

拼接红外探测器冷头设计

张磊, 东海杰, 王春生, 刘伟
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:随着红外探测技术的快速发展,具有长线列/大面阵特征的拼接探测器应用需求越来越广泛。本文结合国内外拼接探测器封装技术的研究情况,分析了拼接探测器冷头结构的常用材料和设计方法,对于拼接探测器的研制具有一定的参考价值。

关键词:拼接探测器;封装;冷头结构

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.013

Design of cold head in mosaic infrared detector

ZHANG Lei, DONG Hai-jie, WANG Chun-sheng, LIU Wei
(North China Research Institute of Electro-optic, Beijing 100015, China)

Abstract: With rapid development of infrared detection technology, mosaic infrared detector with long linear or large array is widely used. Firstly, the domestic and foreign research situation of mosaic detector packaging technology was introduced briefly, and the common materials and design methods of cold head structure in mosaic detector were analyzed. This study provides a reference for the development of mosaic detector.

Key words: mosaic infrared detector; package; cold head

1 引言

红外探测器技术具有被动探测、探测精度高、环境适应性强的特点,广泛应用于预警探测、情报侦察、精确打击、夜视、天文观测等领域。近年来,随着红外探测器技术的飞速发展,为了实现更大视场、更高空间分辨率的要求,对于长线列和大面阵红外焦平面探测器的需求越来越迫切,而实现这一目标的一个途径便是探测器拼接。

冷头结构是探测器封装结构的重要部分,一方面,它作为探测器芯片的装载面,将制冷机的冷量传递给探测器芯片;另外,还作为探测器芯片与电学引出结构的过渡。

2 冷头设计目标

长线列/大面阵拼接探测器通常有三种形式,第一种是在拼接好的多片读出电路芯片上,互连

多片探测器阵列,形成拼接探测器模块(如图1(a))。这种拼接形式的特点是拼缝小,但对碲镉汞衬底材料的均匀性和共面互连技术要求较高,而且其中一片探测器发生故障时,难以修复或替换。第二种是将多个探测器阵列-读出电路混成芯片单模块,在拼接衬底上通过钢柱互连或者粘接的方式进行精密拼接,形成拼接探测器模块(如图1(b))。以上两种形式的拼接探测器封装工艺与与常规的单片大面阵芯片封装工艺类似。还有一种机械拼接方法,是将单个探测器阵列-读出电路混成芯片完成装配和电学引出后,形成单模块封装体,基于精密装配技术,进行封装(如图1(c))。这种方式有利于扩展为更大规模的探测器,而且当其中一个探测器模块出现故障时,易于更换。

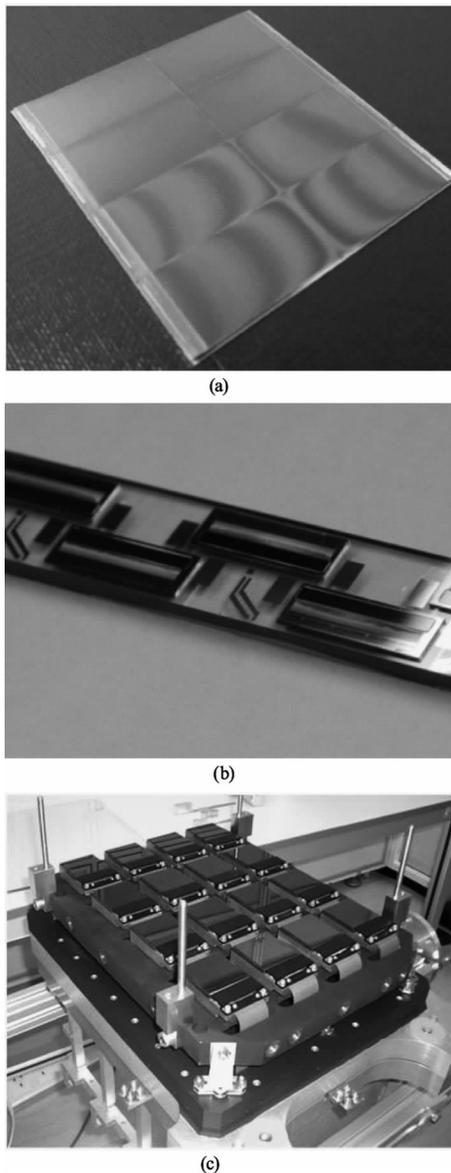


图 1 探测器拼接形式
Fig. 1 Detector splicing modes

拼接探测器芯片在工作中需要承受环境温度至 80 K 甚至 60 K 之间的温度冲击,若芯片受到的应力超过其许用范围,就可能会破坏钢柱结构,产生盲元,影响成像质量;若芯片变形超过系统焦距的调节范围,就无法得到清晰的图像。因此拼接探测器冷头结构的设计目标是:拼接芯片的变形在系统的焦距调节范围内,单片芯片的变形和最大应力在芯片的许用范围内。

