

128×128 InSb 探测器结构模型研究*

孟庆端^{1)†} 张晓玲¹⁾ 张立文¹⁾ 吕衍秋²⁾

1)(河南科技大学电子信息工程学院, 洛阳 471003)

2)(中国空空导弹研究院, 洛阳 471009)

(2012年3月2日收到; 2012年3月31日收到修改稿)

热冲击下红外焦平面探测器的高碎裂概率制约着其成品率. 为明晰碎裂机理, 基于等效设想, 利用小面阵等效大面阵解决了 128×128 面阵探测器三维结构建模所需单元数过多的问题, 同时综合考虑材料线膨胀系数的温度依赖性、材料强度的各向异性、表面加工损伤效应, 合理选取 InSb 材料性能参数, 建立起 128×128 面阵探测器结构有限元分析模型. 模拟结果表明: 热冲击下最大 Von Mises 应力值出现在 N 电极区域, 其极值呈非连续分布, 这意味着热冲击下 128×128 面阵探测器的裂纹起源于 N 电极区域, 且不止一条. 上述结论与碎裂统计分析报告中典型裂纹起源地及裂纹分布这两方面相符合, 这为后续面阵探测器碎裂诱因的研究及结构可靠性设计提供了切实可行的研究思路.

关键词: 焦平面, 铟化镉, 结构应力

PACS: 07.57.Kp, 62.20.mm, 46.50.+a

1 引言

红外面阵探测器具有灵敏度高、环境适应性好、抗干扰能力强、重量轻、功耗低等优点, 被广泛应用于航空航天红外遥感、国防、气象、环境、医学和科学仪器等领域^[1]. 在单色探测领域, 铟化镉 (InSb) 面阵探测器在生产成本、像元均匀性、一致性方面具有明显优势, 且目前最大阵列规模 (4000×4000) 的红外面阵探测器由美国 Raytheon 公司于 2009 年发布, 但极低的成品率使得 InSb 面阵探测器的价格居高不下, 仅在高级军用装备领域得到了运用, 如弹道导弹防御系统^[2]、红外成像制导导弹系统^[3] 和军用遥感卫星系统^[4] 等. 造成这一局面的根本原因源于 InSb 面阵探测器的特定结构和低温工作环境. InSb 面阵探测器通常借助倒装焊技术把 InSb 光敏元芯片和硅读出电路 (silicon readout integrated circuit, Si-ROIC) 通过铟柱阵列互连混成, 之后在光敏元芯片和 Si-ROIC 的间隙中填入底充胶材料以提高铟柱焊点的可靠

性. 为抑制背景噪声、提高信噪比, 高灵敏度的面阵探测器通常工作于液氮温度. 在快速降温过程中, 相邻材料间线膨胀系数的不同, 将在面阵探测器中引入热应力/应变, 引起 InSb 光敏元芯片碎裂, 制约着 InSb 面阵探测器的适用性, 成为批量生产中急需解决的问题.

在 InSb 面阵探测器的研制过程中, 曾零星出现过有关 InSb 芯片碎裂的示例^[5], 但未见有关大面阵红外探测器结构建模及碎裂分析方面的研究. 这或许源于两方面的困难, 一是红外面阵探测器的结构复杂、典型尺寸涵盖微米到厘米量级, 跨尺度效应明显, 因此三维结构建模时所需单元数巨大, 难以求解; 二是 InSb 光敏元芯片 (典型厚度为 10 μm) 的材料参数受前表面结构缺陷、背面减薄工艺损伤及材料各向异性的影响, 其力学性能参数难以测定或获取.

针对上述问题, 在本文中, 基于等效设想, 用小面阵等效大面阵建立 InSb 面阵探测器的结构有限元分析模型, 试图解决面阵探测器三维建模所需单元数过多的问题; 同时考虑 InSb 光敏元芯片的表

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61107083) 和航空科学基金 (批准号: 20100142003) 资助的课题.

