

文章编号: 1672-8785(2019)08-0001-14

碲化铟红外焦平面探测器发展现状

柏 伟

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 近年来, 红外探测器技术发展迅速, 在国防、气象、红外遥感和航空航天等众多领域应用广泛。作为中波红外波段最重要的探测器之一, 碲化铟(InSb)红外焦平面探测器具有量子效率极高、暗电流小、器件响应线性度高、稳定性好、灵敏度极高等特点, 因此备受人们的关注和重视。InSb焦平面探测器性价比高, 优势十分突出, 其快速发展在很大程度上提高了红外整机性能, 同时还覆盖了导弹精确制导、卫星预警探测、机载搜索侦察、红外成像及消防、医疗、电力检测、工业测温等军民两用领域。梳理了国外发达国家在InSb红外焦平面探测器方面的研究情况, 分析了其发展方向并对发展前景及趋势进行了展望。

关键词: InSb; 红外焦平面; 发展; 量子效率

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.08.001

Development Status of InSb Infrared Focal Plane Array Detectors

BAI Wei

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In recent years, infrared detector technology has developed rapidly and is widely used in many fields such as national defense, meteorology, infrared remote sensing and aerospace. As one of the most important detectors in the mid-wave infrared waveband, InSb infrared focal plane detector has received much attention due to its high quantum efficiency, low dark current, high linearity of device response, good stability and high sensitivity. InSb focal plane detector is cost-effective and has outstanding advantages. Its rapid development has greatly improved the performance of the whole infrared system, involving in both military and civilian fields such as missile precision guidance, satellite early warning detection, airborne search and reconnaissance, infrared imaging and fire protection, medical treatment, power detection, and industrial temperature measurement. The research situation of InSb infrared focal plane detectors in developed countries is reviewed, and its development direction, prospect and trend are analyzed.

Key words: InSb; infrared focal plane array; development; quantum efficiency

收稿日期: 2019-07-17

作者简介: 柏伟(1990-), 男, 山东济南人, 硕士, 主要从事红外材料及器件研究。

E-mail: yiyangluoxue@126.com

0 引言

1800 年, 威廉·赫歇尔首次观察到了红外辐射现象。此后, 人们对红外辐射进行了多方面的研究。二战后期, 随着应用需求的推动和科学研究的深入, 西方发达国家相继研制出了多种红外探测器。经过几十年的发展, 国外红外探测器技术愈发成熟。特别是在近十几年, 依托半导体工业中超大规格集成电路和微机电加工工艺的红外焦平面技术的发展更为迅速, 探测器阵列的规模不断增大, 像元尺寸不断减小, 整体性能不断提高^[1-2]。

InSb 具有极窄的禁带宽度、极小的电子有效质量和极高的电子迁移率^[3], 其物理化学性质稳定。在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段, InSb 红外探测器属于本征吸收, 具有极高的量子效率和响应率^[4]。因此, 它可以实现极高的热灵敏度和极好的图像质量, 目前已成为最重要的中波红外探测器之一^[5]。InSb 红外探测器经历了从单元、多元迅速发展成一维线列和二维面阵的过程, 并且正向着新一代超大规模红外焦平面阵列器件(低成本、小型化、数字化、智能化和高集成化等)的方向发展^[6]。InSb 红外焦平面探测器的发展有利地促进了红外技术的发展^[7], 使红外武器装备的性能大幅提高^[8]。目前, 它已经广泛应用于精确制导、搜索跟踪、侦察和光电对抗等军事系统^[9], 成为先进光电

武器系统的重要组成部分, 同时在辅助驾驶、消防、安保、安全生产等民用领域也有大量应用^[10]。本文梳理了国外发达国家在 InSb 红外焦平面探测器方面的发展历程及成就, 分析了该研究的发展方向, 并对其发展前景与趋势进行了展望。

1 InSb 红外材料的发展

1952 年, Welker H H 首次报道了 InSb 半导体材料。由于它具有独特的性质且在红外探测领域拥有广阔的应用前景, 多年来西方发达国家投入了巨资研发。他们对 InSb 材料的制备进行了大量研究, 开发了水平区熔法(Horizontal Zone Melting, HZM)、垂直布里奇曼法(Vertical Bridgman, VB)、垂直梯度凝固法(Vertical Gradient Freezing, VGF)、移动加热器法(Traveling Heater Method, THM)以及切克劳斯基法(Czochralski, CZ)等多种方法, 甚至在磁场和微重力等环境下开展了 InSb 材料生长实验, 获得了大量的研究成果, 使得 InSb 晶体生长技术实现了飞速发展。近年来, 加拿大、美国和英国等发达国家已经开发出了完善的晶体生长及晶片加工技术, 未来他们将朝着更高质量、更大尺寸以及更低成本的目标发展。目前国际上主要的 InSb 晶片材料供应商有美国的 Galaxy Compound Semiconductors 公司、加拿大的 Firebird 公司和英国的 Wafer

