止频率与器件结构参数直接相关,这与等离子体效应中截止频率仅由材料介电函数决定的特性存在显著差异。

利用 EIW 效应的响应电流与载流子浓度、迁移率材料特性参数的关联,结合探测器的光响应电流数据与材料的变温电学特性,可推导出材料的输运特性。该方法为二维材料难以进行霍尔表征的问题提供了新途径,进而推导得到材料的载流子浓度  $n$  和迁移率  $\mu$  随温度变化的特性<sup>[23]</sup>:

$$n(T) = \sqrt{\frac{4\varepsilon_0 a \eta P V_b \tau}{\pi^3 q^3 d^2 w c \sqrt{\varepsilon_r} I_{ph}(T) r^2(T)}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - k_0^2} \times \left[ 1 - \exp\left(-d\sqrt{\varepsilon_r} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - k_0^2}\right) \right] \quad (3)$$

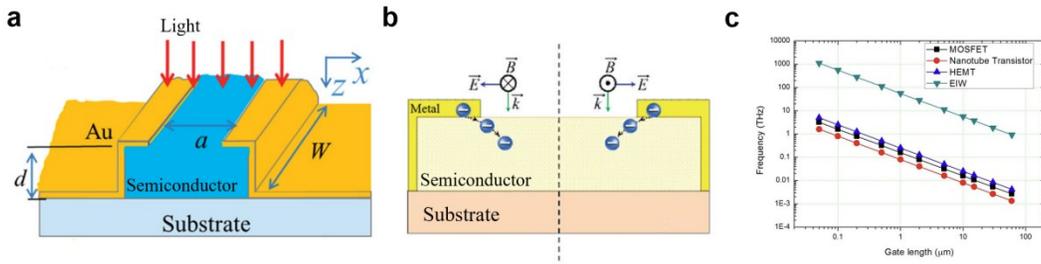


图 10 EIW 效应示意图及其截止频率<sup>[24]</sup>: a. 入射光与金属-半导体-金属相互作用 b. EIW 效应作用时电子注入半导体 c. 不同探测机理作用下探测器截止频率

Fig. 10 Schematic diagram of the EIW effect and its cut-off frequency<sup>[24]</sup>: a. light interaction with a metal-semiconductor-metal structure b. Electron injection in a semiconductor induced by EIW effect c. Comparison of detector cut-off frequency under different detection mechanisms

$$\mu(T) = \frac{\pi^3 q a c \sqrt{\epsilon_r} I_{ph}(T)}{4\epsilon_0 \eta w P V_0 \tau \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - k_0^2} \times \left[ 1 - \exp\left(-d \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - k_0^2}\right) \right]} \quad (4)$$

该研究团队分别采用 II-VI 族 HgCdTe<sup>[23-24]</sup>、III-V 族 InGaAs<sup>[73]</sup>、IV 族 Si<sup>[74-76]</sup>、VI 族 Te<sup>[25]</sup> 和硫族化合物 SbTe<sup>[77]</sup>，研制了基于 EIW 效应的太赫兹探测器，并系统研究了入射功率与频率、器件台面尺寸、偏压等物理参数与 EIW 效应的关系，实验结果与理论预期相符。基于 HgCdTe 的太赫兹探测器，在不同功率、不同频率的太赫兹波照射下，载流子改变量的理论值与实验值保持一致(图 11a,b)<sup>[23-24]</sup>；基于 Si 材料研制的不同台面尺寸太赫兹探测器，其探测光电压的理论值与实验值几乎完全吻合，证实了 EIW 光电转换理论的正确性(图 11c)<sup>[75]</sup>。P 型 SbTe 材料与 P 型 Te 材料探测器在太赫兹波段测试中，均观察到负光电导现象——这与传统光电导效应产生的正光电导现象不同。该现象表明，EIW 效应注入的电子与 P 型材料中的空穴发生复合，导致材料电导率降低，同时也证明 EIW 效应属于一种光电导效应(图 11d)<sup>[25,77]</sup>。此外，小尺寸 Si 探测器在太赫兹波段基于 EIW 效应产生的光电流，随偏压增大而逐渐饱和，这一特征与光电导效应的扫出效应现象相符，进一步验证了 EIW 效应的光电导效应属性(图 11e)<sup>[76]</sup>。基于 InGaAs 材料的探测器，可利用传统光电导效应、热效应与 EIW 效应实现多波段探测。实验发现，探测器基于 EIW 效应的响应时间优于另外两种探测机理，说明 EIW 效应是一种区别于热效应与传统光电导效应的独立探测机理(图 11f)<sup>[73]</sup>。

基于 EIW 效应研制的太赫兹探测器，可实现太赫兹波段的室温高灵敏快速探测，具体性能如下：Te 基探测器可实现 0.02 - 0.3 THz 波段的响应；在

0.2 V 偏压下，该探测器在 0.31 THz 的噪声等效功率(NEP)为  $7.58 \times 10^{-14}$  W/Hz<sup>1/2</sup>，响应时间为 4.5  $\mu\text{s}$ ；在 0.02 THz 处，探测器的偏振比高达 468(图 12a)<sup>[25]</sup>。NbSe<sub>2</sub> 基探测器基于 EIW 效应，实现了太赫兹波段室温高灵敏百纳秒量级的探测：其在 0.26 THz 处的响应率为  $9.6 \times 10^5$  V/W；在 0.173 THz、0.1 V 偏压下，响应率进一步提升至  $7.8 \times 10^6$  V/W，NEP 为  $5.4 \times 10^{-15}$  W/Hz<sup>1/2</sup>，响应时间为 610 ns(图 12b)<sup>[78]</sup>。基于拓扑绝缘体材料 InBiTe<sub>3</sub> 研制的探测器，在 0.51 THz 处的 NEP 为  $6.7 \times 10^{-14}$  W/Hz<sup>1/2</sup>(图 12c)，响应时间为 8  $\mu\text{s}$ <sup>[79]</sup>。

半金属 1T-TiSe<sub>2</sub> 借助 EIW 效应，首次观测到玻色-爱因斯坦凝聚态(BEC)转变；同时，利用 EIW 效应和 BEC 的协同作用，有效克服了半金属材料探测响应率低、暗电流大的缺点，成功实现太赫兹波段高灵敏探测(图 12d)<sup>[72]</sup>。Ta<sub>2</sub>NiSe<sub>5</sub> 材料则通过电磁诱导势阱(EIW)效应与激子绝缘体(EI)相变的结合，实现了针对室温条件优化的光电响应极值(图 12e)，在太赫兹波段展现出室温高性能响应——相较传统商用高莱管探测器，其比探测率提升了一个数量级。该研究证实，通过激子绝缘体相变与能带工程的协同调控，可为开发室温高性能光电探测器提供全新技术路径<sup>[80]</sup>。

综上，EIW 效应的核心突破在于，其打破了“光子能量小于半导体带隙时无法产生光电效应”的传统物理限制。依托该效应研制的光电探测器，不仅将室温光电探测的波长延长 2 个数量级以上，更实现了灵敏度提高 3 个数量级的性能跨越。EIW 效应

