

文章编号: 1672-8785(2025)11-0082-12

甚长波红外碲镉汞焦平面 器件研究进展

沈 玥^{1,2,3} 谢 浩^{1,2*} 王 溪^{1,2} 李 珣^{1,2} 魏彦锋^{1,2}
陈 路^{1,2} 林 春^{1,2} 叶振华^{1,2*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 红外探测全国重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 甚长波红外(Very-Long-Wave Infrared, VLWIR)探测在空间遥感、深空探测和红外光谱学等领域具有不可替代的重要作用。碲镉汞(HgCdTe)材料因其带隙连续可调, 是满足 VLWIR 探测需求的理想材料, 但其极窄带隙导致的暗电流与材料均匀性控制是核心挑战。首先综述了 VLWIR HgCdTe 探测器的研究进展以及国际上对 HgCdTe 探测器性能评价标准的演变, 进而分析其主流器件结构演进与工作原理, 最后对 VLWIR HgCdTe 探测器未来研究的关键技术挑战与发展方向进行了展望。

关键词: 碲镉汞; 甚长波红外; 暗电流; P-on-N

中图分类号: TN305 文献标志码: A DOI: 10.11972/j.issn.1672-8785.2025.11.007

Research Progress on Very-Long-Wave Infrared HgCdTe Focal Plane Devices

SHEN Yue^{1,2,3}, XIE Hao^{1,2*}, WANG Xi^{1,2}, LI Xun^{1,2}, WEI Yan-feng^{1,2},
CHEN Lu^{1,2}, LIN Chun^{1,2}, YE Zhen-hua^{1,2*}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Very-long-wave infrared (VLWIR) detection plays an irreplaceable role in fields such as space remote sensing, deep space exploration, and infrared spectroscopy. HgCdTe is an ideal material for VLWIR detection due to its continuously tunable bandgap. However, managing the high dark current and ensuring material uniformity, both consequences of its extremely narrow bandgap, remain core challenges. This paper first reviews the research progress of VLWIR HgCdTe detectors and the evolution of international performance evaluation standards for HgCdTe detectors. Then, it analyzes the structural evolution and operating principle of mainstream devices. Finally, an outlook on the key technological challenges and future research directions for

收稿日期: 2025-10-27

作者简介(Biography): 沈玥(2001-), 女, 博士研究生, 主要从事原位异质结碲镉汞红外探测器研究。

*通讯作者(Corresponding Authors): zhye@mail.sitp.ac.cn (叶振华); xiehao@mail.sitp.ac.cn (谢浩)

VLWIR HgCdTe detectors is presented.

Key words: HgCdTe; very-long-wave infrared; dark current; P-on-N

0 引言

VLWIR 波段(通常指波长为 $14 \sim 30 \mu\text{m}$)覆盖了大气窗口以及多种分子的特征吸收谱线, 因此承载着极其丰富的光谱信息。这一特性使得 VLWIR 探测技术在空间遥感、大气探测和天文观测等领域具有重要的应用价值, 尤其在地球气候监测和行星大气成分分析等方面发挥着不可替代的作用^[1-4]。HgCdTe 材料的带隙可通过改变镉(Cd)的组分(x_{Cd} 值通常在 $0.18 \sim 0.22$ 之间)进行精确调控以匹配 VLWIR 波段的需求, 并具备高量子效率和可抑制的俄歇复合等直接带隙特性, 所以成为该波段探测器的首选材料。

然而, 当探测器的截止波长延伸至 $14 \mu\text{m}$ 以上时, HgCdTe 材料的带隙降至极窄(在 77 K 时小于 0.1 eV)。这导致热激发载流子浓度呈指数式增长, 暗电流急剧增大, 迫使探测器必须在 $40 \sim 80 \text{ K}$ 的低温下工作。此外, 在 VLWIR 波段, Cd 材料的组分低至 0.2 左右, 截止波长对 Cd 组分的微小波动表现出高度敏感性。这对材料生长的均匀性控制提出了极高要求($\Delta x_{\text{Cd}} < 0.001$), 且温度敏感性也随着截止波长的增加而增强^[5], 如图 1 所示。

极窄的带隙亦使器件对各种漏电机理高度敏感。光电二极管即使在低偏压下, 结内建电势也会与带隙处于同一数量级。当低带隙结处在内建电压与外部偏压的共同作用下时, 少数载流子可通过耗尽区形成的势垒直接隧穿, 即带间隧穿(Band-to-Band Tunneling, BBT), 或者通过位于带隙中部的陷阱能级辅助隧穿(Trap-Assisted Tunneling, TAT)^[6]。这些隧穿机制使 VLWIR 器件对材料中的缺陷密度高度敏感, 进而可能导致截止波长和响应出现不均匀性。所以需通过减

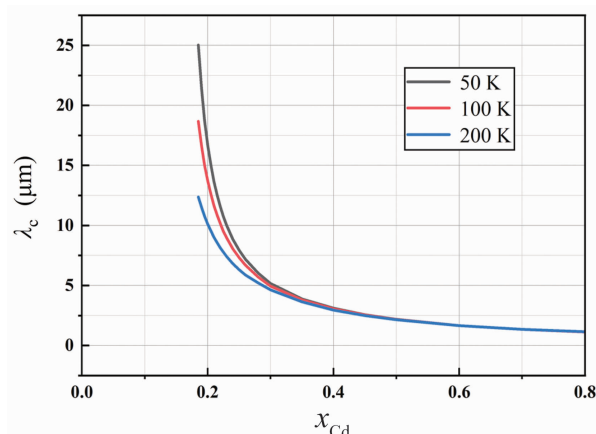


图 1 基于 Hansen 关系的截止波长随 Cd 组分与工作温度的变化规律

Fig. 1 The variation of cutoff wavelength with Cd composition and operating temperature based on the Hansen's relation

少杂质浓度、材料缺陷或探测器应力对其予以抑制。

因此, 在 VLWIR 波段, HgCdTe 的本征特性对组分控制与工作温度提出了极高的要求。为了达到低通量背景应用所需的可靠性、均匀性和信噪比水平, 从低 Cd 组分的 HgCdTe 薄膜生长, 到掺杂控制和器件钝化, 再到器件制造与工艺技术选择, 每一个环节均对 VLWIR 焦平面阵列的性能至关重要。

近十年来, 国际上的研究机构通过 P-on-N 结构创新、分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)工艺优化、外源低浓度掺杂技术应用, 使 VLWIR 探测器性能取得重大突破。国内紧跟国际前沿, 在材料生长、器件制备、焦平面集成等方面取得一系列进展, 部分指标达到国际先进水平。本文系统综述了 VLWIR HgCdTe 探测器的国内外研究进展、器件物理与结构发展趋势, 为相关研究提供参考。

