

文章编号: 1001-9014(2008)06-0409-04

碲镉汞红外焦平面器件热失配应力研究

李言谨, 何力, 杨建荣, 丁瑞军, 张勤耀, 胡晓宁, 王建新,
倪云芝, 唐红兰, 曹菊英, 王正官, 吴云, 朱建妹

(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, 提出了两种焦平面器件结构, 可以有效地降低热应力, 并应用于实际器件的制备, 明显提高了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: O472 **文献标识码:** A

STUDY ON THERMAL MISMATCH STRESS OF HgCdTe INFRARED FOCAL PLANE ARRAY

LI Yan-Jin, HE Li, YANG Jian-Rong, DING Rui-Jun, ZHANG Qin-Yao, HU Xiao-Ning,
WANG Jian-Xin, NI Yun-Zhi, TANG Hong-Lan, CAO Ju-Ying, WANG Zheng-Guan,
WU Yun, ZHU Jian-Mei

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

Abstract: Thermal mismatch stress for HgCdTe infrared focal plane array was analyzed by finite elements method. According to the analyzing results, two configurations of infrared focal plane array were proposed to reduce the thermal mismatch stress effectively. The reliability of HgCdTe infrared focal plane array was raised obviously.

Key words: infrared focal plane array; HgCdTe; thermal stress; reliability

引言

碲镉汞(HgCdTe)红外焦平面器件一般采用碲镉汞光伏阵列与硅读出电路(Si)通过倒装焊技术互联,再粘接到宝石片(Al_2O_3 , sapphire)或陶瓷基片上。由于这几种材料热膨胀系数的差异,探测器在较低的温度下工作,通常在 80~90K,就会在材料内部产生应力,随着焦平面规模的增加,这种由于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,严重影响了焦平面器件的可靠性。国外主要几家从事碲镉汞红外焦平面器件的机构都在研究解决这一问题的办法,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制备过程;还有的采用其他技术途径解决这一问题^[3-5],但

是都没给出具体的做法。本文基于现有的焦平面器件工艺,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,提出了两种焦平面器件结构,可以有效地降低热失配应力,这两种结构已分别用于 256×1 和 256×256 中波 HgCdTe 焦平面器件的制备,器件经受高低温循环的可靠性显著提高,取得了良好的应用效果。

1 计算模型

1.1 结构模型

采用二维结构模型,即考虑器件的长度和厚度方向,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。碲镉汞光敏元阵列是通过钢柱倒焊在硅读出电路上,钢柱的高度一般为 $10\mu m$ 左右,其间填充了环氧树脂粘合剂,其他几种材料之间均采用

收稿日期: 2007-10-22, 修回日期: 2008-04-15

基金项目: 国防预研(42201030102)资助项目

作者简介: 李言谨(1960-),男,江苏东台人,研究员,主要从事红外焦平面组件技术研究。

Received date: 2007-10-22, revised date: 2008-04-15



图1 计算热应力的焦平面器件模型

Fig. 1 The finite elements model of focal plane array

用粘合剂粘接,由于粘合剂很薄,弹性模量很小(与一般金属固体相比小两个数量级),计算时未作考虑.碲镉汞是生长在碲锌镉衬底上,由于这两种材料力学性质相近,计算时未作区分.把整个结构作为简支梁处理,见图1,在长度方向可自由伸缩,不影响在厚度方向产生形变. HgCdTe、Si 和宝石片材料的长度分别是 10mm、14mm 和 20mm,厚度均为 0.4mm,这样的尺寸和我们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 300K ~ 80K,为简单起见,假设材料参数不随温度变化.

1.2 参数的获得

计算所需的材料参数主要是热膨胀系数和弹性模量,由于碲镉汞焦平面器件一般在低温下工作,在低温下的材料参数难以获得,一方面参考了文献[6],另一方面通过测量两种薄片材料粘合后在低温下的应变,结合理论模拟就可以基本确定所用材料热膨胀系数相对关系.图2是一定厚度的宝石片与因瓦及宝石片与柯伐粘合后在低温下的应变 δ ,采用台阶仪沿材料径向扫描获得,扫描长度为L.由于因瓦的热膨胀系数比宝石片小得多,所以宝石片和因瓦粘合后在低温下的应变是向下凹进的,而柯伐的热膨胀系数比宝石片大,所以宝石片和柯伐在低温下的应变是向上凸起的.表1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.

