

碲镉汞线列红外探测器模块温度循环的可靠性

陈星^{1,2}, 何凯^{1,2}, 王建新¹, 叶振华¹, 林春¹, 张勤耀¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 材料与器件研究中心, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:针对直接倒焊(I型)、间接倒焊(II型)两种红外探测器模块,两者中的探测器芯片、硅读出电路和引线基板的尺寸完全相同,只在倒焊封装结构上有所差异,用有限元方法分析比较了这两种封装形式的基本模块于液氮温度时的热应力和形变大小情况,分析结果与实验现象符合较好,模块低温形变值的测量验证了有限元分析结果的合理性.

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:TN215 **文献标识码:**A

Thermal cycling reliability of linear HgCdTe infrared detectors

CHEN Xing^{1,2}, HE Kai^{1,2}, WANG Jian-Xin¹, YE Zhen-Hua¹, LIN-Chun¹, ZHANG Qin-Yao¹

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: For type I and type II linear HgCdTe detector modules, the size of detector chip, Si-ROIC and sapphire electrical lead board in type I module are exactly same as those in type II module, while the hybrid architecture is different. The thermal stress distribution and warpage of these two modules at cryogenic temperature were analyzed by using finite element method(FEM). The FEM results are in good agreement with experimental phenomenon, and measurements of modules' warpage at cryogenic temperature verify the rationality of simulated results.

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

PACS: 85.60.Gz

引言

红外焦平面探测器广泛地应用于天文观察、空间遥感、夜视、导弹制导和工业监控,以及医疗卫生等领域.随着社会需求的不断扩大,红外焦平面探测器无论是规模、尺寸、还是性能都有非常明显地发展和提高,同时也带来了诸多挑战^[1-5].

长线列、大面阵的碲镉汞(HgCdTe)红外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,达到既有红外信号获取、又具有信号处理功能的目的,提高集成度.根据碲镉汞探测器芯片、硅读出电路和引线基板三者之间倒焊位置分布的不同,红外探测器模块可分为直接倒焊、间接倒焊两种结构形式.对于面阵红外焦平面探测器,由于其二维方向像元数均较多,一般采用

直接倒焊的结构形式,探测器芯片通过钢柱直接倒扣在硅读出电路上实现信号的输出输入,具有引线短、封装密度高和寄生电容小的特点;线列红外探测器只在一维方向上像元分布较多,光敏元信号引出相对简单灵活,综合考虑倒焊难度、读出电路设计以及可靠性等其它方面的因素时,线列红外探测器不仅可以采用直接倒焊的结构形式,如法国 Sofradir 公司的长波 288×4、长波 480×6 线列探测器^[5],同时也可以采用间接倒焊的结构方式, Sofradir 公司的长波 940×4、中长波 1500×2^[6]以及德国 AIM 公司的长波 480×6^[7]红外探测器模块则是将多个探测器芯片和读出电路倒焊在同一引线基板上的间接倒焊的方式实现的.由于材料热膨胀系数、弹性模量的差异,当探测器模块上的温度由室温降至 80 K 的低温工作温度时,材料之间的热失配必然导致在整个

模块上产生一定的热应力和低温形变,碲镉汞(HgCdTe)红外探测器的温度循环可靠性因此受到不同程度的影响.本文结合直接倒焊(I型)、间接倒焊(II型)两种结构形式的红外探测器模块,利用有限元方法分析比较了两种结构于80 K低温条件下的热应力大小和低温形变情况,并与实际测量结果进行了比较,分析结果有效地解释了两模块在低温环境下出现的可靠性问题.

1 有限元模型的建立

1.1 探测器模块结构模型

图1(a)和(b)分别为线列直接倒焊(I型)、间接倒焊(II型)探测器模块三维示意图,两种结构形式中的探测器芯片、硅读出电路和宝石引线基板尺寸分别相同,其中探测器芯尺寸为17 mm×1 mm×0.4 mm,硅读出电路尺寸为18 mm×6 mm×0.5 mm,宝石基板尺寸为19 mm×9 mm×0.4 mm.图1(a)所示的直接倒焊(I型)探测器模块,探测器芯片与硅读出电路首先倒焊互连,然后利用环氧胶粘接到宝石基板上而形成;在图1(b)所示的间接倒焊(II型)模块中,探测器芯片与硅读出电路分别倒焊在同一宝石基板上,两者之间信号传输由沉积在基板上的金属引线实现.宝石基板为整个模块提供机械支撑和电学输出端的作用.

