

非制冷红外热成像技术的发展与现状

邢素霞, 张俊举, 常本康, 钱芸生

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要:非制冷红外焦平面技术在过去的几年内飞速发展,非制冷焦平面由原来的小规模,发展到中、大规模 320×240 和 640×480 阵列,在未来的几年内有望获得超大规模的 1024×1024 非制冷焦平面阵列。像素尺寸也由 $50 \mu\text{m}$ 减小到 $25 \mu\text{m}$,提高了焦平面的灵敏度,使非制冷红外热成像系统在军事领域得到了成功应用,部分型号已经装备于部队,并受到好评。今后,随着焦平面阵列规模的不断增大、像素尺寸的进一步减小,非制冷热成像系统在军事领域的应用将越来越广泛,尤其在轻武器瞄具、驾驶员视力增强器、手持式便携热像仪等轻武器方面,非制冷热成像系统在近年内有望逐步取代价格高、可靠性差、体积大等笨重的制冷型热成像系统。

关键词:非制冷焦平面阵列; 红外热成像; 轻武器

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)05-0441-04

Recent development and status of uncooled IR thermal imaging technology

XING Su-xia, ZHANG Jun-ju, CHANG Ben-kang, QIAN Yun-sheng

(Opto-electronics Academy, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: From small scale to medium and large scale 320×240 , 640×480 uncooled focal plane array (UFPA), uncooled infrared technology has been developed rapidly in recent years, and 1024×1024 FPAs are expected in the future. The pixel pitch is also developed from $50 \sim 25 \mu\text{m}$, and the sensitivity is improved largely, so that the thermal imaging system is applied successfully in military affairs. Part model has been armed in military and measured well. In the future, with the developing larger scale and smaller pixel of UFPA, the application of uncooled thermal imaging system will be wider, especially in light thermal weapon, such as light weapon vision, driver vision enhancer and handle thermal system, uncooled thermal imaging system is expected to replace the high price, low reliability, big bulk cooled thermal imaging system gradually in recent years.

Key words: Uncooled focal plane array; Infrared thermal imaging; Light weapon

0 引言

红外热成像仪是一种可探测目标的红外辐射,并

通过光电转换、电信号处理等手段,将目标物体的温度分布图像转换成视频图像的设备,是集光、机、电等尖端技术于一体的高新技术产品。在军事领域,它可以突破黑夜的障碍,实施夜间行动和作战,大幅度提

收稿日期:2003-11-07; 修订日期:2003-12-29

作者简介:邢素霞(1975-),女,山东菏泽人,博士生,主要从事红外热成像系统方面的研究。

高武器系统的作战能力;在民用领域,红外热成像系统可以进行无损检测等,同时非制冷焦平面探测器使整个红外热成像系统省去了复杂的制冷系统,成本大大降低,使得红外热成像技术得到飞速发展。

非制冷红外热成像系统的核心是非制冷焦平面,其发展水平直接决定了非制冷热成像系统的发展。从 1978 年非制冷式热成像技术首次研究成功,到目前非制冷热成像仪装备到部队,已有 20 多年的发展历史。世界各国都在竞相开展非制冷焦平面的研究,其中美国、英国、法国等国家处于领先地位。探测器像素已由原来的单元结构发展到目前的大规模面阵,并逐步向超大规模阵列发展,像素尺寸也在明显减小。

1 非制冷红外热成像技术发展现状

非制冷红外探测器主要有电阻型热探测器、铁电型和热释电型探测器。电阻型热探测器的敏感元是热敏电阻,使用的材料主要为氧化钒(VO_x)和非晶硅(α -Si)。铁电型焦平面探测器的材料主要有锆钛酸铅(PZT),钛酸锶钡(BST)为热释电型探测器的主要材料。性价比最高的非制冷系统使用的是混合式铁电探测阵列。

1.1 国外非制冷热成像技术发展现状

非制冷红外探测器的研究居世界领先水平的国家主要有美国、法国、英国和日本。

英国从事非制冷红外探测器研究的公司主要是 BAE 公司,发展成熟的探测器为 PST 和 PZT 混合结构的热释电陶瓷探测器,PST 与 PZT 单片式结构探测器正处在研制中。