2 计算结果与讨论

2.1 HgCdTe/Si/宝石片三层结构的应力分布

HgCdTe/Si/宝石片三层结构是碲镉汞焦平面器

表1 几种材料的热膨胀系数和弹性模量
Table 1 The parameters of some materials

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

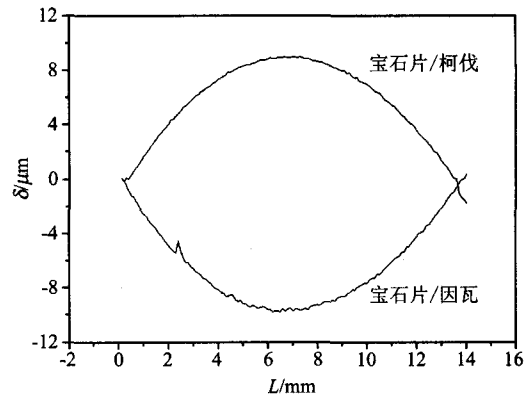


图2 宝石片/柯伐和宝石片/因瓦在低温下的应变

Fig. 2 The strains of sapphire/kovar and sapphire/invar in low temperature

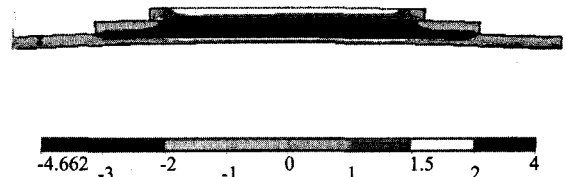


图3 HgCdTe/Si/宝石片三层结构在低温下的沿水平方向的应力分布

Fig. 3 The horizontal stress profile of HgCdTe/Si/ sapphire in low temperature

件的基本结构,碲镉汞光伏阵列通过 In 柱倒焊到 Si 读出电路上,为了便于封装和引出电极,倒焊后的 HgCdTe/Si 芯片再粘接到具有过渡引线的宝石基片上.图3是 HgCdTe/Si/宝石片三层结构在低温下沿水平方向的应力分布,垂直方向的应力和剪切应力比水平方向约小一个量级,所以主要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,注意图中的应变放大了 20 倍.虽然 HgCdTe 的热膨胀系数大于 Si,由于宝石片的热膨胀系数和 HgCdTe 接近,弹性模量大于 Si 和 HgCdTe,在低温下,使得整个结构产生了中间向上的应变, HgCdTe 中全部受到张应力,下表面是光敏元所在的区域,其应力最大值为 $1.32 \text{ dyn}/\mu\text{m}^2$,在这三种材料中, HgCdTe 强度最低,极易受到损伤,实验结果表明,这样的结构往往经过一次或多次高低温循环后, HgCdTe 就发生裂片现象.

2.2 降低 HgCdTe 应力的结构

从上面的分析可知, HgCdTe/Si/宝石片三层结构, HgCdTe 受到比较大的张应力,并产生中间凸起的形变,如果能够找到一种材料,其热膨胀系数比宝石片低,把它粘接在宝石片下面,在低温下,这两种

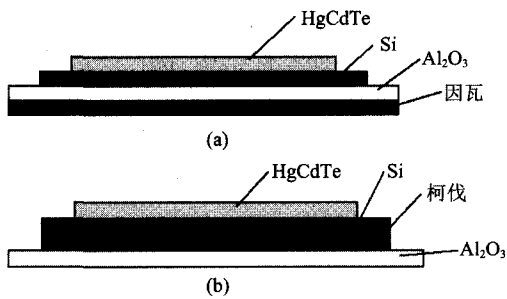


图4 降低 HgCdTe 应力的两种结构 (a) 结构 1 (b) 结构 2
Fig. 4 Two configurations to reduce the thermal mismatch stress (a) configuration 1 (b) configuration 2

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,这样就可以抵消部分张应力,达到提高可靠性的作用. 因瓦材料是一种选择,它的热膨胀系数很低,见表 1,并且导热率较高,也易于加工. 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,在低温下,这两种材料的结合同样会产生中间凹进的作用,降低 HgCdTe 的应力,柯伐材料是一种选择. 图 4 分别是这两种结构的示意图.