1 VLWIR HgCdTe 探测器研究进展

1.1 国际研究进展

20 世纪 90 年代初,国际上致力于将 HgCdTe 探测器的波长范围向长波红外(Long-Wave Infrared, LWIR)、VLWIR 波段拓展。为获得高性能的探测芯片,各研究机构及公司选择了不同的技术路线,开展了大量研究工作。其中的代表性工作如图 2 所示。

最早以欧洲的 Sofradir 公司和 AIM 公司为代表,开展 Hg 空位本征掺杂型 N-on-P 技术路线的研究,制造出了高性能的中波红外(Mid-Wave Infrared, MWIR)和 LWIR 红外焦平面阵列^[7]。然而由于肖克利-里德-霍尔(Shockley-Read-Hall, SRH)复合过程的影响,采用常规 Hg 空位 P 型掺杂难以实现 VLWIR 探测器阵列所需的低暗电流。为实现 VLWIR 探测, Sofradir 公司采用渐变掺杂剖面的极低结本征掺杂 N-on-P 技术控制隧道电流,成功

制备了 320×256 规格、 $30 \mu\text{m}$ 像元间距的 VLWIR 焦平面阵列。其截止波长在 50 K 时达到 $18 \mu\text{m}$,在 30 K 时达到 $20 \mu\text{m}$ ^[5]。AIM 公司则开展了非本征掺杂型 N-on-P 型技术的研究,实现了 112×112 规格、 $30 \mu\text{m}$ 像元间距的 VLWIR 焦平面阵列。其截止波长在 55 K 时达到 $14.4 \mu\text{m}$,暗电流较 Hg 空位本征掺杂器件降低了约 15 倍,且接近了“Rule 07”标准(见图 3),证实了非本征掺杂 N-on-P 技术对器件性能的有效提升^[8]。接着,其 N-on-P 型器件的暗电流水平得到进一步优化,在 80 K 下截止波长为 $11.4 \mu\text{m}$ 的 LWIR 器件的暗电流比“Rule 07”低 3 倍左右^[9]。

尽管如此,非本征 P 型载流子的低掺杂技术(低于 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)较难实现,因此 Sofradir 和 AIM 等公司后续也转向了 P-on-N 型技术路线的研究。

