

红外焦平面成像器件发展现状

陈伯良

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 红外焦平面阵列成像技术已经进入了成熟期。本文对几种红外焦平面阵列器件如 MCT、InSb 和 QWIP 的最新进展作一评述, 简要介绍其器件发展水平、技术路线和关键工艺。简要提及一种新颖的非制冷焦平面成像技术: 光学读出微光机红外接收器。

关键词: 红外焦平面阵列; 碲镉汞; 铋化铟; 量子阱红外探测器

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)01-0001-07

Development state of IRFPA imaging device

CHEN Bo-liang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Infrared focal plane array (IRFPA) imaging technology has been matured during the passed decade. In this paper an overview of recent progress to several kind of IRFPA such as MCT, InSb and QWIP is provided, focusing on new device development, technical lines and key technologies. Also, a new type of uncooled FPA imaging technique—micro-optomechanical infrared receiver with optical readout is briefly introduced.

Key words: IRFPA; MCT; InSb; QWIP

0 引言

红外探测器技术在 20 世纪 90 年代取得了飞速发展。红外焦平面阵列成像技术进入了成熟期。高性能大规格焦平面阵列已正式地应用于各种重大国家安全项目中, 例如弹道导弹防御计划和重要新型武器系统。另外, 新型非制冷红外焦平面技术的涌现正在促进红外技术走向第三代。美国人预言, 未来几年美国红外市场将出现年均 30% 的连续高速增长^[1]。本文简要评述了几种红外焦平面阵列器件技术的最新进展。

1 碲镉汞红外焦平面器件

1.1 器件和材料发展水平

通过调整碲镉汞(MCT)材料的组分, 可以方便地调节其材料的禁带宽度, 器件可以响应多个红外波段范围, 因此, MCT 受到各国的高度重视。MCT 焦平面阵列器件在短波(1~3 μm)、中波(3~5 μm)、长波(8~12 μm)和甚长波(12~18 μm)各个波段取得了全面进展。

1.1.1 短波 MCT 焦平面

波音北美公司和洛克威尔科学中心合作, 在替代

收稿日期: 2004-02-04; 修订日期: 2004-04-06

作者简介: 陈伯良(1943-), 男, 上海市人, 研究员, 主要从事红外探测器材料和器件研究, 碲镉汞、铋化铟红外焦平面器件等重大项目的研究, 在国内外发表论文 30 余篇, 获专利 5 项。

衬底 PACE-1 上生长的 MCT 薄膜材料制造了大规模的焦平面阵列。低背景天文应用,代号为 Hawaii-2 的器件性能参数如表 1 所示^[2]。

多光谱遥感应用的 1024×1024 元 FPA, 截止波长 2.5 μm , 在 1.2×10^{11} phs/cm² s 背景水平和 115 K 工作温度下的平均探测率达到 2.3×10^{13} cmHz^{1/2}W⁻¹, 非均匀性 12.5%, 量子效率 74%, 77 K 下平均暗电流仅为 0.02 e⁻/s, 有效像元率 99.1%, 100 次热循环脱焊率 < 0.2%^[3]。

1.1.2 中波 MCT 焦平面

Rockwell 使用 MBE 技术在 CdZnTe 衬底上制备的 1024×1024 元中波器件已大量生产和应用^[4]。焦平面截止波长 4.8 μm , 像元尺寸 17 μm ×17 μm , p-on-n 结构, SFD 读出。在工作温度 78 K 下平均量子效率 77%, 暗电流 < 60 e⁻/s。在美国海军“凝视红外全景传感器”计划中使用了这种阵列^[5]。

表 1 Hawaii-2 性能参数

Tab.1 Specifications of Hawaii-2

Parameter	Value	Unit
Total pixels	2048×2048	个
Pixel pitch	18	μm
Cutoff wavelength	2.5	μm
Input structure	SFD	
Integration capacitance	18~35	fF
Gain	3.4~6.8	V/e ⁻
Minimum readout noise	<15	e ⁻
Dynamic range	10 ⁴	V/V
Maximum data rate	<1	MHz
Peak detectivity	>1×10 ¹⁴	cmHz ^{1/2} W ⁻¹
Power dissipation	≤2	mW

