

## 红外探测器发展需求

张雪, 梁晓庚

(洛阳光电技术发展中心, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 由于未来作战环境复杂, 红外探测技术发展面临严峻挑战, 而作为红外型武器的核心——红外探测器, 正朝着高灵敏、宽谱段、高分辨率、低功耗、小型化和智能化的方向发展。通过回顾相关产业军民两用融合情况和红外探测技术发展历程, 总结军事发展对探测器新的要求, 以确立新一代探测器发展方向。在详细分析国外红外探测器发展历程和现状的基础上, 重点介绍了国外红外焦平面探测器的最新研制情况和成果, 包括非制冷红外探测器、制冷型红外探测器、红外双色探测器等, 并总结强调第三代红外探测器需要在控制成本的同时不断提高和改进红外焦平面探测系统的性能。最后概述了智能化红外焦平面阵列的发展情况。

**关键词:** 红外焦平面探测器; 红外成像制导; 红外监测; 智能化红外焦平面

**中图分类号:** V271.4; TN21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)02-0041-05

## Development of and Demands for Infrared Detectors

ZHANG Xue, LIANG Xiaogeng

(Luoyang Opt-Electro Center, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** The development of infrared detection is facing a severe challenge in the future since the battlefield situation is getting more and more complex. As the core of infrared-based weapons, the infrared detector is developing towards higher sensitivity, wider spectrum, higher resolution, lower power consumption, smaller size and more intelligent ability. Through reviewing the long history of infrared detection and summarizing the urgent demands on military detecting, the development tendency of next generation detector is studied. The development and achievements of the new generation infrared focal plane detection technology are introduced, and the necessity for improving the system performance while controlling cost is emphasized. In the end, the development of intelligent infrared focal plane array is given.

**Key words:** infrared focal plane detector; infrared imaging guidance; infrared monitoring; intelligent infrared focal plane

### 0 引言

红外探测技术的不断发展是军事应用需求牵引和推动的过程。红外光学最初又叫做军事光学, 首先被广泛应用于军事领域, 如制导、侦察、搜索、预警、探测、跟踪、全天候前视和夜视、武器瞄准等。20世纪70年代以后, 民用需求急剧增长, 加上红外探测器件发展迅猛、生产成本下降, 使得军事红外技术逐步向民用部门转化, 红外探测技术被广泛应用于工业、农业、医学、交通等各个行业和部门, 如电力在线检测、铁路车辆轴温探测、矿产资源勘探、地下矿井测温 and 测气、气象预报、

地貌或环境监测、农作物或环保监测等, 使得红外探测技术发展成为军民两用技术。

目前, 红外探测技术的发展, 特别是最新型的凝视焦平面阵列红外探测器的应用, 使得利用红外成像技术实现对目标的监测和跟踪, 成为了衡量新一代红外武器现代化、自动化和智能化的重要标志之一。为了适应未来战争的需要, 红外探测技术在军事中的应用正朝着高灵敏、宽谱段、高分辨率、低功耗、小型化和智能化的方向发展。

### 1 红外探测技术发展简述

20世纪, 红外探测技术首先受到军事部门的关注, 它实现了黑暗中的目标探测、保密通讯等。

最初的红外探测采用点源探测技术, 该方法将目标看作一个热点源, 以此来探测、锁定并追踪目标。由

于获得的特征信息量十分有限,且非常容易受到各类红外、激光等干扰,因此单元探测基本不具备目标识别的能力。第一代红外导弹采用非致冷的硫化铅探测器进行点源探测,工作波段为 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ ,探测飞机发动机喷口的红外辐射,因此仅可进行尾追攻击,攻击角度小,作用距离近,且受红外诱饵、背景和气象条件影响严重。第二代红外导弹采用了致冷技术,硫化铅或者碲化铟探测器工作波段为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ,并且使导引头有了更大的视角和跟踪加速度,但是抗干扰能力和作战性能表现平平。

随着计算机技术、光电子技术等发展,光电对抗越来越强烈,简单的点源式探测技术面临重大挑战,逐渐发展为多元探测技术,可以获取较丰富的目标信息。第三代红外导弹采用致冷碲化铟探测器,多为圆锥扫描和玫瑰线扫描,探测范围大,跟踪角速度高,具备一定程度的全向攻击能力及抗干扰能力。