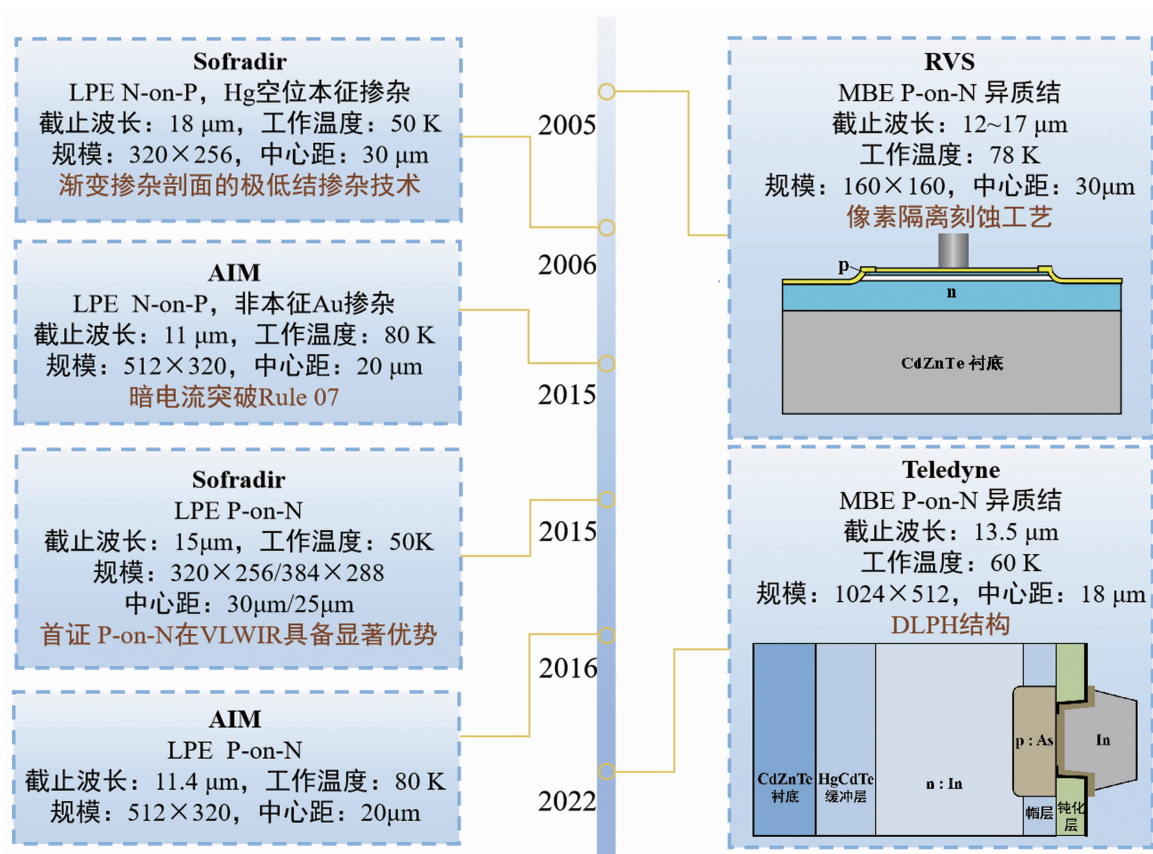


图 2 LWIR/VLWIR HgCdTe 探测器代表性工作

Fig. 2 Representative work of LWIR/VLWIR HgCdTe detectors

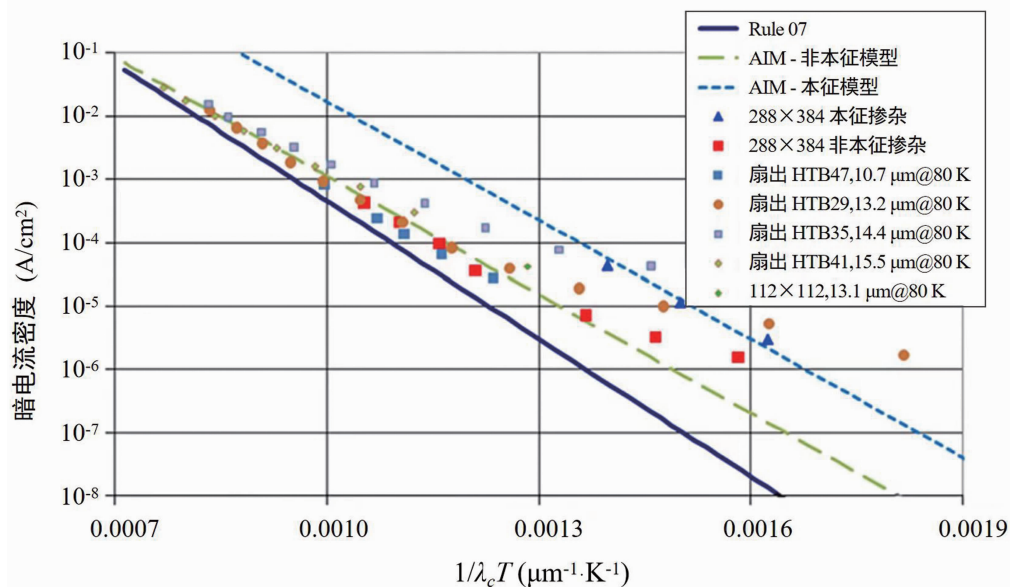


图 3 AIM 公司采用两种平面 N-on-P 技术制造的 LWIR 和 VLWIR 探测器的暗电流对比^[8]

Fig. 3 Dark current comparison of LWIR and VLWIR detectors fabricated by AIM using two planar N-on-P technologies^[8]

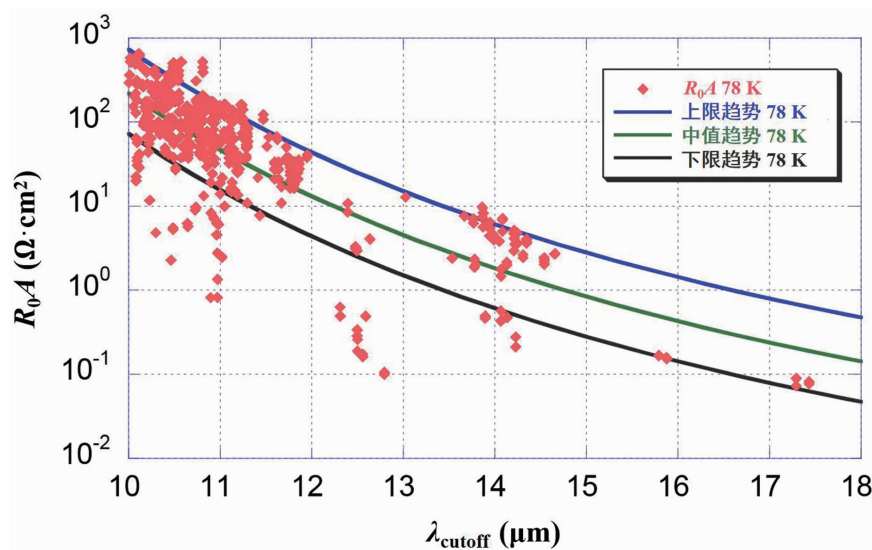


图 4 RVS 公司 VLWIR 探测器的电学性能趋势线^[11]

Fig. 4 Electrical performance trend-line of RVS VLWIR detectors^[11]

P-on-N 型技术路线由于其性能优势逐渐成为主流。Sofradir 公司采用基于液相外延 (Liquid Phase Epitaxy, LPE) 的 As 注入平面结工艺, 达到了 “Rule 07” 的暗电流水平。为应对 VLWIR 极低温度的探测应用, 该公司通过界面带隙拓宽工艺制作 P-on-N 异质结, 沿层厚度调整 Cd 浓度, 使结位于带隙比有源层更高的材料中, 以减小低温下结中的耗尽电

流^[10]。在美国, RVS 公司和 Teledyne 公司是 P-on-N 技术路线的行业代表, 均采用双层平面异质结 (Double-Layer Planar Heterojunction, DLPH) 结构, 器件性能表现优异。RVS 公司早期通过 LPE 技术生长 DLPH 结构, 并采用独特的像素隔离蚀刻工艺, 通过光刻化学蚀刻穿透 PN 结, 实现像素之间的电学隔离, 从而有效降低可能干扰红外源定位的电串扰, 并成

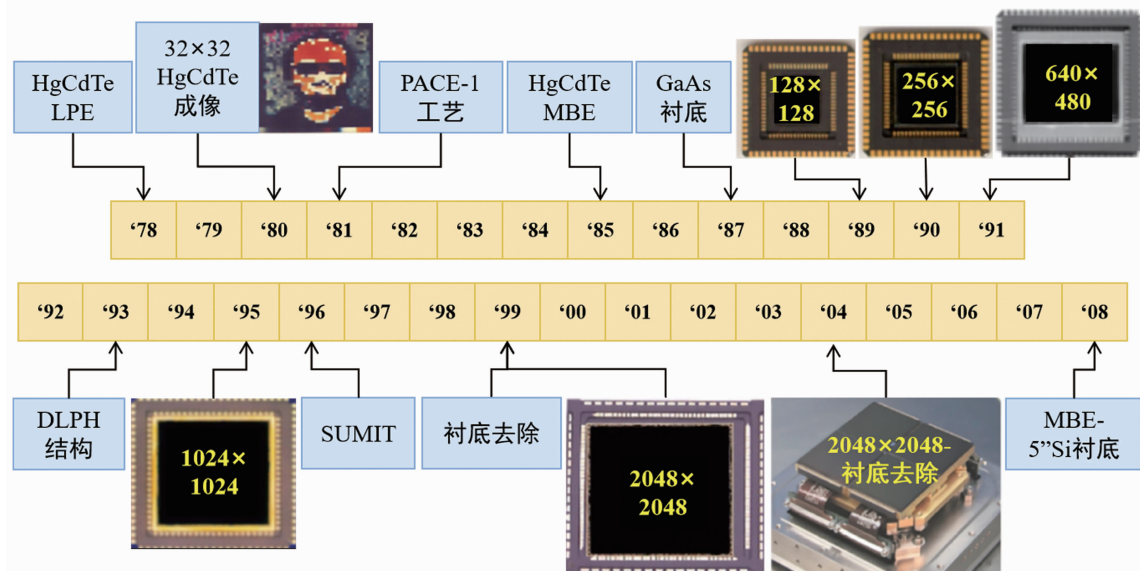


图 5 Teledyne 公司的 HgCdTe 技术突破节点^[12]

Fig. 5 Teledyne's HgCdTe technology breakthrough nodes^[12]

功地在 VLWIR 波段实现了优异的性能(见图 4)^[11]。Teledyne 公司则主要通过 MBE 工艺生长 DLPH 结构,其产品性能与技术路线遥遥领先,始终代表着行业中的标杆水平。图 5 展示了该公司的 HgCdTe 技术突破节点^[12]。

