

文章编号: 1672-8785(2014)02-0001-08

碲镉汞红外探测器的前沿技术综述

叶振华¹ 陈奕宇^{1,2} 张 鹏^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 红外光电探测器件在军事、民用和科学研究方面具有非常重要的应用。而碲镉汞 (HgCdTe) 由于自身的诸多优点在红外光电探测器的发展中起到了至关重要的作用, 至今仍然是重要的战略战术应用中首选的材料体系。首先分析了针对新一代红外探测器所提出的 SWaP³ (Size, Weight, and Power, Performance and Price) 概念, 然后简要介绍了第三代红外焦平面研究背景下 HgCdTe 薄膜的衬底水平与材料生长情况, 最后总结了大规模阵列器件、甚长波红外器件、高工作温度 (High Operating Temperature, HOT) 器件、超光谱探测器件、双色器件以及雪崩光电器件等前沿技术方面的研究进展。

关键词: 碲镉汞; SWaP³ 概念; 高工作温度; 超光谱; 双色; 雪崩光电器件

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.02.001

Overview of Latest Technologies of HgCdTe Infrared Photoelectric Detectors

YE Zhen-hua¹, CHEN Yi-yu^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Infrared photoelectric detectors have shown their versatility in military, civilian and scientific research applications. Because of many advantages, the detector material HgCdTe has played a vital role in the development of infrared photoelectric detectors. Up to now, it is still the best choice for many applications. First, the SWaP³ concept proposed for the new generation of infrared detectors is analyzed. Then, the HgCdTe materials qualified for the third generation of infrared focal plane arrays (FPA) are presented in brief. Finally, the research progress of large format array devices, very long wavelength devices, high operation temperature (HOT) devices, hyper-spectral devices, dual-band devices and avalanche photoelectric diodes (APD) is summarized.

Key words: HgCdTe; SWaP³ concept; HOT; hyper-spectral; dual-band; APD

0 引言

红外探测成像技术具有探测距离远、抗干扰性强以及工作时间不受限制等优点, 已被广泛应用于军事、民用和科学领域。作为红外探测成像技术的主要发展方向, 红外焦平面阵列能够将

红外信号即温度分布信号转换成图片或视频图像, 从而为人们提供直观的温度信息。红外探测器的焦平面技术主要包括碲镉汞 (HgCdTe) 与锑化铟 (InSb) 带间跃迁型光伏探测器、铂硅 (PtSi) 光子发射型探测器、铝镓砷 / 镓砷 (AlGaAs/GaAs) 量子阱等子带间跃迁型探测器以及铁电陶瓷、

收稿日期: 2014-01-20

作者简介: 叶振华 (1977-), 男, 江西玉山人, 博士, 研究员, 主要从事新型红外探测器方面的研究。

E-mail: zhye@mail.sitp.ac.cn

氧化钒、非晶硅微测辐射热计等非致冷型探测器。目前,许多国家尤其是美国、英国、法国和德国等西方军事强国都有很多公司致力于红外成像技术的研究与开发。他们在红外探测领域处于领先地位,并获得了许多成果^[1-2]。

HgCdTe 红外焦平面探测器是一种非常重要的红外探测器。自 1959 年人工合成的 HgCdTe 材料问世以来,尤其是从 20 世纪 70 年代开始,借助于晶体制备技术以及外延技术的快速发展,碲镉汞材料及器件的研究工作取得了很大进展。通过调节 Cd 的组分, HgCdTe 的带隙可以实现在 0 ~ 1.6 eV 之间的连续变化,而且其所对应的波长能够完全覆盖短波、中波、长波和甚长波等整个红外波段。与其他红外探测材料相比, HgCdTe 具有以下优点: (1) 禁带宽度易于调节; (2) 由于是本征吸收型材料,其量子效率高,响应快; (3) 电子迁移率高,且电子 / 空穴迁移率之比大; (4) 少子寿命较长,扩散长度较长; (5) 介电常数比较适中,从而可得到较小的 p-n 结电容,等等。

本文先从系统应用需求上分析针对新一代红外探测器所提出的 SWaP³ 概念,然后简略地介绍适应新需求的 HgCdTe 薄膜技术的研制状况,最后总结 HgCdTe 红外探测器前沿技术方面的研究进展。

1 新一代红外探测器的 SWaP³ 概念

各种成像探测技术的发展过程都会经历以下三个阶段^[1]: (1) 得到目标的信号强度,获取目标的“黑白照片”; (2) 得到目标的信号强度和波长,获取目标的“彩色照片”; (3) 得到目标的信号强度、波长、相位以及偏振态,获取目标的“全息照片”,这才是各种成像探测技术所追求的最高级别。

