

文章编号: 1001-5078 (2006) 09-0840-04

红外探测技术的发展

林武文¹, 徐 锦², 徐世录¹

(1. 东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000; 2. 辽宁对外经贸学院, 辽宁 大连 116052)

摘 要: 文章介绍了红外探测技术的发展历程以及装备的研制、改进情况, 指出了在现代战争中发展红外探测技术的优势和重要性, 重点探讨了几种红外探测技术的性能及其特点; 最后分析了红外探测技术的未来发展趋势。

关键词: 红外探测技术; 红外焦平面阵列; 军事应用

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Development Trend of IR Detection Technology

L N Wu-wen¹, XU Jin², XU Shi-lu¹

(1. Northeast Research Institute of Electronic Technology, Jinzhou 121000, China;

2 Liaoning University of International Business and Economics, Dalian 116052, China)

Abstract: The process of development and modification of the IR detection technology are described. The IR detection technology has high advantage and importance in the modern battles. The performance and properties of the IR detection technology are discussed and the development tendency are analyzed.

Key words: IR detection technology; RFPA; military application

1 引 言

随着隐身技术的发展, 导弹和各类作战飞机平台的雷达反射截面积呈现显著减小的趋势, 使得利用无线电手段探测目标越来越困难, 与此形成对比的是, 这类目标高速运动时与空气的摩擦和其发动机的尾焰均会产生强烈的红外辐射, 有利于红外系统对目标的探测。本文就红外探测技术做进一步的研究和探讨。

2 红外探测技术

任何物体, 只要其温度高于绝对零度, 就会发出红外辐射, 由于物体各部位温度不同, 辐射率不同, 就会显示不同的辐射特征, 经过大气传输, 被红外探测设备接收后, 经光电转换, 成为人眼可观察的图像。

2.1 原 理

红外探测技术是利用目标与背景之间的红外辐射差异, 所形成的热点或图像来获取目标和背景信

息的, 探测系统包括: 光学系统和探测器、信息处理器、扫描与伺服控制、显示装置、信息输出接口、中心计算机和激光测距等装置。

红外接收光学系统的作用是把目标或目标区域的红外辐射聚焦在探测器上, 其结构类似于通常的接收光学系统, 但由于工作在红外波段, 其光学材料和镀膜必须和其工作波长相适应。红外探测器将目标及背景的红外辐射转换成电信号, 经过非均匀性修正和放大后以视频形式输出至信息处理器。信息处理器由硬件和软件组成, 对视频进行快速处理后获得目标信息, 通过数据接口输出。显示装置可以实时显示视频信号、状态信息。中心计算机的作用是对整个系统提供时序、状态、接口及对内、对外指令等控制。扫描和伺服控制器控制光学扫描镜或伺

作者简介: 林武文 (1967 -), 男, 高级工程师, 研究方向为电子工程。

收稿日期: 2006-03-28; 修订日期: 2006-04-11

服平台的工作,并把光学扫描镜或伺服平台的角位置信息反馈给中心计算机^[1]。

红外探测技术的主要优点在于符合隐身飞机自身高度隐蔽性的要求,即被动探测、不辐射电磁波,而且由于工作波长较微波雷达短 3~4 个数量级,可以形成高度细节的目标图像,目标分辨率高。

2.2 应用

红外探测具有环境适应性好、隐蔽性好、抗干扰能力强、能在一定程度上识别伪装目标,且设备体积小、重量轻、功耗低等特点,在军事上被广泛应用于搜索跟踪、火力控制、制导、监视等方面。

(1)搜索跟踪。搜索平台周围的广大区域出现的目标,跟踪并将信息传送给相应单位。IRST(红外搜索与跟踪)系统根据应用领域可以分成三种:机载、舰载以及地基。机载 IRST除了以敌飞机和其发射的空空导弹为主要探测对象外,还包括以地面发射的地对空导弹为对象的 MWS(导弹告警系统)或 MAWS(导弹临近告警系统);舰载 IRST以反舰导弹为主要目标;而地面 IRST则主要用于对临近攻击机/直升机进行早期预警。

(2)火力控制。把捕获、跟踪目标获取的信息直接用于平台的火力运用,攻击目标。例如,进行机关炮瞄准和进行 SSM(舰对舰导弹)制导的舰载火控系统(FCS);观测命中结果,并提供弹道信息给炮长瞄准装置等。

(3)制导。用于导弹寻的:便携式地对空导弹、近程地对空导弹、导弹防御用地对空导弹等;对付反舰导弹的舰载近程对空导弹、舰载 BMD用地对空导弹等;机载反舰导弹(ASM);空空格斗导弹等。

