

〈综述与评论〉

非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态

冯涛^{1,2}, 金伟其¹, 司俊杰³

(1.北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

2.北方广微科技有限公司, 北京 100089;

3.中国空空导弹研究院光电器件研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 非制冷红外焦平面探测器是热成像系统的核心部件。介绍了非制冷红外焦平面探测器的工作原理及微测辐射热计、读出电路、真空封装三大技术模块, 分析了影响其性能的关键参数。与微测辐射热计设计相关的重要参数包括低的热导、高的红外吸收率、合适的热敏材料等; 读出电路的传统功能是实现信号的转换读出, 近年来也逐渐加入了信号补偿的功能; 真空封装技术包括了金属管壳封装、陶瓷管壳封装、晶圆级封装和像元级封装。列举了国内外主要厂商的非制冷红外焦平面探测器的技术指标及近年来的最新技术进展, 总结了非制冷红外焦平面探测器的技术发展趋势。

关键词: 非制冷红外; 焦平面探测器; 微测辐射热计; 读出电路; 真空封装

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2015)03-0177-08

Uncooled Infrared FPA——A Review and Forecast

FENG Tao^{1,2}, JIN Wei-qi¹, SI Jun-jie³

(1.MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2.North Guangwei Technology Inc., Beijing 100089, China;

3.China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Uncooled infrared FPA is key component of thermal device. The structure and technical theory of uncooled infrared FPA is introduced with analysis of key parameters. Uncooled infrared FPA consists of micro-bolometer, ROIC and vacuum package. Some of the most important micro-bolometer design parameters are a low thermal conductance, a high absorption of the infrared radiation, a bolometer temperature sensing material. ROIC achieve signal conversion and read out, now it can compensate non-uniformity of signal. Vacuum package are include metallic package, ceramic package, wafer level package and pixel level package. Most important manufacturers' products are introduced in this paper. At last, the technical development trends of uncooled infrared FPA are summarized.

Key words: uncooled infrared, FPA detector, micro-bolometer, ROIC, vacuum package

0 引言

红外焦平面探测器是热成像系统的核心部件, 是探测、识别和分析物体红外信息的关键, 在军事、工业、交通、安防监控、气象、医学等各行业具有广泛的应用。红外焦平面探测器可分为制冷型红外焦平面探测器和非制冷红外焦平面探测器, 制冷型红外焦平

面探测器的优势在于灵敏度高, 能够分辨更细微的温度差别, 探测距离较远, 主要应用于高端军事装备; 非制冷红外焦平面探测器无需制冷装置, 能够在室温状态下, 具有体积小、质量轻、功耗小、寿命长、成本低、启动快等优点。虽然在灵敏度上不如制冷型红外焦平面探测器, 但非制冷红外焦平面探测器的性能已可满足部分军事装备及绝大多数民用领域的技

收稿日期: 2015-02-13; 修订日期: 2015-02-20.

作者简介: 冯涛(1977-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事红外焦平面探测器及其处理技术研究。E-mail: tao.feng@139.com.

通讯作者: 金伟其(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器的教学和研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目, 编号: 61231014; 教育部博士点基金优先发展项目, 编号: 20131101130002.

术需要。近年来,随着非制冷红外焦平面探测器技术的不断进步和制造成本的逐渐下降,其性价比快速提升,为推动非制冷红外焦平面探测器的大规模市场应用创造了良好条件。

非制冷红外焦平面探测器主要是以微机电技术(MEMS)制备的热传感器为基础,大致可分为热电堆/热电偶、热释电、光机械、微测辐射热计等几种类别^[1],其中微测辐射热计的技术发展非常迅猛,所占市场份额也最大。近年来非制冷红外焦平面探测器的阵列规模不断增大,像元尺寸不断减小,并且在探测器单元结构及其优化设计、读出电路设计、封装形式等方面出现了不少新的技术发展趋势。本文将在介绍微测辐射热计型非制冷红外焦平面探测器的基础上,分析其技术发展趋势。

1 测辐射热计 IRFPA 及其技术进展

非制冷红外焦平面探测器从设计到制造可分成微测辐射热计、读出电路、真空封装等3大技术模块。下面分别对它们进行介绍。

1.1 微测辐射热计的设计与制造

图1为单个微测辐射热计的结构示意图,在硅衬底上通过MEMS技术生长出与桥面结构非常相似的像元,也称之为微桥。桥面通常由多层材料组成,包括用于吸收红外辐射能量的吸收层,和将温度变化转换成电压(或电流)变化的热敏层,桥臂和桥墩起到支撑桥面,并实现电连接的作用^[2]。微测辐射热计的工作原理是:来自目标的热辐射通过红外光学系统聚焦到探测器焦平面阵列上,各个微桥的红外吸收层吸收红外能量后温度发生变化,不同微桥接收到不同能量的热辐射,其自身的温度变化就不同,从而引起各微桥的热敏层电阻值发生相应的改变,这种变化经由探测器内部的读出电路转换成电信号输出,经过探测器外部的信号采集和数据处理电路最终得到反映目标温度分布情况的可视化电子图像。