20世纪80年代研发的多元红外探测器面阵凝视成像系统探测元数量达到 $10^3\sim 10^6$ 量级,可以直接置于红外物镜的焦平面上,实现所谓的大角度“凝视”,电子脉冲代替了光学机械扫描体制。系统灵敏度可提高两个量级且可同时处理多个目标,体积缩小、重量减轻、响应更快、可靠性提高,在军事上有更突出的适用性。第四代红外导弹,如美国的AIM-9X采用了凝视焦平面阵列成像,导引头具有更高的抗干扰能力和真正意义上的全向攻击能力,实现了发射后不管。

目前,红外探测技术正朝着中波红外、长波红外双波段甚至多波段方向发展。红外探测器将具备像素更高、帧速率更快、热分辨率更强、多色化和智能化等特征。

## 2 军事发展对探测器的要求

未来空战将是多机编队的协调空战,是多层次、多目标、全方位和高度的立体化空战,战场将始终充满强烈的光电干扰,目标机动性能、红外隐身性能以及采用的红外干扰措施的不断提高,使得红外探测环境越来越恶劣。

在空中侦察获取情报任务中,为了能够更好地完成立体化空战,现代战斗机挂载的侦察吊舱的种类和数量在逐渐增加,而吊舱的先进性取决于其探测器的性能,如有效探测距离、探测精度、抗恶劣环境的能力等。为了获取高分辨率的图像情报,以完成对远距离目标的探测、识别和瞄准,需要提高探测器的灵敏度和分辨率,可靠性及全天候工作能力,在单位时间内提供更多的目标信息,以对付高速和高机动目标,同时在光电对抗中能够更有效地识别目标和跟踪目标。

在精确打击任务中,红外制导技术的发展方向为多用途、智能化、低成本等<sup>[1]</sup>。

1) 多用途。未来成像制导导引头将会肩负更多的使命,包括中制导、末制导、侦察以及打击效果评估等,具备多色、多模复合制导能力。

2) 智能化。未来智能化红外成像制导导引头需要具备仿人眼神经网络处理,可调谐红外探测,可调整每个像素的灵敏度。

3) 低成本。未来武器系统除了对性能的高要求以外,还要求经济上可承受。这就要求组成武器系统的各单元部件尽量降低制造成本。

由此可见,军事发展对探测器提出了新的要求:1) 新一代红外探测器阵列数目必定大幅度增加,传感器获取的目标信息量也会成倍增加,因此需要增加像素数量,缩小像素间距,增大空间分辨率;2) 需要能够同时进行双波段或多波段检测,独立提供探测结果,从而辨别目标的绝对温度和各自特征,并进一步提高灵敏度,降低误警率,从对目标的单一探测功能扩展到对目标的认识,进而实现对目标的快速识别;3) 由于侦察或制导系统需要较高的数据更新率,因此要求减少红外探测器的噪声等效温差,增加器件占空比。

## 3 红外焦平面探测器的最新研制情况

红外焦平面探测器技术体现了当前红外探测技术的发展水平,其趋势是体积更小、功效更强和更加集成化。下面介绍这一关键技术的国外研制情况。

### 3.1 高性能致冷型红外探测器

由于背景温度与探测温度之间的对比度将决定探测器的理想分辨率,所以,为提高探测仪的精度必须大幅度降低背景温度。致冷型红外探测器件需要在低温下工作,相比非致冷器件,成像质量更优、探测灵敏度更高。对于新一代致冷型探测器,除了需要设计非常小的像素间距以保证红外焦平面阵列的尺寸足够小,还需要采取提高操作温度等一系列手段以达到降低成本、提高性能的目的。

#### 3.1.1 碲镉汞红外焦平面器件

碲镉汞优良的电学特性体现在载流子浓度低、少数载流子寿命长、电子空穴有效质量比大、电子迁移率高而介电常数小等方面。作为军用红外探测的理想器件,碲镉汞(MCT)焦平面阵列无论在长波、中波还是短波等多个红外波段都得到了全面的发展。其中,中波凝视红外成像制导发展较快,美国响尾蛇AIM-9X空空弹就采用了 $128\times 128$ 元中波碲镉汞焦平面阵做成的红外凝视成像系统。