(4)侦察、监视、预警和告警等。FLIR(前视红外装置)等警戒(预警)用 IRDS(红外探测装置)、救援直升机装备的旋转头型 FLIR 等搜索/救援用 IRDS、高速导弹艇搭载 FLIR 等监视可疑船只用 IRDS、海峡警备所设置的 FLIR 监视整个海峡用的 IRDS,将来还考虑像美国国防支援项目传感器那样的监视用星载 IRDS。

3 发展现状

目前,美国、法国、德国、英国等已经研制出各种规格的扫描型和凝视型焦平面阵列,仅以法国、美国为例进行简要介绍。

3.1 法国

法国 SOFRADIR 公司与 CEA-LETI 合作建立

了一个共用实验室,即 DEFIR,致力于第三代红外探测器关键技术研究。DEFIR 的第三代红外探测器的所有研究都以新技术为基础,关注的是小像素间距、大规格、多色探测器以及主动成像探测器。目前,法国的大型红外焦平面阵列(RFPA)和双波段 RFPA 技术以及小像素非晶硅非制冷探测器技术诸研究已取得一定进展。

1280 × 1024 元中波红外探测器。CEA-LETI 在 2002 年对工作在 3~5 μm 波段、像素间距为 15 μm 的碲镉汞百万像素(1000 × 1000) RFPA 进行了论证。以此为基础,SOFRADIR 公司和 DEFIR 正在开发 1280 × 1024 元规格中波碲镉汞红外探测器。其中,碲镉汞材料通过分子束外延工艺在 4 in 锗衬底上制得,阵列通过在 p 型碲镉汞层中注入 n 型的二极管制得。该阵列的截止波长大于 5.1 μm,填充因数大于 80%,量子效率较高,约 80%。这种间距 15 μm 的 1280 × 1024 中波碲镉汞红外探测器的设计具有经济性,可满足超高分辨率系统需要,预计会很快提供使用。

256 × 256 双波段红外探测器。LETI-LEIR 和 DEFIR 目前正在对 TV/4(320 × 256 和 256 × 256)规格、间距为 30 μm 和 25 μm 的多色红外探测器进行研究。其中的中波红外/中波红外探测器阵列由两个背靠背的二极管组成,结构为通过分子束外延工艺生长的四层异质结构。这种结构依靠所施加的偏压可对 3 μm 和 5 μm 波长辐射按顺序进行探测。其中,截止波长为 5 μm 的结通过离子注入方法获得,截止波长为 3 μm 的结在生长过程中通过掺铟形成。在探测器各层中, p 型掺杂通过对汞空位的热退火控制而实现。

这种双波段探测器制造的两个关键工艺是:实现台面型像素的蚀刻工艺以及调整掺杂水平的热退火工艺。台面分离主要通过湿蚀刻技术实现,最后采用倒装片技术通过圆柱将探测器结构和 CMOS 读出电路互连。这种双波段探测器的性能非常理想,预计第一个 TV/4 规格的 25~30 μm 间距的双波段焦平面阵列很快将被付诸使用,其性能类似于缺陷密度低的单色红外焦平面阵列。

小像素间距非制冷探测器。非晶硅微测辐射热计是非制冷红外探测器中发展较快的一种。LETI 自从 1992 年以来就一直从事非晶硅微测辐射热计的开发,其所开发的阵列涉及从 50 μm 间距的 256

$\times 64$ 阵列到 $35\mu\text{m}$ 间距的 320×240 阵列,其中 $45\mu\text{m}$ 间距的 320×240 阵列已经开始了工业化生产。

LET 的非制冷技术的基础是具有非常薄 ($0.1\mu\text{m}$) 的微桥结构的非晶硅。非晶硅材料可以在低温下通过成熟的沉积和蚀刻技术集成到硅 CMOS 衬底上,与硅生产线完全兼容。目前,法国已经对 $35\mu\text{m}$ 和 $25\mu\text{m}$ 像素间距技术进行了论证。其中像素间距为 $35\mu\text{m}$ 时,器件的信噪比与标准技术的信噪比相比增加了 5 倍,NETD 达到 36mK 。对 $25\mu\text{m}$ 像素间距技术的论证也有了初步结果,下一步工作是设计 $25\mu\text{m}$ 像素间距的 CMOS 读出电路^[2]。

3.2 美国

硅衬底碲镉汞红外探测器。美国陆军研究实验室通过分子束外延技术在 3in 硅 (211) 衬底上生长出了中波红外碲镉汞异质结构,并利用砷离子注入技术制造了 $p+n$ 型器件。

