

红外焦平面探测器封装结构热应力分析

陈 星, 华 桦, 何 凯, 王建新, 叶振华, 张勤耀

(中国科学院上海技术物理研究所红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 红外焦平面探测器是一个主要由引线基板、硅读出电路、铟柱和探测器芯片组成的多层结构。由于材料层间热膨胀系数的差异, 低温时探测器中会产生相当大的热应力, 对探测器温度循环可靠性影响严重。为了考察红外焦平面探测器低温下的热应力情况, 建立了探测器结构的有限元分析模型; 利用该模型分析了引线基板热膨胀系数、弹性模量, 及其厚度分别对 Si、CdZnTe 衬底类型的探测器热失配应力和形变的影响; 根据对这两种类型探测器的分析结果, 分别提出了相应的改进方法, 并对方法进行了计算验证。

关键词: 碲镉汞红外探测器; 可靠性; 热应力; 形变; 有限元分析

中图分类号: TN214 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.06.012

Thermal stress analysis of IRFPA packaging assembly

CHEN Xing, HUA Hua, HE Kai, WANG Jian-xin, YE Zhen-hua, ZHANG Qin-yao

(Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Infrared focal plane array detector has a multilayer configuration which is mainly composed of electrical lead board, Si-ROIC, indium bumps and detector chip. Substantial thermal stress is generated in the IRFPA packaging assembly at cryogenic temperature due to the difference in coefficient of thermal expansion (CTE) of various materials in the assembly, which affects the thermal cycling reliability significantly. A finite element analysis model for investigation of thermal stress distribution in detector at cryogenic temperature is established. This model is utilized to analyze the influence of CTE, Young's modulus and thickness of electrical lead board on thermal stress and warpage for Si and CdZnTe substrate detectors; Some improved methods are presented respectively according to the analytical results for two kinds of detectors, and these methods are verified by calculation.

Key words: HgCdTe infrared detector; reliability; thermal stress; warpage; finite element analysis

1 引 言

碲镉汞(HgCdTe)红外焦平面探测器通常采用倒焊的方式实现探测器芯片与读出电路之间的电、热和机械特性连接,从而达到既有红外信号获取、又具有信号处理功能的目的。在结构上,一个基本的探测器模块是集成了引线基板、硅读出电路、铟柱区和探测器芯片的多层材料体系。当 HgCdTe 红外探测器上的温度由室温降至 80 K 的低温工作环境时,材料之间的热失配将使得整个结构产生较大的低温形变和热应力。随着焦平面探测器规模的不断增

大,因热失配而失效的现象在长线列、大面阵的探测器中会表现得更加明显,是大规模红外焦平面探测器发展过程中不可避免的问题^[1-4]。

文中选择热匹配良好的硅基、热失配较大的 CdZnTe 基衬底类型的探测器为代表结构模型,用有限元方法分析了这两种衬底类型的探测器的低温热失配

作者简介:陈 星(1984 -), 博士生,主要从事红外焦平面探测器可靠性设计的研究。E-mail:hbucx2005@163.com
收稿日期:2013-10-10;修订日期:2013-11-18

情况,以及引线基板热膨胀系数、弹性模量、厚度分别对这两种探测器热失配应力和形变的影响;针对这两种类型探测器热失配情况,结合结构优化的思想,相应地提出一些改进方法,并计算验证方法的合理性。

2 焦平面探测器结构模型

2.1 探测器结构

图1为背照射红外焦平面探测器三维结构示意图,主要包括红外探测器芯片、硅读出电路和引线基板三部分。探测器芯片位于结构的最顶部,接受红外辐射并将其转化为电信号;硅读出电路位于探测器芯片的下方,通过两者之间的互连钢柱,相应读取探测器芯片上每个光敏元中的电学信号,放大处理后时序输出;位于最底部的引线基板为上述倒焊结构提供机械支撑和输出端的作用^[5]。

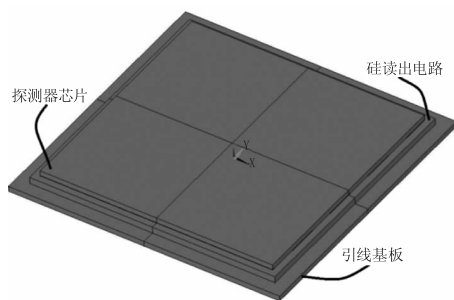


图1 红外焦平面探测器三维结构示意图

Fig. 1 3D schematic diagram of IRFPA detector

2.2 探测器有限元结构模型

由于探测器的结构对称性,选取1/4进行建模,忽略引线基板上金属引线的影响,互连钢柱区由连续的块状结构进行等效,其性能参数由钢、填充胶各自性质以及所占体积分数决定。模型的有限元网格划分如图2所示,探测器芯片上HgCdTe外延层厚度相对衬底、硅读出电路厚度小很多,因此该层上下部分采用梯度网格细化划分。在计算过程中,假设材料各向同性,材料热膨胀系数、弹性模量为室温至80 K温度范围内平均值,不随温度变化^[2,6];模型对称面上施加对称边界条件,模型上温度由室温300 K均匀地降至80 K的低温工作温度。