目前,采用MCT的焦平面阵列大部分是 $128\times 128$

到  $640 \times 512$  像素的格式,但有一些中波 MCT 阵列可以达到  $2048 \times 2048$  像素。德国 AIM 公司最新生产的 HiPIR-640MCT 为  $640 \times 512$  像素,  $15 \mu\text{m}$  间距的长波或中波探测器,全帧速可达到 100 Hz。

法国的研究机构致力于发展非平衡模式的碲镉汞分子束外延 (MBE),以满足碲镉汞多层结构的制备要求。Sofradir 公司双色探测器技术的最新成果为 ALTAIR ( $640 \times 512$  元/ $24 \mu\text{m}$ ) MWIR/MWIR 和 MWIR/LWIR 双色探测器,拥有 18 mK 的噪声等效温差,可操作性超过 99.5%<sup>[2]</sup>。

### 3.1.2 量子阱光导体焦平面阵列器件

量子阱红外焦平面 (QWIP) 利用 MBE、MOCVD 薄膜生长技术,交替生长作为势阱层的 GaAs (或 InGaAs) 材料和作为势垒层的 AlGaAs (或 GaAs) 材料,通过改变量子阱宽度和势垒高度对带隙宽度进行人工剪裁,从而可用于大气窗口  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  和  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  红外的探测。

与传统的 HgCdTe 红外探测器相比,QWIP 具有均匀性高、产率高、成本低、热灵敏度高、热稳定性好等优点。尽管红外探测器的主流碲镉汞技术已发展 40 余年,鉴于其材料的衬底和外延技术的难度很高,实现低盲元率的大面阵焦平面探测器较难,量子阱红外探测器具有更容易制造的优点,因而发展也更加迅速,瑞典的 IRnova 公司正致力于研发  $1280 \times 720$  像素的量子阱长波红外探测器 IRnova1280,以及根据客户需求定制专属的 QWIP-FPA 器件。

目前,QWIP 红外焦平面器件主要向大面阵、高温、双色或多色方向发展,美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 报道了  $640 \times 480$  红外双色焦平面和  $640 \times 512$  红外四色焦平面器件。

### 3.1.3 InSb 红外焦平面阵列器件

InSb 的载流子迁移率高,适用于  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  中红外波段,具有较高的灵敏度,因此在凝视型空空导弹中占据着重要的位置。由德国牵头、六国联合研制的先进红外型近距格斗空空导弹 IRIS-T 导弹即采用机械扫描的  $128 \times 4$  的碲化铟红外成像导引头。

美国 Santa Barbara Focalplane 研制的宽频谱响应 InSb (从小于  $1 \mu\text{m}$  到  $5.2 \mu\text{m}$ ),量子效率达到 90% 以上。其研制的灵活型  $640 \times 512$  元 InSb 焦平面阵列还可用作  $512 \times 512$  元, $640 \times 480$  元或者  $400 \times 400$  元。

以色列的 S. C. D 半导体器件公司 (Semi-Conductor Devices) 开发了一系列数字化 FPA 探测器,与模拟的 FPA 探测器相比,探测距离增加,更容易集成和功能定制,具有非常明显的优势。同时,为了获得高分辨率的中波红外探测器,该公司最新研制了一种大规格数字中波红外探测器,该 InSb 探测器达到兆像素级,被