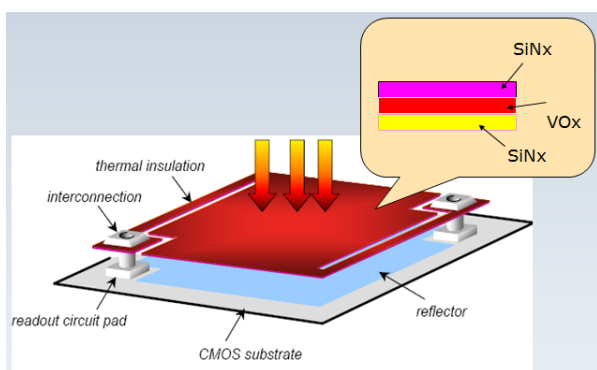


图1 微测辐射热计像元结构示意图

Fig.1 Structure of microbolometer

为了获得更好的性能,需要在微测辐射热计的结构设计上做精心的考虑与参数折衷。主要的设计参数及要求包括:微测辐射热计与其周围环境之间的热导要尽量小;对红外辐射的有效吸收区域面积尽量大以获得较高的红外辐射吸收率;选用的热敏材料需要具有较高的电阻温度系数(TCR)、尽量低的 $1/f$ 噪声和尽量小的热时间常数^[3]。

1.1.1 热导

如图1所示,为使微测辐射热计与其衬底间的热导尽量小,微桥的桥臂设计需要用低热导材料,并采用长桥臂小截面积的设计。此外,需将微测辐射热计探测器阵列封装在一个真空的管壳内部,以减小其与周围空气之间的热导。

1.1.2 吸收率

要使微测辐射热计对红外辐射的吸收率尽量高,可从以下两方面入手。

1) 提高填充系数

填充系数定义为微测辐射热计对红外辐射的有效吸收面积占其总面积的百分比。微桥的桥臂、相邻微桥之间的空隙、连接微桥与读出电路的过孔等所占的面积都是没有红外吸收能力的。图1所示的是典型的单层微桥结构,其填充系数一般是60%~70%,且随着像元尺寸的减小,单层结构的填充系数会进一步下降。

要增加填充系数以获得更高的吸收率,可以采用如图2^[3]所示的双层伞形微桥结构,红外辐射吸收材料处于上方第二层,形似撑开的雨伞,桥臂及其他无吸收能力的部分都放到伞下的第一层。这种结构的填充系数可做到90%左右。

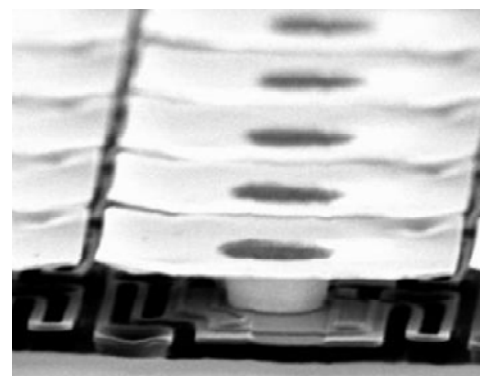


图2 双层伞形微桥结构

Fig.2 A two-level (umbrella) design for improved pixel fill factor

2) 光学谐振腔设计

通过设计光学谐振腔也可以提高微测辐射热计对红外辐射的吸收率。因为有相当一部分入射的红外辐射能量会穿透微桥结构的红外吸收层,所以通常在微桥下方制作一层红外反射面,将从上方透射来的红

外辐射能量反射回红外吸收层进行二次吸收。吸收层与反射面之间的距离对于二次吸收的效果有较大影响,如果设计为红外辐射波长的 $1/4$,就可增加吸收层对反射回来的红外能量的吸收。对于 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的长波红外辐射,该距离约为 $2\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 。

图 3^[3](a)所示为一种类型的谐振腔结构示意图,反射面位于读出电路的硅衬底表面,所以微桥的桥面与硅衬底的距离是 $1/4$ 辐射波长;图 3(b)所示为另一种类型的谐振腔结构示意图,反射面位于微桥的下表面,所以微桥的厚度要做成 $1/4$ 辐射波长。

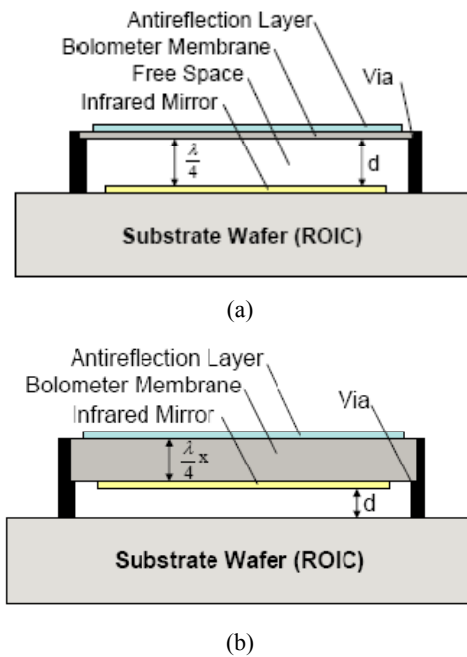


图3 红外光学谐振腔示意图

Fig.3 Cross-sectional image of resonant optical cavities

1.1.3 热敏材料

热敏材料的选取对于微测辐射热计的灵敏度 (NETD) 有非常大的影响,优选具有高温电阻系数 (TCR) 和低 $1/f$ 噪声的材料,同时还要考虑到所选材料与读出电路的集成工艺是否方便高效。目前最为常用的热敏材料包括氧化钒 (VO_x)、多晶硅 ($\alpha\text{-Si}$)、硅二极管等。微测辐射热计的 NETD 主要受限于热敏材料的 $1/f$ 噪声,这种噪声与材料特性密切相关,不同材料的 $1/f$ 噪声可能会相差几个数量级,甚至对材料复合态的细微调整也会带来 $1/f$ 噪声的显著变化。