为实现 HgCdTe 器件的大面阵与低成本化, P-on-N 技术的发展亦包含了在替代衬底上进行外延生长的技术探索。RVS 公司自 2000 年起承接 HRL 公司的工作,积极推动 HgCdTe 在替代衬底(如 Si)上的 MBE 外延生长技术。图 6 展示了其在 Si 衬底上生长的 P-on-N 双层异质结结构^[13]。Teledyne 公司也尝试了在替代衬底(如 GaAs、Si)上的探测器设计^[12]。尽管该方向的研发目前仍停留在高质量 LWIR HgCdTe 材料上,但未来有望拓展到 VLWIR 波段。

在 VLWIR HgCdTe 技术不断推进的过程中,行业性能基准的建立与演进深刻地反映了器件物理的演化。Teledyne 公司在理论和基准建立方面贡献卓著,提出了“Rule 07”经验法则^[14]——作为高性能 HgCdTe 器件暗电流水平的衡量标准。基于该法则,在 77 K 以上的工作温度下,性能优异的 HgCdTe 器件的暗电流主要受 N 型吸收层中俄歇-1 复合机制所

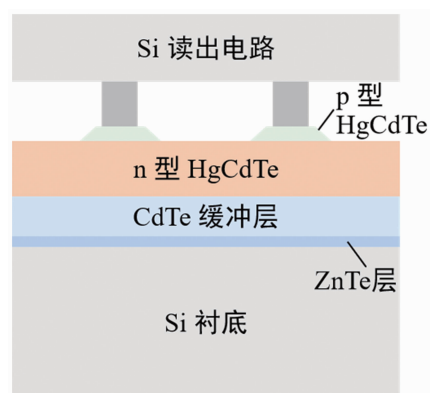


图 6 RVS 公司通过 MBE 技术生长的 P-on-N 双层异质结结构^[13]

Fig. 6 RVS's P-on-N bilayer heterojunction structure grown by MBE technology^[13]

决定的扩散电流限制。因此,“Rule 07”实际上代表了当时最先进技术水平下,由材料本征俄歇复合所决定的扩散电流极限。一个器件的暗电流能够达到或接近“Rule 07”曲线,即意味着其材料质量和器件工艺已经达到非常高的水平,基本消除了产生-复合(Generation-Recombination, G-R)电流、隧穿电流和表面漏电流等暗电流的干扰。

然而,在更低的温度下,由俄歇-1 复合主导的扩散电流被抑制,不再是主要的限制因素。此时, TAT 等暗电流机制开始凸显。为

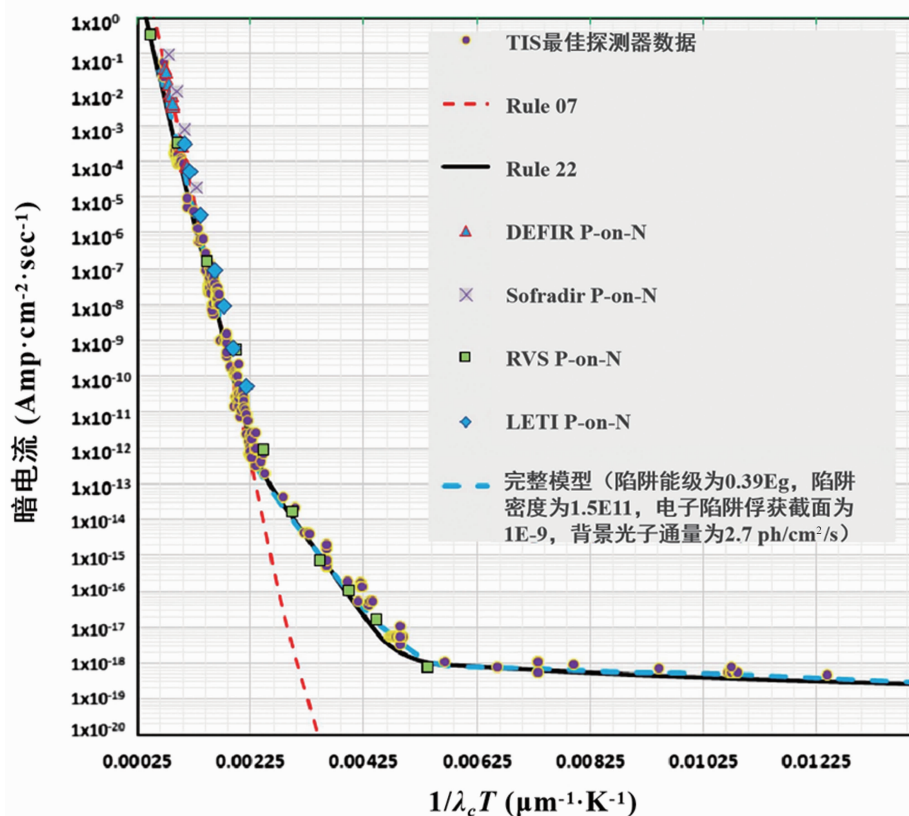


图 7 各机构已报道的最佳探测器的暗电流与“Rule 07”和“Rule 22”基准的对比^[15]

Fig. 7 Comparison of dark current of the best-performing detectors reported by various institutions with the "Rule 07" and "Rule 22" benchmarks^[15]

此, Teledyne 公司在“Rule 07”的基础上提出了“Rule 22”^[15],以更精确地描述在更宽温度和波长范围内器件的性能。“Rule 22”是一个包含多项的复杂经验方程。如图 7 所示,在 $1/\lambda_c T < 0.0025$ 的高温、短波区域,暗电流由俄歇-1 复合主导的扩散电流限制;在 $0.0025 < 1/\lambda_c T < 0.005$ 的中低温区域,暗电流主要由 TAT 主导。这反映了技术进步使得扩散电流被抑制后,材料中的缺陷成为新的性能瓶颈。而在 $1/\lambda_c T > 0.005$ 的极低温、甚长波区域,先进 HgCdTe 器件的暗电流则受限于背景光子通量。Teledyne 公司对这一系列性能基准的演进,体现了 VLWIR HgCdTe 探测器实现高性能需要突破的技术阶段,即从攻克材料的本征俄歇复合极限,发展到攻克材料缺陷所带来的隧穿极限,最终实现背景限制红外光电探测 (Background-Limited Infrared Photodetection, B-LIP) 的理想性能。

