

## &lt; 综述与评论 &gt;

# 红外焦平面阵列在反坦克导弹制导中的应用

刘永昌

(陕西青华机电研究所, 陕西, 长安, 710111)

**【摘要】**综述了红外焦平面阵列及其在反坦克导弹红外成像制导中的应用, 并对发展我国红外焦平面阵列探测技术和兵器制导提出了建议。

**【关键词】**红外焦平面阵列探测器 红外成像导引头 红外成像制导 反坦克导弹

**IRFPA and Its application in the Anti-Tank Missile Guidance / Liu Yongchang (Shaanxi Qinghua Electro-mechanical Research Institute, Chang'an, Shaanxi, 710111) // *Infrared Technology*. 1994. 16(6). 1 ~ 5**

**【Abstract】**IRFPA technique and its application in the anti-tank missile guidance have been reviewed. Future development in this field in China is prospected.

**【Key Words】**IRFPA detector IR imaging seeker IR imaging guidance Anti-tank missile

## 1 前言

红外焦平面阵列(IRFPA)是当今信息时代人们获取、利用信息的一种先进而重要的工具。高密度红外器件的成功集成, 开辟了红外焦平面技术的发展道路。它以电子扫描代替机械扫描, 使焦平面上红外探测器的数量提高了几个数量级, 不但可得到高灵敏度、高分辨率、大视场的红外系统, 而且使系统体积小、重量轻、功耗低。它的应用遍及各个领域, 不仅在资源勘探、工业和科学测量、预警、医疗诊断等领域有着极为广泛的用途, 更重要的是, 在军事和空间高技术的发展中起着关键性的作用。

70年代中期诞生的红外成像制导系统为新一代红外制导武器的诞生创造了条件。这种系统可以实现全方位攻击目标, 也可用于各种战术导弹, 还可用于反弹道导弹的末制导。首先应用红外成像制导技术的导弹是美国空对地的“马伐瑞克”(Maverick)D型导弹, 它采用线阵或小规模的面阵探测器及光机扫描成像的制导系统, 该系统普遍使用碲镉汞探测器, 由于像元数少, 性能比较差, 成像质量也比较低。这就是人们通常所说的第一代红外成像制导系统。第二代红外成像制导技术的成像方式是采用二维高密度焦平面阵列探测器, 配用电荷耦合器件, 采用快速无惯性电子扫描代替光机扫描直接成像。其优点是: 探测器的元数增多, 提高了灵敏度; 探测器的面积减小, 提高了分辨率; 通过凝视方式提高信号积分和信噪比; 去掉光机扫描系统而扩大了视场。可应用于具有全向目标探测能力、高灵敏度、高导引精度、能够抗人工和自然界干扰的红外成像制导导弹。

## 2 红外焦平面阵列的种类

早期制作的多元阵列探测器是镶嵌式的, 每个探测器单元均有一根导线引出, 因此引线数量多, 结构复杂, 尺寸大, 不易致冷, 并且信息处理困难, 限制了阵列中探测器单元的数量。由于

收稿日期: 1993-10-07

电荷耦合器件可以将平面的并行信息转换成时间串行信息, 加之具有信息记忆和多路读出功能, 能够对探测器单元的信号进行存储和处理, 故把红外探测器阵列与电荷耦合器件连接在一起, 构成新型的红外焦平面阵列探测器。现在的红外焦平面探测器主要有两种结构: 一种是单片式的, 另一种是混合式的。应用较广的红外焦平面阵列有下列4种:

### (1) 碲镉汞焦平面阵列

碲镉汞焦平面阵列采用光电导, PN结式金属-绝缘体-半导体结构, 红外信息由电荷耦合器件读出, 工作波段可以是 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 或者包含这两者的双色波段。这种焦平面阵列既适合制成混合式, 又适合制成单片式。光伏碲镉汞焦平面阵列的阻抗很高, 不需要加偏流, 即能与CCD很好地兼容, 而且能简化制冷问题, 是目前应用得最广的焦平面阵列之一。现已制造的器件有 $32 \times 32$ 、 $64 \times 64$ 及 $128 \times 128$ 元数的阵列, 其工作温度77 K。

### (2) 铟化铟焦平面阵列

这种焦平面阵列是用铟化铟(InSb)材料制成的P-N结或金属-绝缘体-半导体结构, 产生的少数载流子贮存在由栅极负压形成的反型区中, 再由硅电荷耦合器件或MOS开关顺序访问探测器各个单元, 读出红外信息。铟化铟焦平面阵列探测器工作波段为 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ , 已制成的阵列有 $32 \times 1$ 、 $32 \times 32$ 、 $64 \times 64$ 和 $128 \times 128$ 元等, 其工作温度为80 K或65 K。

