

碲镉汞高温红外探测器组件进展

陈 军¹, 习中立², 秦 强¹, 邓功荣¹, 罗 云¹, 赵 鹏¹

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;
2. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 高工作温度红外探测器组件是第三代红外探测器技术的重要发展方向, 可用于高工作温度红外探测器的基础材料主要有锑基和碲镉汞两大类。介绍了昆明物理研究所在高工作温度红外焦平面探测器组件方面的最新研究进展, 其中基于碲镉汞材料 p-on-n 技术研制的高工作温度中波 640×512 探测器组件在 150 K 温区性能优异, 探测器的噪声等效温差 (NETD) 小于 20 mK, 配置了高效动磁式线性制冷机的高温探测器组件 (IDDCA 结构), 质量小于 270 g, 探测器组件光轴方向长度小于 70 mm (*F*4), 室温环境下组件稳态功耗小于 2.5 Wdc, 降温时间小于 80 s, 声学噪声小于 27 dB, 探测器光轴方向自身振动力最大约 1.1 N。目前正在进行环境适应性和可靠性验证, 完成后就可实现商用量产。

关键词: 高工作温度器件; 碲镉汞; 锑砷镉; p-on-n

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220462

Advance in high operating temperature HgCdTe infrared detector

Chen Jun¹, Xi Zhongli², Qin Qiang¹, Deng Gongrong¹, Luo Yun¹, Zhao Peng¹

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: High operating temperature (HOT) infrared detector technology is an important branch of the third-generation infrared detector technology. The basic materials that can be used for high operating temperature infrared detectors are mainly Sb based and HgCdTe based. This paper introduces the latest research progress of high operating temperature infrared focal plane module in Kunming Institute of Physics (KIP). The high operating temperature MCT based detectors developed based on p-on-n technology have reached good performance in the temperature range of 150 K with the NETD less than 20 mK. The weight of MCT 640×512 IDDCA module adapted with high efficiency moving magnet split linear cooler is less than 270 g with the detector length in optical axis direction less than 70 mm (*F*4). At ambient temperature, the steady power consumption of the module is less than 2.5 Wdc while the cool down time is less than 80 s, audible noise is less than 27 dB and self induced vibration force is less than 1.1 N. MCT HOT modules are now under environmental adaptability and reliability verification and commercial mass production of this detector will be realized after the verification test.

Key words: high operating temperature (HOT) detectors; HgCdTe; InAsSb; p-on-n

收稿日期: 2022-07-05; 修订日期: 2022-09-23

作者简介: 陈军, 男, 研究员级高工, 硕士, 主要研究方向为微型低温制冷、杜瓦封装及高性能红外探测器制冷组件技术。

0 引言

红外探测技术是第二次世界大战后期发展的新技术,早期主要应用于军事领域,如导弹制导、红外观瞄等^[1]。近十几年,随着技术的不断进步和成熟,商用和民用领域对红外设备的需求开始凸显,如气体污染物监测、森林防火、气象监测、天文观测、汽车辅助驾驶以及医学红外成像等。目前商用和民用领域出于成本和可靠性考虑,主要使用可以在常温温度下工作的非制冷型红外探测器,但这一类探测器动态响应速度慢、探测距离近,并不能满足高性能的应用需求。高性能红外探测器通常为光子探测器,材料内部电荷载流子发热会增大光子探测器的噪声,因此必须使用体积大、功耗高的制冷机对其进行冷却,限制了这一类探测器在商用和民用领域的推广。

1985年,C. T. Elliott等首次提出采用非平衡模式提高光子探测器工作温度的概念,即高工作温度(high operation temperature, HOT)红外光子器件^[2]。1999年,C. T. Elliott等探讨了将光子探测器噪声降低到背景水平所需的条件,认为移除制冷机并没有理论障碍,只是因为工艺水平难以实现^[3]。同年,Donald等提出第三代红外焦平面探测器应具有高性能和低成本等特点,器件工作温度需提高到180 K^[4]。进入21世纪,欧美从事红外光子探测器研发的企业团体陆续推出高工作温度红外探测器组件,采取的技术路线主要可分为:以以色列SCD公司、美国圣巴巴拉红外公司、瑞典IRnova等为代表的碲基材料路线和以美国DRS公司、Teledyne Judson Technologies公司、Raytheon公司以及欧洲AIM公司、Sofradir公司、Selex公司等为代表的碲镉汞(MCT)材料路线^[5-11]。由于碲镉汞材料载流子的肖克莱-里德-霍尔(SRH)寿命较长,理论上器件具有更低的暗电流,较适合研制高温器件。目前国际上在3~5 μm 中波高温器件领域,暗电流最低的是碲镉汞体系探测器^[12]。