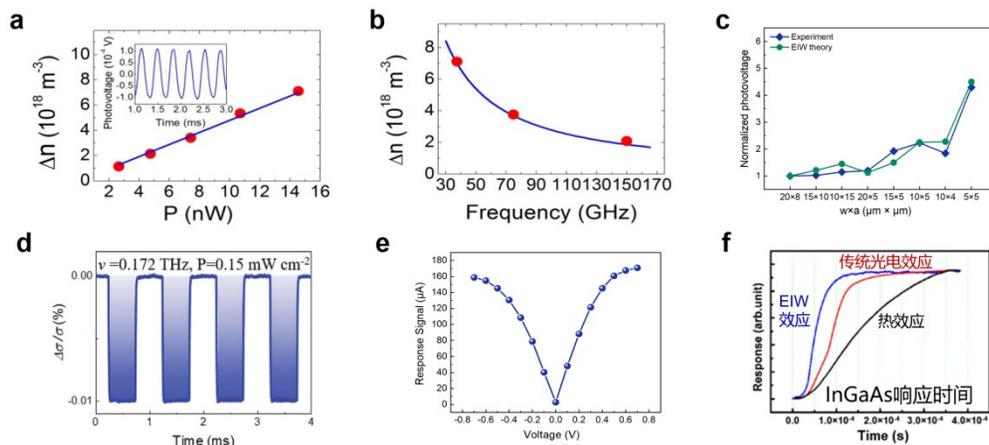


图 11 EIW 效应产生的实验观测结果: a. HgCdTe 探测器中 EIW 效应引起的载流子变化量与功率的关系<sup>[23-24]</sup> b. HgCdTe 探测器中 EIW 效应引起的载流子变化量与入射频率的关系<sup>[23-24]</sup> c. 不同台面 Si 探测器基于 EIW 效应诱导的光电压理论值与实验值比较<sup>[82]</sup> d. Te 探测器中太赫兹波段 EIW 效应诱导的负光电导现象<sup>[84]</sup> e. Si 探测器中 EIW 效应光电流随偏置电压增大逐渐饱和的现象<sup>[83]</sup> f. InGaAs 探测器在不同探测机制下的响应时间对比<sup>[80]</sup>

Fig. 11 Experimental observations of the EIW effect: a. Relationship between EIW - effect - induced carrier variation and optical power in HgCdTe detectors<sup>[23-24]</sup> b. Dependence of EIW - induced carrier variation on incident frequency in HgCdTe detectors<sup>[23-24]</sup> c. Theory - experiment comparison of EIW - induced photovoltage in multi - mesa silicon detectors<sup>[82]</sup> d. Negative photoconductivity induced by EIW effect in Te detectors in the THz band<sup>[84]</sup> e. Saturation behavior of EIW photocurrent with increasing bias voltage in silicon detectors<sup>[83]</sup> f. Response time of InGaAs detectors under different detection mechanisms<sup>[80]</sup>

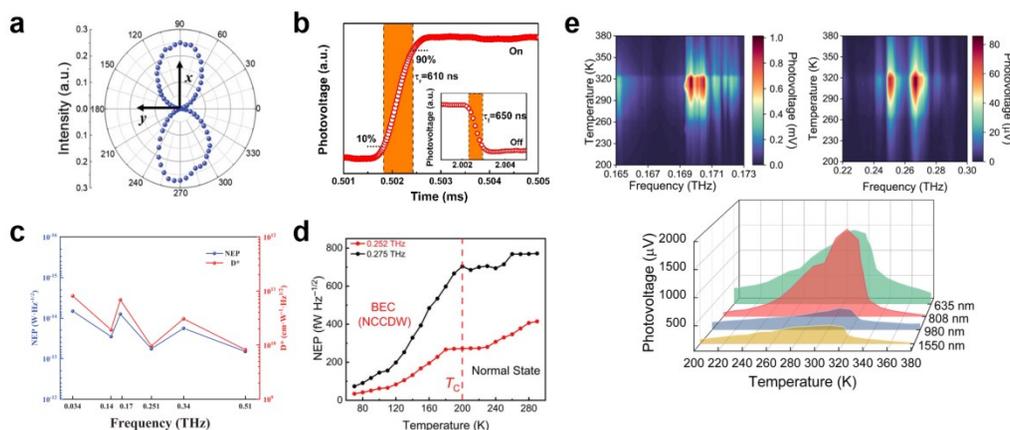


图 12 基于 EIW 效应的探测器性能: a. Te 探测器基于 EIW 效应偏振比高达 468<sup>[25]</sup> b. NbSe<sub>2</sub> 探测器的响应时间为 610 ns<sup>[85]</sup> c. InBiTe<sub>3</sub> 探测器在 0.034 - 0.51 THz 的噪声等效功率和比探测率<sup>[86]</sup> d. TiSe<sub>2</sub> 探测器在 BEC 下在 0.252 THz 和 0.275 THz 的噪声等效功率<sup>[79]</sup> e. Ta<sub>2</sub>NiSe<sub>3</sub> 在不同频段均具有室温极值响应性能<sup>[87]</sup>

Fig. 12 Performance of detectors based on the EIW effect: a. A polarization ratio of up to 468 achieved in Te detectors via the EIW effect<sup>[25]</sup> b. Response time of 610 ns demonstrated in NbSe<sub>2</sub> detectors<sup>[85]</sup> c. NEP and detectivity of the InBiTe<sub>3</sub> detector across 0.034~0.51 THz<sup>[86]</sup> d. NEP of the TiSe<sub>2</sub> detector at 0.252 THz and 0.275 THz under BEC conditions<sup>[79]</sup> e. Room - temperature peak response performance of the Ta<sub>2</sub>NiSe<sub>3</sub> detector over multiple frequency bands<sup>[87]</sup>

既为“光与物质相互作用”研究提供了全新思路,也为太赫兹技术在医学成像、遥感、无损检测等领域的实际应用开辟了新途径,为室温高性能太赫兹探测器件的开发奠定了关键基础。

#### 4.4 铁电极化场调控的红外探测器

近年来,基于铁电极化场的调控技术,凭借其非易失性和强局域电场特性,为新一代高性能红外

探测器在抑制暗电流、拓展响应谱段、获取多维光信息等方面提供了全新路径。

铁电材料可提供高达  $10^9$  V/m 的强局域静电场,能够在无外加栅压的条件下实现对沟道载流子的有效调控。王建禄等人<sup>[81]</sup>采用 P(VDF - TrFE) 有机铁电薄膜作为栅介质,利用极化方向朝上的铁电场对 n 型半导体 MoS<sub>2</sub> 进行调控,使其达到完全耗尽状

态,显著降低了器件暗电流;同时,光照后产生的光生电子-空穴对可被迅速分离与输运,最终实现高达 2570 A/W 的响应率,大幅提升了光电转换效率。这一结果充分体现了铁电极化场在提升器件灵敏度方面的核心作用。在此基础上,通过构建准自支撑铁电膜与半导体的异质结构,增强热隔离效果,成功实现了从紫外至长波红外的超宽光谱探测<sup>[82]</sup>:在紫外至近红外波段,响应机制以半导体的光电效应为主,铁电极化场不仅能抑制暗电流,还可进一步提升响应率与探测率;而在中波至长波红外波段,则主要依赖铁电材料的热释电效应,借助低维半导体界面对微弱热电信号的放大与读取,实现高灵敏红外热响应。

在异质结构器件中,铁电极化场可用于调控界面能带对齐方式,进而提升载流子分离效率与器件响应速度。例如,在 GeSe/MoS<sub>2</sub> 异质结构中,通过控制铁电极化方向,实现了能带对齐方式在 I 型与 II 型之间的可逆切换,形成了能带电势差用以快速拆分光生载流子,有效提升了红外探测器件的响应速度<sup>[83]</sup>。

除了对探测强度和响应波段的调控外,红外偏振信息的获取也逐渐成为多维红外成像的重要发展方向。由于半导体的对称性决定器件的偏振探测性能,通过设计铁电畴图形调控半导体对称性,可显著增强器件的偏振探测能力。例如,在半导体黑磷沟道中定义了面内 pn 结的方向,构建对特定偏振方向具有选择性的光电响应区域,使器件的偏振灵敏度提高至 288<sup>[84]</sup>。该原理推广至本征各向同性的半导体体系,通过铁电畴的图形设计可以改变半导体材料的对称性,赋予器件偏振探测功能,使其在近红外波段的偏振探测灵敏度达到 310<sup>[85]</sup>。这一策略突破了传统偏振探测技术依赖光学元件或微纳结构滤波的限制,为高集成度偏振探测器提供了全新方案。