日本从事非制冷红外探测器研制的公司主要有三菱公司和日本电气公司。

三菱公司的非制冷红外探测器正处于研发过程,主要有 Si P/N 结型和 YBaCuO 电阻型热探测器两种。探测器规格均为 320×240 ,像素尺寸均为 $40 \mu\text{m}$,在 $f/1$ 条件下,Si P/N 结型焦平面探测器的 NETD 优于 120 mK ,YBaCuO 电阻型焦平面的 NETD 优于 80 mK 。

日本电气公司主要从事以 VO_x 为材料的电阻型探测器的研究,其第一个原理型探测器的 NETD 为 150 mK ($256 \times 256, 50 \mu\text{m}$ 像素尺寸)。最新报道的 320×240 焦平面阵列像素尺寸为 $37 \mu\text{m}$,热响应时间为 12 ms ,填充因子为 72% 。装备热成像系统后的

NETD 为 $100 \text{ mK}(f/1, 60 \text{ Hz})$ 。

据国际光学学会(SPIE)预测,目前红外热成像产品的世界市场规模每年合计 40 亿美元,美国产品占 50% 以上。由此看出,在红外热成像技术上,美国处于世界领先地位。

图 1 所示为美国非制冷红外探测器的发展过程。世界上第一个非制冷红外热成像系统就是由美国的 Texas Instruments 研制成功的,主要红外材料为 α -Si 与 BST。1983 年美国 Honeywell 开始研制室温下的热探测器,使用了硅微型机械加工技术,因为这样可以提供较好的热隔离,并且可以降低生产成本。1990~1994 年,美国很多公司从 HoneyWell 公司得到技术转让,使以 VO_x 为探测材料的非制冷探测器得到了快速、广泛的发展。 VO_x 材料具有较高的热电阻系数,目前世界上性能最好的探测器就是采用 VO_x 材料制备的。

(1) BST 铁电型探测器

混合结构的 BST 热探测器发展已经比较成熟,其中像素尺寸为 $50 \mu\text{m}$ 的 320×240 焦平面阵列的 NETD 为 47 mK 。Raytheon 生产的 W1000 系列为典型产品,其质量为 1.7 kg ,探测距离可达 550 m ,可用于轻型武器热瞄具(LTWS)、驾驶员视力增强器(DVE)、手持式热像仪和车载式驾驶员。截止到 2003 年 9 月,Raytheon 已经向美国陆军交付 10000 只武器热瞄具,包括轻、中和重型武器热瞄具,其中以轻型武器热瞄具装备的 SpecterIR 就是采用 320×240 阵列的 BST 探测器制备的,装备的武器有 M16、M4、M203 和 M136 等,可以探测并识别 200 m 以外的行人。其各项参数如表 1 所示。

薄膜铁电型探测器(TFFE)正处于研发阶段^[1,2],设计规格为 320×240 ,像素大小为 $48.5 \mu\text{m}$,2002 年 Raytheon 在 TFFE 上取得新的突破,NETD 在 $90 \sim 170 \text{ mK}$ 之间,填充因子为 55% 。

(2) VO_x 电阻型探测器

由于 VO_x 材料具有较高的热电阻系数,因此用此材料制备的非制冷探测器是目前性能最好的探测器,已经投入市场的焦平面阵列探测器的规格为 320×240 ,像素尺寸为 $50 \mu\text{m}$,NETD 为 20 mK ,热响应时间为 20 ms 。该型号的探测器在 Raytheon vision system、BAE、Indigo、DRS 等公司都有生产。DRS 公司生产的 U3000/U4000 已经作为武器热瞄具装备于美国陆军,焦平面像素尺寸为 $51 \mu\text{m}$,响应波段

为 8~12 μm , $NETD(U3000)$ 为 64~75 mK, 质量约为 1.36 kg。

表 1 Specter IR 热瞄具的各项参数

Tab. 1 The parameter of Specter IR thermal vision

$NETD$	<0.1 $^{\circ}\text{C}$	Internal power	3AA Li battery
FOV	6.4 $^{\circ}$ (V) \times 8.6 $^{\circ}$ (H)	External power	Selectable
Magnification	1.8 \times	Initial start-up time	<10 s
Operating temperature range	-10~60 $^{\circ}\text{C}$	Spectral response	7.5~12.5 μm
Optics	f/1.0 (Ge window)	IR sensor	Mixed BST microbolometer
Focus range	3 m~ ∞	Polarity control	Hot white/hot black
Individual eye correction	Diopter adjust/ security army eyepatch	Gain/level	Automation/ internal sensor shelves calibration/correction
Range to recognize moving man	>200 m	Rail mount	MIL-STD-1913
Continuous operating time	>6 h@25 $^{\circ}\text{C}$ standard COTS battery, chargeable	Video out	Homochromy SMPTE-170M (NTSC concurrent)
Weight (Batteries)	<1.36 kg	Size	33.65 cm \times 7.62 cm \times 9.65 cm

