

降低红外焦平面热失配应力方法

李言谨

中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

摘要 采用有限元分析方法研究了碲镉汞红外焦平面器件在低温下由于不同热膨胀系数引起的热失配应力, 在碲镉汞/硅/宝石片三层结构中, 低温下碲镉汞受到张应力, 易于损坏。根据膨胀合金的特性, 提出了两种焦平面器件结构, 一是将低膨胀合金因瓦材料置于宝石片下面; 二是将定膨胀合金柯伐材料置于硅和宝石片之间, 两种结构均可有效降低碲镉汞的热应力。这两种结构已分别用于 256×1、256×256 和 2048×1 中波红外碲镉汞焦平面器件的制备, 实验结果表明可明显提高碲镉汞焦平面器件的可靠性。

关键词 红外焦平面; HgCdTe; 热应力; 可靠性

中图分类号 TN215

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.08.002

Method of Reducing Thermal Mismatch Stress in Infrared Focal Plane Assembly

LI Yanjin

Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract Thermal mismatch stress in HgCdTe infrared focal plane assembly was studied by using the finite elements method. There will be tensile stresses in the HgCdTe/Si/Al₂O₃ three layers assembly under low temperature and damages would easily occur. According to the properties of expansion alloys, two configurations of infrared focal plane assembly are proposed to reduce the thermal mismatch stress effectively. One is that with the low expansion alloy invar layer below the Al₂O₃ piece, the other is that with constant expansion alloy kovar layer between the Si and Al₂O₃ pieces. 256×1 and 256×256 mid-wave HgCdTe infrared focal plane assemblies were prepared in these two configurations, respectively. The experiment results indicate that the reliability of HgCdTe infrared focal plane assembly is much improved.

Keywords infrared focal plane assembly; HgCdTe; thermal stress; reliability

0 引言

碲镉汞 (HgCdTe) 红外焦平面器件一般先将碲镉汞光伏阵列与硅读出电路 (Si) 通过倒装焊技术互联, 然后再黏接到宝石片 (Al₂O₃, 蓝宝石) 或陶瓷基片上。由于这几种材料的热膨胀系数不同, 探测器在比较低 (80~90K) 的温度下工作, 材料内部会产生应力。随着焦平面规模的增加, 这种由热失配引起的应力会造成碲镉汞材料的损伤或互联的失效, 严重影响焦平面器件的可靠性。对此, 国外研究人员有的采用衬底减薄的办法^[1], 对减薄工艺提出了很高的要求; 有的将碲镉汞薄膜生长在硅衬底上^[2], 将问题转化为碲镉汞材料的制备; 还有的采用其他技术途径解决这一问题^[3-5], 但没有给出具体做法。国内很少有这方面研究工作的报道^[6]。本文基于现有的焦

平面器件的结构和工艺, 采用有限元分析方法研究了碲镉汞红外焦平面器件在低温下的热失配应力分布特征, 并根据膨胀合金的特性, 提出了两种焦平面器件结构, 可以有效降低热失配应力。这两种结构已分别用于 256×1、256×256 和 2048×1 中波 HgCdTe 焦平面器件的制备, 器件经受高低温循环的可靠性得到显著提高, 取得了良好的应用效果。

1 HgCdTe/Si/宝石片三层结构的应力分析

1.1 结构模型

HgCdTe/Si/宝石片三层结构是碲镉汞焦平面器件的基本结构, 碲镉汞光伏阵列通过 In 柱倒焊在硅读出电路上, 为了便于封装和引出电极, 倒焊后的 HgCdTe/Si 芯片黏接在具有

收稿日期: 2010-08-08; 修回日期: 2011-02-24

作者简介: 李言谨, 研究员, 研究方向为红外光电探测组件, 电子信箱: yanjinli@mail.sitp.ac.cn

过渡引线的宝石基片上。

采用二维结构模型,即考虑器件的长度和厚度,这比较符合线列焦平面器件的情形,同样也可供面阵器件参考。碲镉汞光敏元列阵是通过钢柱倒焊在硅读出电路上,钢柱的高度一般为 $10\mu\text{m}$,其间填充环氧树脂黏合剂,其他材料之间均采用黏合剂黏接,由于黏合剂很薄,弹性模量很小(比一般金属固体小 2 个数量级),计算时未作考虑。碲镉汞生长在碲镉汞衬底上,由于这两种材料力学性质相近,计算时未作区分。将整个结构作为简支梁处理,如图 1 所示,在长度方向可自由伸缩,不影响厚度方向的形变。 HgCdTe 、 Si 和宝石片材料的长度分别为 10,14 和 20mm,厚度均为 0.4mm,该尺寸和现阶段实际制备的器件尺寸较为接近。有限元分割网络尺度为 0.1mm。计算的温度范围为 300~80K,为简单起见,假设材料参数不随温度变化。