1) 氧化钒 (VO_x)

20 世纪 80 年代初,美国的 Honeywell 公司在军方资助下开始研究氧化钒薄膜,并于 20 世纪 80 年代末研制出非制冷氧化钒微测辐射热计。氧化钒材料具有较高的 TCR (在室温环境下约为 $2\%/K\sim 3\%/K$),

其制备技术经过多年的发展已很成熟,在微测辐射热计产品中得到了广泛的应用。

氧化钒也有多种复合形态,如 VO_2 、 V_2O_5 、 V_2O_3 等。单晶态的 VO_2 、 V_2O_5 的 TCR 高达 4% ,但是需要采用特殊制备工艺才能得到; V_2O_5 的室温电阻太大,会导致较高的器件噪声; V_2O_3 的制备技术相对不太复杂,且室温电阻较低,能得到更低的器件噪声,成为重点研究的氧化钒材料。

2) 多晶硅 ($\alpha\text{-Si}$)

法国原子能委员会与信息技术实验室/红外实验室 (CEA2LETI/LIR) 从 1992 年开始研究多晶硅材料的探测器,目前技术上已很成熟。多晶硅的 TCR 与 VO_x 相当,也是一种得到较多应用的微测辐射热计材料,其优点是标准硅工艺完全兼容,制备过程相对简单。但由于多晶硅是无定形结构,呈现的 $1/f$ 噪声比 VO_x 要高,所以 NETD 通常不如 VO_x 材料。由于采用多晶硅材料的微测辐射热计可以将薄膜厚度控制的非常小,具有较低的热容,所以在保持较低热响应时间的同时也具有较小的热导,可一定程度兼顾图像刷新率和信号响应率的要求。

3) 硅二极管 (SOI)

硅二极管正向压降的温度系数特性可用于红外探测器的制造。红外吸收导致的温度变化可带来的 PN 结正向压降变化并不显著,等效的 TCR 只有 $0.2\%/K$,比通常的电阻型热敏材料低一个数量级。但硅二极管的优点在于其面积可做的比电阻的面积更小,因而能做出尺寸更小的像元,获得更大阵列规模的焦平面^[4]。硅二极管微测辐射热计可在标准 CMOS 工艺线上生产,制造更为方便。

4) 其他材料

还有一些材料也可用于微测辐射热计的制造,它们具有某些优异的特性,但也存在较明显的缺点。钛金属薄膜具有较低的 $1/f$ 噪声,可方便地与 CMOS 读出电路集成,具有较低的热导,但其 TCR 只有 $0.35\%/K$ 左右;锗硅氧化物材料 ($\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$) 具有较高的 TCR (可达 $5\%/K$ 以上) 和较低的热导,但其较高的 $1/f$ 噪声限制了最终器件的性能;硅锗 (SiGe) 是一种值得关注的材料,可采用标准 CMOS 工艺实现非常薄 (如 100nm) 的薄膜制备,并具有较高的 TCR ($3\%/K$ 以上),通过实现单晶态的 SiGe 可得到较低的 $1/f$ 噪声;YBaCuO 是另一种值得关注的材料,有比 VO_x 高的电阻温度系数 (约 $3.5\%/K$) 以及较低的 $1/f$ 噪声,其光谱响应范围很宽 ($0.3\sim 100\ \mu\text{m}$),是未来制造多光谱探测器的潜在材料^[3]。

1.2 读出电路 (ROIC)

非制冷红外焦平面探测器的读出电路将每个微测辐射热计的微小电阻变化以电信号的方式输出。照射到焦平面上的红外辐射所产生的信号电流非常小，一般为纳安甚至皮安级，这种小信号很容易受到其他噪声的干扰，因此读出电路的电学噪声要控制的尽量小，以免对探测器的灵敏度指标造成不必要的影响。

传统读出电路的工作原理是：给微测辐射热计的热敏薄膜施加固定的低噪声偏置电压，将其随温度的阻值变化以电流变化的形式得到，再由积分器转换成电压信号，经驱动器输出，如图4所示。

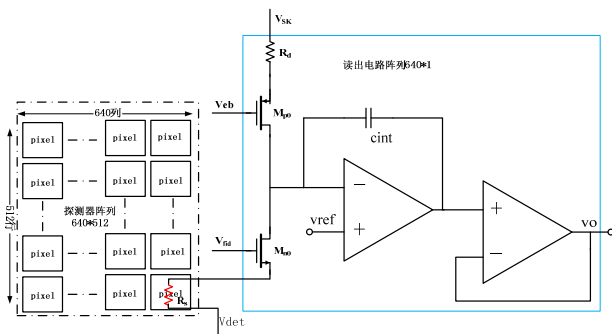


图4 非制冷红外焦平面的读出电路原理图

Fig.4 ROIC principle diagram of uncooled IRFPA

探测器制造工艺存在的偏差会导致探测器的输出信号存在非均匀性，近年来一些降低读出信号非均匀性的设计方法逐渐在读出电路上得到实现。例如列条纹非均匀性就是一种与读出电路密切相关的形态，这是由于读出电路中有一些部件是焦平面阵列中每一列共用的，如积分器。这种电路结构会给同一列的输出信号引入一些共性特征，不同列之间的特征差异就表现为列条纹。针对列条纹的产生机理，可以通过改进读出电路设计来有效地抑制甚至基本消除列条纹，提高列与列之间的均匀性^[5]。

