文章编号:1001-5078(2016)04-0394-06　　·综述与评论·

InSb 红外焦平面探测器现状与进展

牟宏山
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘　要:红外焦平面探测器技术是一种通过摄取景物热辐射分布图像,并将其转换为人眼可见图像的技术。近年来红外探测器技术发展迅速,在军事、工业、农业、医学等各领域显示出越来越重要的应用。本文对锑化铟红外焦平面探测器的应用及发展情况进行了分析,并对其发展前景进行了展望。

关键词:锑化铟;焦平面;红外探测器
中图分类号:TN215　　**文献标识码:**A　　**DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.04.003

Status and progress of InSb IRFPA detector

MU Hong-shan
(North China Reasearch Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Infrared focal plane array (IRFPA) detector technology is a technique which converts the thermal radiation of the target into the visible image. In recent years, IRFPA detector has rapidly developed, and it has more and more important applications in various fields. The applications and development of InSb IRFPA are introduced, and the potential applications and development prospect are discussed.

Key words: InSb; focal plane array (FPA); infrared detector

1　引　言

1952 年,H. H. Welker 首次报道了 InSb Ⅲ - Ⅴ族化合物半导体材料性质,此后,越来越多的国家和机构开始注意到 InSb 独特的性质及其在红外探测器领域的应用前景。

InSb 探测器由于是Ⅲ - Ⅴ族半导体材料,稳定性较好,性能不随工作时间和存储时间发生变化。这些特性使得 InSb 探测器的成像系统调试完成后,在用户使用过程中不需要时常进行采样修正探测器的工作,在武器系统中不需要增加额外采样机构,使武器系统更加简单可靠。

由于 InSb 材料缺陷少(EPD < 50/cm^2)而 MCT 材料缺陷较多(EPD < 10^5/cm^2),所以 InSb 探测器的暗电流较低,器件响应的线性度也较好,可以用于 F 数较大的武器系统,例如 F 数 5.8 的红外探测器系统只能采用 InSb 探测器才能保证较好的灵敏度。这对武器系统非常重要,可以降低武器系统的光学口径,提高光学系统的焦距,从而探测距离更远。

经过几十年的发展,国外主要发达国家和地区如美国、英国、俄罗斯、加拿大、以色列和日本等已经很好地掌握了 InSb 晶体生长和探测器加工技术,探测器规模从 128 × 128、320 × 256 到 2 K × 2 K、4 K × 4 K 以及 6000 × 1、2048 × 16 等实现全面覆盖,工作温度提高到 95 K、110 K、130 K 等,产品广泛应用于

作者简介:牟宏山(1976 -),男,高级工程师,主要从事红外焦平面探测器研究。E-mail: sandymhs@163.com
收稿日期:2015-07-20;**修订日期:**2015-08-25

红外跟踪、制导、热成像、监视、侦察、预警和天文观察等军事与民用红外系统[1-2]。

2 InSb 探测器的应用

InSb 红外探测器主要适用于高背景工作条件和低背景天文学应用,包括红外制导、热成像、红外搜索跟踪、无人机、导弹预警系统、地基和天基红外天文学等。

2.1 弹道导弹防御中的应用

BMD(弹道导弹防御)计划是针对敌方导弹在发射助推、大气层外弹道飞行和再入大气层这三个阶段的不同特点,采取不同的方法建立多层次的全程拦截体系。它包括监视来袭导弹的探测与跟踪、导弹的鉴别与识别,并实施对导弹的拦截与打击。

在导弹初始发射阶段需对全球进行监视与跟踪,这主要依靠空间的预警卫星来完成。在卫星上携带一大型红外望远镜,在望远镜焦平面上的探测器探测与搜索导弹的火焰信息,从而对导弹入侵进行预警。预警卫星早期使用 PbS 线列探测器,目前在轨道上工作的 DSP(防御支持计划)卫星的第三代是 6000 元 InSb 线列探测器。