计算了这两种结构的应力分布,重点考察了 HgCdTe 下表面的应力状态和因瓦及柯伐厚度的关系,因为下表面正是光敏元所在的位置. 图 5 是 HgCdTe 下表面的应力 S 和因瓦及柯伐厚度 T 的关系. 对于结构 1, 当因瓦的厚度增加时, HgCdTe 受到的张应力减小, 因瓦厚度约为 $600\mu\text{m}$ 时, 张应力达到最小值, 然后随着厚度增加, 张应力继续增加. 对于结构 2, 当柯伐厚度增加到近 $600\mu\text{m}$ 时, 张应力减小至零, 并随着厚度增加转变为压应力. 计算结果说明, 选择合适的因瓦或柯伐的厚度, 采用结构 1 或结构 2, 就可以降低 HgCdTe 的应力, 从而提高焦平面器件的可靠性. 作为对比, 用柯伐材料取代结构 1 中的因瓦, 计算了碲镉汞应力和柯伐厚度的关系, 在某个厚度下, 应力达到极大值, 厚度增加时, 应力逐步减小, 当厚度较大时, 应力可以比对应同样因瓦厚度时还要小.

3 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^[7-8], 其中结构 1 用于 256×1 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 $46\mu\text{m}$, 线列长度近 12mm , 试验表明采用这种结构的器件可以承受大于 1000 次的高低温度循环. 目前, 该器件已经在某试验遥感卫星上应

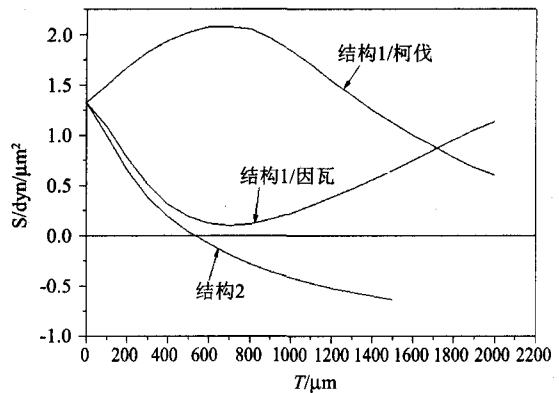


图5 HgCdTe 应力与因瓦及柯伐厚度的关系
Fig. 5 The relationship between HgCdTe stress and thickness of invar or kovar

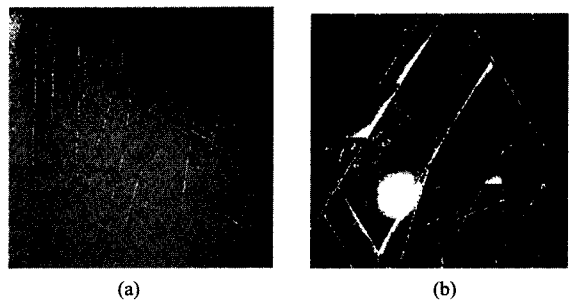


图6 256×256 焦平面器件失效图像 (a) 右上角互联钢柱脱开 (b) HgCdTe 开裂
Fig. 6 The invalid images of 256×256 focal plane (a) the right-up invalid (b) the destroyed HgCdTe

用, 在轨运行了两年多, 得到了大量清晰的地面遥感图片.

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 $40\mu\text{m}$, 器件 HgCdTe 的尺度约为 $11 \times 11\text{mm}$. 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 光敏元列阵损坏的现象, 图 6 是常见的 256×256 焦平面问题现象, 图 6(a) 的右上角表现为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, 出现图 6(b) 所示的 HgCdTe 开裂的现象. 采用结构 2 后, 情形有了很大的改观, 上述的失效现象没有再出现, 256×256 中波焦平面器件已在某红外望远系统中试用, 见图 7. 图 7(a) 是 256×256 中波焦平面器件在实验室内对人的成像, 图 7(b) 是望远系统捕获的战机训练时的图像.

