

文章编号: 1001-9014(2010)06-0431-04

InSb 红外焦平面探测器结构应力的 ANSYS 分析

孟庆端^{1,2}, 吕衍秋², 鲁正雄², 孙维国²

(1. 河南科技大学 电子信息工程学院, 河南 洛阳 471003;

2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要:借助有限元软件系统分析了钢柱取不同直径时红外探测器整体结构的应力分布. 模拟结果表明, 在固定钢柱高度的前提下, 当钢柱直径以 $2\mu\text{m}$ 的步长从 $36\mu\text{m}$ 减小到 $18\mu\text{m}$ 的过程中, InSb 芯片上的最大应力值呈现出先减小, 后线性增加的趋势, 但钢柱上应力最大值始终保持在 15.7MPa 左右, 且分布几乎不变. Si 读出电路上的应力小于 InSb 芯片上的应力值, 变化趋势类同于 InSb 芯片上应力的变化趋势. 钢柱直径取 $30\mu\text{m}$ 时, InSb 芯片和 Si 读出电路上的应力均达到最小值 260MPa 和 140MPa , 整个器件的应力分布在接触区呈现明显的集中性、均匀性, 分布更合理.

关键词: ANSYS; 焦平面; InSb; 结构应力

中图分类号: TG454 **文献标识码:** A

STRESS IN InSb INFRARED FOCAL PLANE ARRAY DETECTOR ANALYZED WITH ANSYS

MENG Qing-Duan^{1,2}, LV Yan-Qiu², LU Zheng-Xiong², SUN Wei-Guo²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Henan University of

Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Based on viscoplastic Anand model, von Mises stress distribution of the infrared focal plane array detector is analyzed by finite element method. Simulation results show that as the diameters of the indium bump decreases from $36\mu\text{m}$ to $18\mu\text{m}$ in step of $2\mu\text{m}$, the maximum stress existing in InSb chip reduces at first, then increases linearly with indium bump diameters. Yet the stress distribution in the indium bump is almost unchangeable and its maximum value keeps at 15.7MPa . Furthermore the maximum stress in Si-CMOS readout integrated circuit is smaller than that of InSb chip, and its changing tendency chart is almost the same as that of InSb chip. When the diameter of the indium bump is set to $30\mu\text{m}$, the maximum stresses existing in both InSb chip and Si CMOS readout integrated circuit reach the minimal value 260MPa and 140MPa , respectively. Simulations also show that the stress distribution at the contact areas is uniform and concentrated, the stress value in the whole infrared focal plane array detector is smallest, and its distribution is promising.

Key words: ANSYS; focal plane array; InSb; structural stress

引言

响应波段在 $1 \sim 5.5\mu\text{m}$ 的碲化铟 (InSb) 凝视红外焦平面探测器具有灵敏度高 (比铂硅 PtSi)、工艺成熟 (相对于碲镉汞 MCT)、成本效益好等优点, 在军用凝视制导和光电设备上有大量应用^[1]. InSb 焦平面探测器通常采用倒装焊技术混合集成、背照射的方式工作, 即先分别研制出 InSb 光伏探测器列阵芯片和 Si-CMOS 读出电路, 通过钢柱互连混成. 混成后的器件

经 InSb 芯片背减薄和表面生长增透膜使量子效率最优化, 最后封装在带有制冷器的杜瓦中. 为了提高探测器的信噪比, 凝视红外焦平面器件通常工作于液氮温度 (77K), 而存放时则处于室温环境下 (300K). 在快速、大范围降温的情形下 (降温幅度高达 223K), 由于材料之间热膨胀系数的不同, 将导致钢柱与 InSb 或 Si 读出电路接触处产生机械应力/应变, 引起 InSb 芯片碎裂. 为了寻求探测器的可靠工作, 迫切需要对其应力分布进行分析研究. 目前对于倒装焊器件可靠

收稿日期: 2010-01-15, 修回日期: 2010-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60904023)

作者简介: 孟庆端 (1978-), 男, 河南叶县人, 博士, 副教授, 主要从事红外探测器结构优化方面研究, E-mail: gdmengly@163.com.