图 1 计算热应力的焦平面器件模型
Fig. 1 Finite element model of focal plane assembly

1.2 计算结果

$\text{HgCdTe}/\text{Si}/\text{宝石片}$ 三层结构在低温下沿水平方向的应力分布如图 2 所示,其垂直方向的应力和剪切应力比水平方向约小一个量级,因此本文主要分析讨论水平方向的应力。图中正值为张应力,负值为压应力,为了显示效果,图中的应变放大了 20 倍。虽然 HgCdTe 的热膨胀系数大于 Si ,但由于宝石片的热膨胀系数和 HgCdTe 接近,其弹性模量大于 Si 和 HgCdTe ,在低温下使整个结构产生了中间向上的应变, HgCdTe 全部受到张应力,除了两端外,水平方向应力分布基本上是均匀的。在这 3 种材料中, HgCdTe 强度最低,极易受到损伤,实验结果表明,这种结构往往经过一次或多次高低温循环后, HgCdTe 就发生裂片或互联失效现象。

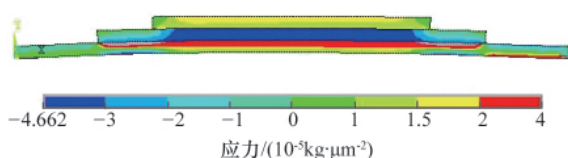


图 2 $\text{HgCdTe}/\text{Si}/\text{宝石片}$ 三层结构在低温下的沿水平方向的应力分布
Fig. 2 Horizontal stress profile of $\text{HgCdTe}/\text{Si}/\text{sapphire}$ under low temperature

2 膨胀合金特性

膨胀合金包括低、定膨胀合金两类,主要是铁镍合金,或配以适量的钴或铬构成了一系列不同热膨胀系数的低、定膨胀合金。图 3 是铁镍合金在室温附近的热膨胀系数与镍组分

的关系,当镍组分为 36%时,热膨胀系数达到最小值,这个组分的合金被称为因瓦(Invar),又称为不胀钢或殷钢,牌号为 4J36。用钴取代因瓦合金中的部分镍,其常温附近的热膨胀系数更低,称为超因瓦合金,如 4J32。用适量的钴和铬取代镍,构成不锈钢,其热膨胀系数较因瓦合金和超因瓦合金低,这类合金通常称为低膨胀合金,主要用于制造标准尺、测微计、测距仪、钟表摆轮、微波设备的谐振腔、重力仪构件、光学仪器零件等,在航天航空、军事武器、微波通信以及彩电阴罩等领域中得到广泛应用。

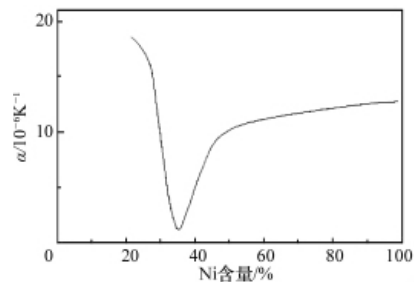


图 3 铁镍合金热膨胀系数与镍组分的关系
Fig. 3 Relationship between the thermal expansion coefficient of iron and nickel alloy and the content of nickel in it

其他牌号的膨胀合金一般称为定膨胀合金。表 1 列举了几种膨胀合金的成分、主要用途和性能。其中,柯伐(4J29)和 4J33 的热膨胀系数并未落在图 3 的曲线上,这是因为这两种合金掺入了适量的钴。除了因瓦合金外,其他合金主要用于玻璃或陶瓷的封接,在电真空器件和电子器件封装中有着非常重要的应用,因此这类合金又称为电子合金或封装合金。