导弹进入大气层段,主要采用中波与长波 IRFPA,美国国家导弹防御 NMD 拦截系统(称为陆基拦截器)为了拦截敌方射程在 600 至 3500 km 的中程弹道导弹重点部署陆基的战区高空区域防御系统(THAAD)和海基的海军全战区导弹防御系统(NTW)。由美国 Lockheed Nartin 公司主承包的 THAAD 地空导弹既可用于在大气层内高空(约 40 km)拦截敌弹,又可用于大气层外高空(最高 150 km)拦截目标,弹头的动能杀伤拦截器(KKV)上装有用于捕获和跟踪目标的中波红外导引头,该导引头使用了 512×512 InSb FPA 器件,在飞行末端探测、跟踪、识别和拦截敌弹。

如果突破了高空防御,而进入大气层的来袭弹道导弹,美国有两种使用红外 FPA 的低空导弹防御系统。一种是海洋区域防御系统,该系统以"宇宙盾"级战舰为平台,其拦截手段为海军"标准 II-4A"导弹,其红外导引头采用了 256×256 InSb FPA。另一种是美国和以色列联合研制的"箭-2"(Arrow-2)导弹防御系统,该导引头工作在 3.3~3.8 μm 中红外波段,采用 256×256 InSb FPA。

2.2 制导探测应用

InSb 红外探测器由于其探测性能高、工作稳定、积分时间连续可变、探测器规模及像元尺寸覆盖广等优势,在中波制导方面有着不可比拟的优势,广泛应用在多个型号。表 1 描述了 InSb 探测器制导型号应用情况。

表 1 InSb 探测器制导型号应用情况[3]

Tab. 1 InSb detector guidance applications

国家	应用型号	探测器规格
美国	AIM-9X 响尾蛇空空弹	128×128
	FIM-92E、F 毒刺便携弹	128×128
	RIM-116B 拉姆舰载防空反导弹	128×1
	THAAD 萨德末端高空防御反导弹	256×256
欧洲	KEPD 动能侵彻毁灭者巡航导弹	256×256
	AASM 模块化空地导弹	320×240
	ASRAAM 近程空空弹	128×128
	MICA 拦截与空战导弹	64×1
	IRIS-TAAM 彩虹空空导弹	128×4
俄罗斯	P-27T 系列中远程拦射空空导弹	多元
	P-73 系列空空导弹	2 元
	П-21、22(白蚁)反舰导弹	
	П-120(孔雀石)中程反舰导弹	
	"针"系列便携式防空导弹	
以色列	"怪蛇"-4(Python)空空导弹	
	"怪蛇"-5(Python)空空导弹	256×256
	箭-2 型反导导弹	256×256
	"长钉"反坦克导弹	128×128

(1)红外制导的空-空导弹

目前世界上已发展的新一代红外成像制导空-空导弹,有法国装在"幻影 2000"、"阵风"等各种机型的"MICA"导弹,德国装在"狂风"EF2000 机型的"IRIS-T"导弹、以色列装在"幼狮""幻影""F-15"和"F-16"等机型上的以色列的"怪蛇 V"和响尾蛇。其中"怪蛇 V"采用 320×240 元双波段 InSb 凝视焦平面探测器[4];美国响尾蛇(Sidewinder)AIM-9X 采用由休斯公司研制的128×128 InSb FPA 探测器;英国 ASRAAM 采用休斯公司研制的 128×128 InSb FPA 探测器;德国 IRIS-T空空导弹采用 InSb 128×4 FPA 探测器、南非的 A-DARTER"敏捷飞镖"空空导弹采用 384×288 InSb FPA 探测器。

(2)巡航导弹

德国 EADSLFK 和瑞典 BOFORS 合资的 Tranrus GmbH 公司于 1997 年开发几百公里远距离的 KEPD-350 巡航导弹,导弹以各种高度飞行,可离地面很低的高度并有很高的飞行速度,要求 InSb FPA 的积分时间连续可调和高的量子效率,导弹的

红外寻的器采用256×256 InSb FPA探测器。

(3)便携式防空导弹

便携式导弹自1969年首次实战以来,在中东战争、越南战争和20世纪80年代的阿富汗战争中击落了大量飞机和直升机。使得在科索沃和阿富汗反恐战争中,空袭飞机需保持在5 km以上进行空袭作战,主要是担心便携式导弹的攻击。当前便携式导弹已进入第四代并开始装备部队,它采用InSb焦平面阵列导引头制导。美国的"毒刺"系列导弹的最新型产品就是采用InSb 128×128红外探测器。它具有高精度抗干扰和提高对抗无人机和巡航导弹的效能,具有全向攻击能力和很好的抗电子干扰能力。