此外,铁电材料的非易失性和极化连续可调特性,为实现动态可重构及智能化红外探测系统奠定了基础。利用铁电调控可精确设定沟道区域载流子类型与浓度分布,构建可写入/擦除的同质结结构,实现器件功能的电学重构<sup>[86]</sup>。在更高集成层面,该策略已被成功用于感知-计算一体化系统的构建:通过铁电调控实现半导体费米能级的连续调节,可在 pn 结和 np 结间线性连续切换,完成正负光响应的权重配置,进而实现无需外部存储与计算单

元的图像识别功能验证,充分展示了铁电调控技术在本位智能感知系统中的巨大潜力<sup>[87]</sup>。

## 5 红外探测器的新技术应用

随着科技的日新月异,各类新技术不断涌现。如前所述,真正意义上的现代红外探测器是出现在二战之后,历经 80 余年发展,红外探测技术已达到较高水平。将传统的红外探测器与新技术结合,有望实现更优的综合性能,拓展更多新应用场景,这也是第四代红外探测技术的发展要求。

### 5.1 动态视觉传感

红外技术的持续演进,推动红外光电成像系统向高分辨率、高动态范围、高帧频与智能化方向快速发展,与此同时,红外光电系统成像需要处理的数据量也呈指数级增长。在相邻两帧图像中,无变化的背景信息占比极高,这部分内容属于冗余数据;而随着探测器帧频与分辨率的不断提升,冗余数据量会急剧增加,给信息传输和数据处理带来巨大挑战。此外,由于对光信号采样需依赖曝光时间,帧频提升受到瓶颈限制,导致在超高速场景下容易丢失大量有用信息。

动态视觉传感器(Dynamic Vision Sensor, DVS),又称事件视觉传感器(Event Vision Sensor, EVS),是一类受生物视觉机制启发的新型图像传感器。它突破了传统曝光时间与固定帧频的限制,响应时间可达微秒级,甚至纳秒级;且其输出形式并非传统图像帧,而是由目标运动触发的异步事件流,因此在捕捉极高速运动目标方面具有显著优势<sup>[88]</sup>。将这类传感器与传统红外探测器融合,可构建动态视觉红外探测系统:其核心功能一方面是通过红外光电成像获取目标细节信息,另一方面是当发生变化事件时,仅输出相关事件像素的信息以呈现目标轮廓,无需传输冗余数据,实现信息传输的多路复用,从而提升帧频,达成高速探测成像。

在过去的十几年中,基于事件的动态视觉成像仪主要应用于可见光领域。2022年,以色列SCD公司开发出一款新型成像仪,在国际上首次将基于事件的成像技术引入短波红外波长范围。该成像仪在输出事件信息的同时,还可提供同步的常规高帧频图像,属于多模 Video Graphics Array (VGA) 传感器,像素间距为 10 μm;其工作波段覆盖可见光至短波红外波段(600 - 1700 nm),基于事件的视觉成像帧频高达 25 kHz,并集成了 11 - 13 位可调模数转换器(Analog - to - Digital Converter, ADC)——当分辨

率设为 13 位时,帧频可达 800 fps;将量化分辨率降至 11 位时,帧速可翻倍至 1600 fps,实现了常规成像的高帧频性能。

图 13 展示了该成像仪使用不同镜头、不同帧率在不同目标场景中捕捉无人机的图像:图 13a 为植被背景下,使用 500 mm f/7 镜头、以 1 kHz 帧率捕捉的无人机运动图像,13c 为以 10 kHz 帧率通过 ROIC 事件通道仿真得到的无人机运动轮廓;图 13b 为天空背景下,使用 50 mm f/2 镜头、以 1 kHz 帧率捕捉的无人机运动图像,13d 为以 10 kHz 帧率通过 ROIC 的事件通道仿真得到的无人机运动轮廓。图中白点代表 ON 事件,黑点代表 OFF 事件。

通过将红外探测器与动态视觉传感技术相结合,研制出动态视觉红外探测系统。该系统不仅可显著提升目标识别能力与抗环境干扰能力,还能增强对高速运动目标、微弱信号目标及伪装目标的高灵敏度探测及持续跟踪能力,进而有效提高其在复杂场景与恶劣气象条件下的环境适应性及作战效能。可见,动态视觉红外探测器是应对高速、高动态目标探测挑战的有效技术途径。

## 5.2 计算成像

计算成像是一种融合光学工程、数学与信息技术的新型多学科前沿成像技术。它以信息传递为核心准则,强调从光源到接收端的全链路协同优化,在成像过程中通过主动植入或被动接纳的方式嵌入编码,扩展信息通道、增加信息维度,进而显著提升成像系统的信息获取与解码能力<sup>[89-90]</sup>。现阶段,计算光学成像已发展为一门集几何光学、信息光学、计算光学、现代信号处理等理论于一体的新兴交叉技术研究领域。

传统成像系统通常难以同时兼顾高灵敏度、大

景深、高分辨率与高帧频等核心性能指标。在空间分辨率提升方面,当前红外探测器的像元尺寸已逼近物理极限,进一步缩小像元尺寸或扩大阵列规模,需突破材料特性、制备工艺及工作环境等多方面的严峻限制;且像元尺寸减小会直接降低单个像元的光通量,不仅导致探测灵敏度下降,还会加剧散粒噪声,增加后续信号处理的复杂度。此外,对于传统小视场成像系统,其分辨率最终受限于光学系统的孔径尺寸——传统光学系统设计受光学衍射极限制约:若要提升分辨率,需增大光学系统孔径,但孔径扩大必然导致系统体积与质量增加,且常伴随景深缩小、视场范围受限等衍生问题。

为解决传统光学成像的诸多不足,计算光学成像应运而生,其相较于传统光学成像的突破点也在众多实际案例中得到了充分验证,具体对比如表 2 所示。

通过上述对比可见,计算成像在多个方面实现了对传统光学成像的突破,这些突破也使其在红外探测器中得到了广泛应用,主要包括:高光谱计算成像、远距离成像、超分辨率成像、大视场/高分辨率成像、偏振成像、三维成像和光场成像等<sup>[90]</sup>。例如,2020 年 MONAKHOVAK 等提出的计算光谱相机便是高光谱计算成像的典型应用<sup>[96]</sup>,而潘建伟院士团队的研究则属于远距离成像与三维成像的范畴<sup>[94]</sup>。

基于计算光学的红外探测成像机理与方法,是新一代红外光电成像技术的重要发展方向,有助于实现“更远作用距离、更高成像分辨率、更广视场、更小光学系统”等下一代红外探测器的发展要求。随着相关技术的持续创新与突破,计算成像在红外探测及其他光学成像领域的应用前景将更为广阔。

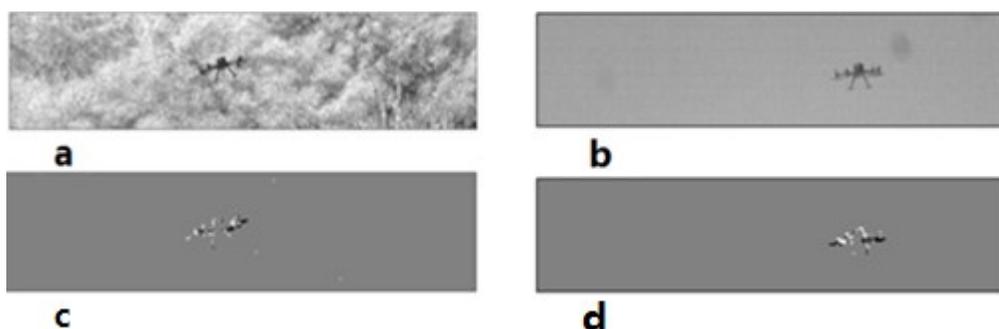


图 13 以色列 SCD 公司开发的短波红外动态视觉成像仪使用不同镜头、不同帧率捕捉不同目标场景中无人机的图像:a,c 为植被背景 b,d 为天空背景

Fig. 13 Images of drones in different scenes captured by using different lenses and different frame rates by short - wave infrared dynamic vision imager developed by Israel SCD company: a, c. Vegetation background b, d. Sky background