国内开展高温器件研究的单位主要有昆明物理研究所、华北光电技术研究所、中国科学院上海技术物理研究所、武汉高德红外股份有限公司等。华北光电技术研究所于2020年报道了其基于As离子注入p-on-n和垂直液相外延(VLPE)的p-on-n异质结器件的研制情况^[13],报道的探测器在120 K时盲元率和噪声等效温差(NETD)就发生退化。武汉高德红外股份

有限公司于2019年报道了其基于n-on-p技术高温器件的研制情况^[14],其报道的产品能够在125 K下工作,器件响应波长在液氮温度下可达到4.8 μm ($x=0.31$),125 K下则降低为4.6 μm 。中国科学院上海技术物理研究所主要基于二类超晶格开展HOT组件的研制,采用带间级联(ICIP)结构,具体产品性能未见文章报道。

文中介绍了昆明物理研究所在高工作温度红外探测器芯片和探测器组件方面的最新成果,对典型的MCT HOT 640中波高温探测器组件的各项性能与国外同类产品进行了对比,在完成环境适应性和可靠性测试后,相关产品即将实现商业量产。

1 高工作温度探测器芯片的研究进展

昆明物理研究所是国内最早开展高工作温度红外焦平面器件研制工作的单位。2014年,昆明物理研究所对nBn型InAs/GaSb II类超晶格器件在150 K温度工作下的光电特性进行了性能摸底,发现150 K工作时的暗电流比77 K温度下大一个量级左右,但峰值探测率仅下降1/5,验证了该结构在较高温度工作的潜力^[15]。2019年,昆明物理研究所启动高工作温度InAsSb焦平面探测器的研制工作。衬底材料为GaSb,使用MBE生长XCBn复合势垒结构的InAs_{0.91}Sb_{0.09}材料,并于2019年研制出首个InAsSb高工作温度中波红外探测器组件样品。该探测器组件面阵规模为640×512,像元中心距15 μm ,响应截止波长4.2 μm (蓝中波),工作温度150 K,暗电流密度约 5×10^{-6} A/cm²(@150 K),NETD约30 mK,采用数字化读出电路,综合性能接近以色列SCD公司的HOT Pelican-D组件,其在不同温度工作下的热成像图如图1所示。2021年,昆明物理研究所相关团队对关键技术进一步攻关,优化工艺参数,最新研制的器件暗电流密度降低到 9×10^{-7} A/cm²(@150 K),NETD小于25 mK,综合性能已与以色列SCD公司的HOT Pelican-D组件相当。图2所示为昆明物理研究所最新研制的高工作温度中波焦平面探测器在150 K温度工作下的热成像图。

昆明物理研究所在4.2 μm 波长中波器件研制的基础上进一步提高中波响应波段,在GaSb衬底上MBE生长XCBn复合势垒结构的InAs_{0.83}Sb_{0.17}材料,于2020年研制出响应截止波长4.6 μm 的150 K工作温度的红外焦平面器件(红中波),经测试NETD在

40 mK 左右,该组件在不同温度下的热成像图如图 3 所示。2021 年,昆明物理研究所对响应截止波长 5 μm

的 $\text{InAs}_{0.81}\text{Sb}_{0.19}$ 材料在 150 K 温度下成像进行了性能验证,材料结构及工艺参数正在持续优化。



图 1 昆明物理研究所 2019 年研制的中波 $\text{InAs}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}$ 焦平面探测器热成像图

Fig.1 Thermal image pictures of $\text{InAs}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}$ focal plane detector developed by KIP in 2019

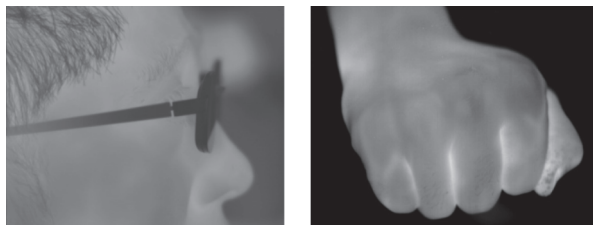


图 2 昆明物理研究所 2021 年研制的 150 K 温度下 $\text{InAs}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}$ 焦平面探测器热成像图