1.2 国内研究进展

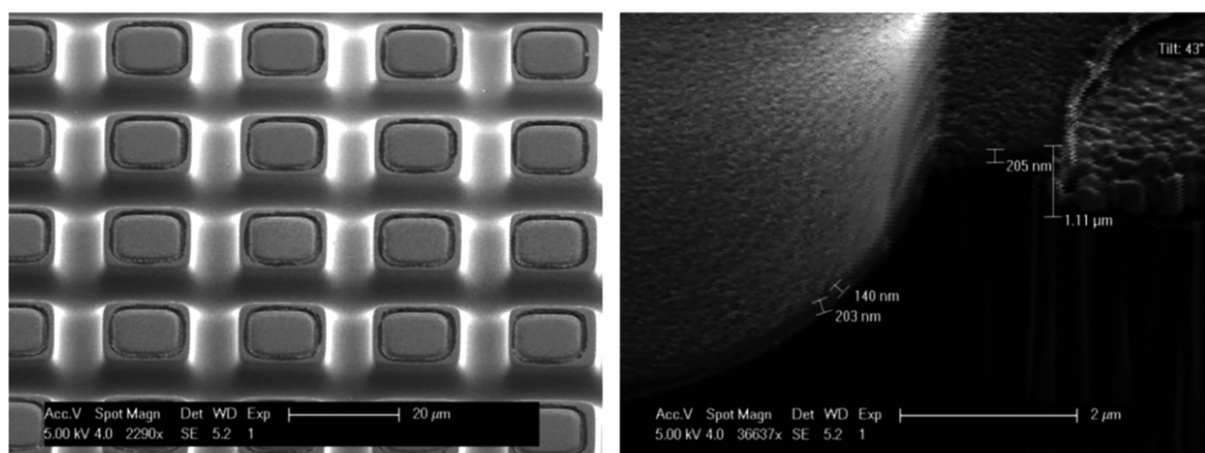
国内较国外在 VLWIR HgCdTe 探测器方面的研究起步较晚,尽管如此,各大研究机构在 N-on-P 型和 P-on-N 型甚长波器件的材料生长与器件工艺上都实现了稳步发展,近年来成功研制出多种规格的 LWIR 和 VLWIR HgCdTe 焦平面器件。

昆明物理研究所报道了采用 As 离子注入的平面结工艺制备的 P-on-N 探测器。测试结果如表 1 所示,VLWIR 器件在 71 K 工作温度下的截止波长为 $14.97 \mu\text{m}$,平均峰值探测率为 $1.2 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ^[16]。

华北光电研究所采用双层异质 P-on-N 台面结工艺,研制出 60 K 下截止波长为 $14.28 \mu\text{m}$ 的 VLWIR 探测器。图 8 为其制备的焦平面像元阵列 (320×256 规格、 $30 \mu\text{m}$ 像元间距) 的扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope,

表 1 昆明物理研究所三个不同波长焦平面器件的测试结果^[16]Table 1 Test results of three focal plane array devices with different operating wavelengths from the Kunming Institute of Physics^[16]

性能参数	器件		
	配置 1	配置 2	配置 3
截止波长	9.5 μm	10.1 μm	14.97 μm
工作温度	77 K	77 K	71 K
视场角(FOV)	F2	F2	F2
电容值	4.17 pC	4.17 pC	4.17 pC
有效像元率	99.90%	99.78%	99.82%
峰值探测率	$2.10 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$	$1.61 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$	$1.20 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$

图 8 华北光电研究所焦平面像元阵列(左)及像元钝化膜剖面(右)的 SEM 图像^[17]Fig. 8 SEM images of the focal plane pixel array (left) and pixel passivation film profile (right) from the North China Research Institute of Electro-Optics^[17]

SEM)图像。可以看出,像元的台面结构和占空比表现出较好的一致性与均匀性,侧壁钝化效果良好^[17]。

中国科学院上海技术物理研究所(以下简称“上海技术物理研究所”)也通过 P-on-N 平面结工艺研制出了 40 K 下载截止波长为 14.4 μm 的 VLWIR 探测器。该器件的峰值探测率为 $2.5 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,暗电流水平已经达到“Rule 07”基准,如图 9 所示。

总体而言,国内在 VLWIR HgCdTe 焦平面技术方面已经攻克了 P-on-N 平面注入等核心工艺难题,器件性能达到了国际上的“Rule 07”基准,但与全球顶尖水平相比仍存在一定差距。未来亟需在高质量、低缺陷密度 VLWIR 材料外延、先进掺杂控制以及

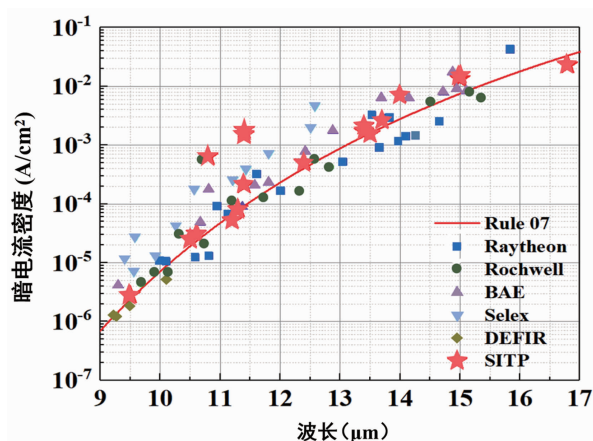


图 9 上海技术物理研究所焦平面器件的暗电流密度与波长关系曲线

Fig. 9 Dark current density versus wavelength curves of focal plane array devices from the Shanghai Institute of Technical Physics

器件钝化工艺等方面持续投入研究。

2 VLWIR HgCdTe 关键器件结构与物理

前面综述了 VLWIR HgCdTe 探测器关键器件结构的发展历程。为深入理解上述技术路线的演进逻辑,下面将从器件物理的角度,详细剖析各主流结构的基本原理、核心优势及其固有局限性。

2.1 N-on-P 型结构

N-on-P 型 HgCdTe 探测器是 VLWIR 技术发展早期的主流方案,其发展历程主要分为两个阶段:基于汞(Hg)空位本征掺杂的技术和基于外源非本征掺杂的技术。

随着 LPE 技术的不断成熟, Hg 空位本征掺杂型 N-on-P HgCdTe 红外探测器技术得以广泛应用。这种技术路线的工艺相对简单,通常在 P 型 HgCdTe 衬底上通过离子注入等方式形成 N 型区域,从而构建 P-N 结(能带示意图见图 10(a))。然而,这种本征掺杂方式存在根本性的缺陷:载流子浓度直接依赖于外延材料 Hg 空位的浓度,而 Hg 空位的浓度在生长过程中难以精确控制。这导致了较高的载流子浓度,进而使得器件的扩散电流显著增大。更重要的是, Hg 空位会在 HgCdTe 的带隙中引入深能级缺陷。这些缺陷作为 SRH 复合中心,极大地缩短了少数载流子(电子)的寿命,从而导致 G-R 电流急剧增加。

为了克服上述限制,外源非本征掺杂技术路线继续发展。该技术通过引入金(Au)、铜(Cu)等外源杂质原子来替代 Hg 空位作为 P 型掺杂剂。该方法能够大幅减少深能级 SRH 复合中心的数量,导致少数载流子寿命大幅提升,理论上可使暗电流水平实现同等幅度的降低^[8]。

