

〈行业动态〉

HgCdTe 红外焦平面探测器从研发到生产

韩福忠，周连军，袁绶章，吴军
(昆明物理研究所，云南 昆明 650223)

摘要：HgCdTe 红外焦平面探测器经过多年研发，已达到批量生产的水平。昆明物理研究所批量生产的第二代红外探测器产品主要是长波 288×4 和中波 320×256 两类典型的红外焦平面探测器组件。在 2013 年这两类组件生产的数量分别可达几百套。介绍了在红外探测器生产中所需解决的关键问题，主要是 HgCdTe 材料的质量及光伏器件工艺的稳定性，并介绍两类主要生产的探测器组件产品及其性能结果。

关键词：红外焦平面；HgCdTe；离子注入；制冷型探测器；噪声等效温差

中图分类号：TN215 文献标识码：A 文章编号：1001-8891(2014)04-0271-04

HgCdTe IRFPA Detectors from Research to Production

HAN Fu-zhong, ZHOU Lian-jun, YUAN Shou-zhang, WU jun
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: HgCdTe IR-FPA detectors have been researched for many years and already reached production level. Kunming Institute of Physics mainly produces LW 288×4 and MW 320×256 infrared detector assemblies which are second generation detectors. Hundreds of the two kinds of detector assemblies are produced in 2013. In this paper, the main problems needed to be resolved in the process of producing the IR detectors are discussed, including the quality of HgCdTe material and stability of photovoltaic detector process. Also, such two kinds of detectors and their performance are introduced.

Key words: IRFPA, HgCdTe, ion implantation, cooled detectors, NETD

0 引言

昆明物理研究所红外探测器中心组建于 2006 年，它把昆明物理研究所的原五个研究室人员、设备、技术融合为一体，在昆明经济技术开发区建成了国内规模最大从 HgCdTe 材料、芯片、读出电路设计、微读瓦封装、低温制冷到组件测试完整的红外焦平面组件研发生产线。红外探测器中心有 300 多名员工从事红外焦平面探测器的研发及生产工作，见图 1。

国产第一代红外探测器批量使用是在上世纪 90 年代末，使用时带一个复杂二维扫描系统，是制冷型小线列光导探测器，国内第二代 HgCdTe 红外焦平面探测器在 1998 年开始立项研制。第二代红外探测器定义为用红外探测器芯片和带信号预处理与多路传输技术的读出电路芯片耦合在焦平面上。昆明物理所从 2006 年开始经过四年的技术研发从 2010 年开始批

量生产长波 288×4 和中波 320×256 两类典型红外焦平面探测器组件。由于红外探测器技术的日益成熟，红外系统被越来越多领域包括军事、安全、过程控制、环境监测、科学和空间应用。国际上 HgCdTe 制冷型红外焦平面探测器的需求是每年约 16000 套，国内对国产 HgCdTe 红外焦平面探测器的需求也越来越大。因此，把科研成果转化成工程化产品具有非常重大的意义。



图 1 昆明物理研究所红外探测器中心

Fig.1 The infrared detector center of Kunming institute of Physics

收稿日期：2013-08-31；修改日期：2013-11-11。

作者简介：韩福忠（1969-），男，研究员，主要研究方向为红外焦平面探测器。

1 生产 HgCdTe 遇到的问题

1.1 HgCdTe 红外探测器工艺的特点

国内外通常把 HgCdTe 红外焦平面组件生产工艺分为一般工艺和特殊工艺^[1]。

一般工艺包括：读出电路的设计；读出电路测试、铟柱生长、倒装互连；杜瓦设计和制造、封装；制冷器的安装及测试。

特殊工艺包括：布里奇曼法生长 CdZnTe 晶锭、磨抛；液相外延法生长 HgCdTe 薄膜；离子注入平面工艺制备光伏二极管。

1.2 优化工艺技术

昆明物理研究所红外焦平面探测器生产刚刚经过了 3 年，产量平均每年提高 50% 以上。每年都要对部分工艺进行优化；优化工艺技术的目的首先是提高成品率、降低成本，其次是为生产更大规模的红外焦平面做准备。