Received date: 2010-01-15, revised date: 2010-06-09

性的研究手段主要依靠有限元模拟法,即通过分析应力/应变评估其结构的可靠性^[2~4].

In 材料通常用于极低温组件的连接封装,其力学本构关系并不像锡铅 SnPb 材料那样研究得非常充分^[5,6],因此有关该方面的研究鲜有报道. 2009 年,美国马里兰大学的 Ruiwu Chang 研究组报道了钢块材在 123K 至 273K 范围内,采用 Anand 粘塑性模型描述钢块材料的本构关系,为红外焦平面探测器可靠性分析提供了模型参数^[7~10]. 基于上述研究结果,系统分析了红外焦平面探测器在无底充胶情形下的结构应力分布情况,为高可靠性探测器的研制提供了设计依据.

1 模型建立和参数选择

1.1 模型建立

在建立红外焦平面探测器的有限元模型时假设钢柱焊点为八角形棱柱,整个器件处于无缺陷的理想状态. 所建模型中红外焦平面探测器简化成具有钝化钢芯片、钢柱及硅读出电路的三层结构,如图 1 所示. 在保持钢柱高度的前提下,选取不同直径的钢柱来比较其对整个焦平面器件应力分布的影响. 钢柱直径从 36 μm 按照 2 μm 的步长降低到 18 μm ,中心间距 50 μm ,硅读出电路尺寸为 250 μm \times 250 μm \times 300 μm 、InSb 芯片尺寸为 200 μm \times 200 μm \times 10 μm ,这里 InSb 芯片取 10 μm 厚,是器件高探测效率的要求.

利用 ANSYS 建立焦平面探测器模型时,采用自上而下的建模方法. 焊球采用 VISCO107 单元,其余部分选用 SOLID95 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(8 \times 8)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,共有 62804 个单元,三维模型如图 1 所示.

1.2 参数的选择

硅读出电路以及 InSb 芯片的材料属性视为各向同性线弹性材料,不考虑材料性能随温度的变化,具体参数见表 1.

表 1 线弹性材料参数

Table 1 Liner elastic material parameters

材料名称	杨氏模量 E/MPa	波松比 μ	线膨胀系数 $\alpha_l/(\times 10^{-6}\text{K}^{-1})$
Si 读出电路	163000	0.28	2.50
InSb 芯片	409000	0.35	5.04
In 柱	10600	0.45	33.00

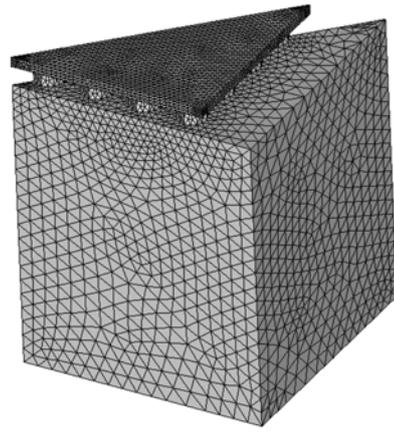


图 1 焦平面器件三维有限元模型

Fig. 1 Three dimensional model and mesh of infrared focal plane array device

由于钢柱的熔点(429K)较低,电子封装及组件的服役温度(77 ~ 300K)可达钢柱熔点的 0.18 ~ 0.70,在这样相对较高的温度下,钢柱的蠕变变形明显,变形与温度和时间(或速率)有关,表现为粘塑性. 故采用具有单一内变量的统一型粘塑性 Anand 模型来描述钢柱的力学本构关系. 通过力学性能实验得到钢柱在恒应力蠕变和恒应变速率实验条件下的应力应变数据,基于稳态塑性流动及饱和应力概念,确定粘塑性 Anand 本构方程的材料参数,具体细节源于 Ruiwu Chang 的工作^[7]. 文中 Anand 方程为

$$\dot{\epsilon}_p = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{s}\right)\right]^{\frac{1}{m}}, \quad (1)$$