表2 传统光学成像与计算成像的比较<sup>[89]</sup>Table.2 Comparison between traditional optical imaging and computational imaging<sup>[89]</sup>

传统光学成像的限制	计算成像的突破及实例支撑
光学系统体积大,质量重,加工和装调成本高	光电载荷微小化、轻量化(利用图像复原的算法复杂度换取成像系统的简化):2024年,程鑫彬等人提出的基于严重退化估计框架的计算成像方法,在中波红外成像系统中将光学元件从7片减至2片,重量降低50%,仍能实现与传统镜头相当的成像质量 <sup>[91]</sup> ;时东锋等人构建的基于MoTe <sub>2</sub> /Si二维-三维异质结光电二极管的短波红外计算成像系统,依托算法优化实现了轻量化设计下的高质量成像 <sup>[92]</sup>
光学系统口径限制了分辨率和作用距离	全链路成像设计优化,增大探测视场,提升作用距离和分辨率:美国DARPA于2008年推出“自动实时地面全部署侦察成像系统”,通过368颗镜头组成复眼光学计算成像系统,获得高达18亿像素、60°×60°的视场,在6000 m高空的监视范围可达24 km,地面目标分辨率达15 cm <sup>[93]</sup> ;潘建伟院士团队于2021年采用相关探测器和激光器,结合单光子探测及回波光子数据处理算法,实现了201.5 km远距离目标的光子计数三维成像 <sup>[94]</sup>
只能直接探测强度信息,光波多维物理量信息利用不充分	实现光波多维物理量信息的探测利用,综合感知环境信息,解决信息缺失问题:美国4D技术公司推出的PolarCam偏振相机,利用Stokes矢量运算和偏振差分计算成像等算法,实现对比度更高的偏振增强图像,可广泛用于虚假目标识别、雾霾图像增强等领域 <sup>[95]</sup>
离焦、运动模糊以及纵深信息缺失问题难以解决	解决复杂条件下各种成像模糊问题,实现清晰成像:2020年MONAKHOVAK等提出的用于快照高光谱成像的计算光谱相机,对空间光谱信息进行编码,通过解决稀疏约束逆问题,实现亚超像素分辨率的高光谱图像 <sup>[96]</sup> ;时东锋等人构建的短波红外计算成像系统,能够在强散射环境下保持优异的成像性能 <sup>[92]</sup>

### 5.3 微纳结构

微纳结构超构表面(Metasurface)具备优异的光场调控能力。将其与传统半导体探测器相集成,可显著提升光子耦合效率,突破传统体材料的吸收极限,进而提高光电器件的量子效率并降低暗电流,为高性能红外探测器的研制提供了全新的技术路径。

目前,红外探测器研究中应用的微纳结构主要分为介质型微纳结构和表面金属型微纳结构两类<sup>[97]</sup>。其中,介质型微纳结构通常直接在半导体器件正面或背面制作周期性孔状或柱状结构(如图14所示),这类结构可对入射光场进行调控,核心优势体现在两方面:一是对特定入射光谱具有减反射效果;二是能让光在微纳结构内进行多次反射与散射,通过延长光的传播路径提升吸收率。该特性对薄吸收层材料作用尤为显著,可使峰值处光吸收率突破传统材料的吸收增强上限。表面金属型微纳结构则是在器件表面额外集成一层特定图案的周期性金属微纳单元,能够在谐振波长处激发等离激元共振——入射的红外光被这种人工微结构有效耦合至红外材料表面<sup>[98]</sup>,进而增强吸收层内的光场密度,使电磁波在微结构下的亚波长范围内被捕获并吸收。这一过程不仅减少了空气-界面反射,还

实现了对目标波段光的吸收增强。此外,微纳结构在探测器表面产生的局部电场,对器件暗电流具有一定抑制作用,从而一定程度上提升了探测器的探测极限。

采用微纳结构实现对红外探测器的性能提升和多维度调控,并开展其机理研究,是当前红外探测器领域的前沿研究热点,也是新一代红外探测器的重要发展方向。未来,微纳结构红外探测器的研究重点可归纳为三方面:一是设计开发与CMOS工艺兼容的微纳集成结构与制造方法;二是发展综合性能优异的微纳结构红外探测器,使其同时具备宽波段响应、高灵敏度、低噪声和高响应速度;三是研制对响应光谱等性能可动态调控的自适应型微纳结构红外探测器,进一步提升器件的适用性和灵活性。

### 5.4 三维集成

随着应用的不断深入与需求的持续牵引,红外探测器除了需要满足高分辨率、高灵敏度等性能要求外,还需向小型化、集成化方向发展。传统的信号处理电路/读出电路在极限探测性能以及功能集成度方面,已难以适配未来红外探测系统的发展需求。在此背景下,三维集成技术成为解决红外探测器小型化、集成化的重要方案之一。

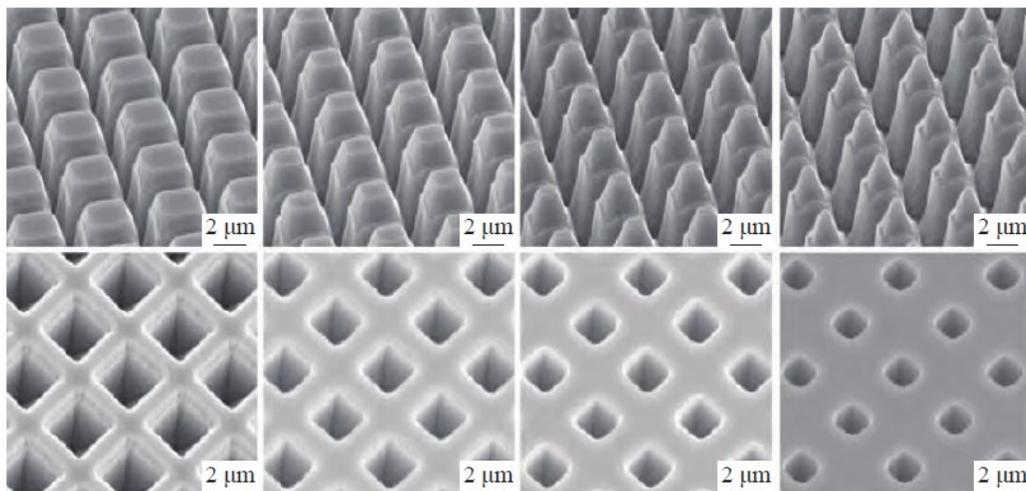


图 14 具有不同微纳结构的HgCdTe红外探测器样品<sup>[97]</sup>

Fig. 14 Samples of HgCdTe infrared detectors with different micro - nano structures<sup>[97]</sup>