目前,为了满足越来越多的应用需求,红外成像技术已经从“黑白照片”向“彩色照片”过渡,其标志是美国、英国、法国和德国等已经研制出了双(多)色甚至多波段的第三代红外光电探测器。为了扩展“彩色照片”的颜色覆盖范围,人们以后将会继续发展甚长波、双(多)色以及主被动双模器件。然而要想得到“全息照片”,人们还需要探索在目标辐射入射方向上集成具有像素级分光 and 像素级偏振选择等功能结构的红外焦平面探测器^[1]。

当前发展的第三代红外光电探测器正在逐渐形成 SWaP³ 概念^[4]。图 1 所示为 SWaP³ 概念所涉及的因素及其相关的剖析情况。该概念是在唐纳德·里高等人于 1999 年提出高性能、低成本的基本思想的基础上形成的。在 SWaP³ 概念发展的驱使下,红外探测器的发展主要集中在大规格、小型化、多色化 (multi-color)、智能化

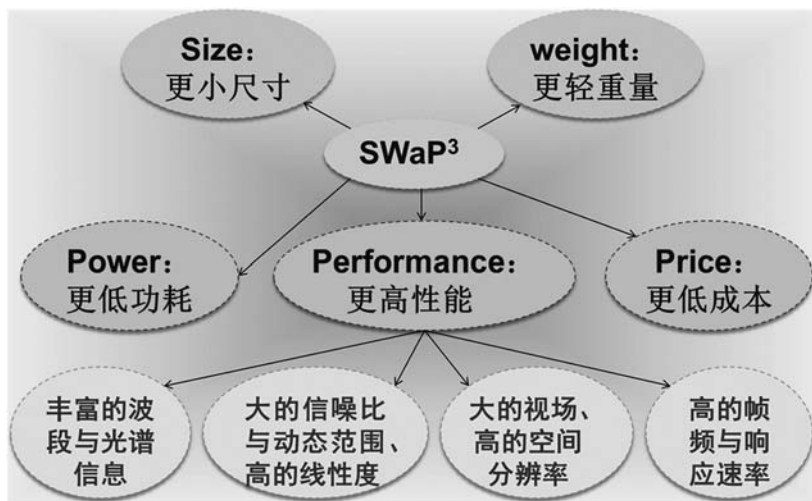


图 1 红外探测器 SWaP³ 概念的关系框图

和高温工作等前沿领域。在战略应用方面, 高性能是核心, 其重点是要提高光谱分辨率、空间分辨率、时间分辨率以及辐射探测器的灵敏度。然而在战术应用中, 高性能则涉及到 SWaP³ 概念的各个方面。此时需要权衡尺寸、重量和功耗三者之间的关系, 另外还要特别关注应用成本。

2 HgCdTe 材料及其发展

HgCdTe 红外探测器已经在军事领域的预警卫星、侦察、制导, 民用领域的遥感探测以及满足科学研究要求的天文探测等方面得到了广泛应用。采用液相外延 (Liquid Phase Epitaxy, LPE) 法生长 HgCdTe 的技术已经趋于成熟, 使得 HgCdTe 可以实现产业化生产。而分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 法或金属有机化合物汽相沉积 (Metal-Organic Vapor-Phase Epitaxy, MOVPE) 法等技术则可用于制作复杂的 HgCdTe 多层异质结材料, 这更有利于第三代双色 / 多色红外光电探测器以及新型探测器的发展。国际知名的红外光电探测器研究机构包括美国的 DRS 公司和雷神公司、法国的 CEA-Leti 研究中心和 Sofradir 公司、英国的 SELEX 公司以及德国的 AIM 公司等。目前, 各公司的研究工作主要集中在提高材料质量并开发出更好的工艺流程上, 以提高探测器的各项性能。

2.1 外延用碲锌镉衬底技术

在利用 LPE 技术生长 HgCdTe 时, 需要采用晶格严格匹配的衬底。经过多年的研究工作, 人们一般认为 Zn 含量为 4% 的碲锌镉 (CdZnTe) 晶体是最佳的衬底材料。而高质量 CdZnTe 衬底是制作高质量 HgCdTe 薄膜材料的基础。现如今, CdZnTe 衬底的尺寸比较受关注, 因为单晶尺寸越大, 产量越高, 同时成本也越低。目前, 法国 CEA-Leti 研究中心已经具有制作直径为 90 mm 的 CdZnTe 单晶晶锭的工程化能力, 同时他们还能制作直径为 115 mm 的大尺寸单晶晶锭 (见图 2)^[3]。但是晶锭越大, 封管技术越复杂, 温度以及 Cd 组分的分压控制也越严格。目前, CdZnTe 的刻蚀坑密度 (Etch Pit Density, EPD) 已经可以