式中 $\dot{\epsilon}_p$ 为非弹性应变速率, A 为指数项前置因子, Q 为激活能, R 为理想气体常数, T 为热力学温度, m 为应变率敏感因子, ξ 为应力系数, s 为给定温度和应变率下的内部变量的饱和值, σ 为应力. 内变量 s 的演化方程囊括了应变硬化、动态恢复和静态恢复三种机制,由下式给出:

$$\dot{s} = \left| h_0 \left[1 - \frac{s}{s^*} \right]^a \text{sign}\left(1 - \frac{s}{s^*}\right) \right| \dot{\epsilon}_p; a > 1, \quad (2)$$

$$s^* = \hat{s} \left[\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right]^n, \quad (3)$$

式中, h_0 是硬化/软化常数, α 是硬化/软化应变率敏感因子, s^* 是内变量 s 的饱和值, \hat{s} 为系数, n 为形变阻抗饱和值的应变率敏感因子. s_0 为形变阻抗的初始值. 具体参数见表 2.

1.3 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

表 2 钢柱 Anand 方程的材料参数

Table 2 Material parameters of indium for steady-state plastic flow material parameter values

钎料	Q/R (1/K)	常数 A (1/s)	应力乘子 ξ	敏感指数 m	系数 \hat{S} (MPa)	指数 n	硬化常数 h_0 (MPa)	应变指数 a	形变阻抗 s_0 (MPa)
In 柱	9369.7	2.33×10^8	49.97	0.30	28.3	0	0	1	28.3

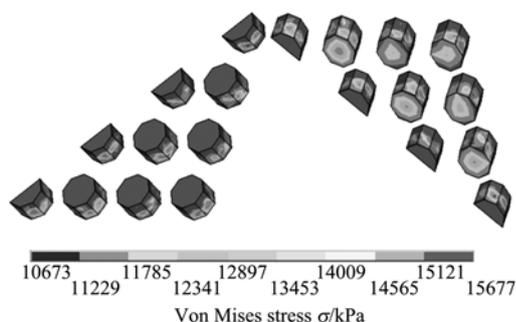


图 2 钢柱三维 Von Mises 应力分布

Fig. 2 Von Mises stress distribution of 3-D indium bumps

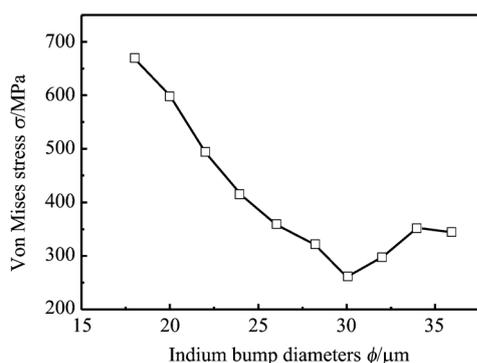


图 3 InSb 芯片上应力最大值随钢柱直径的变化曲线

Fig. 3 Von Mises stress maximum values of InSb as a function of varied indium bump diameters

施加零位移约束。温度激励载荷的初始点为 370K, 即倒装焊时的温度, 对应于零应力状态, 结束温度为 77K, 历时 10s, 求解过程采用瞬态分析的方法, 载荷步采用斜坡加载方式。

2 模拟结果分析

图 2 为降温结束后三维钢柱上、下表面的 von Mises 应力分布图, 显然在钢柱与 InSb 芯片的接触面上呈现出明显的应力集中现象, 且在整个钢柱中应力值处于最高水平。在钢柱与 Si 读出电路的接触面上, 除对角线上钢柱外, 其余部分的钢柱下表面上的应力分布不呈现出应力集中现象, 并且接触面上的应力呈现出明显的梯度分布。钢柱侧壁上的应力分布也具有梯度分布现象, 下边的应力值明显小于上边的应力值。这些与常规铅锡焊点的结果明显不