Fig.2 150 K thermal image pictures of $\text{InAs}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}$ focal plane detector developed by KIP in 2021

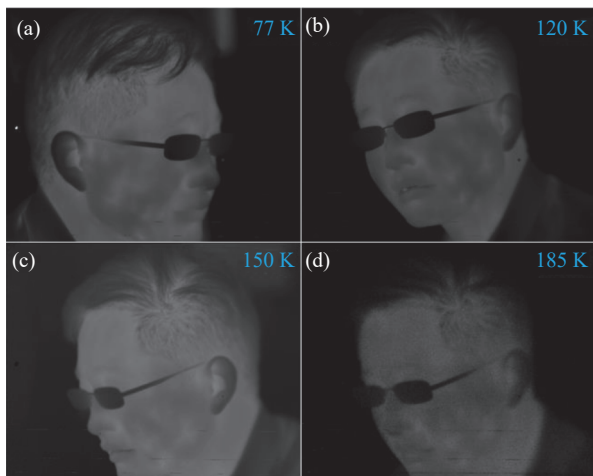


图 3 昆明物理研究所 2020 年研制的 $\text{InAs}_{0.83}\text{Sb}_{0.17}$ 焦平面探测器热成像图

Fig.3 Thermal image pictures of $\text{InAs}_{0.83}\text{Sb}_{0.17}$ focal plane detector developed by KIP in 2020

在推进锑基材料高温器件研制的同时,昆明物理研究所也开展了基于 As 注入掺杂 p-on-n 结构的高工作温度碲镉汞材料器件的研制,采用液相外延法

(LPE) 原位掺杂多层异质结构碲镉汞薄膜结合 As 离子注入技术,完成了阵列规模 640×512 、像元中心距 $15 \mu\text{m}$ 的中波碲镉汞高温焦平面器件的制备。研制出的探测器芯片在 80 K 工作温度、303 K 黑体辐射温度下的信号响应如图 4 所示,NETD 约为 11.5 mK, NETD 直方图如图 5 所示,NETD 半峰宽约 2.5 mK。



图 4 p-on-n 中波碲镉汞焦平面器件的信号响应图

Fig.4 Signal response diagram of p-on-n MWIR HgCdTe focal plane device

探测器芯片在 80~200 K 温度下的 NETD 情况如图 6 所示,器件的 NETD 由 11.5 mK 变化至 25.5 mK。80、120、150、180 K 温度下器件的盲元分布图如图 7 所示,对应的有效像元率分别为 99.98%、99.97%、99.92%、99.32%。

昆明物理研究所对研制的中波高温器件的暗电流进行的测试结果如图 8 所示。图中,红线为高温中波器件在 150~200 K 的暗电流测试结果,黑线为 Rule-07 理论计算暗电流。高温器件在 150~200 K 之间暗电流的变化接近 Rule-07 的水平。