1) 增大衬底尺寸、提高衬底质量

早期昆明物理研究所只能生产 60 mm、75 mm 直径的 CdZnTe 晶锭（见图 2），晶片的尺寸被统一成 20 mm×25 mm。2010 年开始生产 90 mm、120 mm 直径的 CdZnTe 晶锭（见图 2）；2013 年生产 CdZnTe 晶片的尺寸增大至 36 mm×38 mm 的新标准，从而能在每块晶片上做出更大或更多的探测器管芯。



图 2 不同直径的碲锌镉晶体

Fig.2 CdZnTe crystals of different diameter

CdZnTe 衬底没有小角度的取向错误，只有少量的位错线，碲沉淀相很少，合格的衬底标准是半峰宽 <20 弧秒。

2) 提高 HgCdTe 薄膜材料的质量

对红外焦平面器件的生产而言，最重要的是材料的质量^[2]，包括 CdZnTe 衬底和 HgCdTe 薄膜，基于精确控制的工艺流程，红外探测器中心生产的 HgCdTe 液相外延材料（见图 3）达到了国内先进水平，但是与法国 Sofradir 公司相比还有一定的差距，法国精确控制的液相外延方法给出完美的组分均匀性，在 80 K 温度处截止波长为 10.3 μm 的材料的波长均匀性优于 0.15 μm，厚度均匀性 ±1 μm^[1,3]；而昆明物理研

究所同样波长材料的波长均匀性水平在 0.3 μm 左右，厚度均匀性 ±1.5 μm，因此还有很大的提高空间。生产红外探测器的基础是使用高质量的材料。这是大量生产有成本效益的 HgCdTe 列阵的关键。因此，要解决的核心问题是如何提高材料质量使其达到或接近法国标准水平。

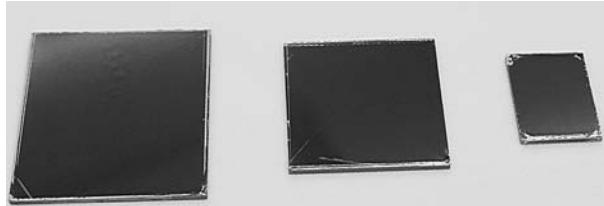


图 3 不同尺寸的碲镉汞液相外延材料

Fig.3 LPE HgCdTe materials of different size

3) 减小 HgCdTe 二极管的暗电流

暗电流是光伏 HgCdTe 二极管无光信号下的反向饱和电流，暗电流直接影响红外焦平面的性能；暗电流越小越好，在材料和器件工艺中尽可能控制影响产生暗电流的各种因素。光电二极管的暗电流主要来源于扩散电流、表面复合电流、结区内产生复合电流、缺陷辅助隧穿电流以及能带到能带隧穿电流。碲镉汞光电二极管与读出电路输入级连接，构成信号输入回路。探测器暗电流对焦平面性能的影响除了直接影响探测器本身噪声水平以外，还对读出电路信号传输效率、读出电路输入端等效噪声、焦平面线性度、动态范围以及性能稳定性等产生重要影响。HgCdTe 红外焦平面探测器采用了优良的材料和简单的平面加工方法，目前的光伏工艺在生产水平上得到了较好的控制。在 10 μm 截止波长和 80 K 的测试条件下，探测器的 R_0 值平均大于 3 MΩ。在光伏工艺之前对 HgCdTe 材料进行较好的热处理与电学参数控制，可以使探测器的 R_0 值提高；减小暗电流。昆明物理研究所在实际生产中通过测试每个二极管的 G_{pol} 值与直流电平变化的比值来评价暗电流水平。