研究人员首先将碲镉汞试样彻底清洁、除油,并沉积 $500\text{\AA}$ 的 ZnS 层。接着在试样上涂敷 AZ18 光阻材料,并为砷离子注入开口。砷离子注入完成后剥离光阻材料层,用 HCl 刻蚀 ZnS 层,并彻底清洁试样。然后将试样在密闭装置中进行退火。退火包括三步:先是在 425°C 进行 10min ,接着在 300°C 进行 4h ,最后在 235°C 退火 24h 。

利用该技术制造的材料具有优良的电性能,载流子浓度在 $10^{14} \sim 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 之间,载流子寿命在 200K 时约 $7.2\mu\text{s}$,在 80K 时约 $2\mu\text{s}$, 80K 的截止波长为 $5\mu\text{m}$ 。由这种碲镉汞异质结构制造的光伏探测器性能优异,峰值动态阻抗 $10^9\Omega \cdot \text{cm}^2$ 的为 2% , R_0A 值为 $10^8\Omega \cdot \text{cm}^2$ 的 7% ,这些值已非常接近理论极限。这种器件是当前公开文献中所报道的最好性能之一。

双波段量子阱红外光电探测器 (QWIP)。地雷探测是陆军的一项重要任务,也是最困难的任务之一。美国陆军研究实验室和夜视电子传感器管理局近年来对用于地雷探测的双波段 QWIP 进行了研究和测试。这种双波段 QWIP 结构通过分子束外延工艺在半绝缘的砷化镓衬底上生长。该结构由两个活性 QWIP 区组成,其中波长较短区的最大响应波长是 $9.3\mu\text{m}$,波长较长区的最大响应波长是 $10.5\mu\text{m}$ 。这两个 QWIP 结构都是 20 个周期的 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 多量子阱结构,通过调节 GaAs 阱的厚度和 Al 的组

分可以实现所需的峰值响应。

该探测器阵列使用 256×256 水平的焦平面阵列制造工艺,其光谱串扰相对较小,约 30% ,其成像采用了海军研究实验室开发的复杂色彩融合算法。通过该探测器的成像可以清楚识别埋藏地雷的区域,并能够区分新埋藏的地雷和一周之前埋藏的地雷。

四色量子阱红外光电探测器。在美国国家航空航天局、弹道导弹防御局、空军研究实验室和国防高级研究计划局联合发起的一项研究中,喷气推进实验室对多色 QWIP 进行了研究。目前已研制出了 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 材料体系为基础的 640×512 规格的多波段 QWIP,并用于超光谱红外成像装置。

喷气推进实验室开发的 640×512 四色焦平面器件为当前多色器件的最高研制水平,其结构中包括四个多量子阱结构层,分别在 $4 \sim 5.5\mu\text{m}$ 、 $8.5 \sim 10\mu\text{m}$ 、 $10 \sim 12\mu\text{m}$ 和 $13 \sim 15.5\mu\text{m}$ 波段响应。每个像素上加工有刻槽较深的二维反射光栅,这些光栅是通过干蚀刻技术产生并涂有 Au 涂层。当施加偏压时,每个像素激发一个 QWIP 层,并读出一个红外波段内的光电流。这种四色探测器在 300K 背景温度下 f 数为 2,工作温度为 45K ,各探测器的探测率均大于 $1 \times 10^{11} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,可操作像元数为 99.9% 。

另外,美国量子阱红外光电探测器技术公司根据国防高级研究计划局的合同,也在加紧发展四色焦平面阵列,其材料为 $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$,阵列规模达到 1024×1024 元,波长覆盖可见光和长波红外,其中有二色为中波红外区。

在导弹告警方面,美国 BAE 系统公司推出的方案是以“AN/ALQ-212 先进威胁红外线对抗系统”为基础而开发的,该系统由 AN/AAR-57(V)通用导弹告警系统、对抗投放器及定向红外线对抗设备组成。在民用型系统中,AN/AAR-57(V)通用导弹告警系统将被保留,但会引入尺寸更小、灵敏度更高的新型激光干扰机。这种民用型红外对抗系统将被安放在长 $1.5 \sim 2.5\text{m}$,高 50cm 的吊舱内,吊舱则安装在民用客机的机腹下面。

诺·格公司的系统源自于“大型飞机红外对抗系统”,该系统原本是专为 C-17、C-130 等大型军用运输机所设计的,采用了 AN/AAR-54(V)导弹告警系统、精确跟踪传感器与干扰机等部件。