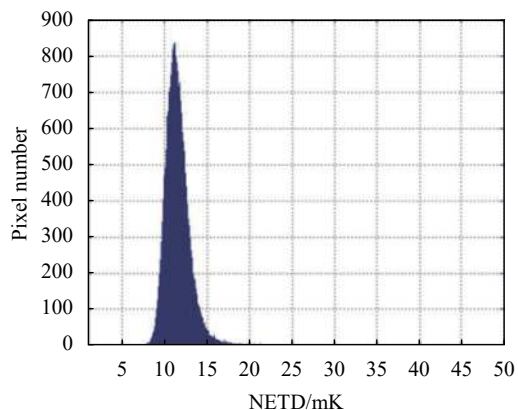


图 5 p-on-n 中波碲镉汞焦平面器件的 NETD 直方图

Fig.5 NETD histogram of p-on-n MWIR HgCdTe focal plane device

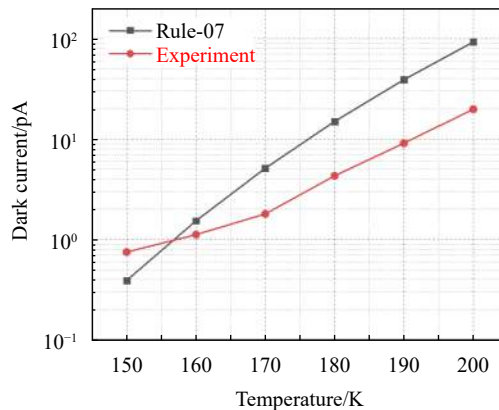


图 8 器件暗电流在 150~200 K 随温度变化情况

Fig.8 Dark current of the device operating within 150-200 K

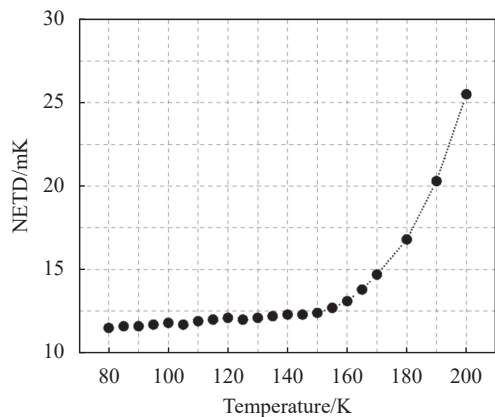


图 6 p-on-n 中波碲镉汞焦平面器件在 80~200 K 温度范围的 NETD

Fig.6 NETD of p-on-n MWIR HgCdTe focal plane device from 80 K to 200 K

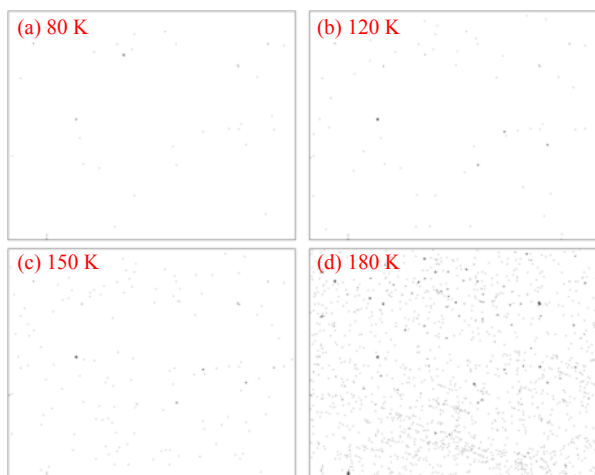


图 7 p-on-n 中波碲镉汞焦平面器件在 80~180 K 温度范围的盲元分布图

Fig.7 Blind element distribution of p-on-n MWIR HgCdTe focal plane device from 80 K to 180 K

由于 Sb 基锑碲在 4.2 μm 截止波长处晶格匹配更好, 目前 Sb 基高温器件主要是 4.2 μm 截止的蓝中波器件, 当其向 5 μm 红中波延伸时需要克服晶格失配带来的影响, 虽然国内外各研发单位都在开展相关研究工作, 但在红中波段, 锑碲器件暗电流最好结果距离碲镉汞 p-on-n 器件仍有一个数量级的差距。未来进一步提升工作温度时, 碲镉汞高温器件也必须对温升带来的扩散电流进行抑制。因此, 通过吸收层深度耗尽降低高温下扩散电流的影响是碲镉汞高温器件未来的主要工作之一^[16]。

2 高工作温度探测器组件的研究进展

根据高工作温度探测器组件在单兵、无人机载平台等的应用需求, 昆明物理研究所基于探测器组件短光轴长度, 低功耗、快速制冷、低成本等设计理念, 于 2021 年为基于 InAsSb 材料制备的 640 \times 512 中波高温探测器芯片研发了专门的短冷指膨胀机、低功耗线性制冷机和短光轴长度的封装杜瓦, 形成了 InAsSb HOT IDDCA 组件。

该组件使用的制冷机为昆明物理研究所研制的长寿命、高效率、低振动线性分置式斯特林制冷机 C351 第一轮样机。该制冷机压缩机的电机采用单磁钢动磁结构, 由 Robert Redlich 发明^[17], 其结构示意图如图 9 所示。其结构的特点一是动磁采用径向充磁的单磁钢, 二是动磁全行程基本封闭在磁回路中, 漏磁很少, 故电机效率高, 通常可达 82% 以上, 好的设计可超过 90%, 显著优于早期双磁钢动圈式及双磁钢动磁式电机的效率。另外, 由图 9 可知, 该电机结构简