命名为 Hercules ( $1280 \times 1024$  元像素/ $15 \mu\text{m}$  间距) 探测器<sup>[3]</sup>。

### 3.1.4 II 类超晶格

近年来,超晶格探测器引起人们的极大关注,尤其是由 III-V 族半导体材料 InAs/GaSb 或 InAs/Ga<sub>x</sub>In<sub>x</sub>Sb 构成的具有优越的材料性能的 II 类超晶格 (T2SL),其量子效率高,暗电流小,工作温度高,能带结构可调,在同等时间内的探测能力高,同时积分时间短,在国际上被认为是第三代红外焦平面探测器的优选材料。2010 年,美国西北大学量子器件中心制造了高性能的兆像素级 II 类超晶格 (T2SL) 长波红外 FPA 器件,在 80 K 时的噪声等效温差为 23.6 mK,背景温度 300 K 时的积分时间是  $0.13 \text{ ms}$ <sup>[4]</sup>。2011 年,美国的 Qmagiq 公司又成功研制了  $1 \text{ K} \times 1 \text{ K}$  的超晶格长波 FPA 器件。

### 3.1.5 第三代新型红外探测器要求

除了在材料和工艺上不断改善,减少缺陷,提高系统性能,以增大产量,第三代新型红外探测器还需降低功耗以满足新系统的需求,因此要减少系统规模,以增加系统的自主性和可靠性,并在整体上降低系统成本。

红外焦平面阵列技术要求控制 IRFPA 的成本和产量,整体上降低系统成本,首先需要提供 IRFPA 的可操作性,IRFPA 的可操作性在两个相反的方面影响 IRFPA 的生产率。随着可操作性接近 100%,由于采用了更纯、更好的材料 (如较少缺陷),导致可操作性改善越来越困难。一方面,所用 IRFPA 材料成本随可操作性技术要求的提高而提高;另一方面,具有较高操作性的 IRFPA 更可能满足对缺陷像素的系统技术要求,从而具有较好的最终测试结果<sup>[5]</sup>。

为了增加操作性、自主性和可靠性,同时降低成本,法国 Sofradir and CEA/LETI 通过采取一系列措施提高 MCT 探测器工作温度<sup>[6]</sup>。通过对 N/P 和 P/N 碲镉汞技术进行优化改进,尽可能地提高工作温度,保证高温操作下的良好性能和极低的缺陷像素率。2011 年的试验中,采用了小规模探测器,参数选取的是 Scorpio 探测器 ( $640 \times 512$  像素/ $15 \mu\text{m}$  间距) 的数值,采用 n-on-p 结构,在 80 K 的截止波长为  $5.3 \mu\text{m}$ 。在低功耗的前提下,该探测器温度能达到 140 K。同时,系统的功耗降低,可靠性增强。其下一步目标是在不影响系统灵敏度的前提下,将截止波长下降到  $4.2 \mu\text{m}$  的同时,将工作温度提升至 160 K。

另一个好的解决办法是降低红外探测器的像素间距。在保持整体性能的前提下,愈发强调系统的紧凑性能,图 1 显示了随着工艺技术的进步,像素间距得到有效控制,实现了逐年递减<sup>[7]</sup>。



图1 像素间距变化图

Fig. 1 Roadmap for pixel pitch

由图1可知,2011年相对于2000年,无论是8~12  $\mu\text{m}$  波段还是3~5  $\mu\text{m}$  波段,探测器的像素间距均下降了一半左右,这对降低成本、提高系统性能都具有非常重要的意义。此外,还可以通过增加晶圆的尺寸、降低系统规模等措施降低成本。

### 3.2 非致冷红外探测器

鉴于致冷型红外焦平面阵列的成本高,制造难度大,给弹载设备带来一定的复杂性。近年来,非致冷型凝视红外焦平面阵列探测器的研制已受到技术发达国家的高度重视。

法国现已具备了多种微测辐射热计阵列的像素尺寸,从 $160 \times 120$  像素阵列到 $1024 \times 768$  像素阵列,如图2所示<sup>[8]</sup>。

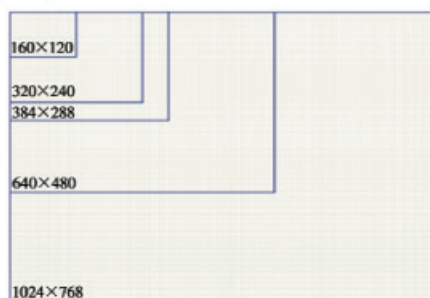


图2 微测辐射热计阵列像素尺寸可选图

Fig. 2 A wide range of array sizes are now available

美国雷神公司在成功研制了25  $\mu\text{m}$  的高灵敏度 $320 \times 240$  元微桥 IRFPA 后,又研制了 $640 \times 480$ , 20  $\mu\text{m}$  的元器件。最近,美国 DRS 公司则开发了17  $\mu\text{m}$  间距的 $1024 \times 768$  氧化钒 ( $\text{VO}_x$ ) 非致冷红外焦平面产品 U8000。

