

## 非制冷热成像最新发展和应用前景

李颖文, 陈福胜, 罗艳

(华中光电技术研究所, 湖北 武汉 430073)

**摘要:** 综述了非制冷热成像技术的最新发展和研究趋势及其应用前景。热释电焦平面阵列和微测热辐射计焦平面阵列已成为两种主流非制冷红外探测器。前者的年增长率为 11.4%, 后者的年增长率为 32.4%。非制冷热成像技术在作用距离上优于微光成像、在体积和成本上优于制冷红外成像技术, 使之成为中距离探测的主力军, 并有可能在不远的将来在许多应用方面代替制冷热成像技术。

**关键词:** 非制冷; 热成像; 最新发展

**中图分类号:** TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)03-0257-04

## Latest development and application market of uncooled thermal imaging

LI Ying-wen, CHEN Fu-sheng, LUO Yan

(Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan 430073, China)

**Abstract:** The latest development, research trend and the application market of uncooled thermal imaging are summarized. The ferro electrical focal plane array and the microbolometer focal plane array have been the main uncooled imaging devices. The annual yield of the former has increased 11.4% and the latter 32.4%. Uncooled thermal imaging technology has advantage over dark imaging on the range and has advantage over cooled thermal imaging on the dimension and cost which make it main power on the middle range detection. It will take the place of cooled thermal imaging in many applications in the near future.

**Key words:** Uncooled; Thermal imaging; Latest development

### 0 引言

微光成像系统利用光增强技术, 可以在极低的照度( $10^{-5}$  Lux)下以被动方式工作, 但与非制冷红外成像系统相比, 其体积大, 配套电路复杂, 受环境气候的影响较大, 且视距在 1000 m 左右<sup>[1]</sup>, 而非制冷热像仪的作用距离可达 2~4 km, 因此, 微光成像系统逐渐被

非制冷红外成像系统取代。

红外光子探测器通常要求配有制冷器, 使得整个红外光子探测器组件质量大、功耗高、结构复杂、成本昂贵, 而且单晶复合半导体(例如碲镉汞和铟化铟)与标准 CMOS 的制造技术不兼容, 所以成本很难大幅降低。

为了克服制冷探测器的缺点, 微测热辐射计阵列

收稿日期: 2004-07-18; 修订日期: 2004-08-20

作者简介: 李颖文(1967), 男, 湖北汉川人, 工程师, 主要从事红外成像与红外测试技术方面的研究工作。

和热释电探测器阵列应运而生。这两种器件缩短了热探测器的响应时间、提高了其空间分辨率。除此之外,非制冷焦平面阵列还有 Honeywell 公司研制的非制冷热电焦平面阵列和 Sarcon Microsystems 公司研制的双材料焦平面阵列。

### 1 技术发展概况

#### 1.1 微测热辐射计焦平面阵列和系统

微测热辐射计阵列由 Honeywell 公司最先研制成功,主要材料为氧化钒和非晶硅。最初演示的 336×240 像元微测热辐射计阵列工作在 30 帧/s、室温 and *f*/1.0 光学系统的条件下,噪声等效温差为 0.08 °C。这种阵列在室温下以凝视方式工作,线性输出,采用成熟的硅技术制作,可低成本、大批量生产。

Honeywell 公司给多家公司提供了微测热辐射计阵列的非独家技术转让许可,包括 BAE 系统公司、Raytheon 公司、DRS 技术公司、Indigo 系统公司、INO

表 1 BAE 系统公司非制冷红外成像组件

Tab.1 Uncooled infrared imaging module of BAE system Inc.