### (3) 肖特基势垒电荷耦合器件

把金属淀积在半导体表面上, 便形成肖特基势垒, 用来制作单片式肖特基势垒红外电荷耦合器件, 工作波段 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ , 是目前最成熟的红外焦平面阵列探测器。其优点是响应均匀, 辅助电路简单, 易于制造; 经济效益高; 集成度高; 是值得重视的发展方向。已制成的阵列有 $128 \times 128$ 、 $256 \times 256$ 、 $512 \times 512$ 元等, 工作温度77~80 K。

### (4) 非本征硅焦平面阵列

非本征硅是制作小于 $6 \mu\text{m}$ 和大于 $10 \mu\text{m}$ 波段探测器的最佳材料, 并可用于制作单片式红外焦平面阵列探测器。

## 3 国内外红外焦平面阵列技术发展状况

目前世界各国都在大力发展红外焦平面探测器阵列技术, 它把二维探测器阵列和信号处理电路都集中在红外焦平面上, 使红外焦平面既具有目标探测能力, 又具有信号处理功能。由于焦平面上探测器的数目大大增加(数千甚至百万以上), 提高了系统的性能, 加之取消了光机扫描, 减少了运动部件, 使其体积减少、重量减轻, 从而彻底解决了小型化问题, 更适合于反坦克导弹使用, 因而红外焦平面的成像制导反坦克导弹成为当今性能最理想的反坦克导弹。

自1973年美国罗门空军发展中心(RADC)的Shepherd和Yang首先提出了用于红外热成像的硅化物肖特基势垒探测器(SBD)列阵以来, 此后十多年, 红外焦平面探测器发展一直很活跃, 80年代, 各国政府和军事部门相继给予巨额资助, 加速了焦平面技术的发展。探测器材料趋向多样化, 工作温度逐步升高, 元数越来越多, 读出方式亦多样化。经过十余年的努力, 各种像元的线列、二维器件不断出现, 预计90年代中后期, 混合式红外焦平面将全面被采用。

研制混合式焦平面探测器的主要国家是美、英、法、德、日等国。美国从事混合式焦平面探测器的公司最多, 圣巴巴拉研究中心先后研制出InSb器件、CMT器件, 波长 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ , 面元已达到 $128 \times 128$ 元、 $256 \times 256$ 元, 并且正在进行研制 $512 \times 512$ 元CMT器件和InSb器件的工作; 德克萨斯仪器公司已研制出CMT、InAsSb  $32 \times 32$ 、 $64 \times 64$ 元的二维器

件,并已把这些器件用于反坦克导弹导引头;洛克威尔国际科学中心在攻克 CMT 中具有独创性,他们研制出的短波  $128 \times 128$  元器件,均匀性达到 3%,其中波长  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  的  $256 \times 256$  元器件也得到较大发展;霍尼威尔电光部始终在为宇航和海军发展  $128 \times 128$  元 CMT 器件;休斯公司制作了  $256 \times 256$  元的混合式阵列,并已用于 FOG-M 导弹。

法国在研制混合式红外焦平面探测器方面占据着重要地位,在法国武器管理局的统一管理下,电子股份有限公司、汤姆逊无线电公司、电子工业研究所及空军试验中心几家合资,1978 年成立了红外实验室,1986 年成立了法国红外探测器公司及红外 CCD 发展中心,它们的主要发展目标就是  $3 \sim 5$  和  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  的 CMT 面阵器件。

英国的马拉德公司和皇家信号雷达公司在研制 CMT 的 IRCCD 方面作了大量的研究工作,不管是中波还是长波面阵,都取得了重大进展,已研制了多种型式的  $64 \times 64$  元器件。

日本和西德的几家公司起步较晚,但近几年发展很快,已研制出用于  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段、元数为  $32 \times 64$ 、 $256 \times 256$ 、 $324 \times 487$  的 PtSi-SB IRCCD 焦平面阵列器件。

单片式和半单片式红外焦平面探测器的发展也经过了曲折道路。1973 年肖特基红外探测技术出现,并研制出  $25 \times 25$  元列阵器件,由于其量子效率和响应率极低而几乎被人们否定。后来抛弃了钨硅化合物而改为铂硅化合物,使截止波长达到  $5.6 \mu\text{m}$ ,并利用了成熟的硅工艺,采用了薄型 Pt:Si 膜和光腔结构,放弃了内线转移 CCD 结构(IL-CCD),采用了垂直电荷传输的电荷扫描器件,提高了量子效率、响应率及填充因子,才使单片器件得到迅速发展,现在器件已进入实用化批量生产阶段。美国的通用电气公司、休斯公司、RCA 公司、罗门空军发展中心,日本的三菱电机公司、仙童公司等已相继研制出  $128 \times 128$ 、 $160 \times 244$ 、 $256 \times 256$ 、 $512 \times 512$ 、 $488 \times 640$  元的 PtSi 阵列,而且正在制作  $1024 \times 1024$  元的 PtSi 阵列,特别是三菱电机公司的  $512 \times 512$  元 IRCCD 阵列,像元尺寸小达  $26 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ ,采用  $2 \mu\text{m}$  设计规格,填充系数 30%,已做出了  $160 \times 244$ 、 $256 \times 256$  和  $512 \times 512$  元的电视兼容式红外摄像机。