† E-mail: qdmengly@163.com

面损伤效应, 采用弱化光敏元芯片法线方向结构强度的方式设定芯片力学性能参数. 采用瞬态分析方法, 模拟热冲击下芯片中累积的热应力值及分布, 并分析典型 InSb 芯片碎裂模式及碎裂起源.

2 模型建立和参数选择

2.1 模型建立理论

2004 年 Jiang 发表了热冲击下单个钢柱承受的热失配位移公式^[6]

$$\Delta y = L(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T, \quad (1)$$

式中, Δy 为热膨胀失配位移, L 为面阵探测器中钢柱焊点距对称中心轴的距离, α_1 和 α_2 分别为面阵探测器中光敏元和硅读出电路的热膨胀系数, ΔT 为降温范围. 在热冲击降温范围确定的前提下, 热膨胀失配位移正比于焊点距面阵中心轴的距离和相邻材料热膨胀系数之差的乘积. 对大面阵探测器来说, 光敏元数目增加, 焊点数目随之增加, 由于光敏元(或焊点)呈现出周期性二维排布, 这样整个器件的热失配即为所有焊点热失配的叠加. 为了取得同样的效果, 也可采用增加相邻材料热膨胀系数之差的办法, 即用一个钢柱等效几个钢柱累积热失配的方式, 实现小面阵等效大面阵建立起大面阵探测器结构有限元分析模型, 使得在上述两种情况下, 整个器件的热失配保持不变. 根据上述设想, 为研究 128×128 InSb 探测器在热冲击下的应力值及分布, 这里人为调整相邻材料间热失配的方式, 利用 32×32 小面阵等效 128×128 大面阵进行结构应力分析, 这种建模设想有助于解决大面阵探测器结构中单元数过多带来的计算难题.

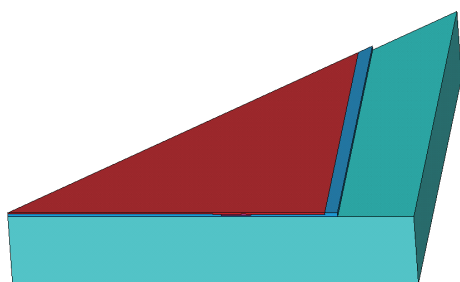


图 1 焦平面器件三维结构有限元模型

在建立 128×128 InSb 面阵探测器的结构有限元分析模型时, 假设钢柱阵列为八角形棱柱, 整个器件处于无缺陷的理想状态. 所建模型中 InSb

面阵探测器简化成具有铟化铟芯片、钢柱和底充胶相间分布、N 电极及硅读出电路的三层结构, 其典型尺寸取: 铟化铟芯片 ($10 \mu\text{m}$)、钢柱 ($20 \mu\text{m}$)、底充胶 ($20 \mu\text{m}$)、N 电极 ($4 \mu\text{m}$) 及硅读出电路 ($300 \mu\text{m}$), 结构布局如图 1 所示. 这里建模软件采用商用 ANSYS 结构有限元分析软件, 其中钢柱采用 VISCO107 单元 (3 维 8 节点黏塑性实体单元), 其余部分选用 SOLID95 单元 (3 维 20 节点线弹性实体单元), 鉴于整体模型的对称性, 选取 1/8 结构进行建模, 通过对称的边界条件实现全阵列的应力分析. 网格划分时, 采用自由网格划分方法, 并对局部进行加密处理, 三维模型见图 1 所示.

2.2 材料参数选取

材料的线膨胀系数随温度呈现出强烈的依赖性, 通常随温度降低而减小, 为准确反映热冲击下 InSb 面阵探测器不同材料中累积的热应力, 在本文中, 探测器结构模型所用材料的线膨胀系数均采用温度相关模型, 其中硅读出电路和 N 电极材料视为各向同性线弹性材料, InSb 芯片的视为各向异性线弹性材料, 钢柱为黏塑性材料, 其杨氏模量随温度降低而增加, 底充胶材料在玻璃化转变区域视为黏弹性材料, 固化后呈现出明显的线弹性, 具体数值如图 2, 图 3 和表 1 所示^[7-10].