	SIM100 microbolometer	SIM200 microbolometer	640×480 SIM microbolometer
Pixel number	327×245	320×240	640×480
Pitch/μm	46.25	—	28
ADC bits	A 14 bits ADC in integrated in the ROIC of the FPA		
Video output	60 Hz NTSC(or 50 Hz PAL)		
NETD	NETD is 50 mK with 30 Hz frame rate and <i>f</i> /1.0 optics	NETD is 50 mK with 30 Hz frame rate and <100 mK <i>f</i> /1.0 optics	
Dynamic range	84 dB, it can view the object in the range of -50 °C~+80 °C without saturation		
Power/W	8.5	4.5	
Dimension	—	3.1"×3.6"(79 mm×91 mm)	—
Thermal imager	Uncooled infrared thermal imager LTC500, ThermacCAM570 of FLIR System Inc.		
Products	Its product includes Infrared helmet, commercial application. The company also manufactures rifle sight and portable imager. It also develops the prototype of the Light Thermal Weapon Sight which will used to bid for the Thermal Omnibus II		

公司、三菱电子公司、LET/LIR 公司、NEC 公司、红外部件公司等,其生产的非制冷微测热辐射计阵列焦平面的性能参数如表 1、表 2 所示。

表 2 雷声红外工作(RIO)公司非制冷红外焦平面阵列

Tab.2 Uncooled infrared focal plane array of RIO company

Pixel number	320×240 VO <sub>x</sub> microbolo-meter	320×240 VO <sub>x</sub> microbolo-meter	Small format (160×128) uncooled mi-crobolometer array based on a-Si	Hybrid pyroelectric BST FPA
Pitch/μm	50	25	—	—
NETD	NETD is 10 mK with 30 Hz frame rate and <i>f</i> /1.0 optics	NETD is 35 mK with <i>f</i> /1.0 optics	Less than 100 mK	NETD is less than 100 mK with <i>f</i> /1.0 optics
Cooler	Need thermo-electrical cooler	Need thermo-electrical cooler	Do not need thermo-electrical cooler	
Thermal imager	RIO provides the microbolometer focal plane array for the TVS-620 commercial temperature-measuring imager of Nippon avionics			
Product	The high performance microbolometer of RIO is mainly used in the military products such as TWS, missile guide and other Raytheon products			

DRS 技术 STS 公司唯一获得了 Honeywell 的许可,能生产 OEM U3000 非制冷微测热辐射计 (320×240)焦平面,也生产用于非均匀性校正和视频格式转换的电子组件。

Indigo 系统公司的读出电路应用了该公司的专利“偏压平衡技术”,可对每个像元单独提供偏压,并在片内进行非均匀性校正。在 3 V 偏压时其总的功耗仅为 0.5 W。

加拿大国家光学研究所 (Institute National d'Optique, INO) 生产 128×128 像元二氧化钒凝视型阵列、256×1 和 256×40 像元的线阵列非制冷焦平面,其噪声等效温差为 0.1 °C。法国 LETI/LIR 公司的 320×240 非晶硅非制冷微测热辐射计、日本 NEC 研究实验

室的 256×256 氧化钽测热辐射计, 红外部件公司 (ICC) 的非制冷焦平面在  $f/1$  光学系统条件下的噪声等效温差均优于 100 mK。

## 1.2 热释电焦平面和系统

热释电探测器阵列由德州仪器公司的国防研发部首先研发成功, 现转让给了美国的雷声公司。热释电焦平面主要集中在美国的雷声公司和英国的 BAE 系统公司, 其热释电焦平面和系统的性能如下:

### (1) 雷声公司的热释电焦平面阵列

像元数 320×240, 钽铌钛 (BST);

NETD 在  $f/1.0$  的光学系统条件下热像仪的噪声等效温差为 70 mK。这种单片 FPA 预计值性能将达到 12 mK;

光学系统 反射式光学系统;

产品应用 200NightSight 系列, 包括商用和军用产品: ProtectIR 4000、PalmIR250 Digital、NightDrive 热像仪。NightSight 的军用型号包括: 便携式武器瞄准器、驾驶员视觉增强器 (DVE)、集成瞄准组件 (ISM)。