2003 年法国 LETI/LIR 报道的 640×512 元焦平面, 是在 CdZnTe 衬底上液相外延生长的 MCT 片子上制备的。截止波长 5 μm , 像元中心距 15 μm , B 离子注入 n⁺/p 结构, 快照式电荷放大(SCA)读出, 电荷容量为 $4.4\sim 6.5 \times 10^6$ e⁻。在视场角为 $f/2$, 帧频 120 Hz 下, 平均噪声等效温差 17 mK, 非均匀性 ~5%, 有效像元率 99%, 动态范围 80 dB^[6]。

1999 年德国 AIM 报道了 640×480 元中波器件,

像元中心距 24 μm , 在 $f/1.5$ 视场角和 2 ms 积分时间下, 噪声等效温差 20 mK。

在线列方面, 法国 LETI/LIR 和 Sofradir 共同发展了用于机载对地观测推帚式扫描的长线列焦平面。截止波长 5.5 μm , 像元面积 30 μm ×30 μm , 像元数 1500 个, 由 5 块 300 元的线列阵芯片无缺损拼接而成, 总长度达到 45 mm。平均探测率 ~ 3×10^{11} cmHz^{1/2}W⁻¹, 平均响应率 2.3 A/W, 量子效率 65%, 噪声等效温差 4.3 mK, 非均匀性 7.1%, 有效像元率 99.6%^[7]。

1.1.3 长波(8~10.5 μm)MCT 焦平面

这是一个最受关注也是资金和人力投入最多的波段, 现在已能够大量提供 320×240 元和 256×256 元器件。

Hushes-SBRC 最早报道过做在 Si 衬底上的 MCT 长波 640×480 元焦平面。第一幅热像发布于 1994 年, 但高性能数据迄今尚未披露。

法国 LETI/LIR 报道的 256×256 元焦平面, 像元中心距 35 μm , 77 K 截止波长 10.3 μm 。在视场角 30° 条件下, 噪声等效温差 13 mK。由于采取了 SCA 读出结构, 电荷容量达到 5×10^7 e⁻, 动态范围达 85 dB。在 $f/2.67$ 的视场角下, 平均探测率为 1.56×10^{11} cmHz^{1/2}W⁻¹, 非均匀性 8%^[8]。最近报道的商品化 320×256 元长波组件, 像元中心距为 30 μm , 电荷容量 $1.2\sim 3.7 \times 10^7$ e⁻, 在 $f/2$ 视场下, 噪声等效温差为 20 mK, 动态范围 80 dB, 非均匀性 5%, 失效率 1%。配上 0.4 W 斯特林循环制冷机, 组件质量仅 0.6 kg^[6]。LETI-Sofradir 的线列阵像元数 1500 元, 截止波长 10 μm , 像元面积 30 μm ×30 μm 。在视场角 28° 和 2.4 ms 积分时间下, 量子效率为 55%, 响应率为 4 A/W, 噪声等效温差 12 mK, 有效像元率 98.3%。最近研制成的 1500×2 长波器件, 由 5 块 MCT 和 10 块硅 CMOS 拼接, 具有死像元补偿、均匀性改善或时间延迟积分等功能^[9]。

德国 AIM 制造的 256×256 元器件, 光谱响应范围 7.7~10.0 μm , 像元中心距 40 μm , 填充因子 60%。在 350 μs 积分时间和 $f/2.0$ 光学视场下, 噪声等效温差 18.7 mK, 有效像元率 99.3%^[10]。