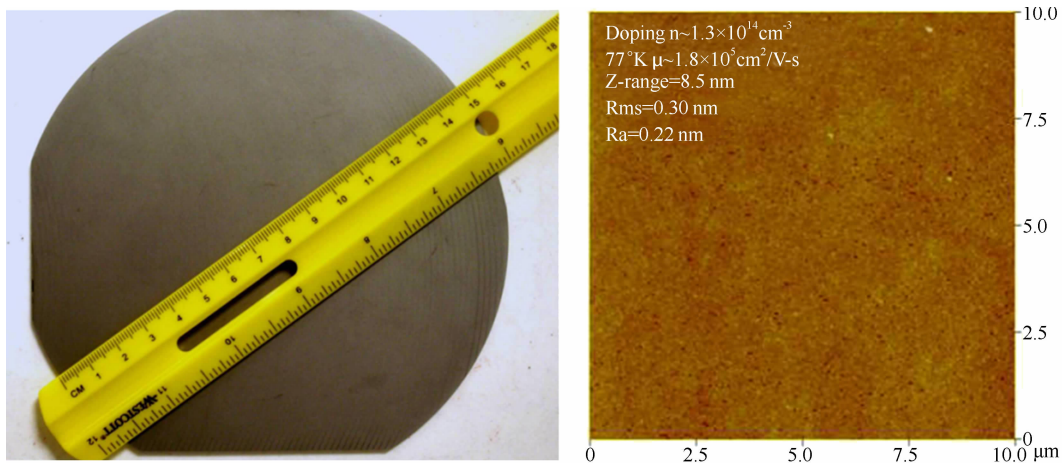


图 1 Galaxy Compound Semiconductors 公司生产的直径为 150 mm 的 InSb 晶片及其表面粗糙度

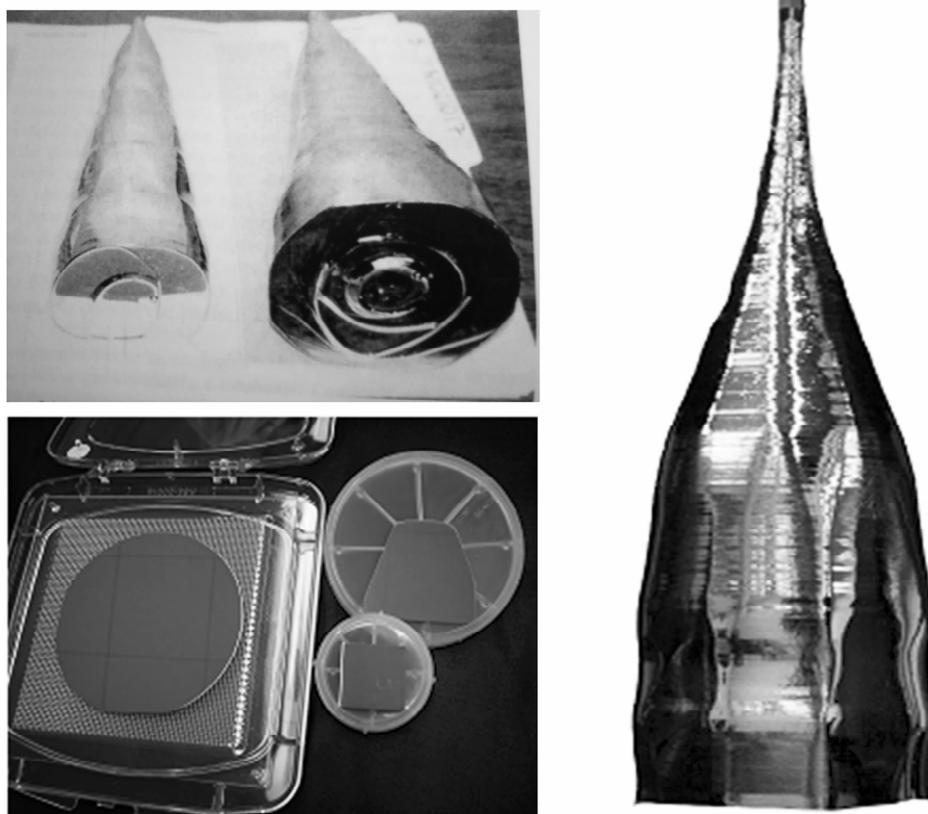


图 2 Firebird 公司生产的 2 in、4 in、5 in InSb 晶体及各类 InSb 晶片

Technology 公司等 (其主要产品见图 1 ~ 图 3) [11-13]。Galaxy Compound Semiconductors 公司和 Firebird 公司已经实现了 5 in InSb 晶片的产品化, 并且正在开展 6 in、8 in 等更大尺寸的 InSb 晶片材料的商业化研究。InSb 晶片材料的快速发展为推动大规格、高性能、低成本的一代 InSb 红外焦平面探测器的发展及应用奠定了良好基础。

2 传统 InSb 红外焦平面探测器的发展

国外 InSb 红外焦平面探测器的研制工作始于 20 世纪 80 年代, 当时针对的主要是红外制导和红外成像等军用领域^[14]。经过几十年的发展, InSb 红外焦平面技术的研究重点涵盖了大阵列、小像元、数字化等多个方面。近些年来, 相关文献报道较少, 且多为进展及产品类报道, 说明它已经成为一种比较成熟的技术。国外主要发达国家非常成功地研发出了 InSb 红外焦平面探测器制作技术, 并且实现了产业化。其中的代表公司包括美国的 Lockheed

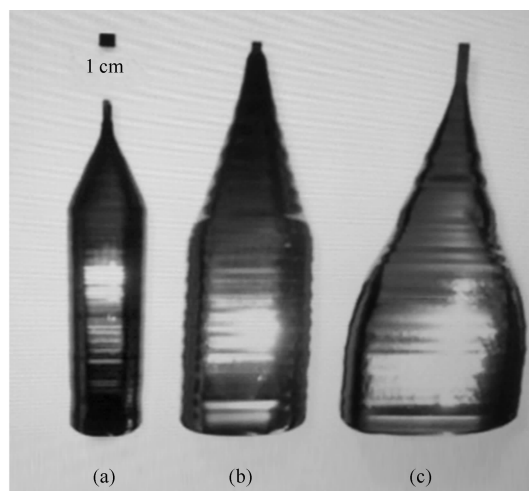


图 3 Wafer Technology 公司生产的 2 in、3 in 和 4 in InSb 晶体

Martin 公司 (Santa Barbara Focalplane)、Raytheon 公司 (Santa Barbara Research Center)、L3 技术公司 (CMC Electronics Cincinnati) 和以色列的 SCD 公司等。探测器阵列规格全面覆盖了从 256×256 元、 320×256 元、 640×512 元、 1024×1024 元到 2048×2048 元及 $4k \times 4k$

的范围。表 1 列出了世界主要厂家的典型产品及其性能参数^[15-28]。

2.1 Lockheed Martin 公司

Lockheed Martin 公司在 1993 年收购 Santa Barbara Focalplane (SBF) 公司后逐步建立起了完整的 InSb 红外焦平面探测器研发生产线。到 20 世纪 90 年代末期基本成熟, 产品阵列规格包括 256×256 元、 320×256 元、 640×512 元和 1024×1024 元等^[15], 像元尺寸涵盖了 $20 \mu\text{m}$ 、 $25 \mu\text{m}$ 和 $30 \mu\text{m}$, 噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 通常小于 20 mK 。NETD 表示红外系统的热灵敏度, 即产生 1 个单位的信噪比所要求的温差量。图 4 所示为 Lockheed Martin 公司研制的像元尺寸为 $20 \mu\text{m}$ 的 640×512 元 InSb 红外焦

平面阵列。

2.2 Raytheon 公司

20 世纪 80 年代末期, Santa Barbara Research Center (SBRC) 成功研制出了 256×256 元 InSb 红外焦平面探测器^[16]。此后, 更大阵列规格的探测器陆续研发成功。1993 年, SBRC 率先研制出了第一台 1024×1024 元的百万像素 InSb 焦平面阵列, 其像元尺寸为 $27 \mu\text{m}$, 暗电流小于 0.1 e/sec , 量子效率可高达 85% 。1994 年, 该阵列在美国亚利桑那州图森(Tucson)国家光学天文台(National Optical Astronomy Observatory, NOAO)的望远镜上得到了验证, 成功应用于“阿拉丁”(ALADDIN)计划^[16]。