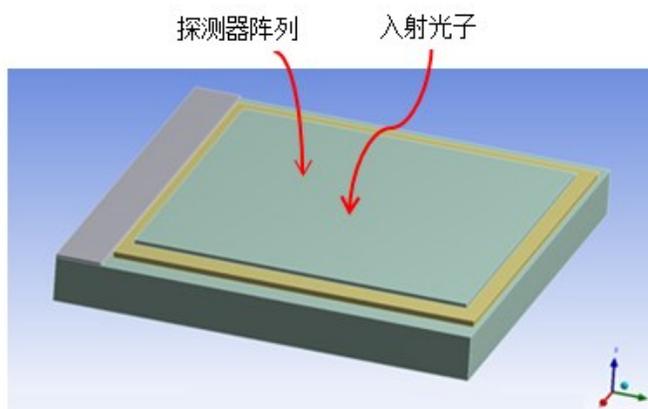


图 15 传统红外探测器结构

Fig. 15 Structural diagram of traditional infrared detector

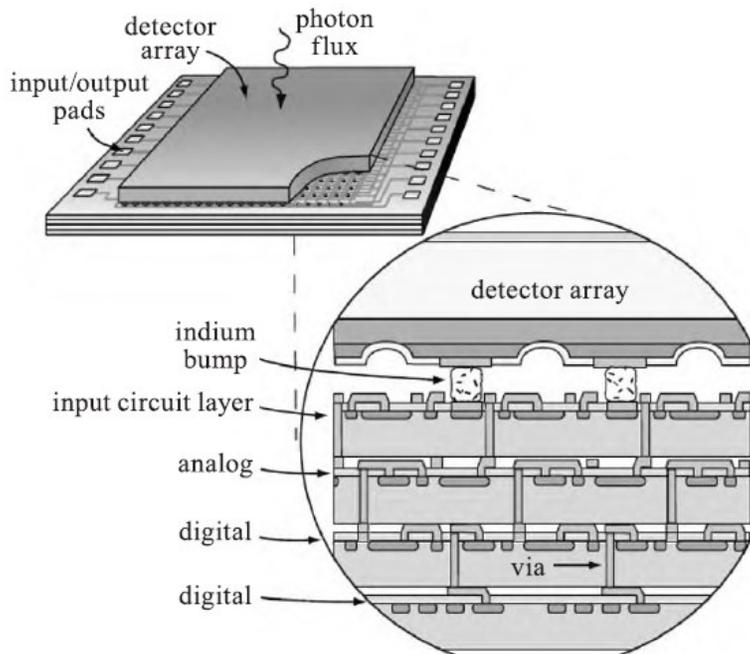
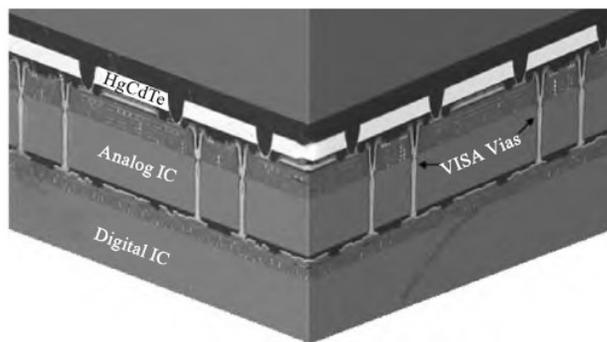
图 15 展示了传统红外焦平面探测器的结构:其通常采用倒装焊方式将焦平面芯片阵列与硅基读出电路互连。减小像元尺寸是红外探测器的重要发展趋势,但像元尺寸的持续缩小,导致在有限面积内集成更多电路功能的难度不断增加。尽管采用更先进的 CMOS 工艺可在一定程度上缓解这一问题,但研究表明,当工艺节点超过 28 nm 后,先进设计技术的成本优势开始下降<sup>[99]</sup>。鉴于在有限面积的二维尺度上实现电路功能集成和性能扩展存在技术瓶颈,研究人员开始转向三维读出电路(3D ROIC)的研发。

三维读出集成电路最大优势在于不受像元尺寸的限制:采用三维集成方式后,作为读出电路中关键参数之一的积分电容,不再占据电路的主导可用面积;片上 A/D 转换、数据压缩、原位信号处理等功能,有望额外集成到像元级信号处理电路中。此

外,三维集成还可将模拟电路与数字电路布局在相互独立的不同层内(如图 16 所示),从而充分利用两类电路各自的最佳设计规则与工艺技术,实现降低噪声、减小功耗及提升探测器性能的目标。

借助三维集成技术,可在有限的像素单元上增大积分电容面积,即提升电荷存储能力:尤其针对长波波段,可将噪声等效温差提升近一个数量级,在中波波段也有小幅提升;积分电容面积的增大意味着电荷容量增加,探测器的场景动态范围可提升至 120 dB,能够同时探测高、低温目标与常温背景。同时,三维集成技术的应用使读出电路具备更丰富的功能,例如非均匀性校正、盲元剔除/替代、数据处理等,这些功能都可在片上完成,大幅提升了器件的智能化水平。

目前,国内外多家研究机构已开展并完成三维集成技术在红外探测器中的初步验证。例如,美国

图 16 三维集成示意图<sup>[99]</sup>Fig. 16 Schematic diagram of 3D integration<sup>[99]</sup>图 17 美国 DRS 公司的三维集成碲镉汞红外焦平面探测器 SEM 图<sup>[99]</sup>Fig. 17 SEM image of a 3D integrated HgCdTe infrared focal plane detector in DRS<sup>[99]</sup>

DRS 公司报道了采用高密度三维集成技术制备碲镉汞红外探测器的研究工作:其采用标准 COMS 工艺,分别设计模拟电路层和数字电路层;晶圆流片完成后,通过 256×256 阵列的硅通孔(Through-Silicon Via, TSV)工艺实现垂直互连(该硅通孔直径 4 μm、深度 30 μm,像元中心距 30 μm);测试结果显示,三维集成互连的连通率超 99.9%(图 17)。

在国内,中电科 11 所开展了三维集成长波碲镉汞红外探测器研究,该探测器阵列规格为 640×512,像元间距为 25 μm,响应波段为 8 - 10 μm。研究人员将模拟电路与数字电路分开设计并流片,随后采用后穿孔(TSV-last)工艺路线实现读出电路的三

维集成;测试表明,该探测器具备 18 bits 的数字信号处理能力,动态范围达到 100 dB,NETD 可低至 3 mK。

尽管三维集成技术展示出显著优势,但将其应用于制冷型红外探测器仍需解决以下核心问题:三维集成过程涉及过多手工操作,导致良品率降低;电路芯片减薄的工艺复杂性较高;低温工作环境下电路键合的可靠性难以保障;硅通孔(TSV)的制备难度较大。

总体而言,三维集成技术能够大幅提升红外探测器的片上处理能力,增强红外探测系统的功能集成度、突破红外探测器的极限探测性能,同时有效减小系统体积、重量与功耗,显著提高灵敏度与动态范围。因此,三维集成技术也是推动未来红外探测器向智能化、高性能化发展的重要方向。

## 6 结束语

红外探测技术水平是衡量一个国家科技实力与竞争力的重要标志之一。本文从以 HgCdTe、InGaAs、Te 基化合物等为代表的五种主要传统光子型红外探测器、四种新型红外探测器及动态视觉传感技术,计算光学方法,微纳结构、三维集成新技术等方面论述了红外探测器的研究进展。

传统光子型红外探测器中,碲镉汞(HgCdTe)探测器已在短波、中波、长波与甚长波红外波段实现

广泛应用;镓砷(InGaAs)探测器是近红外波段的主流探测器;碲化物探测器包括InSb基探测器及其II类超晶格(T2SL)探测器——其中InSb基红外焦平面探测器主要针对3-5  $\mu\text{m}$ 中波红外波段,T2SL则可用于研制高工作温度、长波及多色探测器,是HgCdTe红外探测器的重要互补者;量子阱红外探测器(QWIP)通过调控量子阱结构参数,可实现3-18  $\mu\text{m}$ 甚至更宽范围的光谱响应,尤其在中长波领域表现出良好应用潜力;硅基阻挡杂质带红外探测器可探测5-300  $\mu\text{m}$ 的光谱范围,已成为天文探测等重大科学任务中的通用器件。

新型红外探测器方面,胶体量子点(CQD)红外探测器的最大优势在于其材料制备工艺与CMOS工艺兼容,可直接生长在CMOS读出电路上实现片上集成,是一类极具发展前景的低成本、高集成度焦平面红外探测器;新型二维材料探测器因其独特的光学性质,展现出多方面的高性能应用潜力;电磁诱导势阱效应探测器可将室温光电探测波长延长2个数量级以上,广泛地应用于红外及太赫兹探测领域;铁电极化场效应调控的红外探测器,凭借铁电材料的非易失性和强局域电场,可为新一代高性能红外探测器在抑制暗电流、拓展响应谱段、获取多维光信息等方面提供全新的路径。