1.1.4 甚长波(>12 μm)MCT 焦平面

这一波段因其在空间应用和导弹防御计划中的

重要性而受到重视。Boeing/Rockwell用在CdZnTe衬底上MBE生长的MCT薄膜制备了截止波长为15.8 μm (65 K)的128×128元甚长波焦平面器件。采用As离子注入双层平面异质结工艺,像元中心距60 μm ,在工作温度40 K、积分时间120 μs ,背景通量 $8.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}$ 时,平均探测率达到 $2.76 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$,不均匀性10.5%,有效像元率97.21%。输入结构为低噪声、高线性度直接注入电路^[11]。

1.1.5 双色和双波段焦平面器件

SBRC首先研制成双色同时读出的128×128元(MW/LW)FPA^[12]。

DRS已演示了320×240元(MW/LW)FPA,双波段同时读出,量子效率均大于50%^[13]。

1.2 技术路线和关键工艺技术

碲镉汞历经40余年的发展。全世界从事这一研究的重量级单位达十几家,长期以来都是在相互保密的情况下各自独立地发展自己的技术,形成了各具特色的技术路线。

1.2.1 Boeing/Rockwell

Boeing/Rockwell成功地发展了两种不同的工艺技术:PACE-1/LPE MCT/n-on-p同质结工艺以及双层平面异质结(DLPH)工艺。

PACE-1技术的要点是:外购MOCVD生长的CdTe/Al₂O₃衬底片;LPE生长短波和中波MCT薄膜(8~12 μm 厚)并退火成p型;B⁺离子注入形成n-on-p同质结;ZnS+SiO₂或Si₃N₄双层钝化。这样做出的器件在截止波长5.0 μm ,77 K温度下 $R_0A \sim 1.0 \times 10^6 \Omega\text{cm}^2$,满足大多数高背景应用的性能要求。

MBE-DLPH技术是美国DARPA组织协作攻关取得的重要成果。这项技术的特点是:在CdZnTe衬底利用MBE方法原位掺铟生长n型MCT薄膜;MBE原位掺铟生长较宽带隙(x+0.07)的n型覆盖层;MBE生长CdTe钝化层;As离子注入及退火形成p-on-n结。自1992年起,经过5年攻关,确立了这项技术作为高性能、较低成本、可大批量生产从甚短波(VSWIR)到甚长波(VLWIR)红外焦平面阵列制造技术的地位。

1.2.2 LETI/LIR和Sofradir

LETI/LIR成立于1978年,主要从事红外焦平面

的技术研究。Sofradir成立于1986年,主要使用LETI/LIR的技术,生产和销售MCT焦平面器件。LETI/LIR开发的工艺技术路线早已广为人知。其标准化的生产过程如下^[14]:

(1) 体晶生长CdZnTe,切割成4 cm^2 (111)衬底,LPE生长8~10 μm 厚的MCT薄膜;

(2) 经钝化,离子注入(形成3 μm 深n型层),光刻、腐蚀……,制成二极管阵列;

(3) CCD读出电路,由Sofradir设计,由Thomson在4"Si片上加工,在Sofradir进行验收测试,CCD读出电路上长钢柱,用无压力的特殊工艺进行混成互连;

(4) 实验室杜瓦上互连片进行低温测试,合格的芯片装成正式杜瓦组件,测试并交付使用。

这种标准工艺有两点值得注意。

(1) 离子注入n/p结的制备。和一般离子注入形成突变的浅结不同,Sofradir做了~3 μm 深的渐变的结,中间形成一个相当宽的低掺杂区。这个低掺杂区降低了带间隧道电流,使长波器件有较高的 R_0A 值(20~30 Ωcm^2)^[15]。

(2) 法国人采用独特的钢柱再流焊技术,连通率达到100%。

法国的标准工艺还在实践中继续发展,主要表现为外延片的面积大幅度增加。目前,46 mm×46 mm的特大晶片正在投入工艺线,用于制备大型凝视阵列。

在“标准工艺”基础上,LETI/LIR在器件工艺和读出结构两方面作了改进。改进的工艺降低了复合中心浓度,使长波n-on-p结的暗电流大为减小,10 μm 器件的 R_0A 值达到400~650 Ωcm^2 ,和美国p-on-n结的水准相当。在读出方面,采用了一种所谓的SCA结构,使35 $\mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$ 的像元面积上电荷容量达到 $5 \times 10^7 \text{ e}^-$ 。这些改进使长波焦平面的工作温度提高了10°C,而噪声等效温差仍保持77 K时13 mK的优异水平。