SBRC 于 1998 年被 Raytheon 公司收购

表 1 世界主要厂家的典型 InSb 红外焦平面探测器及其性能参数

厂家	型号	阵列规模	像元尺寸 / μm	响应波段 / μm	噪声等效 温差/ mK	工作温度 / K	读出电路
Lockheed Martin	SBF135	256×256	30	1~5.3	14	80	Analog
	SBF180	320×256	30	1~5.3	14	80	Analog
	SBF200	320×256	30	1~5.3	10	80	Digital
	SBF193	640×512	24	1~5.3	14	80	Analog
	SBF191	640×512	20	1~5.3	13	80	Digital
	SBF184	1024×1024	19.5	1~5.3	14	80	Analog
	SBF196	1024×1024	25	1~5.3	17	80	Digital
Raytheon	AE194	256×256	30	1~5.5	14	80	/
	AE195	384×256	30	1~5.5	14	80	/
	AE197	640×512	25	1~5.5	18	80	/
	SB152/206	1024×1024	27	1~5.5	18	80	/
	SB304	2048×2048	25	0.6~5.4	18	80	/
L3	256×256	256×256	30	1~5.3	14	80	Analog
	640×512	640×512	20	1~5.3	13	80	Digital
	1024×1024	1024×1024	25	1~5.3	17	80	Digital
	2048×2048	2048×2048	25	1~5.3	17	80	/
SCD	Blue Fairy320	320×256	20	1~5.4	20	80	Analog
	Sebastian320	320×256	20	3.6~4.9	20	80	Digital
	Mini Gali	480×384	20	3.6~4.9	20	80	Digital
	SNIR	640×512	15	1~5.4	24	80	Digital
	Pelican-D	640×512	15	3.6~4.9	20	80	Digital
	Hercules	1280×1024	15	1~5.4	22	80	Digital
	Blackbird	1920×1536	10	1~5.4	25	80	Digital

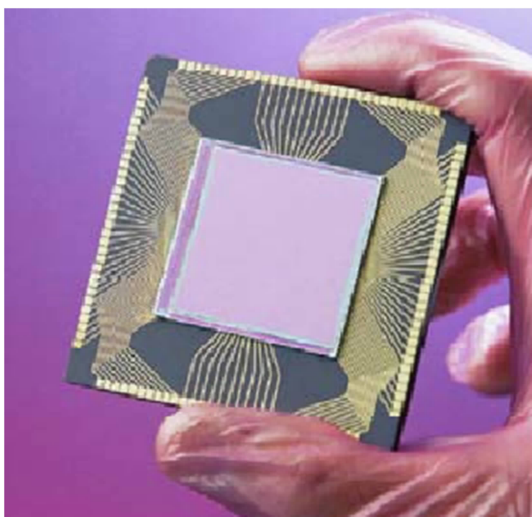


图 4 Lockheed Martin 公司研制的像元尺寸为 $20\ \mu\text{m}$ 的 640×512 元 InSb 红外焦平面阵列

后快速实现了 InSb 焦平面探测器的规模化量产。相关数据显示, 1998~2002 年的年平均产量超过 3000 套, 其 InSb 焦平面探测器代表了 20 世纪末到 21 世纪初的红外制导发展水平^[17], 主要阵列规格涵盖了 256×256 元、 384×256 元、 640×512 元、 1024×1024 元以及 $2\text{k} \times 2\text{k}$ ^[18-21] 等。图 5~图 7 所示为其大规格阵列的典型产品及应用情况。2009 年, Raytheon 公司公开了阵列规格更为巨大的 $4\text{k} \times 4\text{k}$ 及 $4\text{k} \times 24\text{k}$ 拼接焦平面阵列。这是目前规格最大的 InSb 红外焦平面阵列^[18, 22], 如图 8 所示。

2.3 L3 技术公司

CMC Electronics Cincinnati (CMCEC)

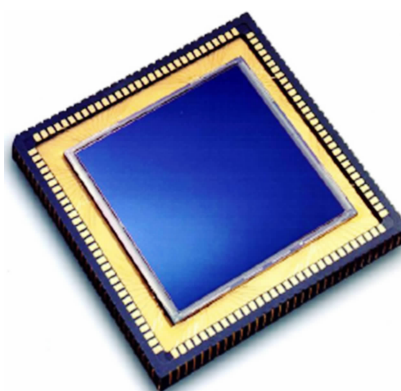


图 5 Raytheon 公司研制的用于 ALADDIN 计划的 $1\text{k} \times 1\text{k}$ InSb 红外焦平面阵列

公司是 L3 技术公司的下属公司, 其研制的各种型号 InSb 焦平面探测器在 20 世纪 90 年代末期基本成熟, 并且实现规模化生产, 合格率超过 99.5%。该公司产品的主要阵列规格包括 256×256 元、 640×512 元、 1280×1024 元以及 $2\text{k} \times 2\text{k}$ ^[23] 等, 其中常用规格的探测器已经获得了广泛应用。图 9 所示为 CMCEC 公司批量生产的 $2\text{k} \times 2\text{k}$ 和 $1\text{k} \times 1\text{k}$ 红外焦平面阵列^[24-25]。图 10 为 $1\text{k} \times 1\text{k}$ 红外探测器的成像图像。图 11 为从 $2\text{k} \times 2\text{k}$ 红外焦平面探测器中获得的各个级别缩放的成像图像^[23]。

2.4 以色列 SCD 公司

1986 年, 以色列的 Rafael 公司与 Elbit 系统公司联合成立了 SCD 公司, 其发展路线以 InSb 红外探测器为主, 兼容非致冷 VO_x 红外探测器等。20 世纪末到 21 世纪初, SCD 公司

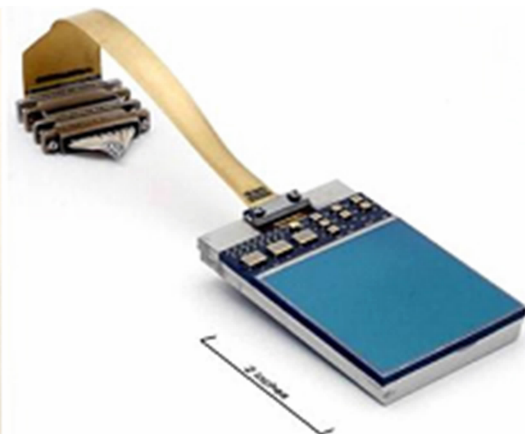
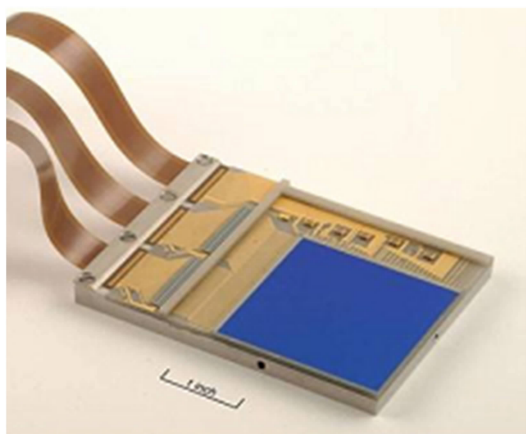