3 冷头设计思路

3.1 结构设计

拼接探测器的阵列规模大、输出管脚多,冷头结构要保证较小的温度梯度、低应力、低变形,使芯片能够在深低温下正常工作。为了尽量减小由于不同

材料的热膨胀系数不同引起的热失配,冷头通常设计成包含芯片衬底、过渡基板、制冷机冷板在内的多层结构,如图 2 所示。

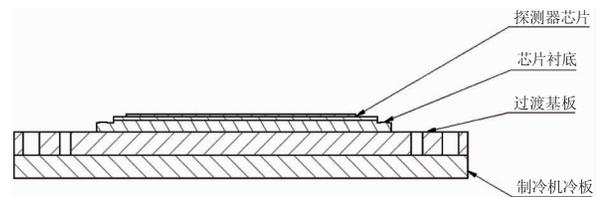


图 2 多层冷头结构

Fig. 2 Multilayer cold head structure

对于小规模的一线列或面阵芯片拼接,可以采用将多个混成芯片在过渡基板上精密拼接的方法,冷头结构的层数相对较少。

国内中国科学院上海技术与物理研究所研制的长波红外 2048 元线列 HgCdTe 焦平面器件采用了 8 个 256 元线列焦平面模块交错拼接而成^[1],如图 3 所示。256 元 HgCdTe 光伏器件和 256 线列读出电路分别通过 In 柱和一个公共宝石衬底相连,两者之间通过高密度引线实现电学连接,形成焦平面模块。8 个焦平面模块通过交叉排列的方式拼接在一个较厚的可伐基板上。

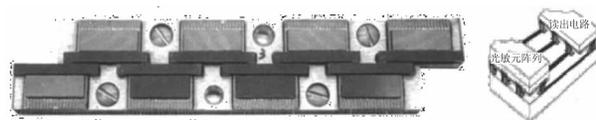


图 3 上海技物所 2048 元线列拼接探测器模块

Fig. 3 2048 mosaic detector

对于超长线列或超大面阵拼接芯片,采用机械拼接方法更为有利,但冷头结构的设计会也更为复杂,对零件的平面度、直线度等加工精度要求较高,以减小拼缝、保证拼接精度。

美国 Rockwell 的 GSAOI H2RG 4K × 4K 探测器由 4 个 H2RG SCA (Sensor-Chip-Arrays) 封装模块拼接而成,如图 4 所示。单个封装模块包含 1 个 TZM/Molybenum 混成结构、4 个 TZM/Molybenum 补偿片、4 个 CuW 支撑腿和 1 个连接 37 芯 D 型接插件的陶瓷 PGA 板,可实现 3 边拼接。2K × 2K 探测器芯片粘接在混成结构上,通过 TZM 补偿片保证 4 个模块的 Z 向,满足共面要求,4 个 CuW 腿用于拼接定位和热学传导,陶瓷 PGA 板用于电学信号引出。混成结构的平面度为 5 μm,上表面与安装面的平行度为 5 μm,底部开孔是为了更好的排气。GSAOI 探测器

将4个H2RG SCA模块拼接在钼板上,钼板通过4个钛材料的支腿固定在铝基板上。为了减小应力,钼板在支撑腿处开槽处理。

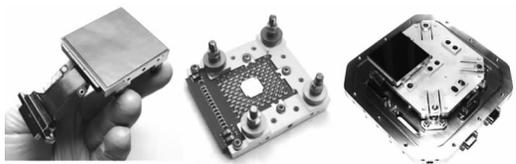


图4 H2RG SCA封装模块及GSAOI H2RG 4K×4K探测器
Fig. 4 H2RG SCA package & GSAOI H2RG 4K×4K detector

3.2 材料选择

多层冷头结构中,与芯片直接接触的结构称为芯片衬底。根据有限元分析结果,每层结构的材料对芯片的应力和变形都有影响,但芯片的应力与芯片衬底材料的热膨胀系数有直接的对应关系。在其他条件相同的情况下,衬底热膨胀系数大,芯片应力大;衬底热膨胀系数小,芯片应力小。芯片变形的影响因素较多,与各层材料的热膨胀系数、泊松比等都有关系。

此外,在材料选取时,还应考虑导热性、密度及可加工性的影响。导热性差的材料热阻大,会增加制冷机的冷量损失。密度太大的材料,会增加冷头的质量,不利于探测器组件在动态稳定性,而且对于支撑结构的强度设计提出了更高的要求。考虑可加工性主要是因为大尺寸金属结构之间的耦合多采用螺纹连接,而某些脆性材料(如钼铜)的螺纹加工难度很大。

基于以上因素,芯片衬底的材料多选用与Si读出电路的热膨胀系数更匹配,且导热性较好的蓝宝石、氮化铝陶瓷等材料,金属基板一般选择易于加工、热膨胀系数与Si较匹配的可伐、钢伐等材料。如上海技物所的2048元线列拼接探测器使用了宝石和可伐材料,Rockwell的H2RG SCA封装模块使用了TZM材料。

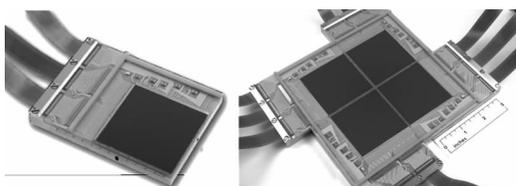


图5 ORION 2K×2K InSb探测器及NEWFIRM 4K×4K拼接探测器
Fig. 5 ORION 2K×2K InSb package & NEWFIRM 4K×4K detector