将传统红外探测器与新技术结合,有望实现更好的综合性能,拓展更多的应用场景。动态视觉传感技术是高速运动红外目标探测的重要解决方案,可显著增强系统在复杂环境下识别目标和抗干扰能力;计算光学方法通过全链路优化赋能新一代成像系统,有助于满足下一代红外探测器在更远作用距离、更高成像分辨率、更宽视场和更小光学系统等方面的发展要求;将微纳结构与传统红外探测器集成,能够有效提升光子耦合效率和光程控制能力,为突破传统探测极限提供新的技术途径;三维集成技术可缩小红外探测器的体积,减轻重量,降低系统功耗,同时提高红外探测器片上处理能力与探测性能,推动红外探测器在小型化、高灵敏度和高智能处理方面的进步,是未来红外探测技术发展的重要方向。

红外探测应用的发展需求对红外探测器提出了新要求。一是在器件性能方面,需重点发展高分辨率、高灵敏度、快速响应的大规模焦平面红外探测芯片;发展双色/多色光谱探测技术,利用多层异质结构,实现对中波/长波、短波/中波、中波/中波双

波段的同时响应,通过同时或分时输出双波段信号,获取更丰富的目标特性。二是拓展红外探测波段,从当前以1-3  $\mu\text{m}$ 、3-5  $\mu\text{m}$ 和8-12  $\mu\text{m}$ 为主的波段,进一步向长波、甚长波、远红外乃至太赫兹频段延伸,发展高性能中远红外波段/太赫兹探测器件技术与全波段红外探测器技术。三是发展红外极限性能探测技术,基于雪崩倍增、等离激元效应、二维材料新奇物性等新型探测机理,结合像素级ADC技术,提升探测灵敏度,实现红外技术在天文、深空等领域对极弱红外信号的高效探测。此外,特别需要指出的是,在光子型红外探测器的发展历程中,1959年被发现的HgCdTe三元合金窄禁带半导体材料,迄今为止仍然是最重要的红外探测器材料。因此,开发探测性能可与HgCdTe材料相媲美、且能大规模制备并长期稳定使用的新型光电探测材料,也是未来红外探测技术的重要发展方向。

## References

- [1] Rogalski A. Scaling infrared detectors - status and outlook [J]. Reports on Progress in Physics, 2022, 85: 126501.
- [2] Rogalski A. Progress in performance development of room temperature direct terahertz detectors [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2022, 43: 709 - 727.
- [3] Rogalski A. Next decade in infrared detectors [C]// Warsaw, Poland: SPIE, 2017.
- [4] Holland A D, Beletic J, Starr B, et al. RVS large format arrays for astronomy [C]// Bellingham: SPIE, 2016.
- [5] Smith R A, Jones F E, Chasmar R P. The detection and measurement of Infra - red Radiation [M]. Oxford: Clarendon Press, 1957.
- [6] Rogalski A. History of infrared detectors [J]. Opto - Electronics Review, 2012, 20: 279 - 308.
- [7] Case T W. Notes on the change of resistance of certain substances in light [J]. Physical Review, 1917, 9(4): 305 - 310.
- [8] Cashman R J. Film - Type Infrared Photoconductors [J]. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1959, 47(9): 1471 - 1475.
- [9] Mitchell G R, Goldberg A E, Kurnick S W. InSb photovoltaic Cell [J]. Physical Review, 1955, 97(1): 239 - 240.
- [10] Lawson W D, Nielsen S, Putley E H, et al. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe - CdTe [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1959, 9(3-4): 325 - 329.
- [11] Chu J H. Physics of Narrow - Gap semiconductor [M]. Beijing: Science Press, 2005. (褚君浩. 窄禁带半导体物理) [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [12] Chu J H, Sher A. Physics and properties of Narrow - Gap semiconductors [M]. Berlin: Springer, 2008.
- [13] Chu J H, Sher A. Device physics of Narrow - Gap semiconductors [M]. Berlin: Springer, 2010.

- [14] Yang J R. Physics and technology of semiconductor materials [M]. Beijing: Science Press, 2020.  
(杨建荣. 半导体材料物理与技术)[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [15] Yang J R. Physics and technology of HgCdTe materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.  
(杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [16] He L, Yang D J, Ni G Q, et al. Introduction to advanced focal plane arrays [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.  
(何力, 杨定江, 倪国强, 等. 先进焦平面技术导论) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [17] Huang Z M. Terahertz optical difference frequency source [M]. Beijing: Science Press, 2016.  
(黄志明. 太赫兹光学差频源)[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [18] Chiu L C, Smith J S, Margalit S, et al. Application of internal photoemission from quantum - well and Heterojunction Super - Lattices to infrared photodetectors [J]. *Infrared Physics*, 1983, 23(2): 93 - 97.
- [19] Smith J S, Chiu L C, Margalit S, et al. A new infrared detector using electron - emission from multiple Quantum Wells [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1983, 1(2): 376 - 378.
- [20] Lü Y Q, Lu X, Lu Z X, et al. Review of antimonide infrared detector development at home and abroad [J]. *Aero Weaponry*, 2020, 27(5): 1 - 12.  
(吕衍秋, 鲁星, 鲁正雄, 等. 碲化物红外探测器国内外发展综述 [J]. *航空兵器*), 2020, 27(5): 1 - 12.
- [21] Cai Y. Review and prospect of HgCdTe detectors (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210988.  
(蔡毅. 碲镉汞探测器的回顾与展望(特邀)[J]. *红外与激光工程*), 2022, 51(1): 20210988.
- [22] Pham P V, Bodepudi S C, Shehzad K, et al. 2D heterostructures for ubiquitous electronics and optoelectronics: principles, opportunities, and challenges [J]. *Chemical Reviews*, 2022, 122(6): 6514 - 6613.
- [23] Huang Z M, Zhou W, Tong J C, et al. Extreme sensitivity of room - temperature photoelectric effect for Terahertz detection [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(1): 112 - 117.
- [24] Huang Z M, Tong J C, Huang J G, et al. room - temperature photoconductivity far below the semiconductor band-gap [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(38): 6594 - 6598.
- [25] Ma W L, Gao Y Q, Shang L Y, et al. Ultrabroadband tellurium photoelectric detector from visible to millimeter wave [J]. *Advanced Science*, 2022, 9(5): 2103873.
- [26] Baier N, Cervera C, Gravrando O, et al. Latest developments in long - wavelength and very - long - wavelength infrared detection with p - on - n HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44(9): 3144 - 3150.
- [27] Gu Y, Xie R Z, Wang P, et al. Bandwidth characteristics of mid - wavelength infrared PIN HgCdTe avalanche photodiodes [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2023, 59(2): 4500106.
- [28] Sakai K, Sakai J. Characteristics of n - InSb hot electron submillimeter detector [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1976, 15(7): 1335.
- [29] Beeler M, Trichas E, Monroy E. III - nitride semiconductors for intersubband optoelectronics: a review [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2013, 28(7): 074022.
- [30] Zhu H, Weng Z, Zhu J, et al. Surface plasmon enhanced Si - based BIB Terahertz detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(5): 053505.
- [31] Gardner J P, Mather J C, Clampin M, et al. The James Webb Space Telescope [J]. *Space Science Reviews*, 2006, 123: 485 - 606.
- [32] Simoens F, Meilhan J, Pocas S, et al. THz uncooled microbolometer array development for active imaging and spectroscopy applications [C]// Bellingham: SPIE, 2010.
- [33] Liang Z Q, Liu Z J, Jiang Y D, et al. High responsivity of Terahertz detector based on ultra - thin LiTaO<sub>3</sub> crystal material [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(5): 520 - 524.
- [34] Zhou H, Kropelnicki P, Tsai J M, et al. Development of a thermopile infrared sensor using stacked double polycrystalline silicon layers based on the CMOS process [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(6): 065026.
- [35] Black S H, Sessler T, Gordon E, et al. Uncooled detector development at Raytheon [C]// Orlando, Florida, United States: SPIE, 2011.
- [36] Calaza C, Viarani N, Pedretti G, et al. An uncooled infrared focal plane array for low - cost applications fabricated with standard CMOS technology [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 132(1): 129 - 138.
- [37] Tao J W, Wang H C, Dong S, et al. Application analysis of wafer - level packaged and large - format uncooled infrared detector [J]. *Infrared*, 2020, 41(1): 15 - 20.  
(陶俊伟, 王宏臣, 董珊, 等. 晶圆级封装非制冷大面阵红外探测器应用分析 [J]. *红外*), 2020, 41(1): 15 - 20.
- [38] Chen M, Wang Y X, Wen J G, et al. Annealing temperature - dependent Terahertz Thermal - Electrical Conversion Characteristics of Three - Dimensional Microporous Graphene [J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2019, 11(6): 6411-6418.
- [39] Yao K H. Study on Optoelectronic and Temperature characteristics of vanadium dioxide heterojunction devices [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.  
(姚宽洪. 基于二氧化钒异质结器件的光电与温度特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- [40] Tan C, Sun Y, Dai N, et al. Spectrally selective infrared thermal detectors based on artificially engineered nanostructures [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2023, 42(5): 594 - 610.  
(谈冲, 孙艳, 戴宁, 等. 基于人工微结构的光谱选择性红外热敏探测器 [J]. *红外与毫米波学报*), 2023, 42(5): 594 - 610.
- [41] Starr B, Mears L, Fulk C, et al. RVS large format arrays for astronomy [C]// Bellingham: SPIE, 2016.
- [42] Gu Y, Xie R Z, Wang P, et al. Bandwidth Characteristics of Mid - Wavelength Infrared PIN HgCdTe Avalanche