图 6 Raytheon 公司研制的用于天文观测的两款 $2\text{k} \times 2\text{k}$ InSb 红外焦平面阵列 (Orion 和 Phoenix)



图 7 大规格 InSb 红外焦平面探测器收集到的太空红外图像

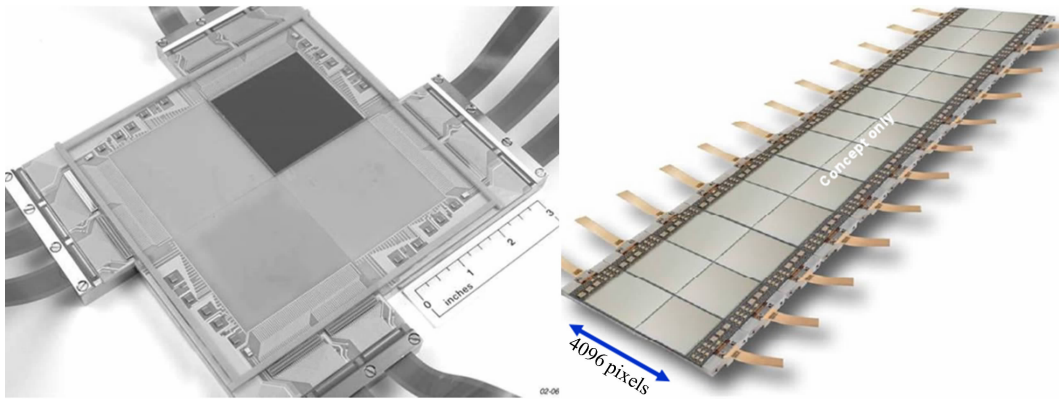


图 8 Raytheon 公司研制的 $4k \times 4k$ 和 $4k \times 24k$ 拼接 InSb 红外焦平面阵列

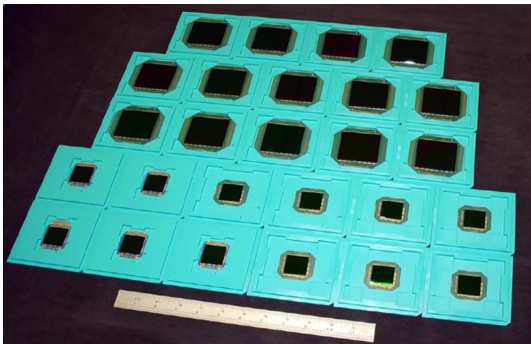


图 9 CMCEC 公司批量生产的 $2k \times 2k$ 和 $1k \times 1k$ 红外焦平面阵列

成功地量产了 320×256 元和 640×512 元等标准规格的 InSb 红外焦平面探测器；2004 年又推出了 480×384 元焦平面探测器；经过多年发展，其探测器阵列规格涵盖了 320×256 元、 480×384 元、 640×512 元、 1280×1024 元以及 1920×1536 元等^[26]。作为全球最大的 InSb 红外探测器制造商，SCD 公司每年生产的各种规格探测器产品的销售