尽管外源掺杂技术在降低暗电流方面表现出显著优势,但是 Hg 空位型 N-on-P 技术凭借其高度成熟的工艺,可实现非常均匀的焦平面阵列,并且在截止波长达 20 μm 时仍保持较高的制造良率^[18]。因此,在一些高光通量的场景下,该技术常被作为首选的解决方案。

然而, VLWIR 探测技术需应对极低通量、低光子能量的探测环境。在此类条件下,目标信号强度微弱,探测器本身的暗电流及相关散粒噪声会成为制约性能的关键因素。所以相较而言,非本征掺杂技术更适合于 VLWIR 应用场景。与 Hg 空位本征掺杂相比,该技术已被证明能够实现高达一个数量级的暗电流降幅。但由于 P 型吸收层的掺杂水平难以控制在较低程度, N-on-P 器件的暗电流水平难以进一步降低。

2.2 P-on-N 型同质结

P-on-N 型 HgCdTe 器件的 P 型层通过掺入砷(As)等受主杂质形成,而 N 型吸收层则通过掺入铟(In)等施主杂质形成(能带示意图见图 10(b))。基于 LPE 工艺, In 的掺入在外延生长过程中完成,并且 In 在 HgCdTe 中无需进行后续的热处理即可激活。该工艺能够提供具有均匀 Cd 成分的高度平整的外延层。这对于 VLWIR 器件尤为关键,因为 Cd 成分的微小变化便会导致截止波长的显著变化。

在较高的工作温度下,器件的暗电流通常受平衡 N 型吸收层中的扩散电流限制。在理想情况下,即所有金属空位都被填充, SRH 复合中心的数量实现最小化时,扩散电流主要由俄歇复合过程决定。基于此, P-on-N 结构的优势体现在以下两个方面:首先, N 型吸收层的载流子浓度由 In 掺杂浓度决定,可以控制在较低水平(10^{14} cm^{-3} 至 10^{15} cm^{-3} 量级)。此外,由于 N 型吸收层的少子是空穴,空穴迁移率 μ_h 远低于电子迁移率 μ_e ^[8],这直接降低了扩散电流的强度;同时,空穴寿命远大于电子寿命,与之相关的 G-R 电流也显著降低。因此,与 Hg 空位型 N-on-P HgCdTe 红外探测器相比, P-on-N 技术路线能够使暗电流降低多达两个数量级。对于需要应对低通量、低光子能量背景探测需求的 VLWIR HgCdTe 红外探测器, P-on-N 型结构已成为当前主流的技术路线。

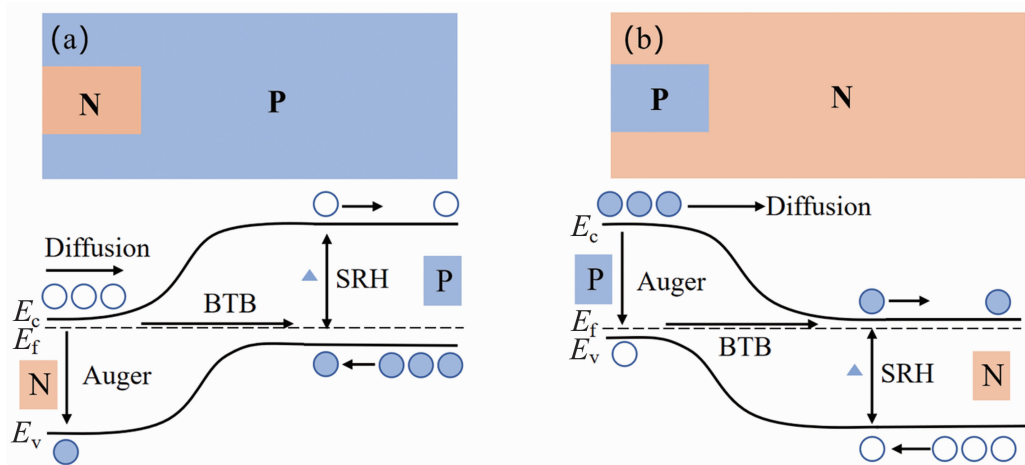


图 10 N-on-P (a)与 P-on-N (b)平面结结构与能带示意图

Fig. 10 N-on-P (a) and P-on-N (b) planar junction structures and energy band diagrams

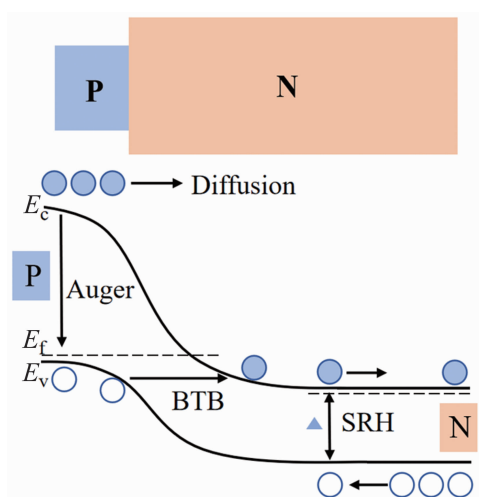


图 11 P-on-N 双组分异质结结构与能带示意图

Fig. 11 P-on-N binary heterojunction structure and energy band diagram

2.3 P-on-N 型双组分异质结

在传统的 P-on-N 同质结中，P 型区和 N 型区具有相同的材料组分。施加反偏时，高电场区域位于窄带隙材料内。在 VLWIR 同质结中，极小的带隙 E_g 与电场 E 叠加，导致隧道电流呈指数级剧增，成为主导的暗电流机制。为解决此问题，P-on-N 型双组分异质结被提出，其核心思想是在器件中电场最强的区域（即 P-N 结的耗尽区），设计具有更高 Cd 组分（即更宽带隙）的 HgCdTe 材料作为势垒层，增高隧穿势垒，从根本上减小隧穿概率，使器件可以在足够高的反向偏压下工作。此时的能带

示意图如图 11 所示。

尽管禁带宽度的差异会使异质结的能带结构中形成少子势垒，阻挡光生少子的输运，但由于双组分异质结具有灵活的能带调控特性，通过调节异质结的设计参数，可以减小势垒高度甚至消除势垒的形成，从而在抑制隧道电流的同时维持高量子效率。这使其成为未来国际上 VLWIR HgCdTe 探测器结构发展的主流趋势。