单,最低只需六种零件就可构成一个单活塞的制冷压缩机。Redlich 电机已成为国外线性制冷机的主流电机结构,后文对比的国外探测器组件用线性制冷机均采用了 Redlich 电机。

昆明物理所制冷团队对 Redlich 电机磁路开展了深入的研究,发现在一定的动磁行程内,磁路提供的反作用力与机械弹簧(图 9 中零件 6)的功能是一样的,称其为电磁弹簧,于是在 C351 制冷机动力学设计时取消了机械弹簧,由磁路在提供活塞推力的同时也承担起机械弹簧的作用,运动结构得到简化。在压缩机外径 29 mm、长度 58 mm 的包络下,电机效率为 84%;膨胀机则基于声功回收技术,对 150 K 温区的热力学进行了优化;制冷机工作于 150 K 时,在 10 Wac 输入功率下,制冷量在 1 W 以上,保证了需要的性能和高效率。杜瓦封装配合 F3/F4 冷屏设计,高温探测器组件光轴方向的长度为 71 mm;探测器组件的总质量小于 290 g。InAsSb HOT IDDCA 组件结构图如图 10 所示,组件达到的性能指标如表 1 所示。

2021 年,昆明物理研究所在碲镉汞 As 注入掺杂 p-on-n 结构探测器芯片研制取得突破后^[18-19],开展了 MCT HOT 640 (640×512, 15 μm 像元中心距)中波高温探测器组件的研发工作。设计了具有更高兼容性的短光轴长度封装杜瓦,即一款杜瓦可封装、采用模拟和数字读出电路的两种 MCT 640×512 和采用数字读出电路的 MCT 1024×768 共三个品种的高温探测器芯片;为单兵平台应用专门设计了新的低功耗读出电路,大幅度减少了杜瓦外引线数量,将杜瓦自身热负载降低为初样设计值的 70%;对 C351 制冷机的磁路、出气结构、电机外引线、膨胀机热力学和长度进

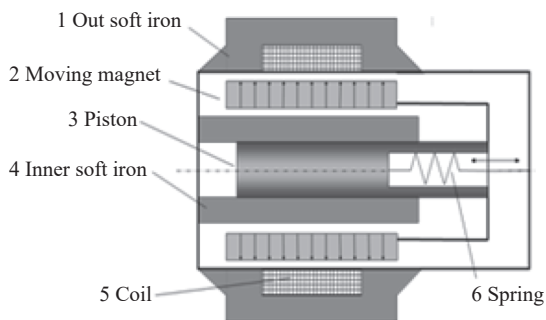


图 9 Redlich 型单磁钢动磁式线性压缩机结构示意图

Fig.9 Structural diagram of Redlich single moving magnet linear compressor

行了优化设计,制冷量平均提升了 20%,形成了 C351 工程版制冷机;开发了低功耗制冷机驱动电路,将电路功耗降低至 0.5 Wdc 以下。可工程化批产的 MCT HOT IDDCA 组件如图 11 所示。

目前,昆明物理研究所工程化 MCT HOT 640 中波高温探测器组件典型产品的各项性能指标如表 2 所示。

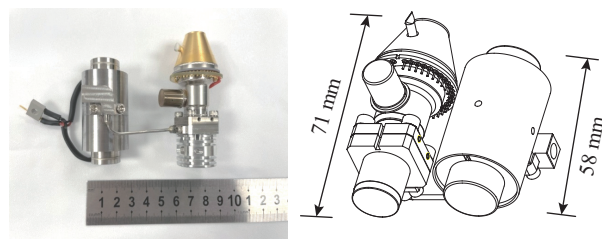


图 10 昆明物理研究所 InAsSb HOT IDDCA 组件结构图

Fig.10 Structure of KIP's InAsSb HOT IDDCA components

表 1 昆明物理研究所 InAsSb HOT IDDCA 组件的性能参数

Tab.1 Performance parameter of KIP's InAsSb HOT IDDCA components

Parameter	Value
Focal plane size	640×512
Pixel pitch/μm	15
Operation wavelength/μm	3.6-4.2
Operation temperature of FPA/K	150
Optical axis length/mm	71
Weight/g	<290
Power consumption (@23 °C, steady)/W	<3.5
NETD/mK	25
F#	F/4
Cooldown time/min	2.5
Cooler type	C351 linear cooler
MTTF of cooler (Goal)/h	>10000

