文章编号: 1672-8785(2023)06-0001-06

大规模红外焦平面阵列探测器的 有效像元率研究

谢 珩 周 铭 李春领 刘江高 (华北光电技术研究所,北京 100015)

摘 要:随着大规模红外焦平面阵列探测器应用的日益广泛,用户对其有效像 元率指标提出了越来越高的要求。分析了有效像元率提升的难点。通过优化基 于垂直布里奇曼法的衬底生长以及表面加工等工艺,提高了液相外延材料质量, 获得了低缺陷中波碲镉汞薄膜外延材料;通过开发碲镉汞探测器背面平坦化工 艺和优化探测器与读出电路倒装互连工艺,提高了成品率。最终提升了有效像 元率指标(大于 99.8%),获得了良好的效果。

关键词:有效像元率;红外焦平面阵列;液相外延;倒装互连

中图分类号: TN214 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.06.001

Research on Effective Pixel Rate of Large-Scale Infrared Focal Plane Array Detectors

XIE Heng, ZHOU Ming, LI Chun-ling, LIU Jiang-gao

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: With the increasing application of large-scale infrared focal plane array detectors, users have put forward higher and higher requirements for the effective pixel rate index. The difficulty of improving the effective pixel rate is analyzed. By optimizing the processes such as substrate growth based on the vertical Bridgman method, and surface processing, the quality of liquid-phase epitaxy materials has been improved, and low-defect medium-wave HgCdTe thin-film epitaxy materials have been obtained. Through the development of back-side flattening process of HgCdTe detectors and optimization of flip-chip interconnection process for detector and readout circuit, the finished product rate is improved. Finally, the effective pixel rate index (greater than 99.8%) is improved, and good results are obtained.

Key words: effective pixel rate; infrared focal plane array; liquid-phase epitaxy; flip-chip interconnection

收稿日期: 2023-02-16

1

作者简介:谢珩(1979-),男,北京人,研究员,主要从事红外探测器工艺技术研究。

E-mail: xieheng3@cetc.com.cn

0 引言

西方发达国家近年来开始对大规模碲镉汞 焦平面阵列探测器进行研究和制备,已有部分 厂家陆续推出此类产品。它们具有尺寸小、重 量轻、分辨率高、灵敏度高等特点,可在相同 探测面积内实现更高的空间分辨率。1280× 1024 碲镉汞中波红外探测器制冷组件是一种 典型的第三代大规模红外焦平面阵列探测器产 品^[1],可应用于车载、舰载、机载高分辨率观 测及告警等领域。美国、法国等西方国家已逐 步开始批量装备应用。

在国内,中国电子科技集团公司第11研 究所在2009年就开展了航天用分置式1024× 1024中波红外探测器组件的研究工作^[2],并在 近些年研制了可替代同类进口产品的集成式 1280×1024中波红外探测器组件。但对于具 有高性能技术指标(有效像元率高于99.8%等) 的组件而言,成品率仍较低。下面将对百万像 素组件有效像元率提升的难点进行分析,并对 材料和器件相关工艺优化进行阐述。

1 百万像素组件有效像元率提升的难点

1.1 控制材料缺陷

对于1280×1024 中波红外探测器芯片来 说,有效像元率高于99.8%的要求,意味着 芯片的盲元数量小于2000个。按照1个缺陷 产生2.5个盲元计算,所允许的缺陷数量为 800个。根据探测器芯片大小可以计算缺陷密 度:缺陷数量/探测器芯片面积=800/(3.6× 3.8/2)=117个/平方厘米。考虑到其他致盲 因素和可靠性因素,材料表面缺陷一般控制在 15个/平方厘米以下。因此,对于小尺寸的碲 镉汞液相外延材料而言,可以通过选取外延膜 较好的区域来制备管芯。但是针对36 mm×38 mm大尺寸管芯材料,很难再通过这种方式进 行,而必须从根本上进一步降低材料的宏观缺 陷密度。