### (2) 英国的 BAE 系统公司的热释电 FPA

像元数 256×128PST (钛钽铅); 像元 384×288, 微扫 768×576 像素。

产品应用 军事市场: LION 手持式热像仪、驾驶员热红外观察仪 (DTIV)、SSARF (英国集成战场预警系统的技术展示者项目)。

## 1.3 热电焦平面阵列和系统

除了研发非制冷微测热辐射计焦平面阵列, Honeywell 公司也研发热电焦平面阵列。该器件原理与非制冷微测热辐射计焦平面阵列相似, 不同之处在于其通过一个绝热微桥的热电效应而不是微测热辐射计电阻的变化来表示温升。

Honeywell 公司把这种技术的许可转让给了 Infrared Solution 公司, 后者研发快照模式的红外热像仪装置, 提供给 OEM 厂商。非制冷热电 FPA 技术仅用于商用产品。

## 1.4 其他非制冷焦平面阵列

### (1) 双材料非制冷红外焦平面阵列

Sarcon Microsystems 公司采用两种材料研发成功了一种新型的基于微悬臂电容传感器的非制冷红外焦平面阵列。这种双材料与双金属条相似, 在温度变

化时产生形变, 形变量通过微机械电容来感应。这种技术的优势在于温度电容系数高 (大于 40%/K) 可产生高的信号电平, 而微测热辐射计依靠电阻的变化, 其温度电阻系数只有 2%~4%。同时, 微悬臂 FPA 还不像微测热辐射计那样受 Johnson 噪声的影响。

该公司在 Sarnoff 研制了迄今为止最大的双材料面阵焦平面 (32×32), 噪声等效温差为 100 mK。

### (2) 红外热电堆焦平面阵列

日本防卫厅和日本电器公司 (JDA/NED) 制作了 128×128 元的红外热电堆焦平面阵列, 噪声等效温差为 0.5 °C ( $f/1$  光学系统)。这种热电堆的噪声等效温差大, 只适用于低成本、便携式、快速启动的工业维护应用场合, 难以在军事上应用<sup>[2]</sup>。

### (3) 热释电光导摄像管热摄像机

由英国 EEV 公司设计的 EEV Argus 第四代手提式热摄像机采用热释电光导摄像管, 其最好的性能为 400 线分辨率, 其最小可分辨温度为 1 °C, 主要用于商业。

### (4) 其他焦平面阵列

目前隧道红外焦平面阵列和石英微型谐振器焦平面阵列尚处于概念研制阶段。

## 2 发展趋势

目前非制冷热成像技术的主要产品有微测热辐射计阵列 FPA 和热释电探测器阵列 FPA。前者的制作材料有氧化钽和非晶硅, 主流的材料为氧化钽。后者的制作材料为钽铌钛 (BST) 和钛钽铅 (PST)<sup>[3]</sup>。

目前能够大批量供应市场的工艺成熟的焦平面为 160×120、320×240 规格的焦平面阵列, 640×480 规格的焦平面阵列只能少量供应市场。1024×1024 等大规模的焦平面阵列正在研发之中<sup>[4]</sup>。

焦平面阵列的像元间距从 50 μm 不断减小, 640×480 像素的焦平面阵列的像元间距已达 28 μm。

非制冷焦平面阵列的读出电路有 CCD 和 CMOS 两种类型。CMOS 型读出电路的工作电压更低、可随机寻址、读出方式灵活、与硅生产工艺兼容, 其工艺越来越成熟, 噪声减小到接近 CCD 型读出电路的水平, 为目前绝大多数非制冷焦平面阵列所采用。随着工作

方式从直流偏压模式到脉冲偏压模式、到快照(snapshot)模式的变化,器件的自加热效应不断减小。

BAE 系统公司等在读出电路上集成了 ADC,实现了数字信号输出。雷声公司采用 DSP 技术,制成了不需要热电制冷器的非制冷热像仪。

在非制冷焦平面阵列的热分辨率提高方面,雷声公司的 320×240 像素的焦平面阵列的噪声等效温差已经达到了 10 mK,该指标达到了制冷焦平面阵列的性能。

Indigo 研制成功了迄今外形尺寸最小(76 mm×38 mm×32 mm)、功耗最低的非制冷红外热像仪,在 3 V 工作电压下的功耗只有 0.5 W,质量仅为 200 g。