控制在 $10^4/\text{cm}^2 \sim 10^5/\text{cm}^2$ 之间; 双 X 射线衍射谱显示, CdZnTe 衬底的典型半高宽为 $25\text{arcsec} \sim 45\text{arcsec}$, 说明该衬底材料的晶型非常好。

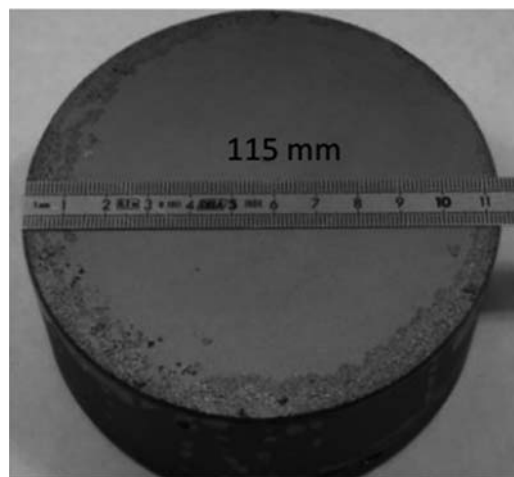


图 2 CEA-Leti 研究中心研制的直径为 115 mm 的 CdZnTe 单晶柱

在用 MBE 法和 MOVPE 法生长 HgCdTe 时, 硅 (Si)、锗 (Ge) 以及砷化镓 (GaAs) 是几种可以选择的衬底。这些材料已经在半导体行业中得到大量使用, 因此成本较低, 质量也较高, 这对于 HgCdTe 生长成本的降低非常有益。由于晶格失配的存在 (例如 Ge 与 HgCdTe 之间的晶格失配达到 14%), 生长很大尺寸的薄膜存在着一些困难。但是在合理利用缓冲层之后, 采用 MBE 法生长得到的 HgCdTe 在性能上已经可以与用 LPE 法得到的材料相当。

2.2 HgCdTe 薄膜材料生长技术

LPE 法是目前 HgCdTe 量产的主要手段。利用合适的 Cd、Hg、Te 元素配比, 可以制作出对应于所有红外波段的材料: 短波红外 ($1.7 \sim 3 \mu\text{m}$)、中波红外 ($3 \sim 5 \mu\text{m}$)、长波红外 ($8 \sim 10 \mu\text{m}$) 以及甚长波红外 ($>12 \mu\text{m}$) 波段。由于熔融态伸缩不可避免, HgCdTe 外延层通常不可能是完全平整的。但是通过调节各种工艺参数, 整个晶片的总起伏水平已经可以被常规控制在 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 以内, 而利用最优良的工艺可以制得 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 以内的超平整芯片^[5]。同时, 外延层的质量也很好: 双 X 射线衍射谱的半高宽在 $25\text{arcsec} \sim 40\text{arcsec}$ 之间, EPD 在 $10^4/\text{cm}^2 \sim 10^5/\text{cm}^2$ 之间 (这已经与衬底的性能相当)。这种高水平的晶体

性质可以保证器件在后期工艺中的均匀性,因此对提高有效像元率非常有益。

MBE 法可以弥补 LPE 法在异质结 HgCdTe 材料方面的不足,它是目前双色 / 多色器件必要的生长方式。采用 MBE 法可以非常方便地调控组分比例及掺杂浓度,这也决定了 MBE 法将会是 HgCdTe 未来发展中的主要生长方式。一些公司已经开始将 MBE 法投入到日常的生产线当中。在 MBE 生长过程中,人们一般将注入铟 (In) 作为 n 型掺杂的施主,将注入砷 (As) 作为 p 型掺杂的受主。当 MBE 法使用成本较低的 Si、Ge 或 GaAs 衬底时,缓冲层的使用非常有必要。使用晶格匹配的 CdZnTe 缓冲层可以降低二次晶格匹配的影响。总体而言,不管是单层还是多层材料的生长,用 MBE 法生长的 HgCdTe 材料的质量均可达到采用 LPE 法时的水平。

MOVPE 法也是一种重要的生长方法。虽然其生长温度比 MBE 法稍高,但是通过仔细控制参数得到良好的 HgCdTe 材料也是可行的。英国 SELEX 公司采用 MOVPE 法在 GaAs 衬底上生长出了性能非常优异的 HgCdTe 材料,并且研制出了双色红外探测器、2M 像素规模的可拼接阵列以及雪崩器件等。