美国Raytheon公司的ORION 2K×2K InSb探测器模块用氮化铝陶瓷和金属基板作为芯片的载体,如图5所示。氮化铝陶瓷基板实现信号线过渡和热传导,通过金属基板材料的热匹配设计保证芯片的低温变形小于系统共焦精度^[2]。NEWFIRM 4K×4K探测器由4个SCA模块采用双边拼接的形式拼接在同一金属基板上,拼缝约2.5 mm。

3.3 接触形式

拼接探测器芯片与芯片衬底之间通常采用粘接工艺进行固定和冷量的传递,对粘接胶的粘度、固化条件、粘接工艺等有较高的要求。如上海技物所的2048元线列拼接探测器8个焦平面模块通过精密粘接工艺拼接在可伐基板上。Rockwell的H2RG SCA封装模块也是将芯片直接粘在TZM基板上。此外,还可以采用钢柱互连的形式进行连接,这对于应力的释放较为有利。

以色列SCD公司采用四片InSb 520×16探测器模块“交错排列”的方式完成了2048×16探测器的拼接^[3],如图6所示。为了避免热失配,改善热传导,每个模块通过钢柱互连的方式耦合在AlN拼接衬底上,AlN衬底与冷指之间设计支撑结构。通过设计加工的高精度的工装定位标识进行对准,拼接精度控制在2 μm。

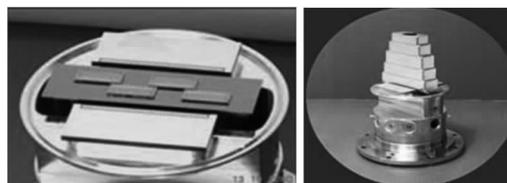


图6 SCD 2048×16拼接探测器
Fig. 6 SCD 2048×16 detector

若冷头层数较多,质量较大,金属基板之间一般采用螺钉连接的形式。为了避免低温下由于材料不匹配引起的可靠性问题,螺钉一般使用与母材相同或相近的材质。在接触面上涂抹导热胶或者增加铜皮,以保证良好的热接触,减少冷量损失。

3.4 制冷机冷板耦合形式的影响

由于拼接探测器芯片的阵列规模大,封装结构复杂,功耗大,通常使用具有更大冷量的集成式斯特林制冷机,进行制冷。制冷机冷板与回热器的耦合形式有钎焊式和冷链式,如图7所示。回热器的材料一般为铜,热膨胀系数为17。若采用冷链耦合,回热器与冷板不直接接触,通过均匀分布的冷链传

递冷量。虽然制冷机冷量损失相对较多,但是冷板可以选择热膨胀系数与 Si 较为匹配的材料,冷头的设计难度相对较小。

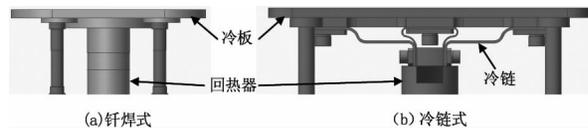


图 7 冷板 - 回热器耦合形式示意图

Fig. 7 Cooler coupling mode

若采用钎焊形式,考虑到焊接匹配性,冷板的热膨胀系数就不能太小,如钼铜的热膨胀系数为 10,但这就给冷头结构的设计带来了很大难度。为了减小热失配对芯片的影响,需要设计复杂的应力卸载结构,给零件加工和装配工艺带来很大难度。但是这种耦合形式的好处是制冷机冷量的损失小。

4 小结

拼接探测器冷头结构多设计成多层结构,尽可能使用与 Si 的热膨胀系数较为匹配的材料,根据实际情况选择粘接或钢柱连接的接触形式,还要考虑制冷机冷板 - 回热器耦合形式的影响。国内拼接探

测器起步较晚,在拼接形式的多样化、组件的小型化等方面与国外产品还存在较大差距,后续将在新材料应用、模块化设计等方向上开展进一步研究,逐步提高拼接探测器的封装水平。

参考文献:

- [1] LI Yanjin, YANG Jianrong, HE Li, et al. Long-wave infrared 2048-elements linear HgCdTe focal plane array[J]. Infrared Millim. Waves, 2009, 28(2): 90-92. (in Chinese)
李言谨, 杨建荣, 何力, 等. 长波红外 2048 元线列碲镉汞焦平面器件[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(2): 90-92.
- [2] Alan W Hoffman, Peter J Love, Joseph P Rosbeck. Mega-pixel detector arrays: visible to 28 μm [J]. Focal Plane Arrays for Space Telescopes, SPIE, 2004, 5167: 194-203.
- [3] Ofer Neshet, Philip C Klipstein, Eliezer Weiss. Advanced IR detector design at SCD: from $\text{D}^3\text{C}^{\text{TM}}$ to ABCS[J]. Quantum Sensing and Nanophotonic Devices, SPIE, 2004, 5359: 101-110.