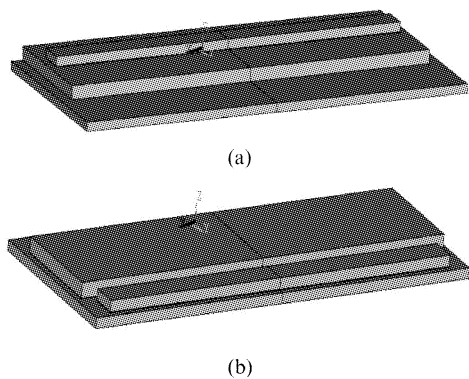


图1 模块结构示意图(a)直接倒焊(I型), (b)间接倒焊(II型)

Fig. 1 Schematic diagram of (a) type I direct hybridization module, and (b) type II indirect hybridization module

1.2 材料属性及参数的选取

在模块结构的热应力分析过程中,材料的热膨胀系数、弹性模量等参数最为关键,正确的材料性能参数有利于更加真实地反映结构的热失配情况.关于常温下材料的热学、力学性能的研究已非常普遍,

相关的测量标准和具体的性能参数也是十分详尽和成熟,但由于碲镉汞红外焦平面探测器一般工作在80 K左右的低温环境下,涉及此温度区域的材料参数相对较少.为了获得相对准确的参数值,设计了一种叠状的双层结构,其中一层材料的平均热膨胀系数、平均弹性模量等参数为已知标准材料,另一层为未知的待测材料,通过测量这个双层结构于液氮温度时热失配产生的低温挠度形变值,结合挠度形变的理论公式,计算出未知材料的平均线膨胀系数、平均弹性模量等值.图2为GaAs衬底材料、Al₂O₃宝石基板两层结构于80 K低温时,实际测量的低温形变曲线,并进行了多次低温测量,由图2可知测量结果具有较好的可重复性,测量曲线经过拟合后中心处最大形变值为-17 μm.由此方法和部分参考文献获得的材料参数如表1所示,其中材料平均弹性模量、平均线膨胀系数均由实验测得,泊松比来源于文献[7]~[13].

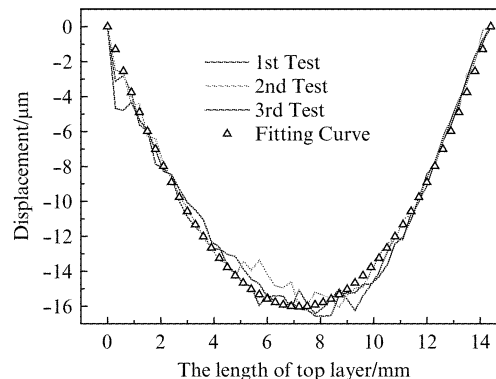


图2 Al₂O₃ 基板/GaAs 衬底材料两层结构低温形变

Fig. 2 Warpage of Al₂O₃ lead board / GaAs substrate bi-layer structure

表1 材料参数

Table 1 Material properties

材料	平均弹性模量/Gpa	平均线膨胀系数/(ppm/K)	泊松比
砷化镓	85	4.07	0.31
碲镉汞	60	5	0.3
钢	0.12	30	0.45
环氧树脂	38	62.6	0.3
硅	130	1.2	0.28
宝石基板	390	4	0.25

1.3 有限元模型网格与边界条件

根据I型、II型模块在X长度方向上对称性,分别取其1/2模型进行计算,即图1(a)、(b)模型中X方向上的1/2,互连钢柱区用一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^[8]. 1/2 模型的网格划分如图 3 (a)、(b) 所示, 探测器芯片上 HgCdTe 外延层为光敏元所在区域, 分析时需重点关注此区域热应力分布大小, 但由于其厚度约为 10 μm , 与外延衬底、读出电路厚度相差较大, 因此该区域上下部分采用梯度网格细化划分. 在计算边界条件上, 由于采用的是 1/2 对称模型, 模块对称面上施加对称边界条件; 在实际测试过程中, 模块 X、Y 方向上自由, 模块底面与冷平台接触, 当模块由于热失配产生形变时, 模块底面中心区域在 Z 向可产生一定位移, 而底面四边边界起支撑作用, 始终与冷平台接触, 在 Z 向上不发生位移, 因此模型中宝石基板底部左端边线上节点位移自由度 UZ 约束为 0; 热加载时整个模块上的温度由室温 300 K 均匀地降至 80 K 的低温工作温度.