(4)反坦克导弹

美国AAWS-M名为"坦克破坏者"中程反坦克导弹采用62×58 InSb FPA;以色列的"长钉"反坦克导弹采用128×128 InSb FPA。

2.3 红外搜索跟踪中的应用

红外热像仪是军事应用中最广泛的红外系统,可适合陆、海、空、天各兵种。320×256、640×512、1024×1024、TDI FPA等规格的凝视型InSb FPA被选定在多款战机如F-22、V-12和F-18上使用。表2是InSb焦平面探测器在搜索跟踪系统应用情况。

表2 InSb焦平面探测器在搜索跟踪系统应用情况

Tab. 2 InSb FPA detector applications of search and tracking system

国别	公司	型号和名称	红外探测器
美国	Lockheed Martin导弹和火控公司	AN/AAQ-13/-14LANTIRN、Sharpshooter	InSb 640×512
		AN/AAQ-30目标瞄准系统(TSS)	InSb 640×512
		AN/AAQ-33 Sniper先进瞄准吊舱(ATP)	InSb 640×512
		Gunship多光谱传感器系统(GMS2)	InSb 640×512
	前视红外系统公司	BRITE StarⅡ对地攻击集成系统	InSb 640×512
		AN/ASQ-228先进瞄准前视红外系统	InSb 640×512
		StarSAFIREⅢ、Sea Star SAFIREⅢ转塔	InSb 640×480
	Raytheon空间和机载系统公司	AN/AAQ-27、AN/AAQ-29系统	InSb 640×480
		AN/AAS-5多光谱瞄准系统(MTS-A)	InSb 640×480
		Global Hawk集成传感器(ISS)	InSb 640×480
	Goodrich公司	DB-110双波段侦察系统	InSb 512×484
美国	成像传感器和系统公司	V-14M多传感器机载系统	InSb 320×240
以色列	Controp精密技术有限公司	稳定多传感器转塔(MSSP-3)	InSb 320×240
	光电Elop有限公司	小型多传用途先进稳定系统(COMPASS)	InSb 320×256
	Rafael武器研制部导弹分部	Reccelite侦察吊舱	InSb 640×512
加拿大	L-3 WESCAN公司	MX-15(AN/ AAQ-35)传感器转塔	InSb 640×480
		MX-20(AN/ASX-4)多传感器转塔	InSb 640×480
		Ⅱ型步进凝视转塔(SST)	InSb 640×512

(1)机截热像仪

美国TAMAM公司为"探索者"和"捕食者"等型号的无人机提供320×240 InSb FPA的红外摄像机。CONTROP精密技术公司研制适用多种飞机平台的采用320×256 InSb FPA探测器的FOX-450 Z型红外摄像机。美国Raytheon空间和机截系统公司生产海上巡逻机装备的"夜间猎手"有AN/AAS-44,AN/AAS-49、AN/AAS-51型红外/光电转塔,其中AN/AAS-44(V)型为Hellfire导弹和激光制导炸弹进行目标指示。AN/AAS-51A改进型采用640×480 InSb FPA。加拿大LS Wescam公司研制了基于640×480 InSb FPA的MX-15和MX-20大尺寸IRFPA。MX-20是海军陆战队AH-12直升机目标瞄准系统的核心部件,并具有很强的识别能力。洛克希德·马丁公司交付的首套光电火控目标瞄准系统(TSS)是为美国海军陆战队的AH-1Z"眼镜蛇"直升机研制的多传感器火控系统(AN/ AAQ-30"鹰眼"),采用640×512规格的InSb红外焦平面探测器,它是目前世界上先进的光电火控目标瞄准系统,代表

了未来光电火控系统的发展方向。

(2)舰载热像仪

美国海军为增强反巡航导弹能力正在研制一种舰载 IRIS 系统。采用 640 × 480 InSb FPA 探测器，系统扫描视场 360° × (2° ~ 2.5°)，通过红外信号梯度变化可探测刚飞出海面的巡航导弹，将导弹航迹方向和仰角等信息传给舰载宇宙盾作战系统和光电干扰系统在连续搜索新出现目标的同时，该系统将继续跟踪已经识别的目标。