早期的非制冷红外焦平面探测器必须使用热电温控器 (TEC) 来保持焦平面阵列的温度稳定，这是因为不同像元之间由于制造工艺的偏差会带来阻值的差异，最终表现为阵列的不均匀性：即使所有像元接受同样的黑体辐射，它们各自输出的电压信号幅值也是不同的；即使所有像元面对同样的黑体辐射变化，它们各自所输出的电压信号的变化量也是不同的。上述这种由于像元之间差异所导致的阵列不均匀性，还会随着焦平面温度的变化而改变，使得探测器输出信号呈现出复杂的变化，为后续信号处理工作带来困难^[6]。近年来随着读出电路设计水平的提高，在实现传统读出电路的行选列选、积分器、信号驱动等基础功能之

外，一些抑制像元输出信号随温度漂移的补偿电路也逐渐用于读出电路设计，从而可以实现无 TEC 应用，使得非制冷红外焦平面探测器在功耗、体积、成本等方面更具备优势。

1.3 真空封装技术

微测辐射热计接收目标红外辐射后的温度变化很微弱，为了使其上面的热量能够维持住，避免与空气分子进行热交换，需要将其置于真空环境下工作，一般对真空度的要求是小于 0.01 mbar (即 0.00001 atm)。对非制冷红外焦平面探测器真空封装^[7]的要求是：优异且可靠的密闭性；具有高透过率的红外窗口；高成品率；低成本。目前的封装技术可分为芯片级、晶圆级、像元级等，其中芯片级封装技术按照封装外壳的不同又可分为金属管壳封装和陶瓷管壳封装。

1.3.1 金属管壳封装

金属管壳封装是最早开始采用的封装技术，技术已非常成熟，图5是金属管壳封装使用的主要部件。由于采用了金属管壳、TEC和吸气剂等成本较高的部件，导致金属管壳封装的成本一直居高不下，使其在低成本器件上的应用受到限制。

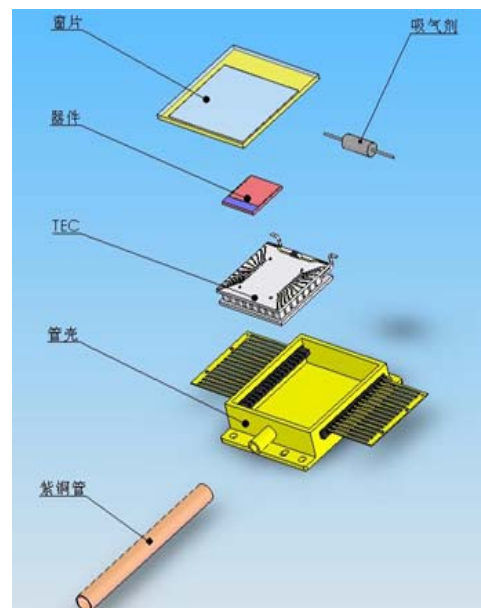


图5 非制冷红外焦平面的金属管壳封装部件

Fig.5 Components of uncooled IRFPA metallic package

金属管壳封装形式的探测器曾经占据了非制冷红外焦平面探测器的大部分市场，无论国外还是国内的生产厂商都有大量的此类封装产品。图6为几种量产的金属管壳封装的探测器。随着更低成本的新封装技术的日渐成熟，目前金属管壳封装形式的探测器所占市场份额已经显著减少。

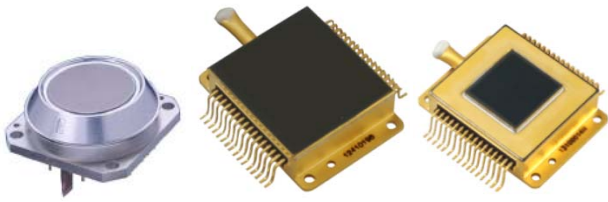


图6 非制冷红外焦平面的金属管壳封装

Fig.6 Metallic package of uncooled IRFPA

1.3.2 陶瓷管壳封装

陶瓷管壳封装是近年来逐渐普及的红外探测器封装技术,可显著减小封装后探测器的体积和重量,且从原材料成本和制造成本上都比传统的金属管壳封装大为降低,适合大批量电子元器件的生产。陶瓷管壳封装技术的发展得益于目前无TEC技术的发展,省去TEC可以减小对封装管壳体积的要求并降低成本。图7为两种典型的陶瓷管壳封装红外探测器。