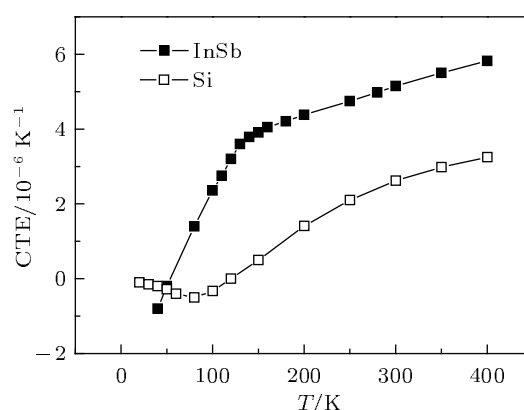


图 2 InSb 和 Si ROIC 线膨胀系数随温度的变化曲线

InSb 晶格是典型的闪锌矿结构, 其立方晶系的结构特点使其在某些方向弹性模量大, 别的方向弹性模量小. 在 300 K 温度下, 不同方向的弹性常数分别为 $C_{11} = 667000 \text{ MPa}$, $C_{22} = 365000 \text{ MPa}$, $C_{44} = 302000 \text{ MPa}$, 其杨氏模量、剪切模量和泊松比可通过下式计算得到

$$E = \frac{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})}{(C_{11} + C_{12})}, \quad (2)$$

$$G = C_{44}, \quad (3)$$

$$\nu = \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}}. \quad (4)$$

尽管用这种方法得到的工程上常用的杨氏模量在 X, Y, Z 方向上是相同的, 但在设定的全局坐标下, 这里设定 X, Y, Z 分别沿着 $[100], [010]$ 和 $[001]$ 方向, 在 InSb 芯片的面内 (X - Y 平面), 其杨氏模量在沿 45° 角达到最大值, 在 X 和 Y 轴最小, 在面外方向 (Z 方向), 其杨氏模量在 X 和 Y 轴方向与面内相等, 与角度无关. 需要指出的是面外方向的杨氏模量比面内沿 X - Y 平面 45° 方向的杨氏模量小得多. 基于上述理论, 考虑到 InSb 芯片在加工过程中受前表面结构缺陷、背面减薄工艺损伤的影响, 预期其面外 (Z 方向) 杨氏模量应远小于面内 (X - Y 平面) 的杨氏模量^[11]. 因此在 InSb 材料的参数选取中, 认为其力学性能参数呈现出正交各向异性, 即在 X 和 Y 方向相等, 在 Z 方向比 X 和 Y 方向小一个数量级.

表 1 线弹性材料参数

材料名称	杨氏模量 E/GPa	波松比 μ	温度 T/K
Si 读出电路	163	0.28	77—300
InSb 芯片	409	0.35	77—300
In 柱	20.54	0.4326	76
	16.24	0.4408	187
	12.70	0.4498	300
底充胶	$0.0002/\alpha$	0.30	77—300
N 电极	79	0.44	77—300

表 1 中 α 为底充胶的线膨胀系数, 在 77—

300 K 的温度范围内, 可用下式给出:

$$\alpha = 22.46 \times 10^{-6} + 5.04 \times 10^{-8} \times (T - 273), \quad (5)$$

T 的单位为 K.