1.2 提升倒装互连工艺的成品率

1280×1024 碲镉汞中波红外器件采用国

INFRARED (MONTHLY)/VOL.44, NO.6, JUNE 2023

内外主流技术途径,即通过铟柱将碲镉汞焦平 面芯片和读出电路倒装互连^[3],从而实现信号 读出。对于像元中心间距为 15 μm 的 1280× 1024 器件来说,芯片尺寸达到 19 mm×16 mm 以上;倒装焊点数量达到 131 万个,且每个焊 点的直径小于 10 μm,焊点间距为 15 μm,使 得倒装焊接难度急剧增加(焊点数量大、直径 小、密度高、芯片尺寸大幅增加)。以上因素 导致互连工艺的容差范围大大减小,而且由于 探测器芯片不平整度的存在,只要探测器与读 出电路之间存在极其微小的角度,就会导致一 部分探测器像元与读出电路的互连失效,造成 有效像元率达不到要求。

2 材料工艺优化及结果

2.1 衬底晶格质量和表面加工工艺优化

外延生长^[4]具有遗传性特点:一般碲锌镉 衬底表面的缺陷容易引入到外延膜上,进而影 响材料性能。因此,高质量的碲锌镉衬底是获 得高性能碲镉汞外延材料的前提。分析来看, 碲锌镉衬底表面的缺陷实际上来源于两部分: 一是在晶体生长过程中形成的二次相夹杂缺 陷,加工时暴露在衬底表面,并在生长时延伸 至碲镉汞薄膜内;二是在加工过程中引入的低 损伤、划痕、残留物等。特别是对于大尺寸碲 锌镉衬底,难以通过避开缺陷的方式对其进行 筛选。因此,提高碲锌镉晶体本身的质量和优 化衬底表面加工工艺显得尤为必要。

针对衬底内部二次相夹杂缺陷问题,改进 基于垂直布里奇曼法的碲锌镉晶体生长工艺, 在石英容器底部单独增加镉单质气源(见图 1 (a)),并控制其温度来产生合适的镉蒸气压 力,抑制晶体内部镉组分的非均匀挥发,使晶 体实现近化学计量比生长,以抑制晶体内部二 次相的形成,从而减小碲锌镉衬底内部二次相 夹杂缺陷的尺寸和密度,提升晶体生长的可控 性。图 1(b)和图 1(c)所示分别为改进前后所 得衬底的红外透过结果。可以看出,改进后晶 体内部的 5 μm 左右大小的二次相夹杂缺陷基 本被消除。



图 1 (a) 工艺改进的示意图; (b) 改进前所得衬底的红外透过结果; (c) 改进后所得衬底的红外透过结果

另一方面,优化碲锌镉衬底表面加工工 艺。通过对晶片研磨工艺、机械抛光工艺、机 械化学抛光工艺和化学抛光工艺进行优化,开 发了亚微米抛光工艺,并通过改进清洗过程中 的工艺操作,形成了高一致性的批量化衬底清 洗流程,最终获得了表面粗糙度小、损伤低、 表面无划痕的碲锌镉衬底。

在使用衬底时,开发了衬底吹干工装,提 高了衬底吹干时的稳定性。这可避免衬底夹取 吹干时崩边、掉渣的情况,同时也可避免周围 杂质、灰尘的带入。该工装的引入规范了外延 装舟前的衬底吹干工艺,提高了工艺一致性, 避免了此工艺中的杂质带入情况,进一步抑制 了外延膜的表面宏观缺陷。

2.2 低缺陷中波碲镉汞薄膜外延生长技术

采用液相外延技术生长的碲镉汞晶片上, 经常会出现形状如"火山口"的缺陷。采用扫 描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)对外延后的碲镉汞薄膜的表面进行测试 后,确定这种缺陷与衬底/外延膜界面处残留 的碳元素有关:由于生长所用的外延舟材料选 择的是高纯石墨材料,在生长过程中,母液在 液相外延前处于碳饱和环境下;水平滑舟时外 延母液与衬底接触,母液与石墨有相对滑动, 石墨颗粒脱落后混入母液。因此,通过每次外 延前都对石墨舟进行预清洗处理,改善石墨舟的表面状态,去除松散的石墨颗粒,从而避免由于石墨颗粒脱落而引起的各种外延生长缺陷。