同时,BAE 公司也在陆续为部队提供 MicroIR™ 系列的轻型武器热瞄具, 配备的武器系统有 A4、A16 系列和 M136、AF4。可用在空降师、机械化步兵师等作战部队。

非制冷红外热像仪在部队轻型武器中的应用是美军用非制冷红外热像仪取代第二代 FLIR 迈出的第一步。

小像素尺寸的 640 \times 480 焦平面阵列探测器是家公司研制的新型产品,也是重点研究产品,它用来提高图像的分辨率。1999 年,BAE 第一个报道了以 640 \times 480 焦平面为核心的热像仪 LTC650™, 像素尺寸为 28 μm , $NETD$ <0.1 $^{\circ}\text{C}$, 质量为 2.4 kg。

DRS 公司在 2001 年报道了第一个研制的以 640 \times 480 焦平面为核心的热像仪 U6000, 像素尺寸为 25.4 μm , 2002 年 5 月对该热像仪进行了演示^[3]。

Raytheon 的 25 μm 像素的 640 \times 480 焦平面性能最高:热响应时间 10 ms, $NETD$ 平均只有 35 mK, 填充因子大于 70%, 代表了目前电阻型微测辐

射热计发展的最高水平,但距其 $NETD$ 为 5 mK 的目标还有一定的差距^[4,5]。

以 640 \times 480 焦平面为组件的热成像系统在 LT-WS 和 DVE 等轻武器上的应用目前还未见报道。

(3) α -Si 电阻型探测器

α -Si 电阻型探测器的市场主要在商业和民用上, Raytheon 公司生产的 160 \times 120 芯片,其像素尺寸为 46.8 μm , $NETD$ <100 mK, 目前已经大批量生产, 在世界范围都有销售。

法国 Sofradir 和 LETI/GEA 公司在非制冷微测辐射热计上的发展打破了美国在这方面的垄断。LETI/GEA 公司从 1992 年开始从事 α -Si 微测辐射热计的研究,取得了较好的成果,2000 年 Sofradir 从 LETI/GEA 公司得到技术转让,开始 α -Si 微测辐射热计的研究。目前真正从事非制冷红外探测器生产的是 Sofradir 的子公司 ULIS 公司。该公司的主要产品型号有两种:UL 01 01 1 型(2001 年)和 UL 01 02 1 E 型(2002 年),其焦平面阵列均为 320 \times 240、像素尺寸为 45 μm 的阵列,填充因子均大于 80%, $NETD$ 分别为 90 mK 和 100 mK。与 UL 01 01 1 型相比,UL 01 02 1 E 型内部增加了温度稳定装置,使探测器的温度动态范围大大增加,其工作性能受外界环境温度的影响明显减小^[6]。

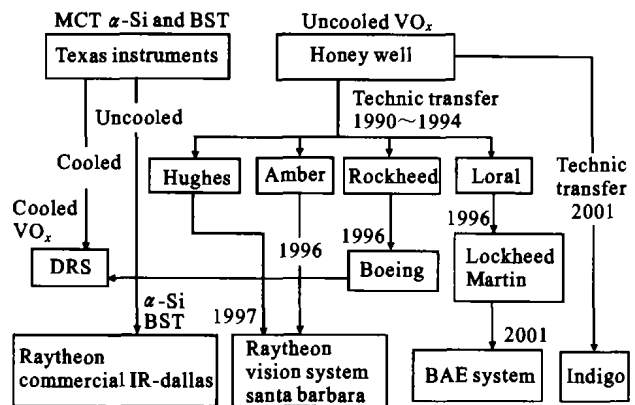


图 1 美国非制冷红外探测器发展过程

Fig. 1 Development of uncooled IR detector in USA

处于研发过程的产品有:35 μm 像素的 160 \times 120、320 \times 240 焦平面阵列和 25 μm 像素的 640 \times 480、320 \times 240 焦平面阵列。