### 3 最新发展

#### 3.1 灵巧焦平面阵列

灵巧焦平面不仅能感知红外辐射的类型,也能执行其他焦平面用独立的部件才能执行的功能,简化了系统的设计,提供了更迅速的响应能力。其特点有:

(1) 重点区域的多路复用,这在目标获取和跟踪中特别重要,目标获取阶段需要大量的像元对准目标,而目标跟踪阶段只需较少的像元,但要高频场景扫描。

(2) 自动提醒;跟踪;多光谱波段应用。

#### 3.2 三维成像传感器

三维成像传感器的每个像元均可提供精确的距离信息。其探测过程是用单激光脉冲以对人眼无害的波长照射目标,用焦平面阵列在成像频率时间内产生图像和精确的距离信息。根据返回激光信号的特点,三维成像传感器需具有高的带宽和增益。

### 4 应用前景

非制冷热成像主要应用在工业、医疗、科研、军事等领域<sup>[5]</sup>。红外焦平面阵列的年产量及估计年产量如表 3 所示。

图 1 为非制冷焦平面供应商市场份额示意图<sup>[6]</sup>。雷声公司是热释电(BST)和微测热辐射计(VOx 和 a-Si)焦平面的市场领导者。BAE 系统公司在英国生产 PST 热释电焦平面、在美国生产 VOx 微测热辐射计焦平面。DRS 在收购了波音公司 SES 分部(VOx 微测热辐射计焦平面)后也变成了非制冷焦平面市场的一员。

表 3 按红外探测器材料划分的非制冷红外焦平面阵列产量及估计

Tab.3 Annual yield and forecasts for the uncooled focal plane array by infrared detector material

	Ferroelectric focal plane array	Microbolometer focal plane array
2001	2700	1950
2002	3375	2730
2003	4050	3413
2004	4455	4266
2005	4678	5546
2006	4912	7487
2007	5158	10482
Average annual growth	11.4%	32.4%

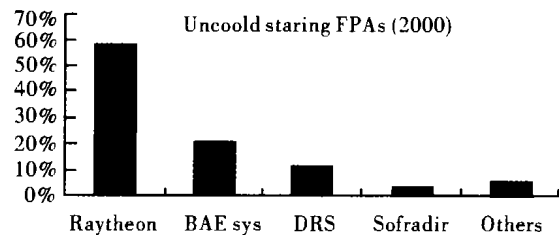


图 1 非制冷凝视型红外焦平面供应商的市场份额

Fig. 1 Market share of uncooled staring infrared focal plane array suppliers

INO 制造 VOx 微测热辐射计焦平面,但是其产品的面阵较小。一些公司也有能力制造非制冷焦平面,如 SOFRADIR 非晶硅微测热辐射计焦平面、Indigo 系统公司的 VOx 微测热辐射计焦平面和三菱电子公司的 SOI 微测热辐射计焦平面。NEC 曾为日本防务厅研发 VOx 微测热辐射计焦平面,后来停止了该 FPA 的开发,在其商用热像仪中使用 DRS 公司的非制冷焦平面。

雷声公司在军用大需求、高性能、小像元非制冷焦平面上有着突出的进展。雷声公司、BAE 公司和 DRS 公司都在研发大面阵(640×480)非制冷微测热辐射计焦平面。

(下转第 280 页)