3 HgCdTe 红外探测器前沿技术进展

基于 HgCdTe 薄膜材料的技术进展, HgCdTe 在各种应用中都取得了稳步的发展与进步。为了达到第三代焦平面探测器的标准并满足越来越复杂的应用需求,目前人们在 HgCdTe 红外探测器的前沿技术方向上主要做了以下几方面的努力。

3.1 大规模探测器阵列技术

德国 AIM 公司采用 LPE 法 (CdZnTe 衬底) 和 MBE 法 (GaAs 衬底) 都得到了像元中心距为 15 μm 的 1280 $\times$ 1024 元中波红外 (80 K 下截止波长为 5.3 μm) 以及长波红外 (80 K 下截止波长为 10 μm) 阵列^[5]。

英国 SELEX 公司采用 MOVPE 法在 GaAs 基上得到了三边可拼接的像元中心距为 12 μm 的

1920 $\times$ 1080 元大规模 HgCdTe 探测阵列 (型号为“FALCON”), 并最终通过拼接 8 块阵列形成了 16M 规格的超级阵列 (见图 3)^[7]。要在一块完整芯片上形成 16M 像素规模的超级阵列几乎是不可能的, 此时拼接方式显然是一个较好的选择。采用拼接技术必定会产生连接部位的盲区。若对盲区进行改良, 则需同时兼顾焦平面阵列及电路的平整性和均匀性, 尤其是芯片边缘像素的性能; 在探测芯片边缘以及连接电路边缘的处理中都要利用特殊工艺。当两块芯片连接处的像素间隔小于 50 μm 时, 拼接的填充系数达到 90%, 这种情况比较理想。

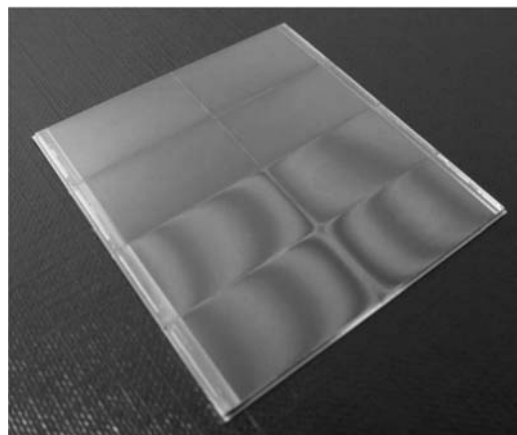


图 3 英国 SELEX 公司利用拼接技术获得的 16M 规格红外探测器

在大规模阵列的制备中, 外延层的平整性以及材料组分需要得到尤为严格的控制。对于截止波长较长的材料而言, Cd 组分的微小变化都会引起截止波长产生大幅偏离。利用较好的工艺可以将截止波长的最大偏离控制在 0.18 μm 以内 (截止波长为 9 μm 的探测芯片)。而平整性的最高水准就是上文提及的超平整芯片。

当像素规模变大时, 像元尺寸必须缩小, 以免芯片过大带来工艺上的难度以及额外的成本。15 μm 和 12 μm 大小的像元中心距是大规模生产已达到的水平, 而且像元中心距为 10 μm 的阵列也已研发出来, 这将更有利于开发 2k $\times$ 2k 规格的阵列^[5]。当像元缩小时, 铟连接工艺将会面临很大的挑战。对于尺寸小于 15 μm 的像元, 铟柱应使用直径小于 6 μm 的铟球。而对于 6 μm 铟球, 形状及直径的控制难度更大, 要求

也更高。通过对光刻工艺、铟蒸发工艺和铟回流工艺进行优化,可以得到符合要求的铟球。

大规模阵列器件所面临的挑战主要是对有效像元率的控制。在整个工艺过程中,衬底、材料生长以及刻蚀、互连、钝化等每一步工艺都有可能造成缺陷像元。只有采用非常成熟的工艺线,才能最终得到很高的有效像元率。AIM 公司研制的大规模探测器阵列的有效像元率都在 99% 以上,中波红外器件的有效像元率在 80 K 下可以达到 99.96%,而 SELEX 公司研制的超级阵列拼接芯片的有效像元率最高在 99.6% 左右。