4) 提高二维列阵的可靠性

随着红外焦平面列阵尺寸的增大和像元间距的减小，考虑到 HgCdTe 和读出电路之间的热失配问题变得非常重要，采用一种独特的集合方法来减薄 CdZnTe 衬底以便优化红外焦平面列阵不同层次之间的机械应力的分配，将器件芯片减薄至 10 μm 以内；这种工艺研发 4 年并已在生产的中波 320×256 元的红外焦平面列阵上得到验证，显示很好的可靠性结果。国外采用多次制冷启动作为考核探测器芯片长期工作稳定性的主要方法之一，如法国 Sofradir 公司采用斯特林制冷机开关机制冷 2000 次以上作为评价探测器芯片在制冷启动应力条件下的可靠性^[1,3-4]。为缩

短试验时间,采用液氮冲击制冷作为考核探测器组件耐受温度冲击应力的方法之一,样品经历2000次液氮冲击试验后,盲元数和盲元分布基本未发生变化,主要性能参数值也未发生明显变化。

5) HgCdTe 工艺流程的稳定性

HgCdTe 敏感层一旦长好并经过抛光,剩下的工艺便是制造光伏二极管。采用的工艺方法是硼离子注入法。这种离子注入方法与扩散或台面成结等技术不同,它用平面加工技术产生明确的像元(这对于有效的钝化是关键)。*n-on-p* 同质结被注入后形成一个可精确控制的结,它具有短的扩散长度^[5]。这些工序制造出来的二极管很灵敏,并且具有高的占空因数和完美的调制传递函数(MTF)^[5-6]。采用平面工艺技术,是获得最佳钝化和最高长期稳定性的一条捷径,已在国内外广泛使用。

6) 集合式混成方法

铟柱混成方法基于一种独特的回流技术。这种技术可使 HgCdTe 列阵能够自动而精确地排列在硅读出电路上,并且具有完美的连接率。已经证明这种技术便于像元间距越来越小的二维列阵的混成^[1,7-8]。此外用这种技术可同时把多个 HgCdTe 光伏列阵混成在一块读出电路硅片上以提高生产率,也可以制作大规格的列阵。

2 生产的典型产品

2.1 长波 288×4 元红外焦平面组件

长波 288×4 元探测器组件在国际上是一款畅销产品,目前在国内外研制和生产的大多数第二代前视红外热像仪都基于这种类型的探测器。在这些第二代前视红外系统中,某些热像仪已经大规模生产,法国 1993 年开始生产长波 288×4 元探测器组件,已有数万个 288×4 元探测器被很多国家的用户购买^[1]。

昆明物理所生产的长波 288×4 元探测器组件与法国产品相兼容。图 4 是长波 288×4 探测器组件和典型的信号图。通过对近几年生产的长波 288×4 元探测器组件的性能进行统计分析,其峰值探测率平均值为 $1.6 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$,响应率非均匀性平均值为 6%。这说明昆明物理研究所生产的长波 288×4 元探测器组件性能和法国同类产品性能相当,但是由于性能离散性较大,仍需要进一步优化工艺。

2.2 中波 320×256 元红外焦平面探测器组件

法国 Sofradir 公司于 1999 年开始生产中波 320×256 元红外探测器组件^[1]。昆明物理所从 2010 年开始生产中波 320×256 元红外探测器组件。该组件有两