1.2.3 Hushes/SBRC

Hushes/SBRC发展了其独特的工艺技术,即无限熔体富汞垂直液相外延(VLPE)/掺杂生长/多层同质或异质n/p或p/n台面结工艺。SBRC用了15年时间使VLPE发展成熟,实现了焦平面材料和器件的低

成本规模生产。目前常规工艺的要点如下^[16]:

- (1) 30 cm² 的 CdZnTe 衬底;
- (2) 在掺铟富汞熔体中垂直 LPE 生长 n 型 MCT, 铟浓度控制在 2×10^{15} cm⁻³, 厚度 ~15 μm;
- (3) 在掺砷富汞熔体中垂直 LPE 生长 p 型 MCT 薄层, 砷浓度 ~ 1×10^{17} cm⁻³, 已获得 p⁺-on-n 结构;
- (4) 刻蚀台面并加 CdTe 钝化层。这项工艺技术在探测器制备中达到了特殊效果^[17]。

Hushes/SBRC 使用大面积衬底使器件成本大幅度下降。以目前的应用来说, 30 cm² 的衬底对降低成本是一个临界尺寸, 再大也不会导致器件成本进一步降低。

2 InSb 红外焦平面列阵器件

InSb 探测器在 3~5 μm 波段响应, 77 K 截止波长 5.5 μm。由于是本征吸收, 量子效率高。20 世纪 90 年代 InSb 红外焦平面列阵器件发展成熟, 在凝视军用系统中占据主导地位。

2.1 器件发展水平

InSb 红外焦平面列阵器件的发展以凝视型为主, 扫描型线列焦平面只在早期有所报道。凝视 InSb 红外焦平面按其用途形成了不同的技术特点。低背景战略和空间应用的 InSb 列阵特点为规模大、噪声低、工作温度低、帧频低; 中、高背景战术应用的 InSb 列阵主要用于导弹制导和热成像, 列阵特点为规模适度、电荷处理能力强、帧频高。

十多年来 Hushes/SBRC 提供了从 64 × 58 到 1024 × 1024 元 InSb 焦平面列阵, 供陆基和天基红外天文学观测使用, 取得了巨大成功。据称 2048 × 2048 元的列阵也已研制出来, 但有关数据尚未公布。表 2^[18] 是“神灯”(ALADDIN)计划的 InSb 列阵的技术数据。

这种器件的特点是暗电流小、噪声低、帧速慢、阱容量小。这正是探测很低背景下极微弱信号目标的条件。为了维持非常小的暗电流, 器件必须冷却到很低的温度下工作(35 K), 而周围的仪器也必须冷却到 70 K 以保持低背景。该产品被美国宇航局等许多机构采用。

在制导应用方面, 代表当前水平的是 Lockheed-

Martin 下属的 Santa Barbara Focalplane 公司研制的灵活型 640 × 512 元 InSb 焦平面列阵。所谓灵活型是指这种列阵也可用作 512 × 512、640 × 480 或者 400 × 400, 在运行中, 甚至可以从帧频 120 Hz、窗口为 640 × 512 的大场景观视模式突然切换到帧频 1000 Hz、窗口为 128 × 128 的小视场跟踪模式。量子效率 85%, 像元有效率 >99.5%, 功耗 <105 mW^[19]。