图2 探测器模型网格(1/4模型)

Fig. 2 Finite element mesh of detector model(1/4)

3 计算结果与讨论

3.1 Si、CdZnTe 衬底类型探测器热失配情况

Si基探测器芯片与Si电路完全热匹配,有效地解决了探测器芯片与硅电路间热失配导致的可靠性问题,是大规模、低成本红外焦平面探测器发展的一个重要方向;CdZnTe材料与HgCdTe材料同为闪锌矿结构,通过材料中锌组分的调整,可以达到与HgCdTe材料晶格的完全匹配,是制备高性能红外焦平面器件的关键衬底材料^[7-8]。图3(a)、(b)分别为结构尺寸相同的Si基和CdZnTe基探测器在80 K低温环境下的热失配形变图,可知因为探测器芯片衬底类型的不同,探测器的低温形变情况有较大差别。Si基探测器底部引线基板热膨胀系数比其顶部硅读出电路、硅基探测器芯片两层大,当温度由室温降低到80 K低温时,整个结构产生一个由中间向上凸起的形变,而CdZnTe衬底探测器芯片热膨胀系数较其底部硅读出电路、引线基板大,CdZnTe基探测器低温下呈现的是一个由中间向下凹进的形变。探测器低温形变是由探测器结构中各层材料间热失配应力引起的宏观表现,不仅与探测器芯片结构尺寸、材料参数有关,也与硅读出电路、引线基板相关的结构尺寸和材料参数有紧密联系^[6,9]。

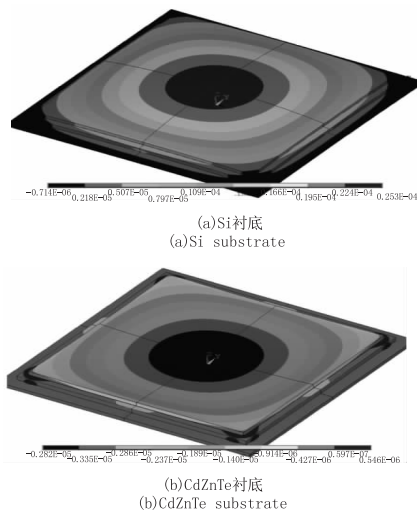


图3 探测器低温形变

Fig. 3 Deformation of IRFPA detector in cryogenic temperature

3.2 引线基板对探测器热失配程度影响

在红外焦平面探测器的封装过程中,探测器芯片与硅读出电路首先倒焊互连,然后利用环氧胶将其粘接到引线基板上,形成如图1所示的结构。图4(a)为硅基、CdZnTe基探测器芯片分别用硅读出电路倒焊互连的两种结构,以及分别相应粘接到宝石基板后,提取的探测器芯片顶表面中心线上的低温形变曲线,图4(b)为相应从这四种结构时探测器芯片

厚度方向中心线上提取的衬底中热失配应力分布曲线。可知对于探测器芯片与硅读出电路倒焊互连形成的双层结构,由于 CdZnTe 衬底热膨胀系数较硅电路大,当温度降低时,CdZnTe 基探测器芯片与电路互连双层结构向下产生了将近 $47\text{ }\mu\text{m}$ 的低温形变,而硅基探测器芯片因为与电路热匹配,低温时两者的互连结构不发生形变;在探测器芯片衬底热失配应力上,CdZnTe 基探测器芯片互连结构中的热应力水平也要比硅基探测器芯片中的高。互连结构粘接到宝石引线基板上后,探测器芯片顶表面形变、衬底中热应力分布情况均发生了较大变化。热匹配较好的硅基探测器芯片互连结构由于热膨胀系数相对较大的宝石引线基板的加入低温时产生了由中间向上凸起的形变,中心处最大的形变位移为 $19\text{ }\mu\text{m}$,此时衬底受一个较小的张应力的影响;而宝石基板热膨胀系数与 CdZnTe 衬底接近,CdZnTe 基探测器芯片互连双层结构在增加引线基板后形成了一个对称的平衡结构,形变程度较双层结构有非常明显的改善,中心处最大形变位移减小到了 $-2.4\text{ }\mu\text{m}$,但衬底中热应力大小却相对增加了 2.9 倍,这主要是因为形变的减小造成结构中的热失配应力无法释放而具有较高的水平。