3.2 甚长波 HgCdTe 红外探测器技术

甚长波红外器件的 HgCdTe 材料需要具有很低的 Cd 组分,对其进行精确控制的难度很大,因此这也是 HgCdTe 红外体系的一个难点。若材料的截止波长设计为 $16\text{ }\mu\text{m}$,只要 Cd 组分变化 1%,截止波长就会变化 4.4% ($0.7\text{ }\mu\text{m}$) 左右。技术领先的国外公司对材料具有很好的掌控能力,并且在甚长波段探测器方面都进行了相应的研制工作。法国 Sofradir 公司运用改良的 n-on-p 工艺在 CdZnTe 衬底上生长了截止波长为 $16\text{ }\mu\text{m}$ (工作温度为 55 K) 的 HgCdTe 薄膜,并利用该材料制得了像元中心距为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的 320×256 元探测器。光电性能测试结果显示,该探测器在 55 K 下的有效像元率为 99.6%。同时暗电流测试结果表明,其与扩散电流限相符^[8]。新型 p-on-n 二极管的结构能够将暗电流下降 2 个量级^[9]。该结构的应用对于提高甚长波红外探测器的工作温度是非常有益的。

3.3 HOT 碲镉汞探测器技术

在不牺牲焦平面阵列性能的同时,提高器件的工作温度可以减小冷却系统的功耗,提高冷却效率,增加制冷机的寿命,从而可以实现更小的成像设备以及更轻的探测器系统。因此, HOT 探测器是第三代焦平面探测器概念中很重要的一个发展方向。探测器的暗电流会随温度的增加呈指数级上升。其中,对应于扩散电流项的暗电流正比于 $\exp(-E_g/kT)$,而由于材料缺陷或钝化不良引起的暗电流正比于 $\exp(-E_g/2kT)$ 。

因此,对于 HOT 器件,最重要的就是减小暗电流。各公司主要是通过对工艺步骤进行改进来减少潜在缺陷,从而降低暗电流的。更具吸引力的办法就是利用新型器件结构,例如 p-on-n 结构、势垒型结构以及陷光结构等。

3.3.1 势垒型结构

图 4 所示为势垒型结构的工作原理情况。该结构是利用单极性 nBn 结构来减小由 SRH 复合导致的暗电流的。另一种 nBnB 结构可以利用“抽取”作用降低吸收区的载流子浓度,从而可减小由俄歇复合导致的暗电流。由于 HgCdTe 的能带性质属于第一类“nested”异质结,其能带工程的应用会受到一些限制。因此必须对偏压、组分和掺杂都进行调节,才能达到良好的效果。目前,势垒结构的研究大多处于模拟阶段^[10-11];也有一些研究小组获得了初步的器件^[10],并对其进行了相关改进,使其性能接近于模拟结果。

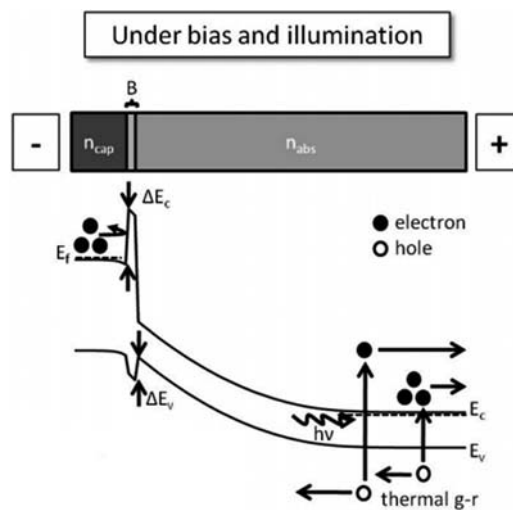


图 4 新型 nBn 结构探测器在偏压下的工作原理

3.3.2 陷光结构

陷光结构能够在维持高量子效率的同时减小探测材料体积,从而减小暗电流。该结构主要分台面刻蚀成孔和锥形台面阵列两种。有效的内部反射可以保证刻蚀后的结构仍能吸收几乎所有的光子。当然,陷光结构也可以用于双波段探测器的设计。雷神公司研制的陷光结构器件可以在 200 K 下保持 100 mK 的噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 水平^[12]。

3.4 超光谱探测器技术

超光谱探测所涉及的波段数目远远大于多光谱探测。因此超光谱图像包含了更多的信息,相应地也可解决更复杂的目标探测和分类问题。作为第三代红外焦平面探测的一个重要方面,红外超光谱探测技术的拓展一直受到人们的重视。