在线列阵方面, 以色列 SCD 成功开发了 4 块拼接的 2048 × 16 TDI InSb 长线列焦平面组件(图 1), 探



图 1 4 块拼接的 2048 × 16 TDI InSb 长线列

Fig.1 Butted 2048 × 16 TDI long linear InSb array

测率达到 4×10^{12} cmHz^{1/2}W⁻¹, 在 $f/4.5$ 、积分时间 500 μs 时, 噪声等效温差为 15 mK, 响应非均匀性为 3%, 有效像元率 99.5%, 串音率 <0.5%, 功耗 <100 mW^[20]。

表 2 ALADDIN InSb 列阵参数

Tab.2 ALADDIN InSb specifications

Parameter	Value	Unit
Total pixels	1024 × 1024	个
Pixel pitch	27	μm
Fill factor	100%	
Input structure	SFD	
Frame time	~150	ms
Full well capacity	3×10^5	e ⁻ (bias 1.0 V)
Quantum efficiency	85%	(0.9~5 μm)
Dark current	<0.5	e ⁻ /s
Noise	<50	e ⁻ rms
Non operability	<0.5%	
Operating temperature	35	K

2.2 技术路线和关键工艺技术

InSb 焦平面列阵器件以体生长掺砷 n 型 InSb 单晶为基体材料, Be 或 Mg 离子注入 p⁺-n 形成二极管阵列, SiO_x 或 Si₃N₄ 钝化, 淀积金属电极, 和 CMOS 读出电路通过钢柱互连混成, 再经芯片背减薄和减反射

膜淀积达到量子效率的优化。对低背景应用的列阵,由于在 50 K 以下掺铟 InSb 中空穴扩散长度急剧减小,基体材料宜采用近本征材料,以获得高量子效率。

InSb 焦平面列阵的规模和产量能够迅速发展,得益于 InSb 体晶生长加工技术和芯片背减薄技术的成熟与完善。现在限制列阵均匀性、成品率和成本的因素,已经不是材料本身的质量和尺寸,而是晶片表面加工的技术和质量。InSb 焦平面的芯片背减薄是一项难度很大的工艺。芯片减薄的目标是厚度约为 10 μm 。现在,SBRC 把光学加工中的单点金刚石车削技术用于焦平面芯片减薄,对芯片厚度控制和响应率均匀性的提高取得了更好的效果。

新的工艺路线的研究也很活跃。在(111)GaAs 衬底上生长的 5 μm 厚的 InSb 薄膜 77 K 霍尔迁移率达到 92000 $\text{cm}^2/\text{V s}$ 。原位生长 $\text{p}^+\text{-i-n}$ 结构探测元的探测率可达 $3 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ [21]。用 InSb/GaAs 薄膜制备了 256 \times 256 元焦平面,首次得到了外延 InSb 列阵的人体热图像。这种方法被认为具有挑战传统工艺的潜力。另一个例子是英国 DERA (Defense Evaluation and Research Agency), 利用重掺杂简并半导体的吸收边兰移(Moss-Burstein 效应),使 InSb 衬底变得部分透明,从而大大降低了芯片减薄的要求。DERA 在这种衬底上利用 MBE 原位掺杂生长多层结构,做出了高性能 320 \times 256 元列阵[22]。在工作温度 80 K,积分时间 1.5 ms 下,测得噪声等效温差小于 10 mK。这种同质外延方法不存在晶格失配问题,容易获得低缺陷密度的外延层,比用 GaAs 衬底异质外延有更大的吸引力。

3 量子阱光导体焦平面列阵

1985 年首次发现 GaAs/GaAlAs 超晶格量子阱结构的红外吸收现象后,量子阱红外探测器(QWIP)的发展十分迅速。之后,由于观测到 GaAs/GaAlAs QWIP 列阵存在较大的串音,并需要较低的工作温度(60~65 K),其发展势头曾一度减缓。近年来,随着低背景空间和战略应用需求的增大和技术的进步,量子阱焦平面列阵的发展出现了新的势头。

1999 年德国 AIM 研制成的 QWIP 焦平面组件,

光电导元的尺寸是 24 $\mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$, 电荷存储容量为 $7 \times 10^6 e^-$ 。组件性能见表 3[23]。