表 1 几种膨胀合金的性能
Table 1 Properties of several expansion alloys

合金牌号	成分	主要性能
因瓦合金 4J36	36% Ni, 其余 Fe	在 20~100℃范围内具有低的线热膨胀系数, $\alpha \leq (0.8 \sim 1.5) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
柯伐合金 4J29	29% Ni, 17% Co, 其余 Fe	在 -80~450℃范围内的热膨胀系数与硬玻璃相近, $\alpha = (4.0 \sim 6.6) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
4J33	33% Ni, 15% Co, 其余 Fe	在 -60~600℃内具有与 95% Al_2O_3 等陶瓷相近的线热膨胀系数, $\alpha = (6.9 \sim 8.3) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
4J42	42% Ni, 其余 Fe	在 400℃以下热膨胀系数与软玻璃和某些陶瓷相近, $\alpha = (6 \sim 7.5) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$

膨胀合金在低温下的材料参数缺少系统的报道。在碲镉汞焦平面器件结构中,可通过测量两种薄片材料黏合后在低温下的应变,获得不同材料热膨胀系数的相对关系,再结合理论模拟确定所用材料热膨胀系数^[9]。图 4 为一定厚度的宝石片与因瓦以及宝石片与柯伐黏合后在低温下的应变,由台阶仪沿宝石片表面径向扫描获得。由图 4 可知,宝石片和因瓦黏合后在低温下的应变是中间向下弯曲,说明因瓦的热膨胀系数较宝石片小得多;宝石片和柯伐在低温下的应变是向

上弯曲,说明柯伐的热膨胀系数较宝石片大。采用同样的方法确定了与碲镉汞焦平面有关的几种材料的热膨胀系数,其大小顺序为:因瓦<硅<宝石<碲镉汞<柯伐。表2是参照文献及采用上述方法确定的所用材料的热膨胀系数和弹性模量。

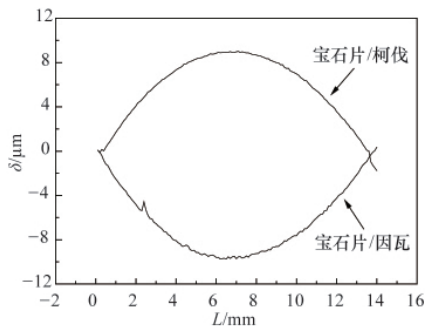


图4 宝石片/柯伐和宝石片/因瓦在低温下的应变
Fig. 4 Strains in sapphire/kovar and sapphire/invar under low temperature

表2 几种材料的热膨胀系数和弹性模量
Table 2 Parameters of materials

材料	热膨胀系数 / $10^{-6}K^{-1}$	弹性模量 / $(10^{-2}kg \cdot \mu m^{-2})$
HgCdTe(CdZnTe)	5	6
Si	2.8	12
Al ₂ O ₃	4.6	42
因瓦(invar)	1	20
柯伐(kovar)	7	20

3 降低 HgCdTe 应力的结构

由以上分析可知,HgCdTe/Si/宝石片三层结构中,HgCdTe受到较大的张应力,并产生中间凸起的形变,如果能够找到一种热膨胀系数比宝石片低的材料,将其黏接在宝石片下面,低温时,这两种材料的结合将会产生中间凹进的作用,从而压缩 Si,在 HgCdTe 中产生压应力,进而抵消部分张应力,达到提高可靠性的作用。因瓦材料是一种选择,其热膨胀系数很低,见图3,并且其导热率较高,易于加工。或者采用一种热膨胀系数大于宝石片的材料,将其置于 Si 电路和宝石片之间,低温时,这两种材料的结合同样会产生中间凹进的作用,降低 HgCdTe 中的应力,柯伐材料是一种选择。如图5所示。

采用第1节的分析方法,计算这两种结构的应力分布。图6为结构1(HgCdTe/Si/宝石片/因瓦)水平方向的应力分布,可以看出,由于低膨胀合金因瓦的作用,整个结构向下凹进,碲镉汞上表面受到压应力,而下表面为张应力,数值与HgCdTe/Si/宝石片三层结构相比明显减小。由于光敏元在HgCdTe的下表面,重点考察了HgCdTe下表面的应力S和因瓦、柯伐厚度T的关系,如图7所示。对于结构1,随着因瓦厚度的增加,HgCdTe受到的张应力减小,在某厚度下,张应力达到最小值,然后随着厚度增加,张应力增加。对于结构2,当柯伐厚度增加到某个值时,张应力减小至零,之后随着厚度