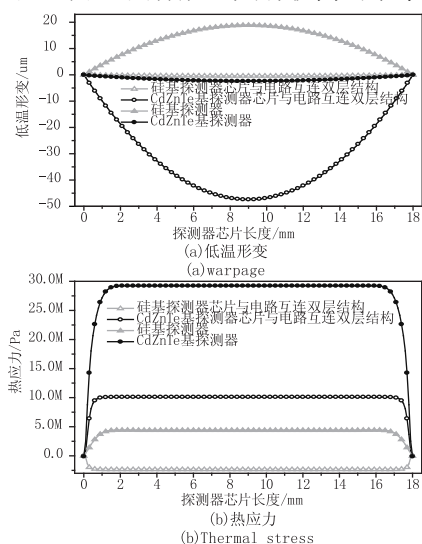


图4 增加引线基板前后探测器封装结构热失配情况比较

Fig. 4 Comparison of thermal mismatch in IRFPA packaging assembly before and after adding the electrical lead board

用于引线基板的材料主要有 AlN、 Al_2O_3 和 BeO 等一些陶瓷材料^[10]。 Al_2O_3 陶瓷片强度高、电绝缘性好、加工平整度高,是红外探测器封装常用的引线基板材料,在热膨胀系数、弹性模量、厚度等参数变化时,相应结构中热应力变化情况如图 5 所示。可知对于硅基、CdZnTe 基探测器,材料参数的变化对两者中热应力水平均有不同程度的影响,硅基探测器随引线基板热膨胀系数、厚度变化热应力变化范围大,合适

的基板材料可以有效地控制探测器中的热应力水平,而 CdZnTe 基探测器由于 CdZnTe 衬底探测器芯片与硅电路之间存在相当大的热失配,引线基板的变化对探测器芯片中热应力水平调节范围相对较小,难以从根本上改善探测器芯片中的热应力水平。

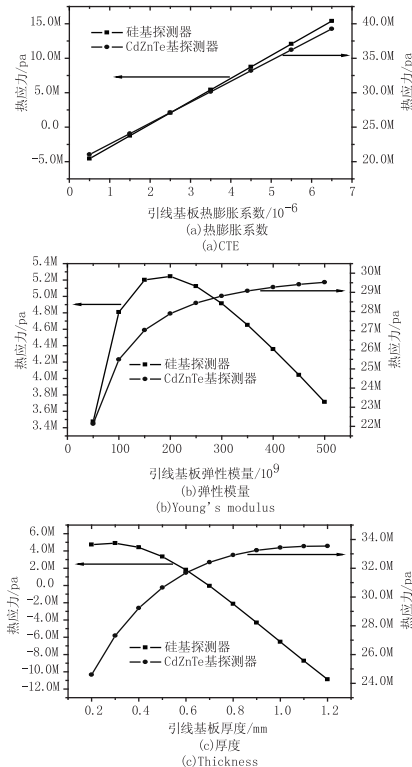


图5 热应力与引线基板材料参数之间关系

Fig. 5 Relationship between thermal stress and material properties of electrical lead board

3.3 探测器结构优化

对于叠层封装的红外焦平面探测器,通过调整组成层材料的结构尺寸^[6]、封装结构以及选择性能参数合适的材料等方法^[2],可以有效地改善探测器结构中的形变和热应力分布情况。图 6(a)、(b)分别为换用了热膨胀系数较小的 AlN 材料为引线基板的硅基探测器,以及在硅电路底部增加热膨胀系数较大的不锈钢压缩层的 CdZnTe 基探测器两种优化结构于 80 K 低温条件下的形变情况,图 7(a)、(b)分别为从优化后的两种探测器结构中相应探测器芯片厚度方向中心线上提取的衬底中热失配应力分布曲线,可知硅基探测器优化后低温热失配形变改善明显,探测器芯片顶面中心处最大形变位移由原来的 $19\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $1.6\text{ }\mu\text{m}$,衬底中热应力由一个相对较大的张应力转化为较小压应力影响;CdZnTe 基探测器结构顶面中心处最大形变位移优化前后均较小,但芯片衬底中的热应力水平相对减小了 48.3%,这主要是由于不锈钢压缩硅电路的作用,减小了与探测器芯片间的热失配程度,因此改善效果显著。

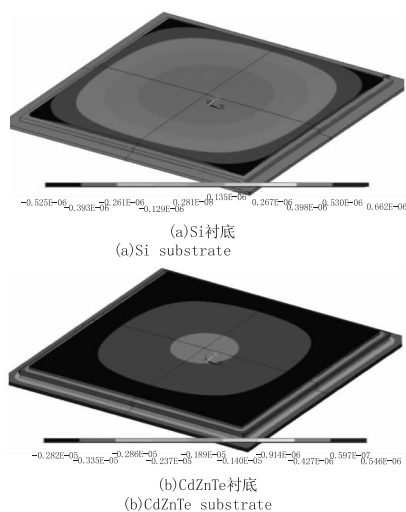


图6 结构优化后探测器低温形变

Fig. 6 Deformation of IRFPA detector in cryogenic temperature after structure optimization