QWIP 焦平面器件存在的一个问题是入射辐射在衬底表面和光栅面之间多次内反射造成了较大的光学串音。在互连后 GaAs 芯片被减薄到 25 μm 以下以消除串音。图 2 是用 640 \times 512 元 QWIP 焦平面器件摄取的人体热像。图中煤气枪喷出的火焰轮廓十分清晰,表明经过适当的芯片减薄,器件串音问题已经得到了解决。现在,通过工艺改进,响应光谱很宽的 QWIP 焦平面也已问世,如 JPL 已研制成 10~16 μm 的 640 \times 512 元 QWIP FPA[25]。

表 3 AIM QWIP 焦平面性能参数

Tab.3 Specifications of AIM QWIP FPAs

Parameter	Value	Unit
Total pixels	640 \times 512	个
Pixel pitch	24	μm
Spectral range	8~10	μm
Integration mode	Snap shot/rolling	
Integration time	16	ms
f numbers	2.0	
Operating temperature	60	K
Frame frequency	60, 120	Hz
Mean responsivity	59.3	mV/K
NETD	19.2	mK
Operability	99.92%	(NETD<40 mK)

最近,AIM 发表了采用新型的四区段量子阱-势垒结构的 640 \times 486 元长波器件,在 30 Hz $\sqrt{f/2}$ 条件下噪声等效温差为 9.6 mK,获得了高清晰、高对比度的外景热像[24]。图3是 QWIP 的芯片结构。

在甚长波范围,JPL 报道了 128 \times 128 元 QWIP 焦平面器件,像元尺寸 38 $\mu\text{m} \times 38 \mu\text{m}$,中心距 50 μm ,截止波长 14.9 μm ,量子效率 3%,非均匀性 2.4%,校正后非均匀性 0.2%,55 K 下 $D^* \sim 1.6 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$,45 K 下噪声等效温差约为 30 mK[26]。

双色和双波段红外焦平面列阵是 QWIP 可以充分发挥其优势的领域。已经报道 Lockheed-Martin 公司制成了 256×256 元中波/长波焦平面列阵, 峰值波长分别为 4.8 μm 和 8.7 μm, 双波段同时积分和读出。图 4 是双色量子阱焦平面器件的热像。



图 2 量子阱焦平面抑制串音的成像效果

Fig.2 Imagery of QWIP PFA with the crosstalk depressed

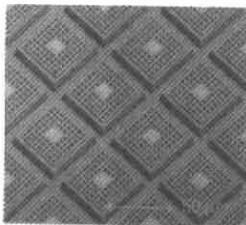


图 3 QWIP 的芯片结构

Fig.3 Micro-structure of a QWIP detector array

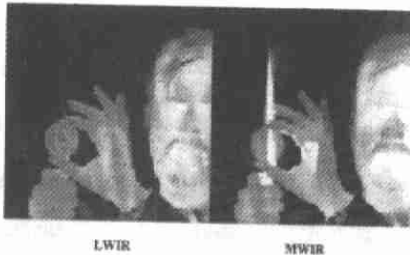


图 4 双色量子阱器件的成像效果

Fig.4 Imagery of two color QWIP FPA

4 非制冷红外焦平面列阵

20 世纪 90 年代成功发展了硅微测辐射热计和热释电探测器列阵两种非制冷焦平面器件。320×240 元热释电焦平面器件已用在凯迪拉克轿车的夜视仪上, 夜视仪的噪声等效温差为 100 mK。近年来, 非制冷硅微测辐射热计焦平面器件也取得重大突破, Raytheon IR 研制成像素 25 μm 的高灵敏度 320×240 元微桥 FPA, 在 f/1, 30 Hz 操作条件下, 噪声等效温差