这两种产品为该公司正在开发的两种新型产品。2003 年报道的最新资料显示,35 μm 像素的 320 \times

240 焦平面阵列 NETD 为 36 mK(50 Hz, $f/1$), 响应时间为 12 ms, 热阻抗为 4.2×10^7 K/W。

25 μm 像素的 640×480 、 320×240 焦平面阵列要求达到 35 μm 像素的焦平面性能。2002 年 LETI/CEA 给出的资料显示, 25 μm 像素的 320×240 焦平面阵列 NETD 值为 35 μm 像素的 320×240 焦平面阵列的 2.2 倍, 个别产品达到与 35 μm 相同的性能^[7]。

1.2 我国非制冷热成像技术发展现状

我国在非制冷焦平面阵列技术上起步较晚, 近年来国家投入了大量人力物力用于非制冷焦平面阵列的研究, 目前已经取得初步进展。1995 年, 中国科学院长春光学精密机械研究所利用微机械加工技术研制成功了低成本线列 32 元、128 元硅微测热辐射计阵列, NETD 为 300 mK, 存储时间为 1 ms。由中国科学院上海技术物理研究所承担的钛酸锶钡铁电薄膜材料研究项目已于 2000 年 12 月通过中国科学院上海分院鉴定。该项目采用新工艺制备的钛酸锶钡铁电薄膜材料性能达到国际领先水平。与美国 TI 公司演示的第一代非制冷探测器所使用的材料相同。这表明我国在非制冷热成像技术研究上还有很大的潜力。

我国在非制冷红外热成像方面的研究主要集中在部分高等院校和研究所。这些研究单位主要进行探测器阵列及其工艺的研究。而经营非制冷红外热像仪的公司大部分只停留在制作一些外围设备和开发软件的业务上, 最核心的机芯部分都是从国外进口。

2 非制冷红外热成像技术发展趋势

根据非制冷红外热像仪的市场需求, 未来非制冷红外热成像技术的主要发展方向为:

(1) 发展高性能的非制冷红外焦平面阵列。主要用于满足军事装备的需要。其性能要求如下:

- 1) 相同性能条件下进一步减小像素的尺寸;
- 2) 响应时间短, 满足目标搜索的需要;
- 3) 低功耗;
- 4) 高分辨率;
- 5) 发展大阵列;
- 6) 进一步缩小系统体积。

(2) 发展低成本的非制冷红外焦平面阵列。适用于对分辨率要求不太高的场合, 主要市场在民用领域。其性能要求如下:

- 1) 提高探测器的灵敏度, 采用新的光学材料;
- 2) 发展小阵列;
- 3) 要易于操作;
- 4) 在封装上, 采用集成干胶片技术。

3 结束语

非制冷红外热像仪在军事(红外警戒、跟踪、瞄准以及制导等)和民用领域(电力系统、消防、医疗诊断、森林火灾预警、缉私、夜间安全监视、搜索救援等)都有广泛的应用前景。

据中国光学协会预测, 在今后 5 年, 我国红外热成像设备市场需求总量约 4 万台, 而目前的年自产量不足 500 台。国外的非制冷热像仪成批打入国内市场, 价格比较昂贵。因此国内非制冷红外热像仪的研制与生产已迫在眉睫。

参考文献:

- [1] Hanson Charles M, Beratan Howard R, Belcher James F, et al. Advances in monolithic ferroelectric uncooled IRFPA technology [A]. SPIE[C]. 1998, 3379, 60-68.
- [2] Hanson Charles M, Beratan Howard R. Thin film ferroelectrics: breakthrough [A]. SPIE[C]. 2002, 4721, 91-98.
- [3] Philip E Howard, John E Clarke, Adrian C Ionescu. DRS U6000 640×480 VO_x uncooled IR focal plane [A]. SPIE[C]. 2002, 4721, 48-55.
- [4] Murphy R, Kohin M, Backer B, et al. Recent developments in uncooled IR technology [A]. SPIE[C]. 2000, 4028, 12-16.
- [5] Murphy D, Ray M, Wyles R, et al. High sensitivity (25 μm pitch) microbolometer FPAs [A]. SPIE[C]. 2001, 4454, 147-159.
- [6] Eric MOTTIN, Jean-Luc MARTIN, Jean-Louis OUVRIER-BUFFET, et al. Enhanced amorphous silicon technology for 320×240 microbolometer arrays with a pitch of 35 μm [A]. SPIE[C]. 2001, 4369, 250-256.
- [7] Mottin E, Astrid Bain, Jean-Luc Martin, et al. Uncooled amorphous silicon technology enhancement for 25 μm pixel pitch achievement [A]. SPIE[C]. 2002, 4820, 200-207.