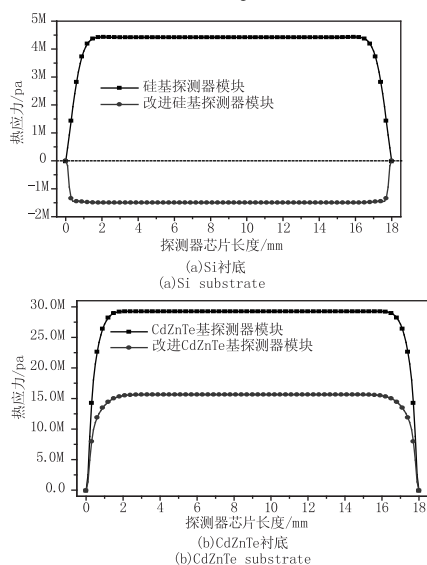


图7 结构优化后探测器中热应力

Fig. 7 Thermal stress distribution of IRFPA detector after structure optimization

4 结论

通过建立硅基、CdZnTe基两种红外焦平面探测器的有限元结构分析模型,计算得到了这两种探测器结构在低温条件下的热失配情况。硅基探测器中探测器芯片与硅电路间虽然热匹配非常良好,但由于引线基板的影响,探测器结构上的低温形变和热应力大小均发生了变化,调节引线基板热膨胀系数、弹性模量和厚度等参数可在较大范围内改变探测器结构上的形变程度和热应力水平,因此硅基探测器只需通过选择合适的引线基板以及相应厚度上进行控制便可达到结构优化的目的;CdZnTe基探测器结构上的热应力水平较硅基探测器高得多,这主要源于探测器芯片与硅电路间热失配,同时也与引线基

板性能参数、结构尺寸相关,热膨胀系数较大的类CdZnTe基探测器结构优化的关键在于调节和控制硅电路与探测器芯片之间的热匹配程度。

参考文献:

- [1] HU Xiaoning, ZHANG Haiyan, LI Yanjin, et al. Thermal stress analysis of HgCdTe focal plane arrays on Si substrates [J]. Laser & Infrared, 2006, 11 (36): 1020 - 1022. (in Chinese)
胡晓宁, 张海燕, 李言谨, 等. 硅基 HgCdTe 面阵焦平面器件结构热应力分析[J]. 激光与红外, 2006, 11 (36): 1020 - 1022.
- [2] LI Yanjin, HE Li, YANG Jianrong, et al. Study on thermal mismatch stress of HgCdTe infrared focal plane array [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2008, 27 (6): 410 - 412. (in Chinese)
李言谨, 何力, 杨建荣, 等. 碲镉汞红外焦平面器件热失配应力研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27 (6): 410 - 412.
- [3] Philippe Chorier, Anne Delannoy. Sofradir latest developments for infrared space detectors [J]. SPIE, 2011, 8012: 801202 - 1.
- [4] P Chorier, P Tribolet, P Fillon. Application needs and trade-offs for short wave Infrared detectors [J]. SPIE, 2003, 5074: 363 - 373.
- [5] LIN Ridong, WANG Xin, MENG Lingwei. Mechanical and heat analyse of the coldfinger structure of micro-dewar for infrared detector [J]. Laser & Infrared, 2007, 37 (11): 1206 - 1208. (in Chinese)
林日东, 王鑫, 孟令伟. 红外探测器用微型杜瓦冷指结构优化设计[J]. 激光与红外, 2007, 37 (11): 1206 - 1208.
- [6] CHEN Xing, DONG Meifeng, HE Kai, et al. Warpage and thermal stress analysis of hybrid infrared focal plane [J]. SPIE, 2012, 8419, 84191B: 1 - 6.
- [7] A Rogalski. Infrared detectors for the future [J]. Acta Physica Polonica, 2009, 116(3): 389 - 404.
- [8] Scott M Johnson, William A Radford, Aimee A Buell, et al. Status of HgCdTe/Si technology for large format infrared focal plane arrays [J]. SPIE, 2005, 5732: 250 - 256.
- [9] GONG Haimei, ZHANG Yani, ZHU Sangen, et al. Study of reliable packaging for IRFPA detector [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2009, 28(2): 85 - 89. (in Chinese)
龚海梅, 张亚妮, 朱三根, 等. 红外焦平面可靠性封装技术[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(2): 85 - 89.
- [10] GONG Haimei, SHAO Xiumei, LI Xiangyang, et al. Advanced technology and application of spaceborne infrared detectors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (12): 3129 - 3140. (in Chinese)
龚海梅, 邵秀梅, 李向阳, 等. 航天先进红外探测器组件技术及应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41 (12): 3129 - 3140.