用较厚的柯伐取代结构 1 中的因瓦, 也可以降低碲镉汞中的应力, 这样的结构可以用于长线列焦平面. 长线列焦平面器件通常是由多个焦平面模块

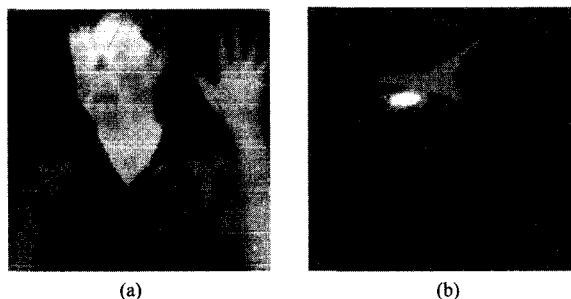


图7 256×256 焦平面器件试用图像(a)实验室成像(b)望远系统的成像

Fig.7 The images of 256×256 focal plane(a) in the lab. (b) outside by the telescope system

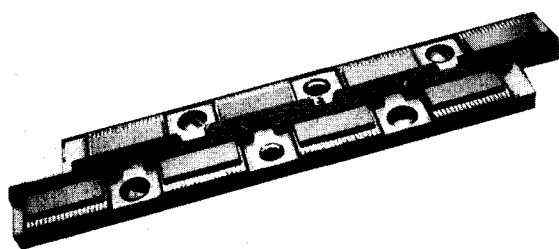


图8 2048×1 元长线列碲镉汞焦平面

Fig.8 2048×1 long linear focal plane

拼接构成,整个器件尺度很大,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列焦平面的拼接衬底,既降低了碲镉汞所受的应力,又可以保证整个器件不易于发生形变.该结构已经用于中长波 2048 元长线列碲镉汞焦平面的制备,也取得了成功并应用于型号项目,图8是2048 长线列焦平面照片.由于柯伐材料的易加工性,两端设计成阶梯状,这样就可以首尾相接构成更长长线列焦平面器件.

4 结语

解决大规模碲镉汞红外焦平面器件的热失配应力是器件设计及制备过程中一项重要的工作,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,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,取得了很好的效果,显著提高了 HgCdTe 焦平面器件抵抗高低温循环的能力.

致谢 感谢上海技术物理研究所裴云天、潘明和赖雪峰等人为实现 256×256 中波焦平面器件在望远系统中成像所做的工作.大量的系统工作克服了初期探测器的许多缺陷,成功地捕获了战机演练时的动感图像.

REFERENCES

- [1] Jean-Luc Tissot, Francois Marion. Collective flip-chip technology for hybrid focal plane arrays[J]. *SPIE*, 2000, **4310**: 581—586.
- [2] Dhar N K, Chen Y, Brill G, *et al.* Composite substrate for large-format HgCdTe IRFPA[J]. *SPIE*, 2003, **5074**:157—165.
- [3] Tribolet P, Costa P, Fillon P, *et al.* Large staring arrays at Sofradir[J], *SPIE*, 2003, **4820**:46—56.
- [4] Pierre Castelein, Francois Marion, Jean-Luc Martin, *et al.* A megapixel HgCdTe MWIR focal plane array with 15 μ m pitch[J]. *SPIE*, 2003, **5074**:52—59.
- [5] Love Peter J, Hoffman Alan W, Gulbransen David J, *et al.* Large-format 0.85~2.5 micron HgCdTe detector arrays for low-background applications[J]. *SPIE*, 2004, **5167**:134—142.
- [6] 饭田修一等合编,张质贤等译.物理学常用数表[M].北京:科学出版社,1987.
- [7] WANG Chen-Fei, LI Yan-Jin. I-V Characteristics of hgcdte photodiode under background illumination of high temperature[J]. *J. Infrared Millim. Wave* (王晨飞,李言谨. HgCdTe 光伏探测器在高温背景辐射下的 I-V 特性分析. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4):257—260.
- [8] QUAN Zhi-Jue, YE Zhen-Hua, HU Wei-Da, *et al.* Study on structural optimization of decreasing the crosstalk of planar HgCdTe focal plane arrays[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (全知觉,叶振华,胡伟达,等.降低平面结型碲镉汞焦平面阵列光串音的结构优化研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5):329—332.