法国 Sofradir 公司开发了型号为“NEPTUNE”和“SATURN”的超光谱探测器(分别为 500×256 和 1000×256 规格的阵列)。这两种探测器都是针对可见光-短波红外波段的应用而设计的。最新开发的超光谱探测器是 1024×1024 规格的短波红外超光谱探测器。除此之外,通过组合 11 个滤光片可以实现对短波红外至长波红外的 11 个波段分别进行探测。而针对各个波段, HgCdTe 需稍作优化,读出电路也要根据不同需求的通量进行调整。对于近红外波段,通量较小;而对于其他波段,通量又会较大。因此,该探测器系统会同时使用不同的读出电路^[8]。目前,超光谱探测技术的发展主要受大规格芯片的开发以及不同波段所需读出电路的集成等方面的制约。

3.5 双色 / 多色 HgCdTe 探测器技术

由于能够探测来自目标的两个波段的强度,双色探测器可以得到目标的绝对温度,大大提高了对目标的识别能力。MBE 技术在 HgCdTe 上的应用,使得制作 HgCdTe 双色探测器可以实现。HgCdTe 双色探测器具有 4 种结构,它们各有优劣之处。目前,双色器件阵列的有效像元率和 NETD 俱佳,基本接近单色器件的水平。

法国生产的 MW-MW ($\lambda_c = 4.6 \mu\text{m}$ & $5.5 \mu\text{m}$) 双波段探测器的量子效率大于 50%, NETD 在 20 mK 以下,有效像元率在 98 K 下可达 99.8%; MW-LW ($\lambda_c = 5.6 \mu\text{m}$ & $10 \mu\text{m}$) 探测器的有效像元率达到 99.8% (MW) 和 98.5% (LW)。双色阵列达到 640×480 规格,像元中心距为 $24 \mu\text{m}$,同时 $20 \mu\text{m}$ 中心距的阵列也处在开发之中^[3]。雷神公司在 Si 基上制得了具有 3 层 n-p-n 结构的 MW-LW ($\lambda_c = 5.1 \mu\text{m}$ & $9.6 \mu\text{m}$ @ 81 K) 双色红外探测器,其

规格为 640×480 ,有效像元率达到 99.98% (MW) 和 98.7% (LW)。与 2009 年制得的器件相比,该探测器主要是在有效像元率上得到了提升^[13]。

图 5 所示为法国 Sofradir 公司在 HgCdTe 双色红外探测器方面的进展历程。总体上, HgCdTe 双色探测器的发展主要集中在规格提高、像元中心距缩小以及有效像元率增加等方面。

3.6 HgCdTe 雪崩光电二极管

雪崩光电二极管的灵敏度可以高 2 个量级,速度可以快 4 个量级;匹配快速 CMOS 电路后就能满足主动成像的要求。HgCdTe 的电子/空穴迁移率之比很高,雪崩性能很理想,因此是制作雪崩器件的优异材料。

在太空应用中, $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的波前探测将使用自然光波前而非激光波前,这就要求分辨率达到几个光子,因此必须使用雪崩光电二极管。然而,其噪声必须得到压制以减小对本身就很微弱的有效信号的干扰,同时暗电流也不能超过光电流的大小。研究人员现已能够制得 $\times 10$ 雪崩增益的雪崩光电二极管,其暗电流小于 $2 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$,亦即 360 e/s/像素^[15]。

主动成像包含雪崩二极管和激光脉冲,其能够得到更高的分辨率,并能扩展识别范围。SELEX 公司开发的 3D 主动成像技术能够在每个激光脉冲下识别像素级的距离及强度信息^[13]。图 6 为 3D 主动成像照片。距离信息的加入将会大大提高主动成像系统的有效性,一些针对红外波段的掩饰技术也能得到识别。雪崩二极管还能用来制作超快主动成像器件(短波红外波段)。法国 Sofradir 公司已经研制出了像元中心距为 $30 \mu\text{m}$ 的 320×256 元短波红外雪崩器件,其最快全帧速可达 2 kHz^[5]。

主动成像的读出电路也需要进行特殊设计,以同时满足高、低增益以及具有激光脉冲处理能力。读出电路的互连工艺可采用环孔互连技术。这种技术可以减小输入端的电容,从而可以允许更宽的带宽,并能保证在高工作频率(20 MHz)下具有较大的输出电压范围^[15]。