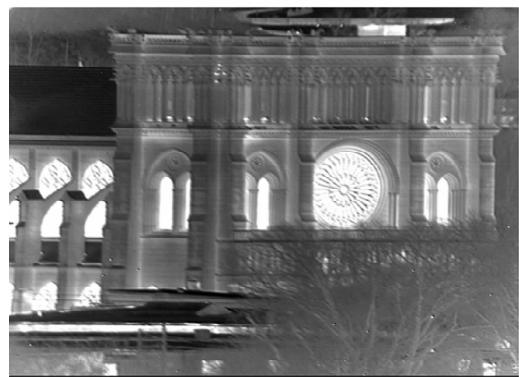


图 10 CMCEC 公司 $1k \times 1k$ 红外焦平面的成像图像量高达 7500 套。2014 年，该公司发售了名

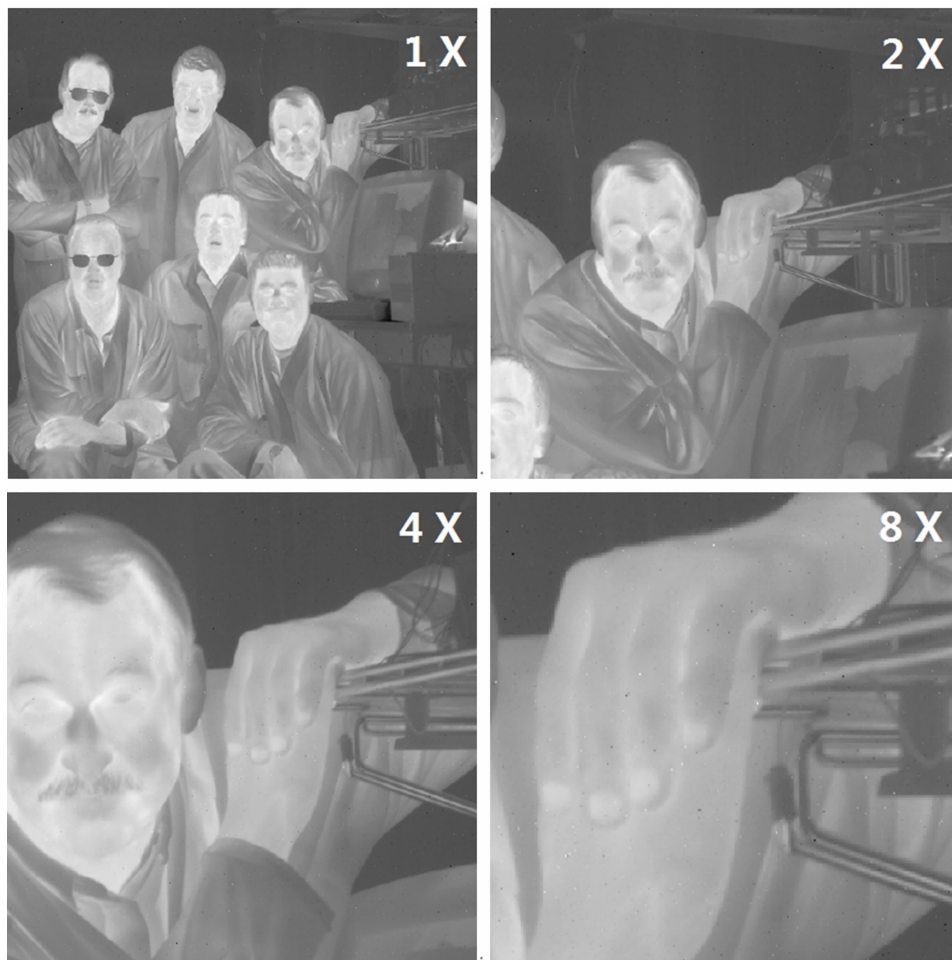


图 11 从 CMCEC 公司 $2k \times 2k$ 红外焦平面探测器中获得的各个级别缩放的成像图像

为 Blackbird 的像元尺寸为 $10 \mu\text{m}$ 的 1920×1536 元数字化 InSb 红外焦平面探测器产品, 其阵列制作重复性很好、缺陷像元少, 像元合格率大于 99.8%; 由于采用数字式读出电路, 大幅提高了电荷处理能力, 有力提升了探测器组件的抗干扰性能, 明显降低了噪声; 77 K 温度下, 暗电流小于 1.3 pA , 量子效率大于 80%。图 12 和图 13 分别为 Blackbird 探测器组件及其高空间分辨率的应用成像图^[27-28]。

3 高温工作 InSb 红外焦平面探测器的发展

随着红外探测器技术的发展, 提高工作温度成为了第三代红外探测器研究的一个重要分支^[29-30]。通过实现探测器的高温工作, 可以有效减小红外探测器的重量、体积、制



图 12 Blackbird 探测器组件

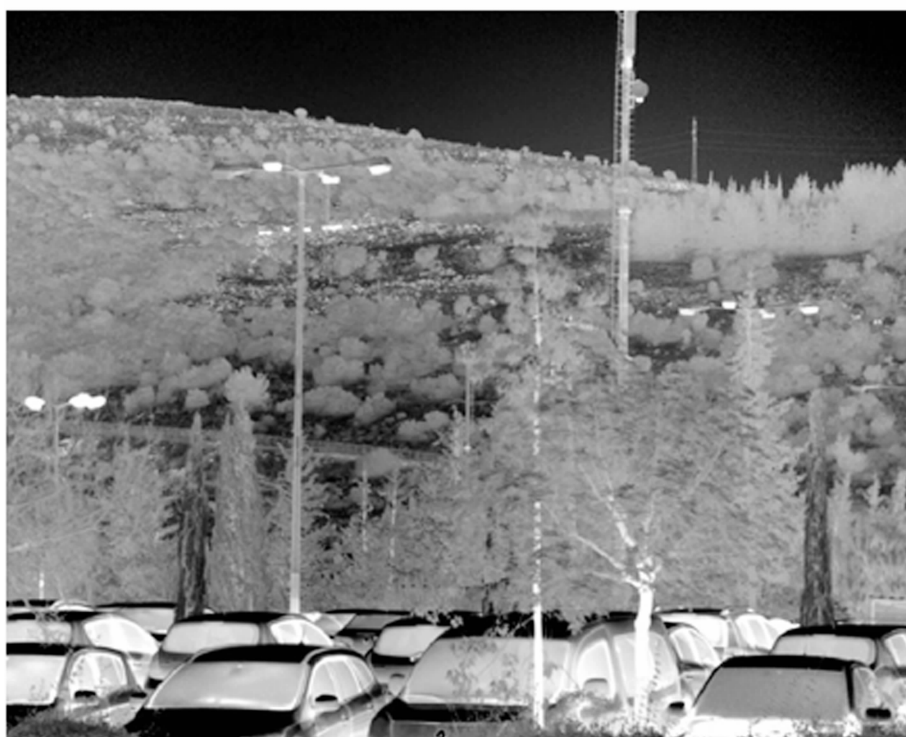


图 13 Blackbird 探测器在 $F/3$ 条件下的成像图像(上图为 2 km 远的条件)

冷能耗和启动时间。这在机载、星载、手持以及制导等应用中颇有价值。此外，提高工作温度，可以增加探测器组件的寿命和可靠性。

传统的 InSb 探测器需要工作在液氮温度下^[31]。当工作温度过高时，探测器的暗电流迅速增大，使得噪声功率变大，信噪比降低，响应时间增长，灵敏度下降^[32]。因此，要想

提高红外探测器的工作温度, 就必须减小其工作时的暗电流。暗电流主要受限于产生-复合电流。为了达到更高的背景限性能, 必须抑制产生-复合电流。以色列、美国和英国等在高工作温度 InSb 红外焦平面探测器研究方面起步较早并开展了大量工作, 目前已经形成了小批量生产能力。表 2 列出了世界主要厂家的典型产品及其性能参数。

3.1 以色列 SCD 公司

为了改进 InSb 材料的性能, SCD 公司早些年前就提出采用分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 技术生长 InSb 薄膜材料。一方面, MBE 技术可以原位制作 pn 结构或其他更加复杂的结构; 另一方面, 它还能够能够在材料外延过程中实现特定元素的原位掺杂, 使得器件制作更加简单, 性能更加优异。该公司开发了在 InSb 衬底上 MBE 生长 InSb 与 InAlSb 的技术, 其主流产品已经采用了这种技术。

3.1.1 MBE InSb 技术

采用原位 MBE 技术在 InSb 衬底上外延制备 pn 结构二极管, 避免了传统 pn 结构注入的损伤。二极管产生-复合 (G-R) 中心的浓度比标准平面 pn 结的要低得多^[32], 可以明显减小暗电流, 提高器件性能, 提高工作温度。从图 14 中可以看出, MBE InSb 红外探测器在 100 K 下的工作性能及稳定性与传统体晶 InSb 红外探测器在 80 K 下工作时相当^[33-34]。图 15 为 Bluefairy 型 256×320 元 MBE InSb 焦

平面探测器在高工作温度下的成像图像^[26,34]。图 16 所示为像元尺寸为 15 μm 的 Mini Pelican-D 型 640×512 元 MBE InSb 红外探测器组件。图 17 为该组件在 95 K 和 110 K 工作温度下的成像图像^[35-36]。

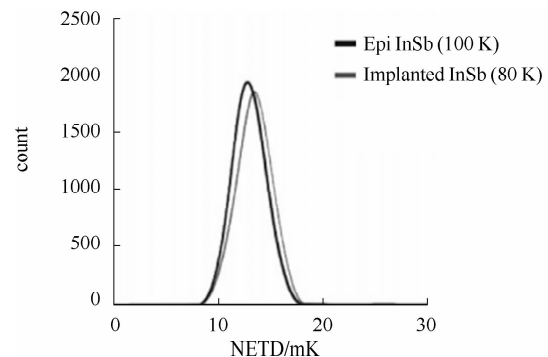


图 14 MBE InSb 红外探测器(100 K)与传统体晶 InSb 红外探测器(80 K)的性能对比

3.1.2 MBE InAlSb 技术

SCD 公司提出了通过采用三元系 InAlSb 材料(在 InSb 中掺入 Al 元素)来进一步减小暗电流和提高器件工作温度的方法。AlSb 的晶格常数 (6.1355 Å) 与 InSb 的晶格常数 (6.4794 Å) 相差较小 (5.3%), 但在 77 K 时, AlSb 的禁带宽度约为 InSb 的 4 倍, 相差巨大。在不引起较大晶格失配的情况下, 适量的 Al 元素掺杂可以极大增加材料的禁带宽度, 减小器件暗电流, 提高工作温度。根据该公司的相关研究, 当加入 3% 的 Al 时, 器件暗电流可以降低 20 倍^[30, 37]。从图 18 中可以看出, InAlSb 焦平面探测器暗电流的半峰宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 值