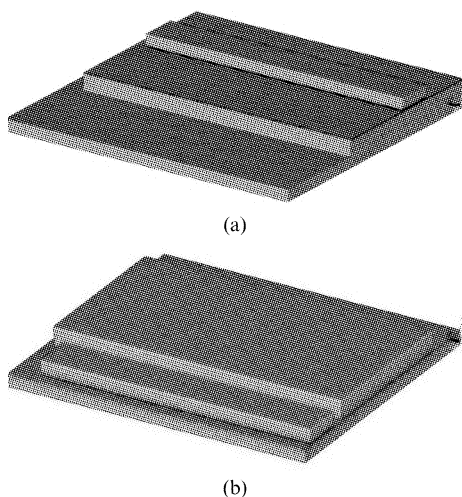


图 3 模块模型网格 (1/2 模型), (a) I 型, (b) II 型
Fig. 3 Finite element mesh of half type for (a) type I module, and (b) type II module

2 计算结果与讨论

2.1 模块低温热失配现象

在不同材料组成的层状结构中, 由于材料热膨胀系数的差异, 当结构上的温度变化或存在温度梯度时, 材料的热膨胀或收缩程度各不相同, 不同层之间相互制约, 整个结构将会产生一个由中间向上凸起或由中间向下凹进的挠度形变, 随着结构上温度变化、热膨胀系数差异增大, 热失配程度加剧, 形变程度会更加明显. 图 4(a)、(b) 分别为线列 I 型、II 型模块结构于 80 K 低温时挠度形变图, 由于引线基板、硅读出电路以及探测器芯片间热膨胀系数不同, 两种类型模块均产生了由中间向上凸起的低温形

变. 这主要是因为探测器芯片在结构上相对狭长, 较引线基板、硅读出电路尺寸要小很多, 系统低温形变主要由引线基板、硅读出电路两者决定, Al_2O_3 引线基板热膨胀系数比硅读出电路要大, 当模块上温度由室温 300 K 降至 80 K 时, 热收缩程度相对硅电路剧烈, 因此两者组成的系统出现了由中间向上凸起的形变. 探测器芯片受制于以基板、硅电路为主导的模块系统的形变状况, 也产生了向上凸起的形变, 只是依在两模块上倒焊位置的不同, 相应形变量大小有所差异.

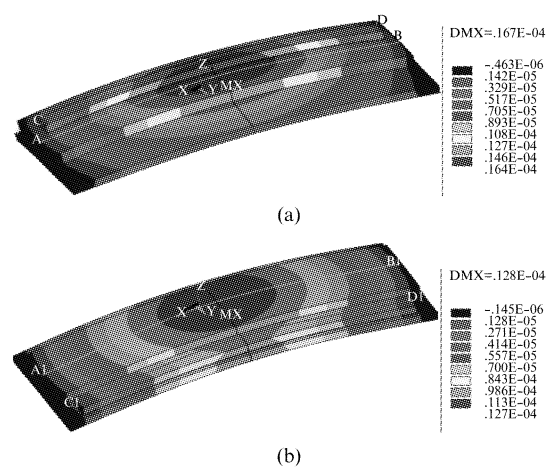


图 4 模块低温形变 (a) I 型, (b) II 型
Fig. 4 Deformation in cryogenic temperature (a) type I module, and (b) type II module