此外,外延完的碲镉汞薄膜存在残留的生 长应力,导致碲镉汞薄膜内位错缺陷增多。通 过优化液相外延生长溶液配方和调节外延生长 过程中的失汞速率、开始外延温度(生长点)以 及生长过程中的降温速率等参数,降低了碲镉 汞薄膜内的生长应力,减小了位错密度,提高 了碲镉汞薄膜晶格质量。图 2 和图 3 所示分别 为工艺优化前后的位错缺陷密度变化情况和材 料表面形貌变化情况。

通过以上优化措施,提高了液相外延材料 质量,使表面宏观缺陷密度降低至15个/平方 厘米以下,为有效像元率的提升打下了坚实的 基础。

3 器件工艺优化及结果

3.1 碲镉汞探测器平坦化工艺优化

碲镉汞薄膜和碲锌镉衬底之间存在应力。 这会使薄膜材料发生形变。虽然在实施器件工 艺之前经过了表面平坦化工艺,但器件工艺过 程中仍会经过多步高温工艺,使薄膜材料表面 的平面度变差,从而对后续的倒装互连工艺造 成影响。针对这一问题,在表面平坦化工艺的

3



图 2 1000 倍显微镜下的位错缺陷分布: (a)优化前; (b)优化后



图 3 液相外延材料的表面形貌: (a)优化前; (b)优化后

基础上开发并优化背面平坦化工艺,以提高倒 装互连前碲镉汞器件表面的平面度。在划片前 测试器件厚度,采用光刻胶保护器件表面,然 后将器件正面向下粘附于玻璃衬底上,并利用 单点金刚石精密车床对碲锌镉衬底进行背面平 坦化,从而间接调整器件正面的平面度。

图 4 为 1280×1024 中波红外器件背面平 坦化后的表面轮廓图。可以看出,经背面平坦 化后,器件表面的平面度得到进一步改善 (0.41 μm)。这增大了后续倒装互连工艺的容 差范围,为提升有效像元率打好了坚实的 基础。

3.2 高导通率倒装互连工艺

4

对于倒装互连工艺本身来说,最重要的参数是互连压力和互连时间。互连压力需要在单 个铟柱的受力与整个芯片材料的受力之间进行 折中考虑。若整个芯片材料受力过大,则材料 产生应力累积,造成材料位错密度增加;但是 材料受力过小又不利于单个铟柱的互连牢靠 度。互连时间越长,一般效果就越好,但也需 要兼顾效率问题。

在优化倒装互连压力和互连时间的同时, 为了提高探测器芯片与读出电路的互连精度, 在芯片四周分别设计了调平标记。在互连工艺 中使用基于双激光束测距的调平方式(见图 5),使调平标记位置到读出电路的距离差小于 1 μm,从而提高倒装互连工艺的精度和成 品率。

通过以上优化措施,1280×1024 碲镉汞 中波红外器件的倒装互连导通率高于99.99%, 倒装互连工艺成品率达到90%以上。



图 4 1280×1024 中波红外器件背面平坦化后的表面轮廓图



图 5 基于双激光束测距的调平示意图

4 结束语

提升第三代大规模中波红外焦平面阵列探 测器的有效像元率需要对材料和器件的相关重 点工艺进行综合考虑。在材料方面,通过改进 基于垂直布里奇曼法的衬底生长以及表面加工 等工艺,提高了液相外延材料质量,获得了低 缺陷中波碲镉汞薄膜外延材料;在器件方面, 通过开发碲镉汞探测器背面平坦化工艺和优化 倒装互连工艺,提高了成品率,最终提升了有效像元率指标。下一步将对器件流片中光刻、 表面钝化、干法刻蚀、电极成型、倒装互连等 各工艺的步骤及细节进行监控分析和优化,使 有效像元率得到进一步提升。

红 外

参考文献

- [1] Antoni Rogalski. Third Generation Infrared Photon Detectors [J]. Optical Engineering, 2003, 42 (12): 3498–3516.
- [2] 喻松林,朱西安,周立,等.百万像素中波红外 焦平面组件研制 [J]. 航天返回与遥感,2016, 37(4):59-65.
- [3]谢珩,王宪谋,王骏.百万像素级红外焦平面器
 件倒装互连工艺研究[J].激光与红外,2017,
 47(3):319-321.
- [4] 赵绪然,裴广庆,杨秋红,等.液相外延技术发展现状[J].人工晶体学报,2006,35(6): 1307-1312.