(3)地面热像仪

法国 CEDIP 红外公司生产两种 IRFPA 系列远距离红外摄像机，最初采用 320 × 240 InSb FPA，后来改用 640 × 512 InSb FPA。摄像机系统能在 5 ~ 25 km 范围内对目标探测，自动选择所需的镜头焦距，并可控制镜头焦距在 25 mm，80 mm 和 320 mm 三档变化。法国的 Jade 热像仪采用 640 × 512 InSb FPA。以色列 Elop - Electro optic Industries 公司生产的 CRYSTAL 红外热像仪采用 320 × 256 InSb FPA 探测器，用于机载或舰载，对目标进行搜索和夜间的瞄准。美国 Raytheon 公司的 Radiance PM 型红外摄像机采用 256 × 256 InSb FPA 探测器，另一种 MAG2400 型远程热像仪采用 320 × 240 InSb FPA 探测器，它是单兵携带的高灵敏度摄像机。

2.4　天文探测应用

在地基和天基天文应用中，红外波段 1 ~ 5 μm 内有两种探测器材料进行竞争——InSb 和 HgCdTe。而 InSb 是一种简单稳定的化合物半导体材料，在 L 和 M 波段大气窗口有广泛的应用[5]。表 3 是部分卫星 InSb 红外探测器应用情况。

InSb 在天文方面的应用有：2002 年，日本发射红外成像勘测仪采用 512 × 512 InSb 焦平面探测器；在陆基天文望远镜中，美国 1996 年报道了 1024 × 1024 InSb FPA (ALADDIN)；美国宇航局 James Webb 空间望远镜(JWST)采用了 2048 × 2048 InSb FPA[6]；雷神公司的宽视场成像器(NEWIRM)采用了 2048 × 2048 InSb FPA；Kitt Peak 和 CerroTololo 4m 级望远镜上的 NOAO NEWFIRN 1 ~ 2.5 μm 红外波段成像器采用的是 4 K × 4 K InSb FPA[7]；European Southern Observatory VLT 的 CRIRES 低温高分辨率红外光谱仪(1 ~ 5 μm 红外波段)使用了 5 个 1024 × 1024 InSb FPA(ALADDIN)[8]等。

2003 年 SPIE 报道，Rochester 大学，Raytheon，NASA Ames Research Center 合作研发测试 InSb 近红外器件，应用于 Hubble Space Telescope 接替者 NGST，项目需求 20 只 2 K × 2 K InSb 器件，报道中先测试了 SB - 226 InSb SCA416431 器件(1K × 1K)，该器件所使读出电路和 InSb 芯片不是研制样品中性能最好的，测试结果显示该器件已经满足和超过大部分相机要求指标。研究成果表明，InSb 器件是 1 ~ 5 μm 地基或天基高灵敏度、低背景、低噪声应用的最佳选择。

表 3　部分卫星 InSb 红外探测器应用情况[9]

Tab. 3 InSb FPA detector satellite applications

卫星类别	国家	卫星	载荷	波段/μm
航天遥感		MTI	MTI	0.86 ~ 5.07
极轨气象	USA	NOAA - 18	AVHRR/3	3.55 ~ 3.93
			HIRS/4	3.76 ~ 4.57
	ESA	Metop - A	IASI	3.62 ~ 5.0
静止轨道气象卫星	USA	GOES - 13	Imager	3.73 ~ 4.07
			Sounder	3.74 ~ 4.57
	JP	MTSAT - 2	JAMI	3.5 ~ 4.0
	ESA	MSG - 2	SEVIRI	3.48 ~ 4.36
资源环境	USA	LAND - SAT - 7	ETM +	1.55 ~ 1.75
				2.09 ~ 2.35
			AATSR	1.58 ~ 1.64
				3.55 ~ 3.93

红外探测器在航天应用中：短波方面应用以 InGaAs 和 HgCdTe 为主，少数使用 InSb 探测器，InGaAs 逐渐替代 HgCdTe；中波应用方面几乎全部为 InSb 探测器——中国除外(全部为 HgCdTe)；长波应用方面全部为 HgCdTe 探测器。