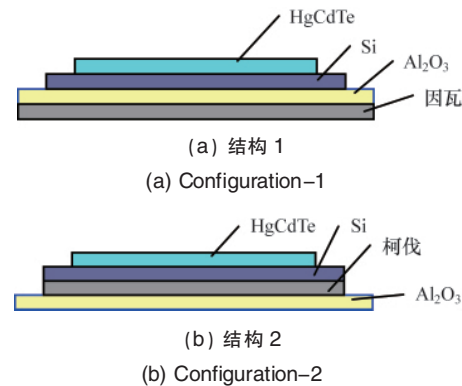


图5 降低 HgCdTe 应力的两种结构
Fig. 5 Two configurations to reduce the thermal mismatch stress

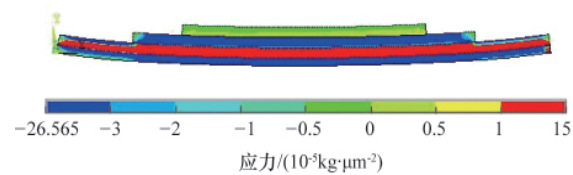


图6 结构1(HgCdTe/Si/宝石片/因瓦)低温下沿水平方向的应力分布
Fig. 6 Horizontal stress profile for configuration-1 (HgCdTe/Si/sapphire/invar) in low temperature

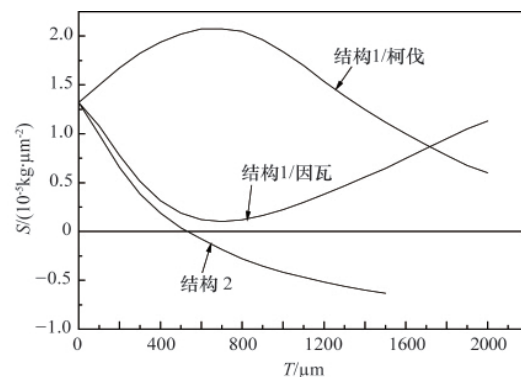


图7 HgCdTe 应力与因瓦和柯伐厚度的关系
Fig. 7 Relationship between HgCdTe stress and thickness of invar or kovar

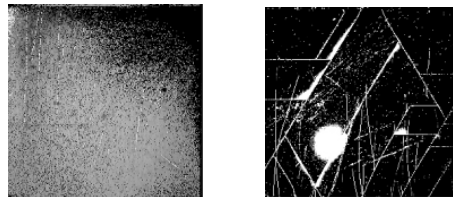
的继续增加转变为压应力。计算结果说明,选择合适的因瓦或柯伐厚度,采用结构1或结构2,可以有效降低甚至消除HgCdTe的应力,提高焦平面器件的可靠性。同时,用柯伐材料取代结构1中的因瓦,结果显示,在某厚度下,HgCdTe应力达到极大值,之后随着柯伐厚度的增加,应力逐步减小,当厚度足够大时,其应力将小于同样因瓦厚度下的应力。

4 应用

上述两种结构已经应用于 HgCdTe 焦平面器件的设计和制备,其中结构1用于 256x1 碲镉汞焦平面器件结构的设计,取得了很好的效果。该器件光敏元中心距为 46μm,行列

长度近 12mm, 试验表明, 采用这种结构的器件可以承受大于 1000 次的高低温循环。目前, 该器件已经在某试验遥感卫星上应用, 在轨运行 4 年多, 得到了大量清晰的地面遥感图片^[7]。

结构 2 用于 256×256 焦平面器件的制备, 也取得了良好的效果。该 256×256 器件的光敏元中心距为 40μm, 器件 HgCdTe 的尺度约为 11mm×11mm。采用基本的三层结构制备时, 在低温下会发生互联失效和 HgCdTe 光敏元阵列损坏的现象, 如图 8(a)所示, 其右上角出现严重的互联钢柱脱开。在 HgCdTe 和 Si 读出电路间填充低温环氧树脂后, 出现如图 8(b)所示的 HgCdTe 开裂现象。采用结构 2 后, 情形有了很大的改观, 上述的失效现象不再出现。256×256 中波焦平面器件已在某红外望远系统中试用, 图 9(a)为 256×256 中波焦平面器件在实验室内对人的成像, 图 9(b)为望远系统捕获的战机演练时的图像。