我国红外焦平面探测器的发展与国外的发展差距甚大,但在实施 863 规划后,近几年来已有较大的进展。现已研制成功  $8 \times 8$  元 CMT 混合式红外焦平面器件,  $8 \times 8$  元、 $32 \times 32$  元 InSb CID 器件,  $64 \times 32$  元、 $64 \times 64$  元、 $128 \times 128$  元 PtSi-SB IRCCD 器件,并已摄出清晰的室温目标图像,但是距离实用化还较远,因此还需要作出巨大的努力,才能满足反坦克导弹导引头的使用要求。例如:就较易实现的 PtSi 焦平面来说,波长必须达到  $5.5 \mu\text{m}$ ,填充因子达到 0.35,均匀性达到 1% ~ 2%,灵敏度  $NE\Delta T \approx 0.1 \text{ K}$ ,像元接近  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ ,杜瓦瓶微型化,工程上的保存时间达到 1 ~ 5 年。满足上述要求均非易事,因此,这一高新技术的发展应继续引起各系统各部门的高度重视。

#### 4 红外焦平面成像制导反坦克导弹的发展状况

随着导弹制导技术的改进,红外成像制导技术一步步发展起来。第一代红外成像制导导弹是美国休斯公司于 1975 年开始研制的“马伐瑞克”(Maverick)空对地导弹族中的 D 型导弹,它采用敏感波段为  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  的  $4 \times 4$  元 HgCdTe 探测器阵列、光机扫描型红外成像导引头,该导弹已在海湾战争中初显锋芒。随着红外焦平面阵列探测器技术的发展,将第二代红外成像技术应用于反坦克导弹,以期研制出凝视红外焦平面阵列成像制导的反坦克导弹,已成为目前各国研制反坦克导弹的重点。世界各国正在发展的部分红外焦平面阵列成像制导的反坦克导弹如表 1 所示。

表 1 世界各国发展的部分凝视红外焦平面反坦克导弹情况

Table 1 The development and application of IRFPA in anti-tank missile guidance in the world

型 号	研制国家	制导方式及采用的探测器	说 明
坦克破坏者 (Tank Brecker)	美国	红外焦平面成像制导 3~5 μm, 中波硅肖特基势垒 8~12 μm, 62×58 元混合式 HgCdTe 8~12 μm, 64×64 元单片式 HgCdTe	此项目现已终止, 它是现 AAWS-M 方案的原型
AAWS-M	美国	凝视红外焦平面成像制导 8~12 μm, 64×64 元 HgCdTe	1989 年 2 月开始进入全尺寸工程研制, 预计 90 年代中期投入使用
远程崔格特 (Trigat)	英、法、西德	红外焦平面成像制导 8~12 μm, 32×32 元 HgCdTe 混合式探测器	已进入全面研制阶段, 90 年代后期投入使用
N-LOS 反直升机 反坦克导弹	美国	红外焦平面成像制导 3~5 μm, 256×256 元 PtSi 混合式、单片式结构探测器	正在研制中
“海尔法”改进型 (Hellfire)	美国	红外焦平面成像制导 8~14 μm, 长波 HgCdTe 探测器 3~5 μm, 32~32 元 InSb 探测器 64×64 或 128×128 元 PtSi 探测器	正在研制中
“坦克破坏者”	西德	红外焦平面成像制导 凝视型 IRCCD 中波硅焦平面探测器	正在研制中
拉格(Nog)导弹	印度	红外焦平面成像制导 8~12 μm, HgCdTe 焦平面探测器	正在研制中

5 几点看法和建议

红外成像制导技术具有较强的抗干扰、识别、跟踪目标的能力以及全天候作战能力, 可以实现打了不用管的功能, 而且红外成像制导是被动式工作, 隐蔽性好, 不易被敌方发现, 尤其是建立在第二代红外成像技术基础上的凝视红外成像制导技术, 实现了电子扫描, 探测元数大量增加, 使导引头精度更高、体积更小、重量更轻, 更加适合于小型战术导弹使用, 因此, 凝视红外成像制导是远、中、近各种射程反坦克导弹制导的最佳方案。但是, 目前国内凝视红外成像制导技术存在的主要问题是制导系统的硬件还不很成熟, 焦平面的研制水平还较低, 制造工艺还不成熟, 加之其数据处理要求又较高, 技术上实现难度较大, 短期内要拿出红外焦平面阵列工程化的产品是不可能的, 而且成本太高。为此, 凝视红外焦平面成像制导技术的发展必须从以下几个方面艰苦努力。