3　国外 InSb 探测器厂家及发展情况

InSb 探测器主要供应商包括以色列 SCD 公司，美国 Lockheed Martin 公司，美国 Raytheon 公司，美国 FLIR 公司等。表 4 是世界主要 InSb 探测器厂家典型产品情况。

从 20 世纪 80 年代初就开始，美国报导了大量 InSb FPA 的研制结果，主要有 32 × 1、128 × 1、512 × 1、64 × 64、64 × 58、128 × 128、256 × 256、320 × 256、640 × 512、1 K × 1 K、2 K × 2 K 等规格产品。20 世纪 80 ~ 90 年代，美国研制 InSb 的厂商主要有：Hughes、Cincinati Electronics、Raython、Amber、General Eletric、Northrop 和 Santa Barbara Focal plane Co. 等。1997 年，Raython、Hughes (SBRC)、Hughes (Magmavox) Mahwah、Amber 和 Texas 仪器公司重组合并后诞生了 RIO (Raytheon

Infrared Operations)公司、20 世纪 90 年代末开始，通过收购等手段，美国研制 InSb 探测器的公司整合为三个主要厂家：RIO、Cincinat Electronics[10] 和 Lockhead Martin 的 Santa Barbara Focal Plane Co.

表 4 世界主要 InSb 探测器厂家典型产品

Tab. 4 Products of the world's major InSb FPA detector manufactures

厂家	型号	阵列规模	响应波段/μm	像元尺寸/μm	NETD/mK	工作温度/K	成结情况
Raytheon	SB304	2K×2K	0.6~5.4	25	18	80	注入台面结
	SB152/206	1K×1K	1~5.5	27	18	80	
	AE197	640×512	1~5.5	25	18	80	
	AE195	384×256	1~5.5	30	14	80	
美国 Lockheed Martin	SBF196	1024×1024	1~5.3	25	17	80	注入平面结
	SBF193	640×512	1~5.3	24	14	80	
	SBF200	320×256	1~5.3	30	13	80	
美国 CMC	2K×2K	2K×2K	1~5.3	25	17	80	扩散台面结
	1K×1K	1K×1K	1~5.3	25	17	80	
	640×512	640×512	1~5.3	20	13	80	
	256×256	256×256	1~5.3	30	14	80	
以色列 SCD	TDI2K×16	2048×16	1~5.4			80	外延 InSb 台面结
	Blackbird	1920×1536	1~5.4	10	25	80	
	Hercules	1280×1024	1~5.4	15	22	80	
	SNIR	640×512	1~5.4	15	24	80	
	Falcon	640×512	3.6~5	25	17	95	
	Bluefairy	320×256	1~5.4	20	17	95	
	H-Hercules	1280×1024	3.6~4.2	15	20	110	外延 InAlSb 台面结
	HotPelican	640×512	3.6~4.2	15	20	110	

SCD(SEMI CONDUCTOR DEVIES)，1986 年由以色列当时的 Elbit 系统和 Rafael 公司合伙成立。SCD 公司每年向全球市场至少提供 7500 套各种规格的探测器产品，其产品规格由 320×256 发展到 640×512、1280×1024、1920×1536，中心间距由 10~30 μm，读出电路模拟输出发展为数字化输出，器件类型则由体晶 InSb 发展到外延 InSb 和 XBn-InAlSb，这些都是为了不断满足系统小型化、轻型化、低功耗和可靠性的发展要求[11-12]。

法国 Sofradir 公司 2010 年左右收购了其国内 InSb 探测器制造商，也开始提供 InSb 探测器产品。同时，英国、德国、日本、俄罗斯等国也有相应的公司开展 InSb 探测器的研制生产工作。

4 结 论

至今，国外 InSb 探测器的研制还在稳步推进，主要在 InSb 大规模阵列探测器工程化、EPI InSb 探测器(95 K 工作)、高温工作 InAlSb 探测器(130 K 工作)、锑基外延材料探测器等方面开展大量研制工作。对于 InSb 焦平面探测器的发展，主要体现在以下方面：