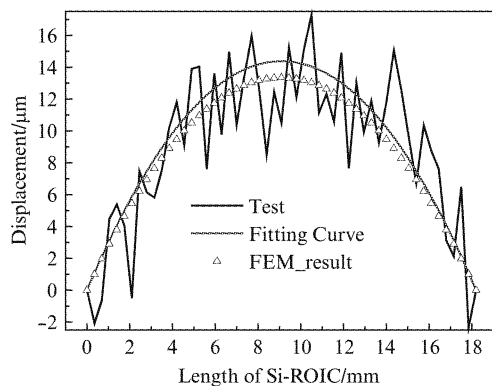
2.2 低温条件下形变测量

由于深低温工作环境的限制, 红外探测器低温热失配应力应变的精确测量往往存在较大困难, 设计了一种专用的测试装置, 能够在液氮温度下对红外探测器低温热失配形变进行稳定可靠的测试. 针对上述 I 型、II 型两种封装结构的模块, 分别测量了在 80 K 低温环境下, 模块中硅读出电路、探测芯片顶表面横向中心线处形变曲线, 具体测试位置如图 4(a)、(b), 即 I 型模块中 AB 点、CD 点、II 型模块中 A1B1 点和 C1D1 点之间连线位置上. 样品模块封装在专用测试杜瓦中, 模块实际温度由粘贴在硅读出电路上表面端角处的测温铂电阻进行监控. 图 5 (a)、(b)、(c)、(d) 分别为 I 型模块中硅电路顶表面上 A、B 点中心线、探测芯片上 C、D 点所连中心线处和 II 型模块中硅电路顶表面上 A1、B1 点、探测芯片 C1、D1 点所连中心线处实际所测形变曲线与从有限元模型中相应位置提取的形变数据对比情况. 由于样品表面平整度不一, 测试系统随机误差的影响, 测量值在表面形变轮廓曲线附近随机分布, 因此

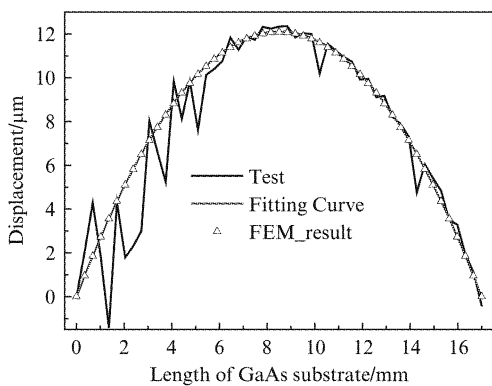
对测试点进行曲线拟合,以便与有限元模拟结果比较.在实验和数据处理过程中发现当样品表面平整性好、粗糙程度低时,各点测量值分布均匀、离散性小,相应的曲线拟合效果更加理想.从图 5 (a) ~ (d)可知,直接倒焊(I型)、间接倒焊(II型)模块上相应硅电路表面上中心线位置处实测最大形变值分别为 $14.4\ \mu\text{m}$ 、 $10.9\ \mu\text{m}$,有限元值分别为 $13.3\ \mu\text{m}$ 、 $11.6\ \mu\text{m}$;探测器芯片表面中心位置处实测最大形变值分别为 $12.1\ \mu\text{m}$ 、 $8.4\ \mu\text{m}$,有限元值分别为 $12\ \mu\text{m}$ 、 $9.4\ \mu\text{m}$,可知关于两模块的低温形变有限元分析结果与实际测量数据相当接近. II型模块上探测器芯片由中间向上凸起的形变量要比 I型模块上的约小 $3.7\ \mu\text{m}$.这是由于 II型模块中的探测器芯片位于引线基板上,位置相对引线基板、硅电路组成的两层结构距离较远,受影响程度小.

2.3 模块低温热失配应力

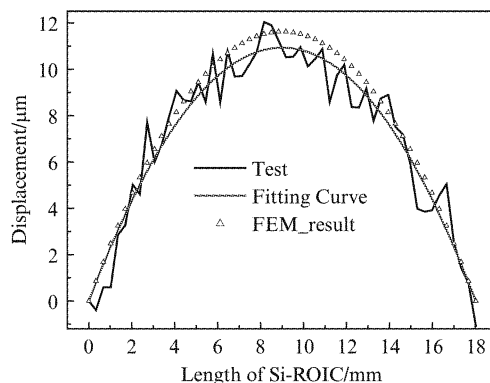
I型、II型模块中的探测器芯片主要包括 GaAs 衬底、厚约 $10\ \mu\text{m}$ 的 HgCdTe 外延薄膜两种材料层,如图 6 所示. HgCdTe 外延层为光敏元所在区域,当其上存在较大热应力时,探测器性能受影响严重,且由于衬底材料机械强度低,芯片很容易断裂,极有可能导致整个探测器损坏失效,因此探测器芯片上的热应力水平是重点关注和比较的对象.