优于 35 mK。下一步的目标是研制出噪声等效温差优于 20 mK 的 640×480 元器件^[27]。

最近出现一种新颖的非制冷焦平面成像技术: “幻镜”(MIRROR)——光学读出微光机红外接收器。“幻镜”是制作在硅衬底上的双层异质薄膜悬臂阵列(Bimaterial Cantilever)。每一个悬臂的尺寸为 100 μm×200 μm, 由两层不同材料组成, 下层为 1 μm 厚的 SiN_x, 上层为 0.5 μm 厚的 Au。SiN_x 和 Au 的热导率和线热胀系数相差很大。红外辐射照射到 SiN_x-Au 悬臂上, 使其温度升高, 发生弯曲。悬臂阵列的正上方对准覆盖了一块刻有针孔列阵的光学滤光片。一束平行光通过光学滤光片照射到悬臂阵列上, 通过光学滤光片的衍射被肉眼、CCD 或 CMOS 光电阵列接收并视频显示出悬臂弯曲的响应, 如图 5 所示。“幻镜”焦平

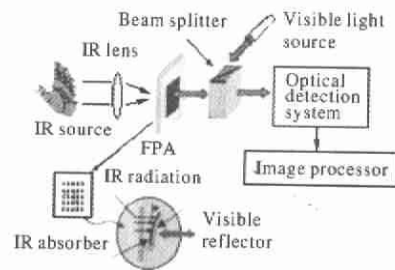


图 5 “幻镜”光学读出成像示意图

Fig.5 Schematic diagram of the MIRROR imaging

面阵列的特点是: (1)室温工作; (2)不用读出电路, 光学读出; (3)不需要电学连线, 像元的漏热小, 由热力学起伏决定的像元热噪声约为 50 μK, 对应的噪声等效温差为 1~3 mK; (4)制造工艺和微电-机系统(MEMS)工艺完全兼容; (5)电功耗为零。这些特点使

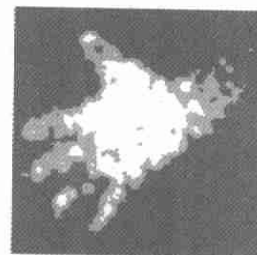


图 6 “幻镜”形成的热像

Fig.6 Thermal image of a human hand

得“幻镜”具有很大的潜在竞争力。最近报道了规格为 300×300 元, 像元大小为 $65 \mu\text{m} \times 65 \mu\text{m}$, 噪声等效温差 $< 200 \text{ mK}$ 的“幻镜”器件^[20], 图 6 是其热像。

参考文献:

- [1] Rotolante R A. Why the IR detector market is in flux[J]. Laser Focus World, 1999, 35(10): 65.
- [2] Kadri Vural, Lester J Kozlowski, Donald E Cooper, et al. 2048×2048 HgCdTe focal plane arrays for astronomy applications[A]. SPIE[C]. 1999, 3698. 24–35.
- [3] Rockwell Scientific. ROIC reference table[EB/OL]. <http://www.rsc.rockwell.com/mctfpa>, 2004–09–24.
- [4] Arvind I D'Souza, Larry C Dawson, Dan J Berger, et al. HgCdTe multispectral infrared FPAs for remote sensing applications[A]. SPIE[C]. 1998, 3498. 192–202.
- [5] Montroy J T, James D Garnett, Scott A Cabelli, et al. Advanced imaging sensors at Rockwell Scientific Company[A]. Proceedings of SPIE[C]. 2003, 4721. 212–226.
- [6] James R Buss. Staring infrared panoramic sensor (SIRPS)[A]. SPIE[C]. 1998, 3436. 743–762.
- [7] Philippe M Tribolet, Patricia Costa, Fillon P, et al. Large staring arrays at SOFRADIR[A]. Proceedings of SPIE[C]. 2003, 4820. 418–428.
- [8] Jean-Paul Chamonal, Eric Mottin, Patrick Audebert, et al. 1500-element linear MWIR and LWIR HgCdTe arrays for high-resolution imaging[A]. SPIE[C]. 1997, 3221. 384–394.
- [9] Jean-Pierre Chatard. LW MCT IRFPA cost optimization[A]. SPIE[C]. 1999, 3698. 407–419.
- [10] Castelein P. New generation of long linear butted HgCdTe arrays for high resolution infrared imaging[A]. Proceedings of SPIE[C]. 2003, 4820. 252–259.
- [11] Rainer Breiter, Wolfgang A Cabanski, Koch R, et al. Focal plane arrays: MCT, quantum wells, PtSi[A]. SPIE[C]. 1998, 3436. 359–374.
- [12] Walter R Dyer, Meimei Z Tidrow. Applications of MCT and QWIP to ballistic missile defense[A]. SPIE[C]. 1998, 3379. 434–440.
- [13] Herbert K Pollehn, Jack S Ahearn. Multidomain smart sensors[A]. SPIE[C]. 1999, 3698. 420–426.
- [14] James P Kraus, James P Dietz, Jean-Pierre Chatard, et al. Development and demonstration of the SOFRADIR 480×4 infrared FPA for the LOSAT second-generation FLIR[A]. SPIE[C]. 1994, 2269. 524–536.
- [15] Destefanis G L. HgCdTe infrared diode arrays[J]. Semicon Sci Technol, 1991, 6(12C): C88–C92.
- [16] Tse Tung, DeArmond L V, Herald R F, et al. State of the art of Hg-melt LPE HgCdTe at Santa Barbara Research Center[A]. SPIE[C]. 1992, 1735. 109–134.
- [17] Charles A Cockrum. HgCdTe material properties and their influence on IR FPA performance[A]. SPIE[C]. 1996, 2685. 2–15.
- [18] Albert M Fowler, Ian Gatley, Paul McIntyre, et al. ALADDIN: the 1024×1024 InSb array—design, description, and results[A]. SPIE[C]. 1996, 2816. 150–160.
- [19] Mark A Goodnough, Larry J Hahn, Robert B Jones, et al. Flexible 640×512 InSb FPA architecture[A]. SPIE[C]. 1997, 3061. 140–149.
- [20] Moshe Zucker, Igor Pivnic, Eyal Malkinson, et al. Long, mid-wave infrared detector with time delayed integration[A]. Proceedings of SPIE[C]. 2003, 4820. 580–592.
- [21] Michel E, Mohseni H, Wojkowski J, et al. Detectors and focal plane arrays on GaAs, Si, and Al_2O_3 substrates[J]. Mat Res Soc Symp Proc, 1997, 450: 79–84.
- [22] Andrew D Johnson. High-performance InSb/In_{1-x}Al_xSb focal plane detector arrays grown by MBE [A]. SPIE[C]. 1999, 3629. 288–297.
- [23] Rainer Breiter, Wolfgang A Cabanski, Koch R, et al. High-resolution QWIP and MCT FPA modules at AIM[A]. SPIE[C]. 1999, 3698. 397–406.
- [24] Harald Schneider, Joachim Fleissner, Robert Rehm, et al. High resolution QWIP FPAs for the $8\text{--}12 \mu\text{m}$ and $3\text{--}5 \mu\text{m}$ regimes[A]. Proceedings of SPIE[C]. 2003, 4820. 297–305.
- [25] Harald Schneider, Joachim Fleissner, Robert Rehm, et al. Characterization of QWIP ($10\text{--}16 \mu\text{m}$) broad band FPA[A]. Proceedings of SPIE[C]. 2003, 4820. 273–281.
- [26] William A Beck, Thomas S Faska. Current status of quantum well focal plane arrays[A]. SPIE[C]. 1996, 2744. 193–206.
- [27] Daniel F Murphy, Michael Ray, Richard Wyles, et al. High sensitivity $25 \mu\text{m}$ microbolometer FPAs[A]. Proceedings of SPIE[C]. 2003, 4820. 208–219.
- [28] Yang Zhao, Jongeun Choi, Roberto Horowitz, et al. Characterization and performance of optomechanical uncooled infrared imaging system[A]. Proceedings of SPIE[C]. 2003, 4820. 164–174.