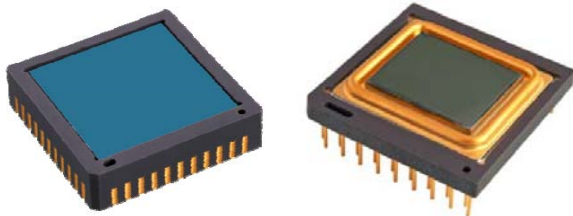


图7 非制冷红外焦平面的陶瓷管壳封装

Fig.7 Ceramic package of uncooled IRFPA

1.3.3 晶圆级封装

晶圆级封装是近两年开始走向实用的一种新型红外探测器封装技术,需要制造与微测辐射热计晶圆相对应的另一片硅窗晶圆,硅窗晶圆通常采用单晶硅材料以获得更好的红外透射率,并在硅窗口两面都镀有防反增透膜。微测辐射热计晶圆与硅窗晶圆通过精密对位,红外探测器芯片与硅窗一一对准,在真空腔体内通过焊料环焊接在一起,最后再裂片成为一个个真空密闭的晶圆级红外探测器。图8^[3]是一个晶圆级封装红外探测器的剖面图和晶圆级封装示意图。

与陶瓷管壳封装技术相比,晶圆级封装技术的集成度更高,工艺步骤也有所简化,更适合大批量和低成本生产。晶圆级封装技术的应用为红外热成像的大规模市场(如车载、监控、手持设备等)提供了具有足够性价比的探测器。

1.3.4 像元级封装

像元级封装技术是一种全新的封装技术,相当于在非制冷红外焦平面探测器的每个像元微桥结构之外再通过MEMS技术制造一个倒扣的微盖,将各个像元独立的密封起来。图9^[7]是其工艺过程的示意图,其中1~5步是目前的微测辐射热计的MEMS工艺步骤,在这之后继续在微桥的桥面上方生长第二层牺牲

层,做为生长红外窗口薄膜的支撑层。待红外窗口薄膜及微盖四壁生长完成后,在真空腔体内通过窗口上的释放孔将前后两次的牺牲层释放掉,最后封堵住释放孔,完成像元级真空封装。

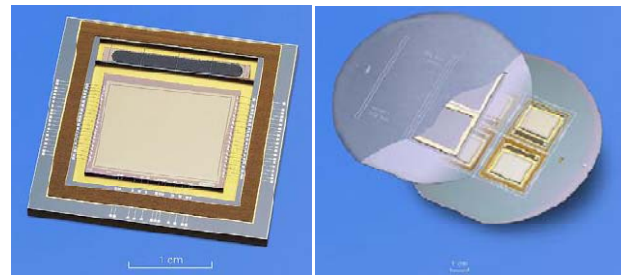
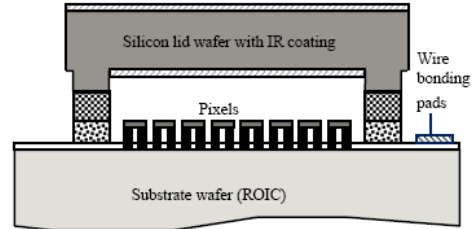


图8 非制冷红外焦平面的晶圆级封装

Fig.8 Wafer level package of uncooled IRFPA

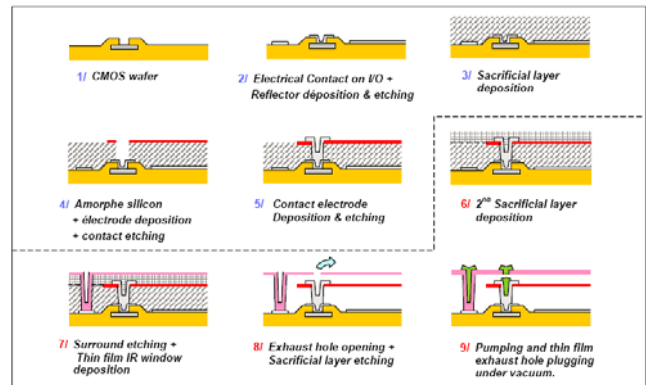


图9 像元级封装工艺步骤

Fig.9 Process flow of microbolometer (steps 1 to 5) and micro package (steps 6 to 9) technology

像元级封装技术使封装成为了MEMS工艺过程中的一个步骤,这极大地改变了目前的封装技术形态,简化了非制冷红外焦平面探测器的制造过程,使封装成本降低到极致。目前这种技术还处于研究阶段,但随着像元级封装技术的成熟和实用化,非制冷红外焦平面探测器的成本还将大幅下降,更加贴近民用和消费级应用市场的需求。

2 主要制造厂商技术发展情况

2.1 美国FLIR-SYSTEMS公司

美国FLIR-SYSTEMS公司高性能红外热像仪系统研制、生产和销售的全球领先者,也是世界上首屈一指的非制冷氧化钒红外焦平面探测器的制造商。

FLIR 不单独销售焦平面探测器，都是随着它的机芯或整机系统一同销售，从 FLIR 推向市场的产品可看出其量产的红外探测器的性能^[8]。目前 FLIR 非制冷焦平面探测器的像元尺寸以 $25\mu\text{m}$ 和 $17\mu\text{m}$ 为主；面阵规模以 336×256 和 640×512 为主；封装形式上既有陶瓷管壳封装，也有晶圆级封装的成熟产品；NETD 指标约为 40mK 左右；热响应时间约 $10\sim 15\text{ms}$ 。总的来说，FLIR 的产品代表了目前世界主流先进水平。