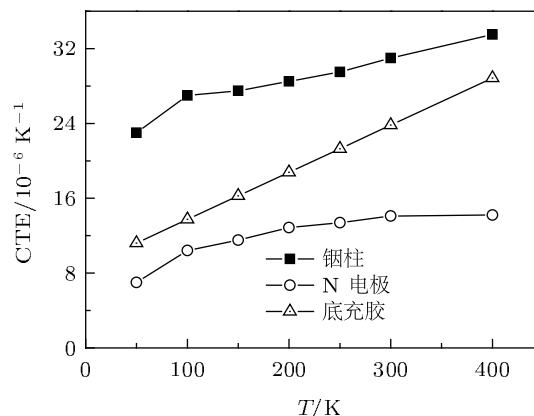


图 3 钢柱、底充胶和 N 电极线膨胀系数随温度的变化曲线

2.3 载荷施加

载荷施加包括约束载荷以及激励载荷的施加. 约束载荷: 对称面处施加对称约束, 对称轴的最下端施加零位移约束. 温度激励载荷的初始点为 370 K, 即倒装焊时的温度, 对应于零应力状态, 结束温度为 77 K, 历时 10 s, 求解过程采用瞬态分析的方法, 载荷步采用斜坡加载方式.

3 模拟结果分析及讨论

3.1 碎裂统计结果

某一批次生产中的典型碎裂示意图如图 4 所示, 碎裂统计分析结论如下.

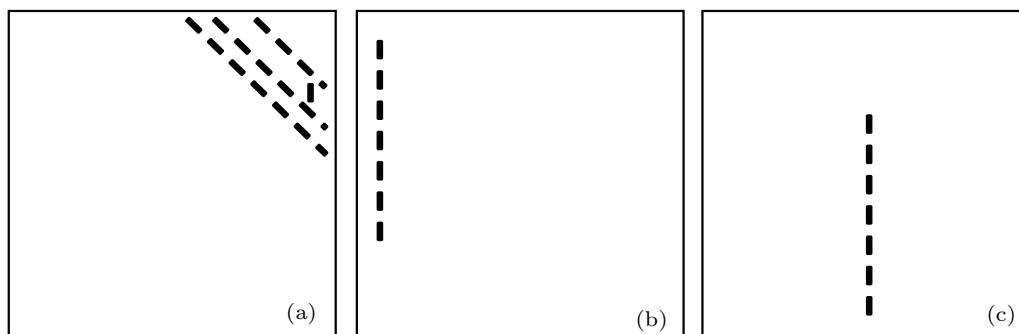


图 4 热冲击下 InSb 面阵探测器的典型碎裂示意图

图 4(a) 所示的裂纹特征为: 裂纹起源于 N 电极区域, 分布于芯片四角, 且相互平行; 碎裂概率为 70%.

图 4(b) 所示的裂纹特征为: 裂纹走向平行于探测器四边, 且相互平行; 碎裂概率为 20%.

图 4(c) 所示的裂纹特征为: 裂纹起源于 N 电极区域, 位于芯片中间位置, 且平行于四边; 碎裂概率为 10%.

3.2 模拟结果分析

基于上述建模设想, 选取典型的 InSb 焦平面探测器结构, 利用 32×32 的小面阵等效 128×128 的大面阵 InSb 探测器, 热冲击结束后, 模拟得到的 Von Mises 应力及分布结果如图 5 所示.

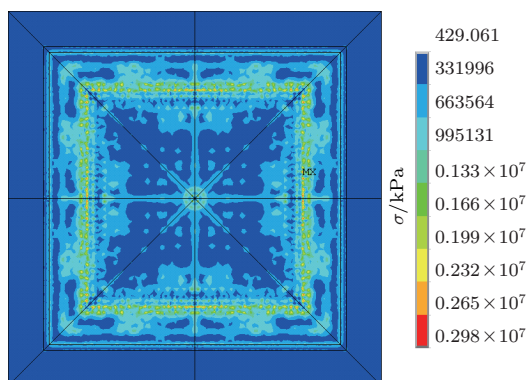


图 5 热冲击下的模拟得到的应力分布图

从数值仿真结果中可知, 最大 Von Mises 应力位于 N 电极区域, 且呈现出非连续的极值分布. 这意味着热冲击下 InSb 面阵探测器的裂纹应起源于 N 电极区域, 且裂纹起始点并非一个, 可同时出现多条裂纹. 上述结论与热冲击下 128×128 InSb 面阵探测器中的典型碎裂照片基本符合. 为便于分析, 对典型碎裂照片中的裂纹进行编号, 具体如图 6 所示.