种杜瓦封装制冷方式(如图 5),以适应不同的武器装备需求。

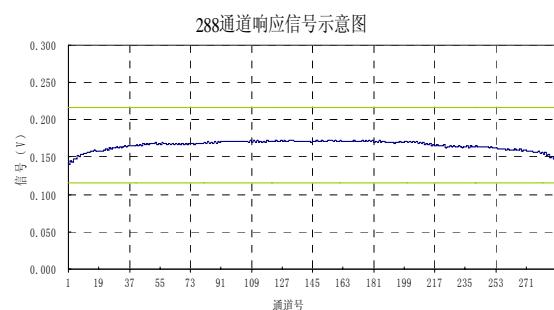


图 4 288×4 元探测器组件及信号图

Fig.4 The LW 288×4 detector assembly and its signal diagram



图 5 中波 320×256 元探测器组件

Fig.5 The detector assembly of MW 320×256

昆明物理所生产的中波 320×256 元探测器组件与法国产品相兼容。图 6 是中波 320×256 元探测器典型的信号图。通过对近几年生产的中波 320×256 元探测器组件的性能进行统计分析,其噪声等效温差平均值为 10 mK,响应率非均匀性平均值为 5%。这说明昆明物理所生产的中波 320×256 元探测器组件

性能接近法国同类产品性能，但是均匀性及稳定性需进一步提高。

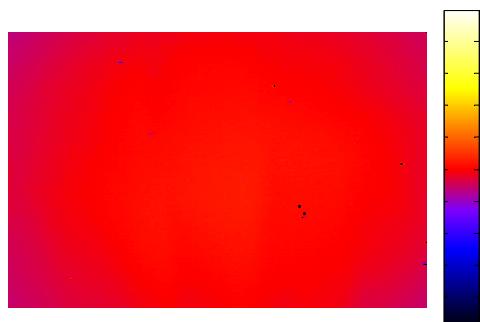


图 6 中波 320×256 元探测器组件信号图

Fig.6 The signal diagram of MW 320×256 detector assembly

3 结论

把 HgCdTe 红外焦平面器件的研究成果转向生产方面，在国内一直是个瓶颈问题，这也是各级领导和用户关心的问题；昆明物理研究所红外探测器中心做了大量的艰苦工作，取得了一定的经验和教训，2013 年两种典型的红外焦平面探测器组件生产的数量分别可达几百套。

首先红外焦平面器件的生产要基于优良的碲锌镉衬底、HgCdTe 液相外延薄膜材料，只有材料的质量得到稳定控制，生产才有保障。

其次利用重复性好的离子注入平面光伏工艺，控制好工艺设备和工艺参数；提高芯片的成品率。

最后，产品交付用户后根据用户的反馈优化工艺，采用更大面积的 HgCdTe 液相外延薄膜材料来提

高产量和降低成本，是昆明物理研究所进一步努力的目标。

参考文献：

- [1] Philippe M Tribolet, Jean-Pierre Chatard. From research to production, 10 years of success[C]// Proc. of SPIE on Infrared Technology and Applications XXV, San Diego: 2000, **4130**: doi:10.1117/12.409884.
- [2] 顾聚兴. 大量生产 HgCdTe 所遇到的技术问题[J]. 红外, 2002(12): 27-33; 2003(1): 35-39.
- [3] Philippe Tribolet, Philippe Chorier, Alain Manissadjian, et al. High performance infrared detectors at Sofradir[C]// Proc. of SPIE on Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VI, 2000, **4028**: doi: 10.1117/12.391759
- [4] Philippe Tribolet, Gérard DestefanisESTEFANIS, Third generation and multi-color IRFPA developments: a uniqueapproach based on DEFIR[C]//SPIE Orlando 2005, **5783**: doi:10.1117/12.607544.
- [5] P Tribolet, J P Chatard, P Costa, A. Manissadjian,Progress in HgCdTe homojunction infrared detectors[J]. Journal of Crystal Growth, 1998, **184/185**: 1262-1271.
- [6] Electrical doping of HgCdTe by ion implantation and heat treatment, G.L. Destefanis[J]. Journal of Crystal Growth, 1988, **86**: 700-722.
- [7] G Destefanis, J P Chamonal. Large improvement in HgCdTe photovoltaic detector performance at LETI[J]. Journal of Electronic Materials, 1993, **22**(8): 1027-1032.
- [8] 王忆锋, 陆剑鸣. 向数字化发展的红外焦平面阵列[J]. 红外技术, 2013, **35**(4): 195-201.