- Photodiodes [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2023, 59(2): 4500106.
- [43] Yu J Y, Kong J C, Qin G, et al. High operation temperature non - equilibrium photovoltaic HgCdTe devices [J]. Infrared Technology, 2023, 45(1): 15 - 22.  
(俞见云, 孔金丞, 覃钢, 等. 基于非平衡模式的碲镉汞高工作温度探测器 [J]. 红外技术), 2023, 45(1): 15 - 22.
- [44] Yang C W, Zhao P, Huang W, et al. Research on high operating temperature p - on - n medium wave mercury cadmium telluride infrared focal plane device [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(12): 20220150.  
(杨超伟, 赵鹏, 黄伟, 等. 高工作温度 p - on - n 中波碲镉汞红外焦平面器件研究 [J]. 红外与激光工程), 2022, 51(12): 20220150.
- [45] Baier N, Gravrand O, Lobre C, et al. HgCdTe diode dark current modeling Rule 07 revisited for LW and VLW [J]. Journal of Electronic Materials, 2019, 48(8): 5233 - 5240.
- [46] Li X, Gong H M, Shao X M, et al. Recent advances in short wavelength infrared InGaAs focal plane arrays [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 129 - 138.  
(李雪, 龚海梅, 邵秀梅, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面研究进展 [J]. 红外与毫米波学报), 2022, 41(1): 129 - 138.
- [47] Cheng J F, Li X, Shao X M, et al. Planar wavelength - extended  $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$  detector with 2.2 -  $\mu\text{m}$  cut off wavelength [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(5): 804 - 809.  
(程吉凤, 李雪, 邵秀梅, 等. 截止波长 2.2  $\mu\text{m}$  的平面型延伸波长 InGaAs 探测器 [J]. 红外与毫米波学报), 2022, 41(5): 804 - 809.
- [48] Klipstein P C, Avnon E, Azulai D, et al. Type II superlattice technology for LWIR detectors [C]// Bellingham: SPIE, 2016.
- [49] Li Z F, Li Q, Jing Y L, et al. Plasmonic microcavity coupled high extinction ratio polarimetric long wavelength quantum well infrared photodetectors (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(1): 20211006.  
(李志锋, 李倩, 景友亮, 等. 离激元微腔耦合长波红外量子阱高消光比偏振探测器(特邀)[J]. 红外与激光工程), 2021, 50(1): 20211006.
- [50] Jiang X Y, Liu W W, Xia H, et al. Elevating the performance of quantum well infrared detectors at 12.55  $\mu\text{m}$  with an all - dielectric scheme [J]. Infrared Physics & Technology, 2024, 141: 105470.
- [51] Luo Y N, Tan Y M, Bi C, et al. Megapixel large - format Colloidal Quantum - dot Infrared Imagers with Resonant - cavity enhanced Photoresponse [J]. APL Photonics, 2023, 8(5): 056102.
- [52] Peng L C, Wang Y J, Ren Y R, et al. InSb/InP Core - Shell Colloidal Quantum Dots for Sensitive and Fast Short - Wave Infrared Photodetectors [J]. ACS Nano, 2024, 18(6): 5113 - 5121.
- [53] Peng L C, Wang Y J, Rodà C, et al. Suppressing Colloidal Quantum Dot Multimer Fusion Leads to High-Performance InSb Infrared Photodetectors [J]. Advanced Science, 2025, 11: 2502775.
- [54] Ma X Z, Tang L B, Zhang Y P, et al. Research Progress of Silicon - based BIB Infrared Detector [J]. Infrared Technology, 2023, 45(1): 1 - 14.  
(马兴招, 唐利斌, 张玉平, 等. 硅基 BIB 红外探测器研究进展 [J]. 红外技术), 2023, 45(1): 1 - 14.
- [55] Wen J, Li J B, Sun J Y, et al. Research progress of infrared detection and infrared stealth materials [J]. Journal of aeronautical materials, 2021, 41(3): 66 - 82.  
(文娇, 李介博, 孙敬勇, 等. 红外探测与红外隐身材料研究进展 [J]. 航空材料学报), 2021, 41(3): 66 - 82.
- [56] Wang X D, Chen Y L, Chen X Y, et al. Dark current transport mechanism associated with acceptor concentration in GaAs - based blocked - impurity - band (BIB) detectors [J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50: 419.
- [57] Guo J X, Zhang T, Zhang K, et al. Sharp interface blocked impurity band very long - wavelength Infrared photodetector with high - temperature epitaxy [J]. IEEE Electron Device Letters, 2024, 45(6): 952 - 955.
- [58] Zhang T, Wei W R, Guo J X, et al. Interface - controlled performance in VLWIR blocked impurity band photodetectors [J]. IEEE Electron Device Letters, 2025, 46(6): 956 - 959.
- [59] Jia X Y, Lan C Y, Li C. Recent advances in two - dimensional materials in infrared photodetectors (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(7): 20220065.  
(贾欣宇, 兰长勇, 李春. 二维材料在红外探测器中的应用最新进展(特邀) [J]. 红外与激光工程), 2022, 51(7): 20220065.
- [60] Lai J W, Liu X, Ma J C, et al. Anisotropic broadband photoresponse of Layered Type - II weyl semimetal  $\text{MoTe}_2$  [J]. Advanced Materials, 2018, 30: e1707152.
- [61] Duan S Y, Qin F, Chen P, et al. Berry curvature dipole generation and helicity - to - spin conversion at symmetry - mismatched heterointerfaces [J]. Nature Nanotechnology, 2023, 18: 867 - 874.
- [62] Ma C, Yuan S F, Cheung P, et al. Intelligent infrared sensing enabled by tunable mouse quantum geometry [J]. Nature, 2022, 604: 266 - 272.
- [63] Wang Q S, Li C Z, Ge S F, et al. Ultrafast broadband photodetectors based on Three - Dimensional dirac semimetal  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  [J]. Nano Letters, 2017, 17: 834 - 841.
- [64] Ma J C, Gu Q Q, Liu Y N, et al. Nonlinear photoresponse of type - II Weyl semimetals [J]. Nature Materials, 2019, 18: 476 - 481.
- [65] Lai J W, Ma J C, Fan Z P, et al. Direct light orbital angular momentum detection in Mid - Infrared based on the Type - II weyl semimetal  $\text{TaIrTe}_4$  [J]. Advanced Materials, 2022, 34: e2201229.
- [66] Guo C, Hu Y B, Chen G, et al. Anisotropic ultrasensitive  $\text{PdTe}_2$  - based phototransistor for room - temperature long - wavelength detection [J]. Science Advances, 2020, 6(36): eabb6500.
- [67] Xu H, Guo C, Zhang J Z, et al.  $\text{PtTe}_2$  - based Type - II dirac semimetal and its van der waals heterostructure for sensitive room temperature terahertz photodetection [J]. Small, 2019, 15: e1903362.
- [68] Zhang L B, Dong Z, Wang L, et al. Ultrasensitive and self