2.2 法国 ULIS 公司

法国 ULIS 公司隶属于法国 Sofradir 公司，是世界上最主要的非制冷多晶硅红外焦平面探测器的制造商，ULIS 的探测器产品进入中国较早并占据了国内大部分探测器市场。目前 ULIS 的探测器在像元尺寸上以 $25\mu\text{m}$ 为主， $17\mu\text{m}$ 的产品也已开始批量供货；面阵规模涵盖 160×120 、 384×288 和 640×480 ；在封装上同时具有金属管壳和陶瓷管壳封装，即 ULIS 的产品既有含 TEC 的，也有无 TEC 的；NETD 指标稍差，约为 $50\sim 80\text{mK}$ ；但热响应时间小于 10ms 是其一个优点^[9]。

最近 ULIS 在进一步减小像元尺寸方面做了不少研究工作，据 2012 年的文献报道，ULIS 已经研制成功像元尺寸 $12\mu\text{m}$ ，分辨率 640×480 的多晶硅探测器，其在热响应时间仅有 6.6ms 的情况下，NETD 可达到 53mK ^[10]。更小的像元尺寸意味着探测器的面阵可以做的更大，而体积、重量、成本则会更低。随着探测器像元尺寸的缩小，也需要在红外光学和图像处理端配合进行更加深入和细致的工作，才能获得性能优异的热成像系统^[11]。

2.3 美国 DRS 公司

美国 DRS 公司是世界知名的非制冷氧化钒红外焦平面探测器的生产厂商，DRS 的探测器产品主要供应美国军方，近两年开始逐渐向民用市场推广。目前 DRS 基于 $25\mu\text{m}$ 像元尺寸的产品已经非常成熟， $17\mu\text{m}$ 像元尺寸的产品也开始在批量供货；阵列分辨率上 320×240 、 640×480 两种都已批量生产，更大的 $1024\times 768/17\mu\text{m}$ 探测器也开始推向市场；在封装上同时具有金属管壳和陶瓷管壳封装^[12]。图 10^[13]是 DRS 几款有代表性的产品照片。DRS 探测器产品的微测辐射热计采用了双层伞形结构设计，可获得更高的填充系数，带来更高的响应率；在读出电路中采用了温度补偿技术，从而可使探测器稳定的工作于无 TEC 模式。

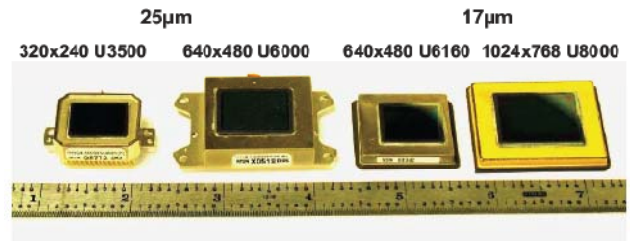


图 10 DRS 非制冷红外焦平面探测器照片

Fig.10 Photos of DRS IRFPA

2.4 英国 BAE 公司

英国 BAE 公司也是世界知名的非制冷氧化钒红外焦平面探测器生产厂商。近年来，BAE 致力于将其原先 $28\mu\text{m}$ 像元尺寸的产品升级至 $17\mu\text{m}$ 像元尺寸， 640×480 的探测器研究和制造较为顺利，更大面阵的 1024×768 探测器也在研制中。BAE 的探测器可有不同的热响应时间指标(从 $4\text{ms}\sim 20\text{ms}$)，对应的 NETD 指标也不同，在两者之间取适当折衷^[14]。BAE 热响应时间 12ms 的器件 NETD 可达 50mK 。

2.5 美国 L-3 公司

美国 L-3 公司是一家实力非常雄厚的非制冷红外焦平面探测器制造厂商。L-3 旗下采用多晶硅为热敏材料的光电系统公司 L-3 EOS (L-3 Electro-Optical Systems)，在多晶硅红外探测器的出货量上仅次于法国 ULIS，早在 2009 年就实现了 $17\mu\text{m}$ 像元尺寸，分辨率 640×480 的探测器量产，其产品阵列规模覆盖了 320×240 、 640×480 和 1024×768 。据报道，其 $17\mu\text{m}$ 探测器在 10ms 热响应时间下可达到 35mK 的 NETD 水平^[15]。L-3 EOS 在多晶硅之外也采用硅锗材料作为热敏材料进行产品开发，以期提升产品性能。

L-3 公司与其他厂商不同之处在于它同时还有采用氧化钒作为热敏材料的产品。2005 年 L-3 收购了主做氧化钒探测器的红外视觉公司 ITC (Infrared Vision Technology Corporation)，从而同时拥有了两种最主流热敏材料的非制冷红外焦平面探测器制造能力^[16]。

L-3 公司也是较早在产品上采用晶圆级封装技术的厂商，并取得了不错的效果。图 11^[15]是 L-3 公司几款晶圆级封装的探测器产品。

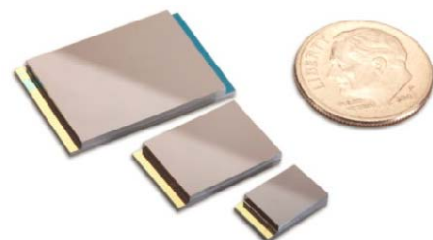


图 11 L-3 公司晶圆级封装探测器

Fig.11 WLP IRFPA of L-3

2.6 日本 NEC 公司

日本 NEC 公司是采用氧化钒材料的非制冷红外焦平面探测器生产厂商, 拥有像元尺寸为 $23.5\ \mu\text{m}$, 分辨率 320×240 、 640×480 的探测器产品^[17]。近两年 NEC 新研制成功了像元尺寸 $12\ \mu\text{m}$ (见图 12^[18])、分辨率 640×480 的探测器, 采用陶瓷管壳封装, 并获得了 $60\ \text{mK}$ 的 NETD 指标^[18]。