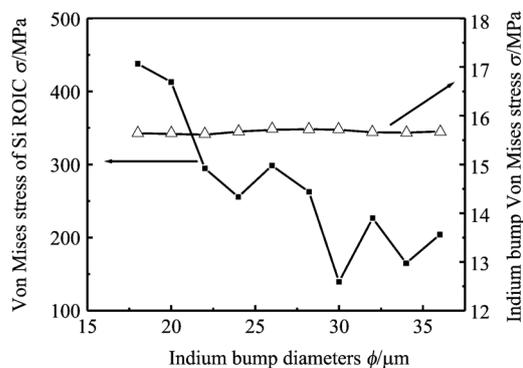


图 4 Si 读出电路和 InSb 上应力最大值随钢柱直径的变化关系

Fig. 4 Von Mises stress maximum values of Si-CMOS and Indium bumps as a function of varied indium bump diameters

同^[2]。与常规 SnPb 焊点倒装焊器件相比, 红外焦平面探测器中 InSb 芯片的厚度 (10 μm) 要薄得多, 原本分布于焊点上的应力会随着 InSb 芯片的减薄转移到 InSb 芯片上, 引起应力在钢柱上重新分布, 使得整个体系能量最低, 从而偏离常规 SnPb 焊点的应力分布规律。

当钢柱直径从 36 μm 按照 2 μm 的步长降低到 18 μm 时, InSb 芯片上的最大应力先从 344MPa 减小到 261MPa, 之后从 261MPa 增加到 668MPa, 几乎呈线性关系, 如图 3 所示。但钢柱上应力最大值始终保持在 15.7MPa 左右, 远低于 InSb 芯片上应力值, 且应力分布不随钢柱直径变化。Si 读出电路上的应力也小于 InSb 芯片上的应力值, 变化趋势类同于 InSb 芯片上应力的变化趋势, 在钢柱直径取 30 μm 时达到最小值 140MPa, 如图 4 所示。

当钢柱的直径取 30 μm 时, 整个器件的应力分布在接触区呈现明显的集中性, 均匀性。对于 InSb 芯片来说, 接触区的 Von Mises 应力在 120MPa 左右, 而非接触区的应力值约在 20MPa 浮动, 从接触区到非接触区呈逐渐递减趋势, 对称面处应力分布的过渡区域明显变大, 如图 5 所示。InSb 芯片上表面的应力分布具有明显的对称性, 沿对角线处的应力值明显高于非对角线区域的值, 这与 InSb 下表面的分布明显不同, 如图 6 所示。对 Si-CMOS 读出电路来说, 与钢柱的接触区域的应力分布也呈现出明显的应力集中现象, 应力值在 80MPa 左右, 而非接

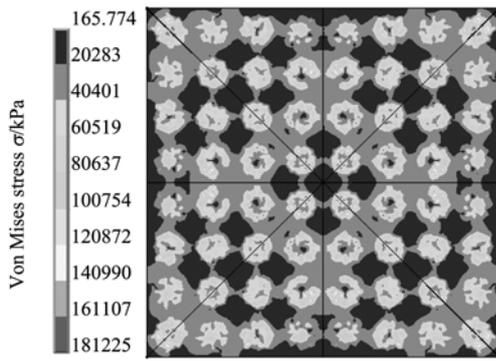


图5 InSb 芯片下表面 Von Mises 应力分布
Fig. 5 Von Mises stress distribution of InSb chip bottom surface

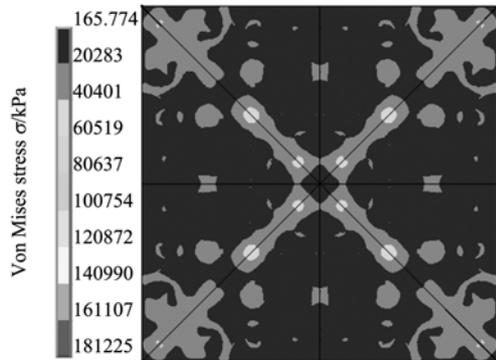


图6 InSb 芯片上表面 Von Mises 应力分布
Fig. 6 Von Mises stress distribution of InSb chip top surface