(1)中波红外应用方面具有绝对优势：制导、反导、成像探测、航天应用全覆盖；单元、多元、128×128、640×512、2 K×2 K 探测器规格全覆盖。

(2)低温工作探测器成熟生产，探测器价格逐渐降低：如 Galaxy Wafer 公司推出了 150 mm(6 in) InSb 晶圆，使大规格的 InSb 焦平面探测器批产能力再次提升；以色列 SCD 公司生产的 320×256 InSb 探测器销售价格仅有 1.2 万欧元，折合 8.5 万元人民币。

(3)大规格探测器广泛应用：美国 Raytheon 公司生产的 SB240 探测器，Lockheed Martin 公司生产的 SBF184 型探测器、以色列 SCD 公司的 Hercules 等 1 K×1 K 规格的探测器，已经是国际上红外探测器的主流产品。

(4)高灵敏、数字化探测器全面应用：Lockheed Martin 公司的探测器 SBF200 型探测器，采用了数字

式读出电路,改善了探测器的加工工艺,探测器 NETD 小于 10 mK。上述参数是在半阱条件下工作,探测器 F 数为5.2,如果探测器的 F 数选择2,此时的 NETD 能小于5 mK。

(5)高温工作探测器全面发展:以色列、美国、英国等公司在高温工作 InSb 探测器已开展大量工作,已形成小批量生产能力。如以色列 SCD 公司,采用 EPI Antimonides(InSb 基外延 InSb 材料)技术的生产线建立,EPI InSb 器件可工作在 95 K 仍能达到普通 InSb 器件 80 K 的水平,SCD 的主流产品全部使用了新建生产线生产。同时,SCD 的高温 InAlSb 探测器工作温度已到达 110 K。

因此,在未来较长时期内,InSb 探测器还将是中波红外应用的主要产品。

参考文献:

[1] FANG Jiaxiong. Progress of infrared detectors technique [M]. Tianjin:Tianjin Science and Techonology Press. (in Chinese)
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.

[2] HE Li. Introduction to advanced focal plane arrays[M]. Beijing:National Defence Press,2011. (in Chinese)
何力. 先进焦平面技术导论[M]. 北京:国防工业出版社,2011.

[3] CAI Yi. Photoelectric precision guided weapon[M]. Beijing:The Publishing House of Ordnance Industry,2013. (in Chinese)
蔡毅. 光电精确制导武器[M]. 北京:兵器工业出版社,2013.

[4] LI Lijuan. Analysis of the key technologies for dual color IR imaging guidance of air-to-air missil[J]. Laser & Infrared,2013,43(9):1036 - 1039. (in Chinese)
李丽娟. 空空导弹双色红外成像制导关键技术分析[J]. 激光与红外,2013,43(9):1036 - 1039.

[5] HUANG Chen. Survey for foreign infrared astronomical telescope[J]. Laser & Infrared,2013,43(3):235 - 239. (in Chinese)
黄晨. 国外红外天文望远镜发展现状[J]. 激光与红外,2013,43(3):235 - 239.

[6] C W Mcmurtry, W J Forrest, A C Moore, et al. James webb space telescope:characterization of flight candidate NIR InSb arrays[C]. SPIE,2004,5167:144 - 158.

[7] Gert Finger. Review of the state of infrared detectors for astronomy in retrospect of the June 2002 workshop on scientific detectors for astronomy [C]. SPIE, 2003, 4841: 839 - 852.

[8] Reinhold J Dorn. The CRIRES InSb megapixel focal plane array detector mosaic [C]. SPIE,2004,5499:510 - 517.

[9] GONG Haimei. Developments and trends in spaceborne infrared detectors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008,37(1):18 - 24. (in Chinese)
龚海梅. 航天红外探测器的发展现状与进展[J]. 红外与激光工程,2008,37(1):18 - 24.

[10] Mike Davis. Advanced FPA technology development at CMC Electronics [C]. SPIE,2004,5563:62 - 73.

[11] Philip Klipstein. Third-generation infrared detector program at SCD:InAlSb focal plane arrays[C]. SPIE,2004, 5612:42 - 50.

[12] Tim Ashley. Epitaxial InSb for elevated temperature operation of large IR focal plane arrays [C]. SPIE, 2003, 5074:95 - 102.