2.7 中国北方广微

北方广微科技有限公司是中国具有领先水平的氧化钒非制冷红外焦平面探测器生产厂商。2009 年初研制成功第一款国产 $160\times 120/45\ \mu\text{m}$ 非制冷氧化钒焦平面探测器, 近几年来在技术和市场上取得了飞速发展。北方广微已实现量产的探测器在像元尺寸上以 $25\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 为主, 面阵规模以 384×288 和 640×512 为主^[19], NETD 指标约为 $40\ \text{mK}$, 热响应时间约 $10\sim 15\ \text{ms}$; 代表了目前国内量产探测器产品的领先水平^[20]。北方广微的 $17\ \mu\text{m}$ 像元尺寸和陶瓷管壳封装的探测器产品也即将推向市场。

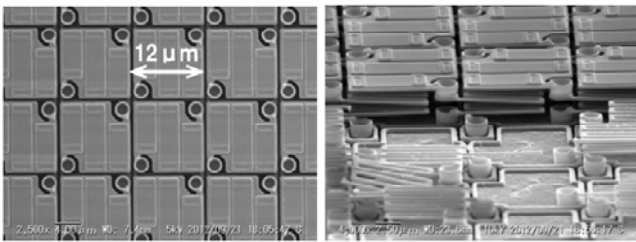


图 12 NEC 公司 $12\ \mu\text{m}$ 像元
Fig.12 $12\ \mu\text{m}$ pixel of NEC

2.8 其他

除上述外, 还有一些知名的非制冷红外焦平面探测器生产厂商, 由于公开的技术文献较少, 在此只能做简单介绍。

美国雷神公司 (Raytheon) 是著名的武器系统供应商, 它也制造先进的红外焦平面探测器, 主要产品用于美国军方装备。从不多的文献中可以大约了解到 Raytheon 的探测器为氧化钒材料; 采用伞形结构; 在像元尺寸上有 $25\ \mu\text{m}$ 和 $17\ \mu\text{m}$; 面阵规模有 320×240 和 640×480 ; NETD 指标约为 $40\ \text{mK}$ 左右。

以色列 SCD 公司也是具有很高技术水平的非制冷红外焦平面探测器制造商。SCD 采用氧化钒材料; 在像元尺寸上有 $25\ \mu\text{m}$ 和 $17\ \mu\text{m}$; 面阵规模为 384×288 和 640×480 ; 热响应时间约 $10\ \text{ms}$; NETD 指标约为 $50\ \text{mK}$ 左右。

此外, 还有日本的三菱、东芝, 中国的浙江大立、烟台睿创等单位也研制出相应的非制冷红外焦平面

探测器产品。

3 结论

近年来, 热成像技术在越来越多的行业得到应用和推广, 军用领域对热成像设备的需求保持稳步增长, 同时民用市场的增长更为迅猛。非制冷红外焦平面探测器以其突出的性价比, 成为新增热成像市场的核心要素。另一方面, 随着非制冷红外焦平面探测器技术的不断进步, 会带来性价比的进一步提升, 从而与市场需求形成一种良性互动。综观主要非制冷探测器生产厂商的技术发展情况, 也呈现出一种以市场需求为导向的特点。预测未来几年非制冷红外焦平面探测器技术的发展, 将呈现以下趋势:

1) 像元尺寸不断减小。更小的像元尺寸能够在焦平面单位面积上集成更多的像素, 提高红外探测器的分辨率, 同时也可以显著减小热成像设备的体积、重量、功耗和成本, 因此具有十分重大的意义。近 10 年来, 主流非制冷红外焦平面探测器的像元尺寸从最初的 $50\ \mu\text{m}$ 左右, 历经 $45\ \mu\text{m}$ 、 $35\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ 等几种规格, 目前已经逐渐进入以 $17\ \mu\text{m}$ 为主流的时代, 且更小像元尺寸如 $15\ \mu\text{m}$ 、 $12\ \mu\text{m}$ 也已进入实质性的研制和试生产阶段^[21]。图 13^[21]所示为像元尺寸缩小的发展趋势。更小的像元意味着 MEMS 制造技术复杂程度的提高, 目前各探测器制造厂商都在重点研究如何在像元尺寸缩小的同时还能保持甚至提高微测辐射热计的性能。

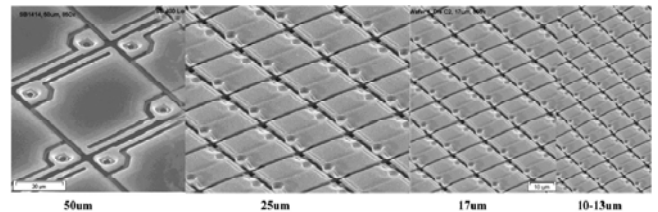


图 13 像元尺寸从 $50\ \mu\text{m}$ 逐渐减小至 $12\ \mu\text{m}$
Fig.13 Pixel size is reduced from $50\ \mu\text{m}$ to $12\ \mu\text{m}$