2.4 非平衡工作模式与全耗尽结构

非平衡工作模式的核心思想是通过使材料中的载流子尽可能置于耗尽状态来降低载流子的浓度，从而减小暗电流^[19]。以 P^+-v-N^+ 型结构为例，通过引入宽带隙的接触层 P^+ 和轻掺杂的本征吸收区 v ，可以有效减少反向偏置下进入吸收区的空穴供应。为了保持电荷中性，电子浓度也随之降低到接近非本征掺杂的水平，从而抑制器件的俄歇复合过程。

若吸收层的掺杂-厚度乘积足够小，则通过对探测器施加反向偏压，能够使吸收层完全耗尽，从而进一步降低扩散电流。此时的能带示意图如图 12 所示。在此理想情况下，器件的最终性能转而由与材料缺陷相关的 SRH 复合而非俄歇复合决定。若 G-R 电流亦足够低，则探测器电流最终由背景黑体辐射和探测器量子效率决定。然而，全耗尽工作模式的实现依赖于施加足够大的反向偏压，以在吸收区建立强电场。对于材料带隙 E_g 极窄的 VLWIR 探

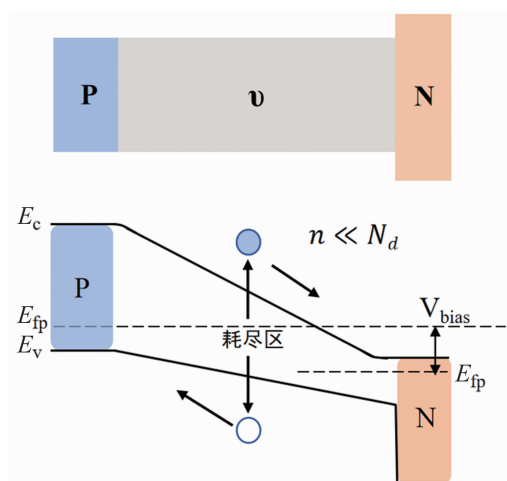


图 12 全耗尽结构与能带示意图

Fig. 12 Fully depleted structure and energy band diagram

测器而言, 在强电场下, BBT 效应将变得极为显著。这种显著的隧穿电流构成了新的暗电流限制机制, 极大地抵消了俄歇抑制带来的增益。因此, 将全耗尽技术路线推广至甚长波段仍面临巨大挑战。然而, Teledyne 公司采用基于 MBE 的低掺杂技术 (10^{13} cm^{-3} 量级), 其吸收层在适当偏压下即可实现完全耗尽, 使全耗尽结构的截止波长首次达到 $10.7 \mu\text{m}$, 暗电流较 “Rule 07” 预测值降低近 400 倍^[20]。因此, 该技术路线在提升长波器件高温性能方面依然具有显著的效果和应用潜力。

3 关键挑战与技术展望

3.1 先进器件结构的物理挑战

VLWIR HgCdTe 焦平面技术的核心目标始终是抑制窄带隙所导致的高暗电流, 以改善 VLWIR 探测器的散粒噪声、探测率、动态范围等各项指标。技术发展表明, 与 N-on-P 结构相比, P-on-N 结构能显著提高结阻抗、抑制暗电流, 而采用双组分异质结则可进一步优化性能。未来要实现高性能、大规模、高密度的甚长波焦平面, 亟需突破先进异质结技术, 并积极应对以下挑战:

首先, 异质结的能带工程与器件物理调控是核心挑战。如前所述, 在异质结中引入高组分宽禁带层虽是抑制隧穿电流的有效手段, 但

禁带宽度差异会导致结区附近的价带势垒增大。该势垒会阻碍光生少数载流子的有效收集, 直接导致量子效率下降。若宽禁带层过薄, P-N 结的位置落入吸收层, 则无法有效抑制隧穿电流。因此, 异质结器件设计的首要难题在于精确控制高组分厚度, 使组分异质结与 P-N 结位置相互匹配, 实现对空间电荷区能带的精准调谐, 从而在抑制 BBT 电流的同时获得高量子效率。

其次, 与缺陷相关的暗电流机制成为新的性能瓶颈。当扩散电流和带间隧穿电流得到有效抑制后, 由材料缺陷主导的 G-R 电流和 TAT 电流尤为凸显。结区内异质结材料的位错和由 As 掺杂引起的畸变均会诱发深能级缺陷, 成为 G-R 和 TAT 电流的主要来源。此外, 台面刻蚀工艺可以消除横向电场导致的隧穿以及串扰问题, 但会暴露出敏感的窄禁带材料侧壁。若钝化不理想, 由表面态和 Te 悬挂键形成的漏电通道将会引入巨大的表面漏电流。因此, 必须深入理解缺陷机理, 开发高质量的钝化工艺。

再者, 材料本征特性的控制要求极高。碲镉汞材料的吸收系数 α 与入射光子的能量 E 和本身的禁带宽度 E_g 密切相关, 其关系可近似表示为

$$\alpha \propto \exp[\beta(E - E_g)]^{1/2}, E \geq E_g \quad (1)$$

光子能量越低, 对应的波长越长, 吸收系数 α 通常越小。这意味着甚长波红外光子穿透更深, 需要更厚的吸收层才能被有效吸收。这对材料体内的缺陷密度控制提出了更高要求。此外, 当 HgCdTe 截止波长延伸至 $16 \mu\text{m}$ 以上时, 极低的 Cd 组分 ($x_{\text{Cd}} \approx 0.2$) 使得截止波长对组分均匀性极为敏感, 0.001 大小的组分波动即可引起约 $0.4 \mu\text{m}$ 的截止波长漂移和数倍的暗电流变化。这对大面积外延生长的均匀性与精确性构成了巨大挑战。

3.2 核心材料工艺: 外延技术选择

在为 VLWIR 碲镉汞探测器选择外延技术, 并基于碲锌碲 (CdZnTe) 衬底的前提下,

LPE 与 MBE 呈现出不同的技术侧重。LPE 技术的核心优势在于其工艺成熟度高, 适于制备高性能的同质结器件。该方法生长的材料结晶质量极佳、位错密度低, 为低暗电流、高均匀性的 VLWIR 探测器提供了坚实基础; 其平面结结构对表面钝化的要求相对宽松, 且基于离子注入 As 的成结技术已非常成熟。若采用富 Hg 的 LPE 方式, 还能实现 As 掺杂的高原位激活率^[18]。然而, LPE 的局限性在于生长复杂异质结时, 层间易发生严重的组分互扩散, 难以实现界面陡峭、结构精确的能带设计。