图 6 中有三条倾斜裂纹 a, b, c 和一条竖直裂纹 d, a, b, c 三条倾斜裂纹相互平行, 沿着 InSb 芯片的某一解理面传播开来. 倾斜裂纹 a 和竖直裂纹 d 相交于 o_1 点, o_1 点左上方的 InSb 芯片向上翘曲明显, 裂缝在 o_1 点附近最宽, 远大于 InSb 芯片厚度, 且随着远离 o_1 点, 裂缝宽度降低, 由此可判断 o_1 点是倾斜裂纹 a 和竖直裂纹 d 的起源点. 倾斜裂纹 b 和倾斜裂纹 c 通过 o_2 区域后向右上方传播, 变向后终于 o_3 点. 在 o_2 区域, InSb 芯片与下

面的底充胶和钢柱彼此分离, 往上成片凸起, 同时与钢柱接触区域的周期性起伏消失. 此外, 在 o_2 区域的上、下两侧, 裂缝相对较宽, 变形明显, 且随着远离 o_2 区域, 裂缝宽度变窄, 越过 o_3 点后消失, 由此断定 o_2 区域为倾斜裂纹 b 和倾斜裂纹 c 的起源位置. 对照 InSb 面阵探测器的结构布局图, 可知 o_1 点和 o_2 区域均位于 N 电极区域, 由此得出热冲击下 128×128 InSb 焦平面探测器中的典型裂纹起源于 N 电极区域, 且起源点并非一个, 能引起多条裂纹同时出现, 这些结论在图 5 所示的模拟结果中得到证实. 此外, 依据竖直裂纹 d 的尽头所在位置, 以及倾斜裂纹 b 和倾斜裂纹 c 向右传播后的终止位置均位于芯片内, 不在芯片边缘, 且裂纹横穿整个芯片, 可推断出热冲击下 InSb 芯片的碎裂诱因源于芯片表面, 属于典型的垂直断裂模式. 碎裂根源为表面缺陷, 不是器件分割过程中引入的边缘缺陷. 因此如能减小前表面光敏元隔离槽结构和背表面减薄工艺对芯片强度损伤的影响, 热冲击下 InSb 面阵探测器的碎裂概率应能得到大幅度降低.

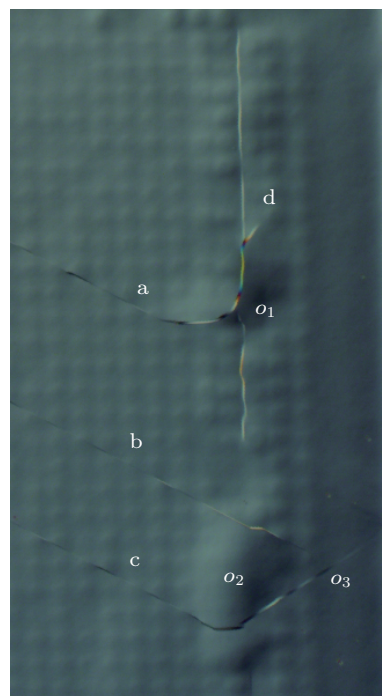


图 6 典型裂纹分布及起源

至此, 我们认为基于等效建模设想, 利用 32×32 小面阵等效 128×128 大面阵建立起的 InSb 焦平面探测器的结构分析模型, 能够同时给出热冲击下 InSb 芯片的典型碎裂起源区域及裂纹分布, 这将有助于 InSb 芯片碎裂模式及碎裂

机理研究深入展开. 需要指出的是图 5 中模拟得到的最大 Von Mises 应力值靠近 N 电极区域中间区域, 而不是如图 6 所示的两端区域, 这归因于本文中 InSb 芯片 Z 方向杨氏模量的选取可能与实际器件略有出入.