在双色发展方面,由 DARPA 资助,美国 DRS 和古德里奇传感器公司共同开发的 DUDE 双色焦平面探测器,集成了  $\text{VO}_x$  微测辐射热计(8~14  $\mu\text{m}$ ) 和  $\text{InGaAs}$  (0.7~1.6  $\mu\text{m}$ )。目前已经完成了双模读出电路的设计与制造,正在进行 DUDE 探测器的制造<sup>[9]</sup>。

尽管非致冷红外探测器已经实现了许多显著的技术突破,包括可靠性提高,制造难度降低,而成本的控制和性能的保证依然是设计的重点之一。如图3所示,非晶硅微测辐射热计的像素间距从最初的2000

年的45  $\mu\text{m}$ 一直下降到2010年的12  $\mu\text{m}$ ,减少了一半以上<sup>[8]</sup>。

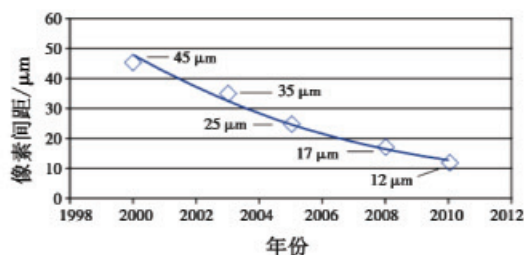


图3 非晶硅微测辐射热计的像素间距变化图

Fig. 3 Pixel pitch for amorphous silicon microbolometers

因此,需要减少非致冷测辐射热计红外焦平面阵列桥式结构的大小,同时增大单位面积的像素,在提高性能的基础上,通过控制物理尺寸不断减轻重量、降低成本。

## 4 智能化红外焦平面阵列的发展

红外焦平面探测器是红外成像导引头的关键器件,双色或多色红外焦平面的使用,可以弥补单一成像制导体制的不足,有助于提高导引头的探测概率和跟踪精度,具有极高的目标识别能力,同时增强了抗干扰能力和损害评估能力。目前,南非的 A-DARTOR、以色列的 Python-5 导弹已分别采用了线列扫描、凝视双色成像导引头技术,使抗干扰能力明显提高。随着材料生长技术、微电子技术等相关领域的发展,进一步发展的方向是双色和具有智能化集成功能的红外焦平面,以不断提高导引头的探测灵敏度和分辨率,最大限度地扩大目标识别范围。

国外正在发展的“灵巧(SMART)”IRFPA,集红外焦平面阵列、读出电路、信号处理为一体,在探测器中附加进行某些像元级处理。如美国 Amber 工程有限公司模仿人视网膜而研制的神经形态 IBPPA(NIF),美国加利福尼亚州 Santa Barbare 研究中心(SBRC)模仿视网膜研制的“灵巧”IRFPA,以及美国 Martin Marietta 公司研制的双色多量子阱探测器构成 $128 \times 128$  元“灵巧”INFPA。据报道,美国的“AIM-9X”就采用了非均匀性校正与探测器集成的“SMART IRFPA”。

美国正专注研发自适应多光谱/超光谱成像,并已经成功开发了基于 MEMS 的可调谐红外探测器。这种探测器具有提供可调谐电压的多波段红外焦平面的潜力,美国 DARPA 正在推动自适应焦平面阵列(AFPA)的发展,已经验证了多光谱可调谐红外探测器结构<sup>[10]</sup>。图4给出了基于 MEMS 技术的可调谐红外探测器的一般构成<sup>[11]</sup>。