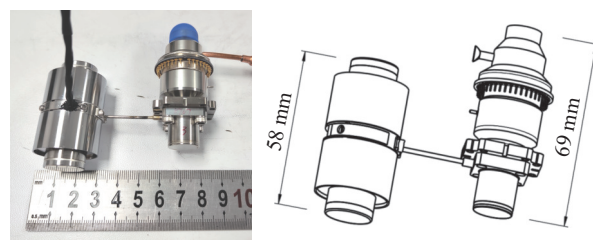


图 11 昆明物理研究所 MCT HOT IDDCA 组件结构图

Fig.11 Structure of KIP's MCT HOT IDDCA components

表 2 工程化 MCT HOT 640 中波高温探测器组件典型产品参数测试结果

Tab.2 Typical products parameter test results of engineered MCT HOT 640 detector components

Parameter	Value
Focal plane size	640×512
Pixel pitch/μm	15
Operation wavelength/μm	3.65-4.76
Operation temperature of FPA/K	150
Optical axis length/mm	69.4
Weight/g	259
NETD/mK	15
F#	4
Cooler type	C351 linear cooler
Power consumption (@23 °C, cooldown)/Wdc	13.2
Power consumption (@23 °C, steady)/Wdc	1.96 (with 50 mW additional heat load); 2.35 (with 100 mW additional heat load)
Cooldown time (@23 °C)/s	78
Detector acoustic noise (@1.5 m)/dB	25.7 (@ cooler full speed)
MTTF of cooler (Goal)/h	>10000


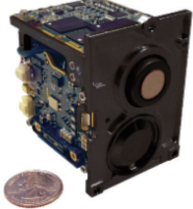
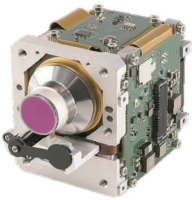
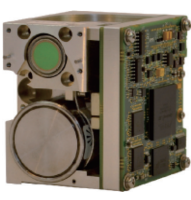
3 组件性能对比

昆明物理研究所高工作温度探测器组件的设计思路与国外各探测器组件研制厂商一致,即满足短光

轴长度,低功耗、快速制冷、低成本等应用需求,研制的 MCT HOT 640 探测器组件与国外同类型产品的性能对比如表 3 所示。

表 3 昆明物理研究所高温 MCT HOT 640 探测器组件与国外同类型组件性能对比^[7-10]

Tab.3 Performance comparison of KIP's MCT HOT 640 detector components with foreign components of the same type^[7-10]

Manufacturer	Kunming Institute of Physics	L3 Harris Technologies	Selex	DRS
Name	MCT HOT 640	Onyx Micro SD/HD	FIREFLY CAMERA CORE	Zafiro®640 Micro
Detector picture				
Detector type	MCT	MCT	MCT	MCT
Focal plane size	640×512	640×512	640×512	640×480
Pixel pitch/μm	15	15	16	12
Operation wavelength/μm	3.65-4.76	MWIR	3.7-4.95	3.4-4.8
FPA operation temperature/K	150	160	160	160
Optical axis length/mm	69.4	76.2	96	55.88
Weight/g	<260	<410	<550	<410
Power consumption@23 °C, steady	Cooler<2.5 Wdc	Core: <9 W	Core: <5 W	Core: <5 W
Frame rate/Hz	60	60	60	120
NETD	15	25	25	25
Operable pixel rate	>99.8%	>99.4%	N/A	>99%
F#	F/4	F/4	F/4	F/3.25, F/4
Cooler type	C351 linear	L200 linear	SX020 linear	Micro cooler
Cooldown time@23°C	Typical<80 s@12 V	<6 min	Typical<3 min	Typical<2.5 min
MTBF/h	>10000 (Goal)	>10000	>25000	>12000