4 结论

热冲击下 InSb 焦平面探测器的易碎裂特性制

约着其适用性. 为了研究碎裂起源、碎裂模式, 提高探测器的结构可靠性, 基于等效设想, 考虑器件加工过程中表面损伤效应对材料强度的弱化效应, 建立起了 128×128 InSb 面阵探测器结构分析模型, 模拟结果在裂纹起源区域及裂纹分布两方面得到典型碎裂照片的初步验证, 认为 InSb 芯片碎裂是源于器件表面缺陷, 碎裂模式为典型的垂直断裂模式. 这为后续 128×128 InSb 面阵探测器的碎裂机理研究及结构优化设计提供可行的研究思路.

-
- [1] He L, Yang D J, Ni G Q 2011 *Introduction to Advanced Focal Plane Arrays* (1st Ed.) (Beijing: National Defence Industry Press) p1 (in Chinese) [何力, 杨定江, 倪国强 2011 先进焦平面技术导论 (第 1 版) (北京: 国防工业出版社) 第 1 页]
- [2] Tidrow M Z 2005 *Proceedings of SPIE*, Bellingham, WA, March 25–28, 2005 p217
- [3] Raytheon, http://www.raytheon.com.au/rtnwcm/groups/rau/documents/download/rau_factsheet_aim-9x.pdf [2012.3.20]
- [4] Gong H M, Liu D F 2008 *Infrared Laser Eng.* **37** 18 (in Chinese) [龚海梅, 刘大福 2008 红外与激光工程 **37** 18]
- [5] Dorn R J, Finger G, Huster G, Lizon J L, Mehrgan H, Meyer M, Stegmeier J, Moorwood A F M 2002 *Eur. Southern Observatory* **1** 1
- [6] Jiang Y T, Tsao S, O'Sullivan T, Razeghi M, Brown G J 2004 *Infrared Phys. Techn.* **45** 143
- [7] He Y, Moreira B E, Overson A, Nakamura S H, Bider C, Briscoe J F 2000 *Thermochemica Acta* **357-358** 1
- [8] White G K, Collins J G 1972 *J. Low. Temp. Phys.* **7** 43
- [9] Cheng X, Liu C, Silberschmidt V V 2012 *Comp. Mater. Sci.* **52** 274
- [10] Chang R W, Patrick M F 2009 *J. Electron. Mater.* **38** 1855
- [11] Pandolfi A, Weinberg K 2011 *Eng. Fract. Mech.* **78** 2052

Structural modeling of 128×128 InSb focal plane array detector*

Meng Qing-Duan^{1)†} Zhang Xiao-Ling¹⁾ Zhang Li-Wen¹⁾ Lü Yan-Qiu²⁾

1) (*School of Electronic Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China*)

2) (*China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China*)

(Received 2 March 2012; revised manuscript received 31 March 2012)

Abstract

Higher fracture probability appearing in InSb infrared focal plane array (IRFPA) subjected to thermal shock test, restricts its final yield. In order to understand the fracture mechanism, in light of the proposed equivalent method, where a 32×32 array is employed to replace the real 128×128 array, to a three - dimensional structural model of IRFPA is developed by taking into account the temperature dependence of thermal expansion coefficient, anisotropic mechanical strength of InSb chip, damaging effects of the surface of the InSb chip, and a reduction of 90% the out-of-plane elastic modulus. Simulation results show that a maximum Von Mises stress appears in the N electrode zone in InSb chip, and the extremum values present a non-continuous distribution. This means that the cracks is most likely to emerge in the region of N electrode, besides, the number of crack tracks is more than one. These are well consistent with the 128×128 InSb IRFPA fracture statistics results under thermal shock test. All these are beneficial to the further study of fracture inducing factors and structural reliability design of InSb IRFPA.

Keywords: focal plane array, InSb, structural stress

PACS: 07.57.Kp, 62.20.mm, 46.50.+a

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No.61107083), and the Aero Science Foundation of China (Grant No. 20100142003).

† E-mail: qdmengly@163.com