(a) 右上角互联钢柱脱开 (b) HgCdTe 开裂
(a) Dislocated at up right part (b) Damaged HgCdTe

图 8 256×256 焦平面器件失效图像

Fig. 8 Failures of 256×256 focal plane



(a) 实验室成像 (b) 望远系统的成像
(a) In the laboratory (b) Pictured by the telescope system

图 9 256×256 焦平面器件试用图像

Fig. 9 Images of 256×256 focal plane

用较厚的柯伐取代结构 1 中的因瓦, 也可降低碲镉汞中的应力, 该结构可用于长线性焦平面。长线性焦平面器件通常由多个焦平面模块拼接构成, 器件尺度较大, 如果采用较薄的拼接衬底, 器件在制备及装配过程中极易发生形变。采用较厚的柯伐作为长线性焦平面的拼接衬底, 既可降低碲镉汞所受的应力, 又可保证整个器件不易于发生形变。该结构已经用于中长波 2048 元线性碲镉汞焦平面的制备^[8], 也取得了成功并应用于型号项目, 图 10 是 2048 长线性焦平面照片。由于柯伐材料的易加工性, 两端设计成阶梯状, 从而可以首尾相接构成更长线性焦平面器件。

5 结论

解决大规模碲镉汞红外焦平面器件的热失配应力是器

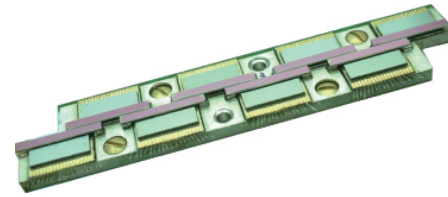


图 10 2048×1 长线性碲镉汞焦平面
Fig. 10 2048×1 long linear focal plane

件设计及制备过程中的一项重要工作, 本文采用有限元分析方法研究了碲镉汞红外焦平面器件在低温下的热失配应力分布, 介绍了膨胀合金的一些主要特性, 提出了两种降低 HgCdTe 应力的焦平面器件结构。选择合适的材料特性和尺度可以有效地降低 HgCdTe 中的热应力。这两种结构分别应用于中短波 256×1、中波 256×256 和中长波 2048×1 碲镉汞红外焦平面器件的制备, 满足卫星应用对碲镉汞红外焦平面可靠性的苛刻要求, 取得良好的效果。如何降低碲镉汞焦平面的热失配应力是器件结构设计及制备过程中的一项重要工作, 采用适当尺度的膨胀合金降低碲镉汞应力, 对器件的其他工艺几乎没有影响, 且膨胀合金易于获得和加工, 应用结果也表明这种方法简便、有效。

参考文献 (References)

- [1] Tissot J L, Marion F. Collective flip-chip technology for hybrid focal plane arrays[C]//Proceedings of SPIE. Beltingham WA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 2000, 4130: 581-586.
- [2] Dhar N K, Chen Y, Brill G N, et al. Composite substrate for large-format HgCdTe IRFPA[C]//Proceedings of SPIE. 2003, 5074: 157-165.
- [3] Tribollet P M, Costa P, Fillon P, et al. Large staring arrays at sofradir[C]//Proceedings of SPIE. 2003, 4820: 46-56.
- [4] Castelein P, Marion F, Martin J L, et al. Megapixel HgCdTe MWIR focal plane array with 15μm pitch [C]//Proceedings of SPIE. Beltingham WA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 2003, 5074: 52-59.
- [5] Love P J, Hoffman A W, Gulbransen D J, et al. Large-format 0.85-2.5 Micron HgCdTe detector arrays for low-background applications[C]//Proceedings of SPIE. Beltingham WA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 2004, 5167: 134-142.
- [6] 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): 409-412.
Li Yanjin, He Li, Yang Jianrong, et al. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(6): 409-412.
- [7] 李言谨, 危俊, 胥学荣. 一种线性红外焦平面的图像处理[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(2): 91-93.
Li Yanjin, Wei Jun, Xu Xuerong. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010, 29(2): 91-93.
- [8] 李言谨, 杨建荣, 何力等. 长波红外 2048 元碲镉汞焦平面器件 [J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(2): 90-92.
Li Yanjin, Yang Jianrong, He Li, et al. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(2): 90-92.
- [9] 饭田修一, 大野和郎, 泽田正三, 等. 物理学常用数表[M]. 张质贤, 译. 北京: 科学出版社, 1987.
Sakata Shuichi, Oono Kazuo, Sawada Masami, et al. The common data of physics[M]. Zhang Zhixian, trans. Beijing: Science Press, 1987.

(责任编辑 代丽)