2) 面阵规模不断增大, 640×480 或 640×512 分辨率成为主流配置, 1024×768 及更大面阵规模如 200 万像素的探测器也已开始研制及试生产。

3) 金属管壳封装探测器因其高昂的封装成本会逐渐退出市场, 陶瓷管壳封装探测器进入全面推广时期, 晶圆级封装的探测器以其更低的成本优势可望在民用领域获得快速增长。

4) 包含数字积分、非均匀性校正和其它数字图像处理功能的片上处理技术也是“智能化”非制冷红外焦平面探测器的重要发展方向之一^[22-23], 可明显

提高探测器组件的成像质量,提高可靠性,减小体积、重量和功耗。

参考文献:

- [1] 雷亚贵,王戎瑞,陈苗海. 国外非制冷红外焦平面阵列探测器进展[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(9): 801-805.
- [2] 阳启明,张剑铭,杨道虹,等. MEMS技术在非制冷红外探测器中的应用[J]. *半导体技术*, 2004, **29**(10): 27-30.
- [3] Frank Niklaus, Christian Vieider, Henrik Jakobsen. MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays-areview[C]//*Proc. of SPIE, MEMS/MOEMS Technologies and Applications III*, 2007, **6836**: 68360D.
- [4] Daisuke Fujisawa, Tomohiro Maegawa, Yasuaki Ohta, et al. Two-million-pixel SOI diode uncooled IRFPA with 15 μm pixel pitch[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications*, 2012, **8353**: 83531G.
- [5] 周云,张丽,吕坚,等. 一种新型的高均匀性非制冷红外读出电路研究[J]. *红外技术*, 2014, **36**(1): 22-25.
- [6] 周云,吕坚,廖宝斌,等. 一种具有衬底温度补偿功能的非制冷红外读出电路[J]. *红外与毫米波学报*, 2013, **32**(3): 248-253.
- [7] Astier A, Arnaud A, Ouvrier-Buffer J, et al. Advanced packaging development for very low cost uncooled IRFPA[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Components and Their Applications*, 2005, **5640**: 107-116.
- [8] FLIR. 机芯和部件>长波红外非制冷机芯[EB/OL]. [2015-1]. <http://www.flir.com/cs/apac/cn/view/?id=42103>.
- [9] ULIS. PRODUCTS[EB/OL]. [2015-1]. <http://www.ulis-ir.com/index.php?infrared-detector=products>.
- [10] Sebastien Beckera, Pierre Imperinettia, Jean-Jacques Yona, et al. Latest pixel size reduction of uncooled IR-FPA at CEA, LETI[C]//*Proc. of SPIE, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications IX*, 2012, **8541**: 85410C.
- [11] Christel-Loic Tisse, Jean-Luc Tissot, Arnaud Crastes, et al. An information theoretic perspective on the challenges and advances in the race towards 12 μm pixel pitch megapixel uncooled infrared imaging[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXVIII*, 2012, **8353**: 83531M.
- [12] DRS. Products-Thermal Detectors[EB/OL]. [2015-1]. <http://www.Drsinfrared.com/Products/ThermalDetectors.aspx>
- [13] Li Chuan, HanCJ, George D Skidmore. Overview of DRS uncooled VO_x infrared detector development[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(6): 061017.
- [14] Richard Blackwell, Daniel Lacroix, Tuyet Bach, et al. 17 μm Microbolometer FPA technology at BAE systems[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXV*, 2009, **7298**: 72980P.
- [15] Charles M Hanson, Sameer K Ajmera, John Brady, et al. Small pixel a-Si/a-SiGe bolometer focal plane array technology at L-3 communications[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXVI*, 2010, **7660**: 76600R.
- [16] Kenneth A Hay. Large format VO_x microbolometer UFPA development at ITC[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VIII*, 2006, **6295**: 629505.
- [17] Shigeru Tohyama, Tokuhito Sasaki, Tsutomu Endoh, et al. Uncooled infrared detectors toward smaller pixel pitch with newly proposed pixel structure[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(12): 123105-1-123105-11.
- [18] Tsutomu Endoh, Shigeru Tohyama, Takao Yamazaki, et al. Uncooled infrared detector with 12 μm pixel pitch video graphics array[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXIX*, 2013, **8704**: 87041G.
- [19] 雷述宇,方辉,刘俊,等. 国产 640 \times 512非制冷氧化钒红外焦平面探测器的研制[J]. *红外技术*, 2013, **35**(12): 759-763.
- [20] 北方广微科技有限公司. 产品中心- GWIR 探测器[EB/OL]. [2015-1]. <http://www.gwic.com.cn/product.html>.
- [21] Dieter Lohmann, Roy Littleton, Colin Reese, et al. Uncooled long-wave infrared small pixel focal plane array and system challenges[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(6): 061305.
- [22] 刘传明,姚立斌. 红外焦平面探测器数字读出电路研究[J]. *红外技术*, 2012, **34**(3): 125-133.
- [23] 白丕绩,姚立斌. 第三代红外焦平面探测器读出电路[J]. *红外技术*, 2015, **37**(2): 89-96.