对此有明显的影 响, 并扫探测器数目越大变化越明显。并扫探测器数目为 10,  $j=4$  时, 在扫描边缘出现的重叠或缝隙达到 30 m 之多。当波段沿 Z 轴移动到某一位置时, 扫描条带出现微小的弯曲, 波段并扫探测器数的增大会加重此现象。当并扫探测器数为 10,  $j=4$ , 波段沿 Z 轴偏离焦平面中心 5 个等效瞬时视场时, 在扫描边缘出现的缝隙达到近 60 m, 但是地面像元在扫描边缘的增大足以覆盖出现的缝隙, 不会导致地面信息的丢失。波段偏离主光轴  $j$  值的增大也造成扫描偏移的增大。 $j$  为 0 时扫描条带沿扫描方向没有偏移,  $j=1$  时扫描条带在两边缘偏移扫描方向达 1000 m,  $j=4$  时扫描条带在两边缘偏移扫描方向达 4000 m。波段并扫探测器元数目及其沿 Z 轴方向的位置对此的影响可以忽略。 $J$  值的改变造成图像的扭曲,  $j=2$  时图像扭曲程度达 3 个像元。

## 4 结 论

波段在焦平面的不同位置和波段并扫探测器数目的改变都有不同的扫描特征, 会造成图像畸变, 给图像的校正和配准带来困难。

(1) 扫描条带相接处, 前后扫描幅宽差值的大小主要由波段并扫探测器数目的多少决定。波段并扫探测器数目越多则扫描条带锯齿畸变越明显。

(2) 扫描条带偏离扫描方向的程度主要由波段偏离主光轴的等效瞬时视场数  $j$  的大小决定。 $j$  越大则扫描条带偏离扫描方向的程度越大。

(3) 波段并扫探测器数目、波段在焦平面的位置都会影响相邻扫描条带的衔接程度。

要减小上述影响带来的图形畸变, 就要求波段探测器元尽量靠近焦平面中心, 波段并扫探测器数也不宜过大。

## 参 考 文 献:

- [1] 韩心志. 45°旋转发射镜扫描性质的讨论[J]. 红外与毫米波学报, 1991, 10(3): 233-236.
- [2] 刘银年. 45°镜多元探测器并扫成像特性和扫描轨迹分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(1): 110-115.
- [3] 张幼文. 红外光学工程[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982. 224.
- [4] 马俊. 45°旋转镜加 K 反射镜扫描特性讨论[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 54-58.
- [5] Pan Delu. A study of anchoring coordinates and calculating zenith of sun and scanner for oceanic satellite data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1997, 15(14): 539-557.
- [6] 连铜淑. 反射棱镜共轭理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
- [7] 张永生. 遥感图象信息系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [8] 章孝灿. 遥感数字图像处理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.

(上接第 260 页)

## 5 结 论

目前红外非制冷焦平面阵列和系统正在向规格更大、像元间距更小、热分辨率更高、系统的外形尺寸更小、功耗更低、质量更轻、不需要热电制冷器的方向发展。绝大多数非制冷焦平面阵列采用 CMOS 读出电路。在焦平面的读出电路上集成 ADC, 使输出的信号数字化已成为发展趋势。灵巧焦平面和三维红外成像传感器成为新的发展方向。非制冷热成像技术在作用距离上优于微光成像、在外形尺寸上优于制冷红外成像技术, 为中距离探测的主力军, 并有可能在不远的将来在许多应用方面代替制冷热成像技术。

## 参 考 文 献:

- [1] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [2] Kruse P W, Skatrud D D. Uncooled Infrared imaging Arrays and I Systems[M]. San Diego: Academic Press, 1997.
- [3] 李颖文, 易新建, 何兆湘, 等. 320×240 红外焦面阵列驱动电路的小型化设计研究[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(3): 230-234.
- [4] 蔡毅. 非制冷热成像在夜视技术中的作用和地位[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(3): 214-217.
- [5] 刘梅冬, 刘少波, 曾亦可, 等. 非制冷红外焦平面阵列 BST 铁电薄膜的制备及性能研究[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(3): 222-225.
- [6] Maxtech International, Inc. The world market for military infrared imaging detectors and systems[M]. 2001.