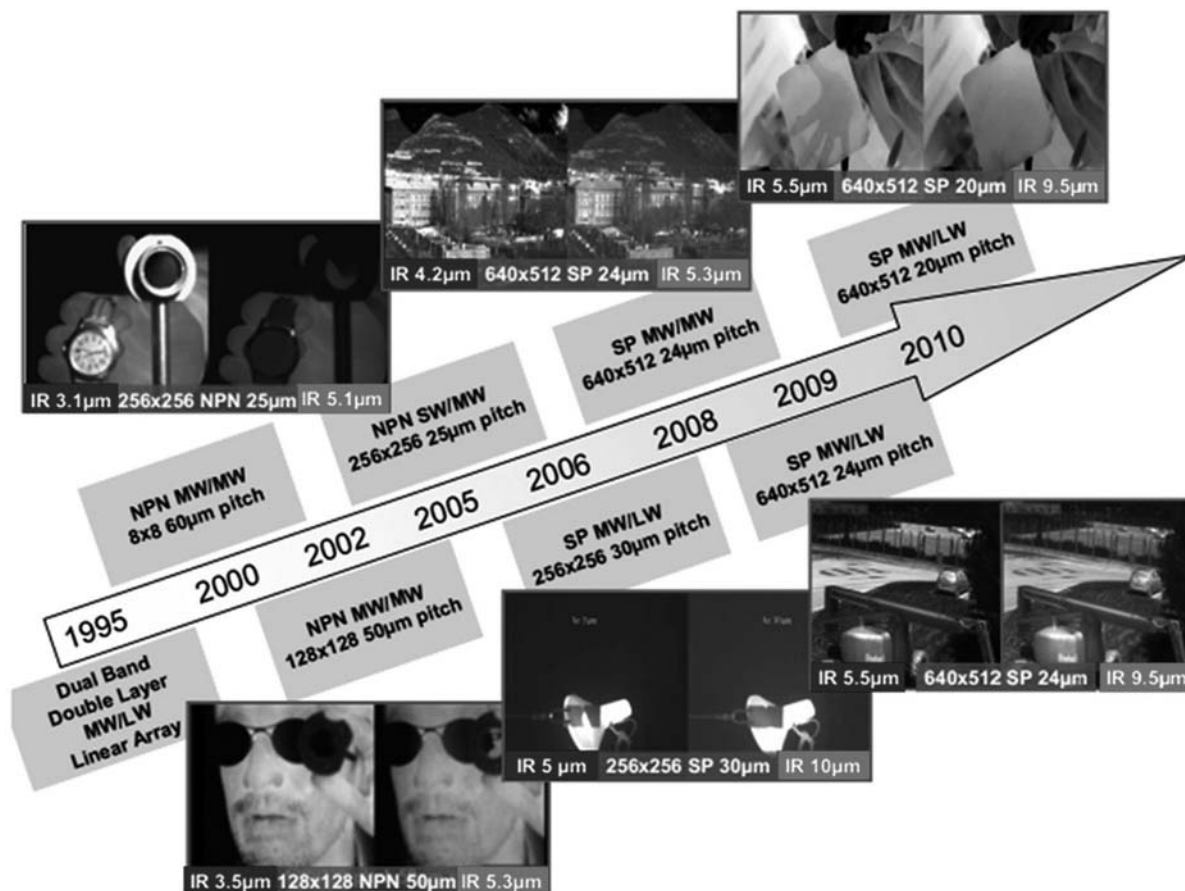


图 5 法国 Sofradir 公司在双色红外探测器方面的发展进程^[14]

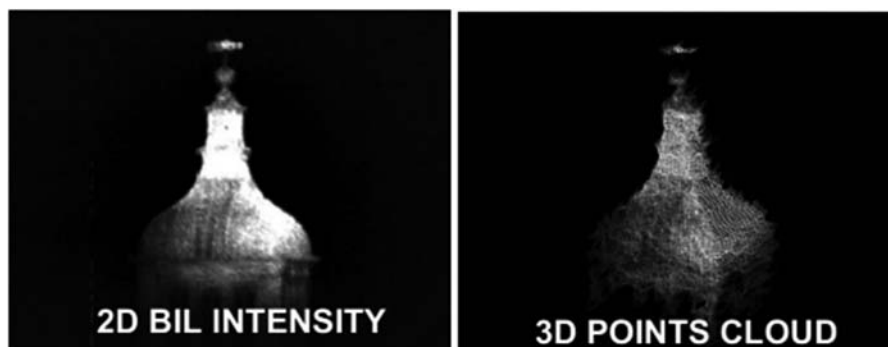


图 6 英国 SELEX 公司利用 3D 主动成像技术得到的 2D/3D 图像

4 结束语

红外光电探测器具有灵敏度高和响应速度快等特点, 主要分为 HgCdTe 探测器、量子阱光电探测器、II 类超晶格探测器以及量子点光电探测器四种。目前, 第三代红外光电探测器的发展方向包括大面阵化、双色甚至多色化、提高工作温度、降低功耗和成本等。这些工作已经在许