AN/AAR-54(V)能在紫外波段探测导弹发动机所喷出的尾烟,并向飞机发出告警信息,精确跟踪传感器(负责锁定与跟踪导弹目标),接着干扰机将红外能量射向导弹,干扰其制导信号。从探测到干扰,整个过程仅需几秒钟。诺·格公司的民用型设备约重140 kg,安装有此设备的吊舱将被固定在飞机后机身的下方,大约每隔18个月需做一次拆下检修。今年年底,诺·格公司计划在波音747客机上对该系统进行运行测试和评估。

2006年,美国将部署天基红外导弹预警卫星系统(SBIRS),该系统由高轨道卫星和低轨道卫星组成。SBIRS系统采用24000个HgCdTe元件组成的基于线阵和焦平面的凝视成像红外探测器,其长波红外探测器在外层空间对弹道导弹助推段的探测能力达300 km。

高轨道卫星由5颗地球同步轨道卫星和2颗大椭圆轨道卫星组成。星上装有短波和中波红外探测器,能穿透大气层,探测弹道导弹的发射。此外,星上还装有新型双传感器系统,即高速红外扫描传感器和辅助凝视传感器,其扫描速度比现役弹道导弹预警卫星快20倍以上。红外扫描传感器用一维线阵扫描南北半球,探测导弹的红外尾焰,然后把信号传递给凝视传感器,用精确的两维阵列跟踪导弹,将导弹运动的画面拉近放大,并能在10~20 s内将预警信息传给弹道导弹预警指挥控制中心。

低轨道卫星由12~24颗覆盖全球的“空间和导弹跟踪系统”(SMTS)卫星组成,用于捕获导弹发动机的红外尾焰,并对导弹进行跟踪,区分再入飞行器和诱饵,为地基拦截导弹提供相关数据和超视距制导,增加拦截导弹的防御区域。低轨道卫星在多个轨道面上成对工作,以提供立体探测和监视。卫星上装有宽视场短波红外传感器和窄视场多光谱(中波、中长波、长波红外及可见光)跟踪传感器。传感器按先地平线以下、后地平线以上的顺序进行扫描探测。SMTS探测搜索区域比现役弹道导弹预警卫星扩大了2~4倍,将有助推段拦截弹道导弹提供更大的作战空间^[3]。

4 发展趋势

为了在未来的技术竞争中取得优势,美国对大规格、多波段(多色)以及非制冷红外探测器技术进行了深入研究。红外探测技术的发展趋势:一是红外焦平面阵列技术;二是红外光电子物理;三是双波

段探测;四是复合探测技术。

4.1 红外焦平面阵列技术

不但要发展基于材料温度特性的硅测辐射热计和铁电材料热释电或热容性红外焦平面器件,还要着力发展基于微光机电技术的热机械应变式红外焦平面器件。同时通过对新型材料的探索,将优异的器件结构和材料特性有效地组合构成性能更为优越的焦平面器件,形成了当前发展的重要方向之一。

4.2 红外光电子物理

研究红外辐射和探测的原理与机制,探索新的材料和器件,为红外光电子技术提供科学基础以及直接应用的热门学科。红外预警探测系统集成红外探测器技术、制冷技术和光电技术、信号处理技术、自动控制技术于一体,以无源方式工作,自身隐蔽性好,抗干扰能力强,探测目标范围广,已逐渐成为对来袭威胁目标预警的主要手段之一。

4.3 双波段探测

采取3~5 μm和8~12 μm双波段探测器件将提高系统对假目标的鉴别能力,还可以降低系统的阈值电平,提高系统的探测距离。随着多元双色探测器技术的成熟,新一代红外预警探测系统必将采用双色探测器件。

4.4 复合探测

采用雷达、红外、紫外、激光等技术的综合型复合光电探测器系统,并不断拓展其响应频谱范围,降低虚警率和提高多传感器数据融合能力,才能满足未来战场的需要^[4]。

5 结束语

随着多波段工作、复合探测、数据融合、各种高新技术应用和发展,红外预警探测系统的灵敏度、效能、定位精度更高,探测距离更远,而且虚警率更低。因此,红外探测技术,在未来现代化战争或局部战争中,将发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 李熙莹,倪国强,蔡娜. 红外探测系统在反巡航导弹中的应用[J]. 激光与红外, 2003, (1): 8-12
- [2] 祝永坚,陈钱. 新型红外探测系统通信模块的设计[J]. 现代电子技术, 2005, (10): 4-6
- [3] 白洪斌. 红外探测器在武器系统中的应用[J]. 航空兵器, 2001, (3): 47-48
- [4] 高昕,许峰. 红外探测技术对多目标弹道参数的测量[J]. 光电工程, 2004, (10): 5-8