(1) 提高红外焦平面阵列的集成度, 以期提高导引头的探测能力。未来 IRFPA 的开发重点将仍然是更大面积、更小像元、更高灵敏度的器件。未来的研究将主要随着材料生长技术和微电子技术的进步而得到发展。

(2) 我国应先把 3~5 μm 波段的中红外焦平面器件实用化, Pt-Si 肖特基势垒集成规模已向

256 × 256 元发展,但由于其量子效率低(约 1% ~ 3%),用于高质量成像还有问题,所以 InSb FPA 器件的发展不可忽视,尽快使 128 × 128 焦平面器件实用化,满足凝视成像的一般需要,同时突破 8 ~ 12 μm 焦平面器件的主要技术关键,包括优质薄膜材料生长,器件逻辑功能设计以及读出电路的配装。

(3) 加强红外焦平面阵列器件的配套支撑技术研究,特别是信号处理电路的研究,实现在焦平面上的逻辑处理功能,发展智能化、功能化组件,提高杜瓦瓶与制冷器的小型化水平、寿命和可靠性,确保有效使用期在 8 年以上。

(4) 积极探索研究各种新材料,采用先进的材料生长技术制造新器件。目前发展较好的主要有 GaAs/GaAlAs 多量子阱,InAsSb 应变层超晶格,GeSi 内光电异质结,肖特基势垒长波器件和高温超导材料等,不失时机地把新材料、新器件推向应用。

(5) 降低红外焦平面阵列关键器件的研制成本是凝视红外成像制导的主要问题,只有这样才能降低红外成像导引头研制的成本,才可能大量装备部队。

(6) 在开展凝视红外焦平面阵列研究的同时,应尽快发展长线阵列的长波(8 ~ 12 μm)HgCdTe 多元探测器件,例如 60 元、120 元、180 元、1024 元等,研制小型化的致冷杜瓦瓶,尽快实现组件的实用化。发展微型视频光机扫描成像传感器技术,在凝视红外焦平面阵列成像导引头技术成熟之前,填补我国红外成像制导技术发展的空白。

我国红外成像制导技术的发展现在尚处于原理样机的研究阶段,其中凝视红外焦平面阵列成像技术与美国相比,大约落后 15 年。光机扫描红外成像制导技术,美国已经装备部队。我们一定要加倍努力,立足国内,以研制为主、国外引进为辅的方针为指导,先研制使用成熟的少数像元线阵、光机扫描红外成像导引头,然后完成凝视红外成像制导导引头的样机,积极加强技术储备,在财力、技术水平许可的时候,进行型号发展,拿出我国的凝视红外焦平面阵列成像制导的反坦克导弹。

### 参 考 文 献

- 1 乐侍译. 红外焦平面阵列技术. 航空兵, 1993(1):38 ~ 44; 1993(2):30 ~ 39; 1993(3):34 ~ 43
- 2 杨亚生. 硅化铂肖特基势垒红外 CCD 焦平面阵列. 现代兵器, 1992(2):38 ~ 48
- 3 袁继俊. 红外成像器件的发展. 激光与红外, 1993(3):12 ~ 14
- 4 Bailey R B et al. 256 × 256 Hybrid HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays. IEEE TRAK., 1991. ED-38(5): 1104
- 5 韩建忠. 32 × 32 面阵 InSb CID 器件设计和研制. 激光与红外, 1991.21(1):38 ~ 40
- 6 程开富. 长波红外焦平面阵列的进展. 激光与红外, 1992.22(3):19 ~ 23
- 7 刘永昌, 李保平. 反坦克导弹精确制导红外成像导引技术展望. 红外技术, 1993.15(3):1 ~ 6
- 8 薛俊杰, 何晓东等. 反坦克武器新的制导途径跟踪研究. 西安: 机电部第 203 研究所, 1990-10:33 ~ 49
- 9 Martin F F. An antitank missile seeker employing an infrared Schottky barrier focal plane array. SPIE. 1981.302:158 ~ 170

### 红外焦平面热像测温仪

红外辐射测温仪采用 InSb 焦平面器件,其显示温度高达 300 ℃,灵敏度高,NETD 达 0.025 ℃,可手持,采用电池驱动工作。焦平面阵列有 160 × 120 元和 256 × 256 元两种。

资料来源: Laser&Optronics 1994(田)