表 2 世界主要厂家的典型高温工作 InSb 红外焦平面探测器及其性能参数

厂家	型号	阵列规模	像元尺寸 /μm	响应波段 /μm	NETD /mK	工作温度 /K	读出 电路
	Bluefairy (MBE InSb)	320×256	20	1~5.4	17	95	/
	Falcon (MBE InSb)	640×512	25	3.6~5	17	95	/
SCD	Mini Pelican-D (MBE InSb)	640×512	15	3.4~5.4	20	95	/
	Hot Pelican-D (InAlSb)	640×512	15	3.6~4.2	/	110	Digital
	Hot Hercules (InAlSb)	1280×1024	15	3.6~4.2	/	110	Digital
QinetiQ	256×256 (InAlSb)	256×256	40	3~5	<15	130	/
	1024×768 (MBE InSb)	1024×768	26	3~5	<15	>80	/

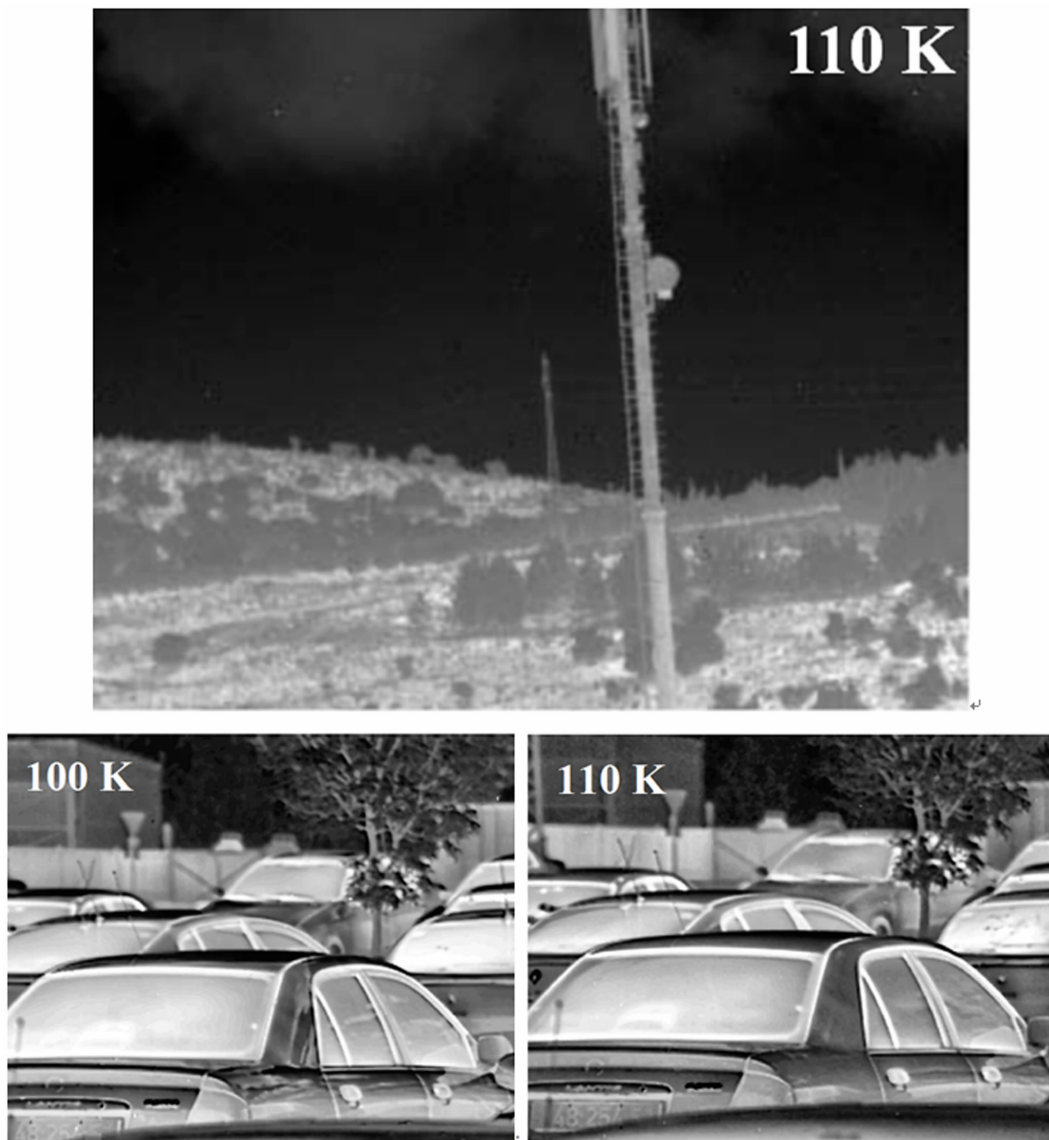


图 15 Bluefairy 型 256×320 元 MBE InSb 焦平面探测器在高工作温度下的成像图像



图 16 像元尺寸为 $15 \mu\text{m}$ 的 Mini Pelican-D 型 640×512 元 MBE InSb 红外探测器组件

仅为峰值暗电流的 $12\% \sim 13\%$ ，并且仅为 MBE InSb 焦平面探测器峰值暗电流的 $6\% \sim$

7% [34,37-39]。2005 年，SCD 公司成功研制出了像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$ 的 320×256 元 InAlSb 焦平面探测器。与同等性能的传统 InSb 焦平面探测器相比，其工作温度由 77 K 提升至 100 K ，并成功用于手持式红外相机。2006 年，探测器阵列的规格扩大到了 480×384 元，其截止波长为 $4.2 \mu\text{m}$ ，工作温度能够达到 120 K 。随后，SCD 公司持续发展了阵列规格更大的 InAlSb 红外焦平面探测器，在该应用研究领域处于领先地位，其探测器的工作温度有望进一步提高。图 19 为 256×320 元 InAlSb 焦平面探测器在 100 K 和 110 K 工作温度下的成像