多国家得到开展, 尤其是美国、英国、法国和德国的顶尖公司已经取得了长足的进步并实现了初步应用。

HgCdTe 红外焦平面探测器仍然在很多方面占据主导地位, HOT 器件、超光谱探测器、双色器件以及雪崩器件的研发与应用显示出了 HgCdTe 材料的多种用途, 也使得 HgCdTe 材料体系变得越来越重要。MBE 和 MOVPE 的发展

将会使人们可以制得更复杂、更精确的 HgCdTe 多层结构;同时依靠工艺中各个部分的改进增加精确加工程度,将会大大促进新一代 HgCdTe 红外探测器前沿热点技术的发展。

参考文献

- [1] 刘武,叶振华. 国外红外光电探测器发展动态 [J]. **激光与红外**, 2011, **41**(4): 365-370.
- [2] 郭瑞萍,李静,孙葆森. 国外红外探测器材料技术新进展 [J]. **兵器材料科学与工程**, 2009, **32**(3): 96-99.
- [3] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third Generation Infrared Photodetector Arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(9): 091101.
- [4] Alain M, Laurent R, Yann R, et al. Improved IR Detectors to Swap Heavy Systems for SWaP [C]. *SPIE*, 2013, **8353**: 835334.
- [5] Gravrand O, Destefanis G, Bisotto S, et al. Issues in HgCdTe Research and Expected Progress in Infrared Detector Fabrication [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, **42**(11): 3349-3358.
- [6] Ziegler J, Bitterlich H, Breiter R, et al. Large-format MWIR and LWIR Detectors at AIM [C]. *SPIE*, 2013, **8074**: 80742L.
- [7] Thorne P, Gordon J, Hipwood L G, et al. 16 Megapixel 12 μm Array Developments at Selex ES [C]. *SPIE*, 2013, **8074**: 80742M.
- [8] Patricia P, Nicolas J, Bruno F, et al. A Review of the Latest Developments of MCT Infrared Technology from Visible to VLWIR for Space Applications at Sofradir [C]. *SPIE*, 2013, **8074**: 80740M.
- [9] Leroy C, Philippe C, Destefanis G. LWIR and VLWIR MCT Technologies and Detectors Development at SOFRADIR for Space Applications [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83532O.
- [10] Itsuno A M. Bandgap-Engineered HgCdTe Infrared Detector Structures for Reduced Cooling Requirements [D]. Diss: University of Michigan, 2012.
- [11] Martyniuk, P, Rogalski A. Theoretical Modelling of MWIR Thermoelectrically Cooled nBn HgCdTe Detector [J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2013, **61**(1): 211-220.
- [12] Kopytko M, Keblowski A K, Gawron W, et al. High-operating Temperature MWIR nBn HgCdTe Detector Grown by MOCVD [J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, **21**(4): 402-405.
- [13] Vilela M F, Olsson K R, Norton E M, et al. High-Performance M/LWIR Dual-Band HgCdTe/Si Focal-Plane Arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, **42**(11): 3231-3238.
- [14] Yann R, Fabien C, Cedric V, et al. Infrared Dual Band Detectors for Next Generation [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 801238.
- [15] Ashcroft A, Baker I. Developments in HgCdTe Avalanche Photodiode Technology and Applications [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76603C.

新闻动态 News

美国空军拟于 2016 年验证商业搭载红外有效载荷后继技术

据 www.airforce-technology.com 网站报道,美国空间与导弹系统中心发言人 Hien Vu 近日透露,美国空军正计划于 2016 年对商业搭载红外有效载荷(CHIRP)后继技术进行飞行验证。目前这项工作还处于存在多种有效载荷设计的早期设计阶段。

由于预算限制日益紧张,成功在轨运行 27 个月的 CHIRP 传感器已于 2013 年 12 月正式停止使用。该传感器是 2011 年 9 月搭载 SES-2 通

信卫星发射升空的,现已采集了超过 300 T 的过顶持续红外(OPIR)数据,为用户分析 70 多次导弹/火箭发射事件以及 150 次其他红外事件提供了帮助。

CHIRP 传感器的设计寿命原为 1 年,但在 2012 年 7 月顺利完成初期验证工作之后,CHIRP 合同延长了三次,包括追加对 CHIRP 传感器的宽视场凝视能力进行了验证。

Hien Vu 表示,美国空军作出 CHIRP 传感器退役的决定为其节省了 3600 万美元。

基于 2000×2000 元凝视阵列的 CHIRP 传感器具有一个能够从地球同步轨道上对全球 1/4 区域进行观测的固定式望远镜。

□ 岳桢千