4 结 论

高工作温度红外探测器组件显著减小了组件尺寸和质量,降低了系统功耗,提高了组件可靠性。昆明物理研究所基于碲镉汞材料体系,工作于 150 K 温区的短光轴、紧凑型 IDDCA 高温中波 640×512 探测器组件质量小于 270 g,探测器组件光轴方向长度为 69.4 mm (F4)。室温条件下测试时,制冷机在 12 V 直流供电条件下,探测器组件降温时间小于 80 s,探测器组件稳定功耗小于 2.5 W_{dc}。在未安装固定情况下,组件光轴方向的振动力最大约 1.1 N。在探测器组件光轴方向长度、体积、质量、稳定功耗等各项指标方面已与国外同类型高温探测器组件先进水平相当,国内还未见有更好性能的斯特林制冷型高温探测器组件的报道。不足之处在于:由于采用了自由活塞式气动膨胀机,探测器组件光轴方向的自激振动力稍大,需要有较好的固定来抵消自激振动。在完成环境适应性和可靠性验证后,工程化 MCT HOT 640 中波高温探测器组件就可实现批量生产。后期研发和优化的重点是逐步将现有中波探测器组件的工艺由 n-on-p 向 p-on-n 转化,形成系列化的高中波探测器组件新产品,降低现有中波探测器组件的体积、功耗等;研制新系列集成式高温探测器组件品种,全面满足机载、弹载等有高强冲击、振动等恶劣环境的应用需求。

参考文献:

- [1] Rogalski A. Infrared Detectors[M]. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [2] Ashley T, Elliott C T. Nonequilibrium devices for infrared detection [J]. *Electronics Letters*, 1985, 21: 451-452.
- [3] Elliott C T, Gordon N T, White A M. Towards background-limited, room-temperature, infrared photon detector in the 3–13 μm wavelength range [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(19): 2881-2883.
- [4] Donald A R, Stuart B H, James C Jr, et al. Third-generation imaging sensor system concepts [C]//Proceedings of SPIE, 1999, 3701: 108-117.
- [5] Klipstein P, Klin O, Grossman S, et al. High operating temperature X_{Bn}-InAsSb bariode detectors [C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8268: 82680U.
- [6] Espuno L, Pacaud O, Reibel Y, et al. A new generation of small pixel pitch/SWaP cooled infrared detectors [C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9648: 96480H.
- [7] Lutz H, Breiter R, Eich D, et al. Ultra-compact high-performance MCT MWIR engine [C]//Proceedings of SPIE, 2017, 10177: 101771A.
- [8] Knowles P, Hipwood L, Shorrocks N, et al. Status of IR detectors for high operating temperature produced by MOVPE growth of MCT on GaAs substrates [C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8451: 845108.
- [9] Robinson J, Kinch M, Marquis M, et al. Case for small pixels: system perspective and FPA challenge [C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9100: 91000I.
- [10] L3HARRIS. ONYX COMPACT MID-WAVE INFRARED SENSORS [EB/OL]. [2022-09-23]. <https://www.l3harris.com/all-capabilities/onyx-infrared-sensor>.
- [11] Delmas M, Höglund L, Ivanov R, et al. HOT SWaP and HD detectors based on Type-II superlattices at IRnova [C]//Proceedings of SPIE, 2022, 12107: 121070R.
- [12] Lee D, Dreiske P, Ellsworth J, et al. Law 19 the ultimate photodiode performance metric [C]//Proceedings of SPIE, 2020, 11407: 114070X.
- [13] Chen Huiqing, Shi Chunwei, Hu Shangzheng, et al. Study on p-on-n technology of the MWIR HgCdTe for hot work [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 435-438. (in Chinese)
- [14] Yang Zhaochen, Zhang Bingjie, Du Yu, et al. A study of manufacture HgCdTe HOT MW infrared detector [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 204-208. (in Chinese)
- [15] Hu Rui, Deng Gongrong, Zhang Weifeng, et al. Optical-electrical characteristics research on nBnType InAs/GaSb Type II superlattice infrared detector [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(11): 863-867. (in Chinese)
- [16] Cai Yi. Review and prospect of HgCdTe detectors (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210988. (in Chinese)
- [17] Redlich R, Unger R, Walt N V D, et al. Linear compressors: Motor configuration, modulation and system [C]//International Compressor Engineering Conference, 1996: 1129.
- [18] Xiong Bojun, Zou Lei, Yang Chaowei, et al. High temperature performance of long-wave p-on-n HgCdTe infrared focal plane detector [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(4): 672-677. (in Chinese)
- [19] Li Lihua, Xiong Bojun, Yang Chaowei, 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. (in Chinese)