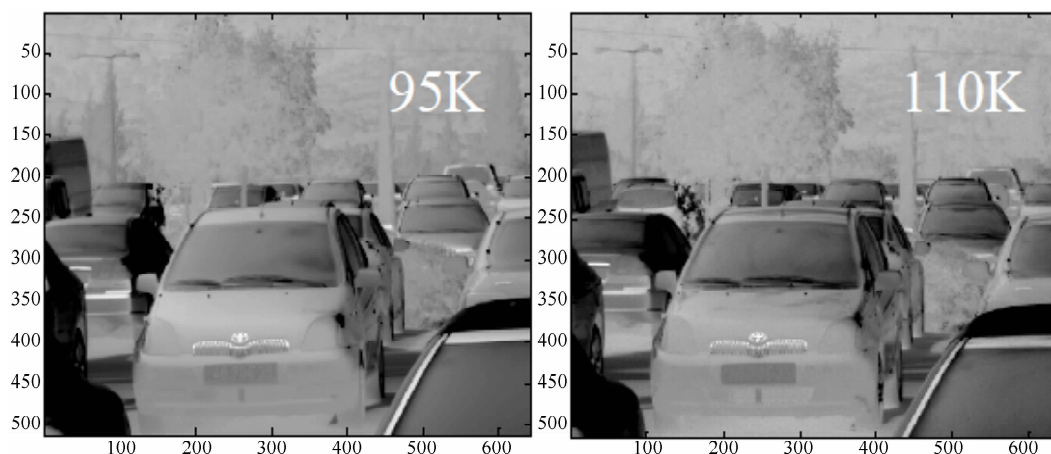


图 17 Mini Pelican-D 型红外探测器在 95 K 和 110 K 工作温度下的成像图像

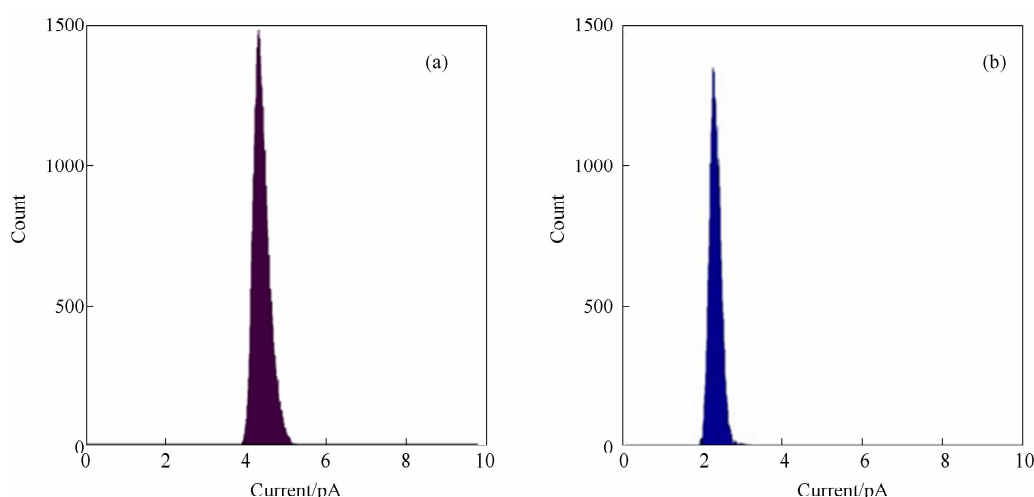


图 18 MBE InSb (a) 和 InAlSb (b) 焦平面探测器像元在 -168 mV 偏压和 90 K 温度下的暗电流分布图 ($\lambda_c = 5 \mu\text{m}$): (a) 中峰值电流为 4.2 pA, FWHM=0.4 pA; (b) 中峰值电流为 2.16 pA, FWHM=0.28 pA

图像^[26,34]。图 20 所示为像元尺寸为 $15 \mu\text{m}$ 的 Hot Hercules 型 1280×1024 元 InAlSb 红外探测器组件。

3.2 英国 QinetiQ 公司

20 世纪 90 年代, 英国开展了在高掺杂 InSb 衬底上 MBE 生长 InSb 与 InAlSb 的工作, 并通过原位掺杂制备了 InSb 与 InAlSb 焦平面探测器。2003 年, QinetiQ 公司成功研发出了性能良好、工作温度高 (130 K) 的 256×256 元 InAlSb 红外焦平面探测器。图 21 为该探测器在 80 K、100 K 和 130 K 下的成像图像^[40]。近年来, 该公司采用 MBE 技术研制出了像元尺寸为 $26 \mu\text{m}$ 的 1024×768 元大规格 InSb 红外焦平面探测器, 其 NETD 值约为 12 ~

15 mK, 性能优良, 已成功应用于 Albion 相机。

4 结束语

历经多年发展, InSb 红外焦平面探测器产品涵盖了大阵列、小像元、数字化以及高温工作等多个方面, 很好地满足了第三代红外探测器及红外/光电系统小型化、轻型化、低功耗和高可靠性的发展要求。数字化读出电路将模拟-数字转换器集成在了读出电路芯片上, 大幅提高了电荷处理能力, 明显提升了组件的抗干扰能力, 降低了噪声, 实现了系统级的更高性能。采用 MBE 技术制备的特殊结构 InSb 探测器具有较小的暗电流、较好的温度稳定性、更广泛的响应波段以及更为



图 19 256×320 元 InAlSb 焦平面探测器在 100 K 和 110 K 工作温度下的成像图像



图 20 SCD 公司生产的像元尺寸为 $15\ \mu\text{m}$ 的 Hot Hercules 型 1280×1024 元 InAlSb 红外探测器组件

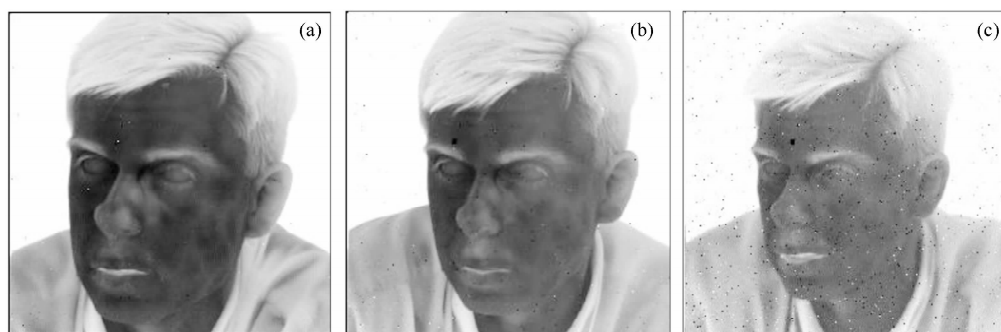


图 21 QinetiQ 公司生产的 256×256 元 InAlSb 焦平面探测器的成像图像:(a) 80 K; (b) 100 K; (c) 130 K

简便的器件制备工艺, 已经成为今后 InSb 红外焦平面探测器的重要发展方向, 以适应高工作温度、快响应速度、宽响应波段、双色及低成本探测器的应用发展趋势。未来, InSb 红外焦平面探测器将朝着工作温度更高、像元尺寸更小的方向继续发展。

参考文献

[1] 彭焕亮. 红外焦平面热成像技术的发展 [J].