- powered Terahertz detection driven by nodal - line dirac fermions and van der Waals architecture [J]. *Advanced Science*, 2021, 8(23): 2102088.
- [69] Li J, Yang X D, Liu Y, et al. General synthesis of two - dimensional van der Waals heterostructure arrays [J]. *Nature*, 2020, 579: 368 - 374.
- [70] Zhang K N, She Y H, Cai X B, et al. Epitaxial substitution of metal iodides for low - temperature growth of two - dimensional metal chalcogenides [J]. *Nature Nanotechnology*, 2023, 18: 448 - 455.
- [71] Yu L X, Sun S R, Jia Y, et al. Space environment adaptability of two - dimensional semiconductor materials [J]. *National Science Review*, 2025, 12: nwaf064.
- [72] Wu T T, Qiu Q X, Li Y Z, et al. High sensitivity of semi-metal photodetection via Bose - Einstein condensation [J]. *InfoMat*, 2023, 6(2): e12492.
- [73] Qu Y, Zhang W, Tong J C, et al. High sensitivity of room - temperature sub - terahertz photodetector based on In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As material [J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(11): 112201.
- [74] Wu C Y, Zhou W, Yao N J, et al. Silicon - based high sensitivity of room - temperature microwave and sub - terahertz detector [J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(5): 052013.
- [75] Qiu Q X, Li J B, Wu T T, et al. High performance of a broadband room - temperature Si detector beyond the cut - off wavelength [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(16): 6374 - 6379.
- [76] Qiu Q X, Ma W L, Li J B, et al. High sensitivity of room - temperature terahertz photodetector based on Silicon [J]. *Science*, 2022, 378: 105217.
- [77] Huang Z M, Zhou W, Huang J G, et al. Directly tailoring photon - electron coupling for sensitive photoconductance [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22938.
- [78] Li J B, Ma W L, Jiang L, et al. High performance of room - temperature NbSe<sub>2</sub> terahertz photoelectric detector [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(12): 14331 - 14341.
- [79] Chen S J, Wu T T, Chen H, et al. Broadband room - temperature photodetection via InBiTe<sub>3</sub> nanosheet [J]. *Small*, 2024, 20(33): 2312219.
- [80] Wu T T, Li Y Z, Zhou Q G, et al. Ultrasensitive photoelectric detection with room temperature extremum [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 96.
- [81] Wang X, Wang P, Wang J, et al. Ultrasensitive and broadband MoS<sub>2</sub> photodetector driven by ferroelectrics [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(42): 6575 - 6581.
- [82] 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.
- [83] Chen Y, Wang X, Huang L, et al. Ferroelectric - tuned van der Waals heterojunction with band alignment evolution [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4030.
- [84] Wu S, Chen Y, Wang X, et al. Ultra - sensitive polarization - resolved black phosphorus homojunction photodetector defined by ferroelectric domains [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3198.
- [85] Wu S, Deng J, Wang X, et al. Polarization photodetectors with configurable polarity transition enabled by programmable ferroelectric - doping patterns [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 8743.
- [86] Wu G, Tian B, Liu L, et al. Programmable transition metal dichalcogenide homojunctions controlled by nonvolatile ferroelectric domains [J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(1): 43 - 50.
- [87] Wu G, Zhang X, Feng G, et al. Ferroelectric - defined reconfigurable homojunctions for in - memory sensing and computing [J]. *Nature Materials*, 2023, 22(12): 1499 - 1506.
- [88] Wang C, Chen F, Wu J J, et al. Progress in mechanism and data processing of visual sensing [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2020, 25(1): 19 - 30.  
(王程, 陈峰, 吴金建, 等. 视觉传感机理与数据处理进展 [J]. *中国图象图形学报*), 2020, 25(1): 19 - 30.
- [89] Wang K, Jiang F. Analysis application of computational imaging technology in photoelectric Field [J]. *Electro - Optic Technology Application*, 2022, 37(6): 58 - 62.  
(王锴, 姜锋. 计算成像技术在光电领域的应用分析 [J]. *光电技术应用*), 2022, 37(6): 58 - 62.
- [90] Shan X P, Su Y, Liu J P, et al. Connotation and system of computational imaging (Invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(5): 0511001.  
(邵晓鹏, 苏云, 刘金鹏, 等. 计算成像内涵与体系(特邀) [J]. *光子学报*), 2021, 50(5): 0511001.
- [91] Ji P Z, Dun X, Xing Y J, et al. High - quality diffractive lens infrared computational imaging via severe degradation Estimation Framework [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2025, 11: 1458 - 1468.
- [92] Shi D, Chen J, Zhu M, et al. Computing imaging in short-wave infrared bands enabled by MoTe<sub>2</sub>/Si 2D-3D heterojunction - based photodiode [J]. *InfoMat*, 2024, 6(12): e12618.
- [93] Leininger B, Edwards J, Antoniadis J. Autonomous real - time ground ubiquitous surveillance imaging system (ARGUS - IS) [C]// Bellingham: SPIE, 2008.
- [94] Li Z P, Ye J T, Huang X, et al. Single - photon imaging over 200 km [J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344 - 349.
- [95] Zhang H Y, Zhang J Q, Yang B, et al. Calibration for polarization remote sensing system with focal plane divided by multi - linear array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 311 - 318.  
(张海洋, 张军强, 杨斌, 等. 多线阵分焦平面型偏振遥感探测系统的标定 [J]. *光学学报*), 2016, 36(11): 311 - 318.
- [96] Monakhova K, Yanny K, Aggarwal N, et al. Spectral DiffruserCam: lensless snapshot hyperspectral imaging with a spectral filter array [J]. *Optica*, 2020, 7(10): 1298 - 1307.
- [97] Zhu P, Xiao L, Sun T, et al. Research progress of micro - nano structures enhanced infrared detectors (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210826.  
(朱鹏, 肖磊, 孙泰, 等. 微纳结构增强型红外探测器研究进展(特邀) [J]. *红外与激光工程*), 2022, 51(1): 20210826.
- [98] Tan C, Sun Y, Dai N, et al. Spectrally selective infrared thermal detectors based on artificially engineered nano-

structures [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2023, 42(5): 594 - 610.  
(谈冲, 孙艳, 戴宁, 等. 基于人工微结构的光谱选择性红外热敏探测器[J]. *红外与毫米波学报*), 2023, 42(5): 594 - 610.

[99] Tan Z, Nie Y, Yu Y, et al. Application of 3D integration technology in infrared detector [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(2): 163 - 169.  
(谭振, 聂媛, 于艳, 等. 三维集成技术在红外探测器中的应用[J]. *激光与红外*), 2022, 52(2): 163 - 169.