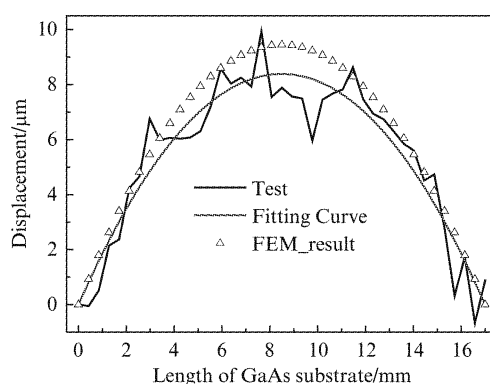
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5 各中心线处形变曲线(a) I型模块硅电路表面 A、B 点连线,(b) I型模块探测器芯片顶表面 C、D 点连线,(c) II型模块硅电路表面 A1、B1 点连线,(d) II型模块探测器芯片顶表面 C1、D1 点连线
Fig. 5 Warpage along centerline in (a) the Si-ROIC's topside AB of type I module, (b) the detector chip's topside CD of type I module, (c) the Si-ROIC's topside A1B1 of type II module, and (d) the detector chip's topside C1D1 of type II module

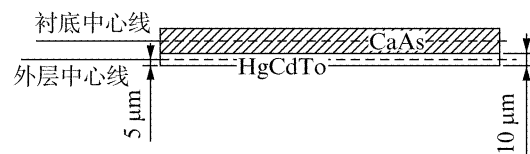


图 6 探测器芯片剖面结构示意图
Fig. 6 Cross section of detector chip

图 7(a)、(b)分别为两模块上探测器芯片外延层、衬底中热应力大小比较情况,外延层和衬底中热应力分别取自于厚度方向上外延层 $5\ \mu\text{m}$ 处,衬底中心线处的热应力值,具体位置如图 6 所示; I型、II型线列模块探测器芯片横向尺寸大, X 向热应力比 Y、Z 向高出一个数量级,因此主要比较 X 向热应力大小.由图 7(a)、(b)可看出,两模块中的探测器芯片均主要受张应力作用,在探测器芯片边界处存在应力集中现象. II型模块中的探测器芯片无论是

外延层、还是衬底中热应力水平都要比 I 型模块中的低,外延层、衬底中的最大热应力分别比 I 型模块中的低 59% 和 32.8%。II 型模块中的 GaAs 衬底探测器芯片倒焊在热膨胀系数与之相近的 Al_2O_3 宝石引线基板上,两者之间的热失配程度较 I 型模块中探测器芯片与硅读出电路间热失配要小得多,因此导致的探测器芯片中热应力水平均相应较低。在实际测试和应用中 II 型模块往往具有更高的温度循环可靠性和更稳定的光电性能, I 型模块经过数次的低温测试后就会出现如图 8 所示的芯片断裂现象。两模块上的相对热应力水平计算结果与实验现象符合较好。

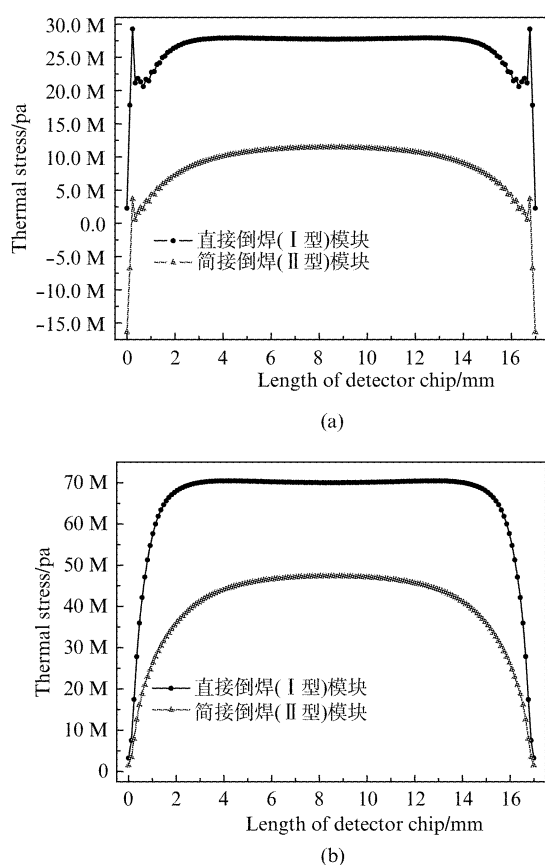


图 7 I 型、II 型模块热应力大小分布比较 (a) 外延层中心线处, (b) 模块衬底中心线处

Fig. 7 Comparison of thermal stress between type I and type II module (a) the centerline of epilayer, and (b) the centerline of substrate