MBE 技术的卓越之处则在于其强大的能带工程能力, 能够实现原子级精度的结构控制。特别值得指出的是, 随着 $\langle 211 \rangle$ 晶向 CdZnTe 衬底技术的不断成熟, 它所提供的优异结晶质量与低缺陷密度, 为在其上生长高质量的 MBE 外延材料提供了关键保障, 使材料本征质量得以媲美 LPE。这正是 MBE 技术应对探测器发展趋势的基石。如上文所述, 当前器件结构正从传统的 N-on-P 向 P-on-N 演进, 并进一步发展出采用宽禁带帽层的双组分异质结以有效抑制隧穿电流。这些先进结构对界面陡峭度、组分和掺杂的精准控制提出了极高要求, 而这正是 MBE 的非平衡生长模式所擅长的。尽管传统 MBE 在富 Te 条件下 As 掺杂的原位激活率较低, 但比如在 HgTe/CdTe 结构的 CdTe 层中进行脉冲掺杂技术, 不仅能实现无需退火的高效原位掺杂, 还有望规避直接掺 As 带来的深能级缺陷问题^[21]。

展望未来, 技术的发展焦点已不再局限于外延层本身的生长。随着 MBE 在复杂能带结构制备上的优势显现, 挑战也随之转移: 对于由 MBE 制备的基于台面结的先进器件结构而言, 如何实现高效、稳定的侧壁钝化以抑制表面漏电流, 已成为决定器件最终性能乃至成败的关键工艺环节。因此, 从技术演进的内在需求来看, LPE 方案在制备传统高性能同质结探测器方面更为成熟可靠; 然而, 为了从根本上优化甚长波性能并实现双组分异质结甚至全耗

尽等新型异质结构, 业界必须大力发展 MBE 技术。MBE 不仅提供了从能带结构设计上实现突破的工艺能力, 而且其与高质量衬底及先进钝化工艺的深度融合, 更是推动 HgCdTe 探测器性能向更高阶迈进的必由之路。

4 结束语

本文系统回顾了甚长波红外碲镉汞探测器技术的发展历程、核心物理机制与前沿研究动态。为满足空间探测等低通量应用需求, HgCdTe 探测器技术经历了从早期 N-on-P 结构到当前主流高性能 P-on-N 结构的清晰演进, 成功将暗电流水平逼近由材料本征俄歇复合决定的“Rule 07”基准。然而, 面向未来更高工作温度、更高灵敏度的应用需求, 单纯的 P-on-N 同质结暴露出在抑制隧穿电流和高温下热激发方面的局限性。

未来, VLWIR HgCdTe 技术的发展将聚焦于器件结构与先进材料外延技术的协同创新。在器件层面, 以双组分异质结为代表的先进架构, 通过精巧的能带工程, 为从根本上抑制隧穿电流和俄歇复合提供了路径。然而, 这些高级结构的实现高度依赖于攻克价带势垒、界面缺陷、表面漏电等一系列关键难题。在材料层面, MBE 等技术凭借其原子级的生长控制精度, 已成为生长复杂异质结构、实现能带精准调控的核心技术。可以预见, 通过将先进的器件物理设计与高精度的外延生长工艺紧密结合, 持续优化材料质量、界面特性和器件钝化技术, VLWIR HgCdTe 焦平面阵列的性能将不断突破现有极限, 为人类在空间科学领域拓展更为广阔的观测视野。

参考文献

- [1] Tidrow M Z, Dyer W R. Infrared sensors for ballistic missile defense [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, **42**(3-5): 333-336.
- [2] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(3): 136-154.

- [3] Rogalski A. Infrared detectors: status and trends [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, **27** (2-3): 59-210.
- [4] Rogalski A. Recent progress in third generation infrared detectors [J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, **57**(18): 1716-1730.
- [5] Gravrand O, De Borniol E, Bisotto S, et al. From LWIR to VLWIR FPAs made with HgCdTe at Defir [C]. *SPIE*, 2006, **6361**: 328-337.
- [6] 杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
Yang J R. *Physics and Technology of HgCdTe Materials* [M]. Beijing: China's National Defense Industry Press, 2012.
- [7] Ziegler J, Eich D, Hanna S, et al. Recent results of two-dimensional LW- and VLW-HgCdTe IR FPAs at AIM [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 1017-1026.
- [8] Wollrab R, Bauer A, Bitterlich H, et al. Planar n-on-p HgCdTe FPAs for LWIR and VLWIR Applications [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(8): 1618-1623.
- [9] Gassmann K U, Eich D, Fick W, et al. Low dark current MCT-based focal plane detector arrays for the LWIR and VLWIR developed at AIM [C]. *SPIE*, 2015, **9639**: 174-182.
- [10] Baier N, Cervera C, Gravrand 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.
- [11] Gilmore A S, Bangs J, Gerrish A, et al. Advancements in HgCdTe VLWIR materials [C]. *SPIE*, 2005, **5783**: 223-230.
- [12] Tennant W E, Arias J M, Bajaj J. HgCdTe at Teledyne [C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 1079-1089.
- [13] Bratt P R, Johnson S M, Rhiger D R, et al. Historical perspectives on HgCdTe material and device development at Raytheon Vision Systems [C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 1044-1078.
- [14] Tennant W E, Lee D, Zandian M, et al. MBE HgCdTe technology: A very general solution to IR detection, described by "Rule 07", a very convenient heuristic [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, **37**(9): 1406-1410.
- [15] Wijewarnasuriya P, Shojaei B, Cante K, et al. Performance of very long wavelength planar P⁺/n devices [C]. *SPIE*, 2022, **12234**: 1223401.
- [16] 李立华, 熊伯俊, 杨超伟, 等. p-on-n 长波、甚长波碲镉汞红外焦平面器件技术研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2022, **41**(3): 534-539.
Li L H, Xiong B J, Yang C W, et al. Research on p-on-n LWIR and VLWIR HgCdTe infrared focal plane detectors technology [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, **41**(3): 534-539.
- [17] 谭振, 刘世光, 田震, 等. 双层异质结碲镉汞甚长波红外焦平面探测器研究进展 [J]. *红外*, 2020, **41**(4): 1-7.
Tan Z, Liu S G, Tian Z, et al. Research progress of HgCdTe VLWIR focal plane detectors based on double-layer heterojunction [J]. *Infrared*, 2020, **41**(4): 1-7.
- [18] Gravrand O, Mollard L, Largeron C, et al. Study of LWIR and VLWIR Focal Plane Array Developments: Comparison between p-on-n and Different n-on-p Technologies on LPE HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, **38**(8): 1733-1740.
- [19] Ashley T, Elliott C T. Nonequilibrium devices for infrared detection [J]. *Electronics Letters*, 1989, **25**: 54-56.
- [20] Lee D, Carmody M, Piquette E, et al. High-operating temperature HgCdTe: A vision for the near future [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, **45**(9): 4587-4595.
- [21] Jung H S, Boieriu P, Grein C H. p-type HgTe/CdTe superlattices for very-long wavelength infrared detectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, **35**(6): 1341-1345.