激光与红外, 2006, 36(Z): 776-780.

[2] 马京立. 光伏型 InSb 红外焦平面探测器的性能研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.

[3] Hamidreza S. Optimisation of Cooled InSb Detectors [J]. *III-Vs Review*, 2004, 17(7): 27-31.

[4] 柏伟, 庞新义. 4 英寸高质量 InSb 晶体生长研究 [J]. *红外*, 2018, 39(9): 8-13.

[5] 付安英, 马睿, 薛三旺. 高灵敏度室温锑化铟红外探测器研制 [J]. *现代电子技术*, 2007, 30(2): 182-183.

- [6] 张雪, 梁晓庚. 红外探测器发展需求 [J]. 光电与控制, 2013, **20**(2): 41-44.
- [7] 王利平, 孙韶媛, 王庆宝, 等. 红外焦平面探测器的读出电路 [J]. 光学技术, 2000, **26**(2): 122-125.
- [8] Lucy Z, Meimei T, Leslie A. Developing High-performance III-V Superlattice IRFPAs for Defense: Challenges and Solutions [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76601E.
- [9] 方家熊. 红外探测器技术的进展 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2003.
- [10] 何力. 先进焦平面技术导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [11] Flint P. CMP Process Comparison for 150 mm Larger Area InSb (111) B Focal Plane Array Substrates [C]. *SPIE*, 2009, **7487**: 74870C.
- [12] Ian R G. Progress in III-V Materials Technology [C]. *SPIE*, 2004, **5621**: 58-65.
- [13] Mark J F. Scaling up Antimonide Wafer Production: Innovation and Challenges for Epitaxy Ready GaSb and InSb Substrates [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 801211.
- [14] 赵玉红. InSb 红外焦平面探测器结构优化研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2016.
- [15] 雷胜琼. 昆明物理所铋化铟红外材料、器件研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(Z): 15-16.
- [16] Fowler A M, Gatley I, McIntyre P. ALADDIN: the 1024 × 1024 InSb Array-design Description and Results [C]. *SPIE*, 1996, **2816**: 150-160.
- [17] Mark A G, Larry J H, Robert B J. Flexible 640 × 512 InSb FPA Architecture [C]. *SPIE*, 1997, **3061**: 140-149.
- [18] High Performance Large Infrared and Visible Astronomy Arrays for Low Background Applications: Instruments Performance Data and Future Developments at Raytheon [C]. *SPIE*, 2007, **6660**: 66600B.
- [19] Hoffman A W, Corrale E, Love P J. 2K × 2K InSb for Astronomy [C]. *SPIE*, 2004, **5499**: 59-67.
- [20] Hoffman A W, Love P J, Ando K J. Large Infrared and Visible Arrays for Low Background Applications: an Overview of Current Developments at Raytheon [C]. *SPIE*, 2004, **5499**: 240-249.
- [21] 钟轶. 空间遥感用 InGaAs 探测器低噪声电路系统设计 [J]. 激光与红外, 2009, **39**(5): 514-517.
- [22] Gert F, James W B. Review of the State of Infrared Detectors for Astronomy in Retrospect of June 2002 Workshop on Scientific Detectors for Astronomy [C]. *SPIE*, 2003, **4841**: 839-852.
- [23] Grelner M. State of the Art in Large Format IR FPA Development at CMC Electronics Cincinnati [C]. *SPIE*, 2003, **5074**: 60-71.
- [24] Davis M, Devitt J, Greiner M. Advanced FPA Technology Development at CMC Electronics [C]. *SPIE*, 2004, **5406**: 62-73.
- [25] Rawe R, Timlin A, Davis M. Advanced Large Format InSb IR FPA Maturation at CMC Electronics [C]. *SPIE*, 2004, **5563**: 152-162.
- [26] Neshor O, Klipstein P C. High Performance IR Detectors at SCD Present and Future [C]. *SPIE*, 2005, **5957**: 59-68.
- [27] Gershon G, Albo A, Eylon M. 3 Mega-pixel InSb Detector with 10 μm Pitch [C]. *SPIE*, 2013, **8704**: 870438.
- [28] Gershon G, Albo A, Eylon M. Large Format InSb Infrared Detector with 10 μm Pixels [EB/OL]. <http://www.scd.co.il>, 2014.
- [29] Cabanski W. Status of 3rd Generation Focal Plane Array IR Detection Modules at AIM [C]. *SPIE*, 2003, **5074**: 72-82.
- [30] 陈刚, 孙维国, 吕衍秋. 高工作温度 InAlSb 红外探测器的研究进展 [J]. 红外, 2016, **37**(2): 1-6.
- [31] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择 [J]. 红外技术, 2013, **35**(1): 1-8.
- [32] Shtrichman I. High Operating Temperature Epi-InSb and XBn-InAsSb Photodetectors [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83532Y.
- [33] 刘铭, 程鹏. InSb 薄膜分子束外延技术研究 [J]. 激光与红外, 2013, **43**(11): 1256-1259.

- [34] Glozman A, Harush E, Jacobsohn E. High Performance InAlSb MWIR Detectors Operating at 100 K and Beyond [C]. *SPIE*, 2006, **6206**: 62060M.
- [35] 邓功荣, 赵鹏. 铟基高工作温度红外探测器研究进展 [J]. *红外技术*, 2017, **39**(9): 780–784.
- [36] Markovitz T, Pivnik I, Calahorra Z. Digital $640 \times 512/15 \mu\text{m}$ InSb Detector for High Frame Rate, High Sensitivity and Low Power Applications [C]. *SPIE*, 2014, **8012**: 80122Y.
- [37] Klin O, Klipstein P, Jacobsohn E. Molecular Beam Epitaxy Grown $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}/\text{InSb}$ Structures for Infrared Detectors [J]. *Vac Sci Technol B*, 2006, **24**(3): 1607–1612.
- [38] Klipstein P, Calahorra Z, Zemel A. 3rd Generation Infrared Detector Program at SCD [C]. *SPIE*, 2004, **5406**: 222–229.
- [39] Philip R C. The Thermal Emission Imaging System (Themis) for the Mars 2001 Odyssey Mission [J]. *Space Science Reviews December*, 2004, **110**: 85–130.
- [40] Ashley T, Burke T M, Emeny M T. Epitaxial InSb for Elevated Temperature Operation of Large IR Focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 2003, **5074**: 95–102.