3 结论

针对两种各部分结构尺寸相同,倒焊封装形式不同的 I 型、II 型碲镉汞线列探测器模块,用有限元方法分析比较了这两者在 80 K 低温环境条件下的形变程度和热应力情况。在模块的低温形变方面,有

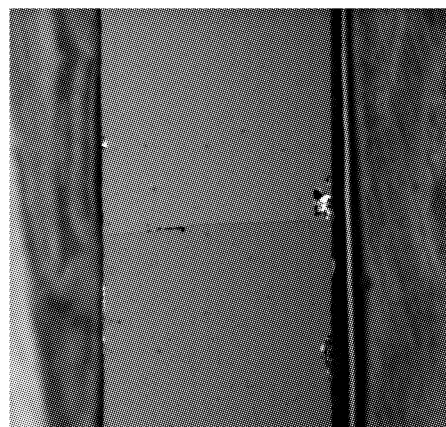


图 8 I 型模块探测器芯片断裂现象
Fig. 8 Crack in detector chip of type I module

有限元分析结果与实验测量值一致, I 型模块和 II 型模块均产生了由中间向上凸起的低温形变, I 型模块上的低温形变程度相对较大;在模块热应力大小方面,间接倒焊的 II 型模块中的热应力水平比 I 型直接倒焊模块中的要低得多,有限元分析结果合理地解释了 I 型模块容易断裂失效、II 型模块具有更好性能和更高可靠性的原因, I 型模块需要对引线基板、硅读出电路和探测器芯片等主要部分的结构尺寸进行优化、封装形式上进行调整才能达到实际生产应用的目的。

References

- [1] Chorier P, Delannoy A. Sofradir latest developments for infrared space detectors [J]. *SPIE*, 2011, **8012**: 801202.
- [2] Chorier P, Tribolet P, Fillon P. Application needs and trade-offs for short wave InfraRed detectors [J]. *SPIE*, 2003, **5074**: 363-373.
- [3] Maurer T, Wilson D L, Smith S R. Search and detection comparing midwave and longwave infrared [J]. *SPIE*, 2009, **48**(11): 116401.
- [4] Breniere X, Manissadjian A, Vuillemeret M. Reliability optimization for IR detectors with compact cryo-coolers [J]. *SPIE*, 2005, **5783**: 21.
- [5] Tribolet P, Chatard J P, Costa P. MCT technology challenge for mass production [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, **30**: 574-584.
- [6] Chatard J P, Vuillemeret M. Space observation at Sofradir [R]. RTO SET Symposium, 2000.
- [7] Ziegler J, Finck M, Kruger R. Long linear HgCdTe arrays with superior temperature-cycling-reliability [J]. *SPIE*, **4028**: 380-389.
- [8] ZHANG Li-Juan, RAO Qiu-Hua, HE Yue-Hui, et al. Research advance on thermal stress of functionally gradient materials [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy* (张丽娟, 饶秋华, 贺跃辉, 等. 梯度功能材料热应力的研究进展. *粉末冶金材料科学与工程*), 2005, **10**(5): 260.
- [9] HU Xiao-Ning, ZHANG Hai-Yan, LI Yan-Jin, et al. Ther-

- mal stress analysis of HgCdTe focal plane arrays on Si substrates [J]. *Laser and Infrared*(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. *激光与红外*), 2006, **11**(36), 1020 - 1022.
- [10] LI Yan-Jin, HE-Li, YANG Jian-Rong, *et al.* Study on thermal mismatch stress of HgCdTe infrared focal plane array [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(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. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(6): 410 - 412.
- [11] GONG Hai-Mei, ZHANG Ya-Ni, ZHU San-Gen, *et al.* Study of reliable packaging for IRFPA detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(龚海梅,张亚妮,朱三根,等. 红外焦平面可靠性封装技术. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(2): 85 - 89.
- [12] WU Li-Gang, LIU Da-Fu, ZHU San-Gen, *et al.* Failure and finite element analysis of indium solder-bumps for HgCdTe detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(吴礼刚,刘大福,朱三根,等. HgCdTe 探测器 In 焊凸点的失效及有限元分析. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(3): 194 - 197.
- [13] FAN Guang-Yu, GONG Hai-Mei, LI Yan-Jin, *et al.* Temperature-cycling-reliability of IRFPA device [J]. *Infrared and Laser Engineering*(范广宇,龚海梅,李言谨,等. 红外焦平面器件温度循环可靠性研究. *红外与激光工程*), 2010, **39**(4): 608 - 610.