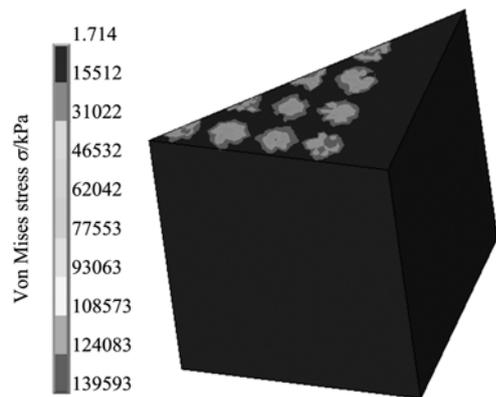


图7 Si 读出电路三维 Von Mises 应力分布
Fig. 7 Von Mises stress distribution of Si-CMOS readout integrated circuit

触区域的应力值很小可以忽略不计,应力分布在 Si 读出电路的上表面薄层区,下表面没有应力集中现象,如图 7 所示。

3 结论

借助有限元分析软件系统研究了钢柱取不同直

径时红外探测器整体结构的应力分布情况.在固定钢柱高度的前提下,InSb 芯片的最大应力随着钢柱直径的减小先降低,后随钢柱直径直线增加,但钢柱上应力最大值始终保持在同一水平,且分布不变. Si 读出电路上应力值小于 InSb 芯片上应力值,其变化趋势与 InSb 的类同.当钢柱直径取 $30\mu\text{m}$ 时,使得 InSb 芯片上的最大应力最小,并且其应力分布在接触区呈现集中性,整个红外探测器的应力值最小,最具实用性。

REFERENCES

- [1] CHEN Bo-Liang, SUN Wei-Guo, LIANG Ping-Zhi, *et al.* Development and applications of staring InSb infrared focal plane array assembly [J]. *Infrared and Laser Engineering* (陈伯良,孙维国,梁平治,等. InSb 凝视红外焦平面组件研制和应用. *红外与激光工程*), 2002, **31**(5): 419—423.
- [2] GAO Li-Li, XUE Song-Bai, ZHANG Liang, *et al.* Analysis of solder joint reliability of FCBGA devices [J]. *Transactions of the China Welding Institution* (皋利利,薛松柏,张亮,等. FCBGA 元器件焊点可靠性的有限元分析. *焊接学报*), 2008, **29**(8): 73—76.
- [3] CAI Xia, CHEN Liu, ZHANG Qiu, *et al.* Thermal fatigue failure analysis of SnPb solder joint in flip-chip assemblies [J]. *Chinese Journal of Semiconductors* (彩霞,陈柳,张群,等. 倒扣芯片连接焊点的热疲劳失效. *半导体学报*), 2002, **23**(6): 661—666.
- [4] LIU Shi-Long, QIN Lian-Cheng, YANG Dao-Guo, *et al.* Flip-chip assembly in thermal cycle: effects of residual stress due to cure on the thermo-mechanical reliability [J]. *Electronic Components and Materials* (刘士龙,秦连城,杨道国,等. 固化残余应力对倒装焊器件热-机械可靠性的影响. *电子元件与材料*), 2003, **22**(2): 44—48.
- [5] Wang G Z., Cheng Z N., Becke K R, *et al.* Applying Anand model to represent the viscoplastic deformation behavior of solder alloys [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2001, **123**(3): 247—253.
- [6] Wilde J, Becker K, Thoben M, *et al.* Rate dependent constitutive relations based on Anand model for 92.5Pb5Sn2.5Ag solder [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2000, **23**(3): 408—414.
- [7] Chang R W, Patrick McCluskey F. Constitutive relations of indium in extreme-temperature electronic packaging based on Anand model [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, **38**(9): 1855—1859.
- [8] Kim S, Ledbetter H. Low-temperature elastic coefficients of polycrystalline indium [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1998, **252**(1): 139—143.
- [9] Hermida E B, Melo D G, Aguiar J C, *et al.* Temperature dependence of the viscoelastic response of In, Sn and In-Sn alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, **310**(1): 91—96.
- [10] Reed R P, Mc Cowan C N, Walsh R P. Tensile strength and ductility of indium [J]. *Materials Science and Engineering*, 1988, **102**(2): 227—236.