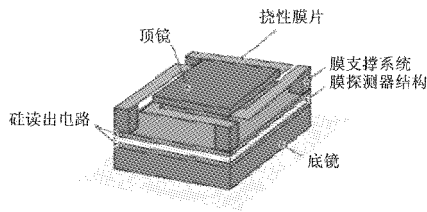


图4 基于MEMS技术的可调谐红外探测器的一般构成  
Fig.4 General concept of MEMS-based tuneable IR detector

其中, MEMS滤波器是静电驱动法布里-珀罗可调谐滤波器,在实际使用中, MEMS滤波器阵列的安装使光谱串扰最小。集成各组件技术的自适应焦平面阵列涉及许多相关学科,包括MEMS、光学镀膜技术、微透镜技术、光学系统建模以及焦平面阵列装置。集成的目的是产生一个图像传感器阵列,其中每一个像素的波长灵敏度都是可以独立调整的。该设备实际将构成一个大型的电子可编程微型光谱仪的格式阵列。美国洛克韦尔科技有限公司已经验证了长波红外线中的同步光谱调谐,同时使用双频AFPA提供了中波红外波段的宽带图像。AFPA概念的实现将使许多重要军事任务实现巨大改进,包括侦察勘测、战场监视和精确制导等应用方向。

## 5 小结

回顾红外探测的发展历程,其在军事领域的高精尖技术应用,引领并促进了相关产业军民两用的融合发展。未来先进武器的红外器件将向采用大规模高密度红外焦平面探测器的凝视红外成像方向发展,这对红外探测器也提出了更高的要求:

- 1) 在减小规模的基础上,不断提高系统的整体性能,包括更高的像素灵敏度,更高的像素密度,由二维向三维多层次结构发展;
- 2) 采用高速/高帧频探测器,实现快速响应;
- 3) 减少红外成像阵列系统的成本;
- 4) 双色、多色的发展可以实现不同波长的探测,成倍扩大系统信息量,探测器在焦平面上实现神经网络功能,通过智能化红外焦平面的发展改善红外成像阵列的功能;
- 5) 提高探测器的工作温度。

同时,还应该设计用户检测器接口,以简化系统设计并提高系统性能。

随着红外探测技术的不断发展与完善,其在军事领域应用前景也将更加广阔,运用计算机技术、模式识别、多模复合制导等先进技术,将大力提高武器装备的性能。

## 参考文献

- [1] 罗海波,史泽林. 红外成像制导技术发展现状与展望[J]. 红外与激光工程,2009,38(4):565-573.
- [2] REIBEL Y, CHABUEL F, VAZ C, et al. Infrared dual band detectors for next generation[C]//Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXVII, 2011, 8012: 801238-1.
- [3] SHKEDY L, MARKOVITZ T, CALAHORRA Z, et al. Megapixel digital InSb detector for midwave infrared imaging[J]. Optical Engineering, 2011, 50(6):1-8.
- [4] RAZEGHI M, HUANG E K, NGUYEN B M, et al. Recent advances in high-performance antimonide-based superlattice FPAs[C]//Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXVII, May 20, 2011, 8012:80120T.
- [5] CRAREY P E, FARLEY C M. Modeling the cost and producibility impacts of infrared focal plane array operability [C]//Proceedings of SPIE, Infrared Focal Plane Array Producibility and Related Materials, 1992, 1683:14-23.
- [6] VUILLERMET M, RUBALDO L, CHABUEL F, et al. HOT infrared detectors using MCT technology [C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8012:80122W.
- [7] REIBEL Y, CHABUEL F, VAZ C, et al. Infrared dual band detectors for next generation[C]//Infrared Technology and Applications XXXVII. Proceedings of the SPIE, 2011, 8012:801238-13.
- [8] SOFRADIR E C. Uncooled infrared detectors achieve new performance levels and cost targets [Z]. White Paper, 2009.
- [9] LI C, SKIDMORE G D, HAN C J. Uncooled VOx infrared sensor development and application [C]//Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXVII, May 2011, 8012:80121N.
- [10] 范晋祥,岳艳军. 军用红外成像系统新概念新体制的发展[J]. 红外与激光工程,2011, 40(1):1-6.
- [11] ROGALSKI. Infrared detectors for the future[J]. ACTA Physica Polonica A 2009, 116(3):389-406.