

## 基于内聚力模型的 InSb 面阵探测器失效分析

贵磊, 孟庆端, 张立文, 李鹏飞

(河南科技大学电子信息工程学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 基于内聚力模型, 运用 ANSYS 仿真软件研究了 InSb 芯片在 N 电极附近的脱落和碎裂问题。模拟结果显示: 在 N 电极区域, InSb 芯片沿隔离沟槽存在明显的脱落趋势; 为了解 InSb 芯片碎裂失效分布状况, 在 InSb 芯片中做切分处理, 并在切分面上选取等间距内聚节点, 得到了节点沿 X 轴方向的相对分离量, 及相对分离量最大节点沿不同坐标轴的变化趋势。模拟结果中 InSb 芯片脱落失效区域和分离量较大的内聚节点所在位置与典型 InSb 焦平面探测器光学碎裂分布相吻合, 这为后续研究 InSb 芯片中裂纹起源及扩展提供参考。

**关键词:** 内聚力模型; InSb 芯片; 失效; 脱落和碎裂

**中图分类号:** TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.12.11

## Failure analysis of InSb infrared detector based on CZM

GUI Lei, MENG Qing-duan, ZHANG Li-wen, LI Peng-fei

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

**Abstract:** Based on Cohesive Zone Model (CZM), the failure problem of delamination and fracture of InSb chip around N electrode materials is studied by using ANSYS. The simulation results show that InSb chip has an obviously tendency of delamination around N electrode materials along the groove. To study the distribution of fracture, the InSb chip is divided, and some cohesive nodes with equal step are selected in segmentation surfaces, relative separation along the X-axis is obtained, and the strain tendency of node with highest displacement of relative separation along the X, Y and Z-axis is drawn. In simulation results, the region which contains failure InSb chip and cohesive nodes with higher relative separation displacement is agree closely with the typical optical fracture distribution of InSb infrared focal plane arrays (IRFPAs), which provides references for analysis of crack initiate and growth in InSb chip.

**Key words:** cohesive zone model; InSb chip; failure; delamination and fracture

### 1 引言

温度冲击下多层材料的脱落和碎裂一直是材料科学和结构工程上亟待解决的问题<sup>[1]</sup>。InSb 面阵探测器是典型的层状结构, 由光敏元芯片和硅读出电路经钢柱阵列连接而成, 为提高信噪比, InSb 面阵探测器通常工作于液氮温度, 由于 InSb 芯片和硅读出电路之间线膨胀系数不同, 将在面阵探测器中产生热应变, 引起钢柱断裂、相邻材料间分层脱落甚至是 InSb 芯片碎裂。据统计, 某批次生产中探测器芯片材料的崩裂以及焊点脱落为主要失效模式, 严重制约着光电探测器的成品率<sup>[2]</sup>。为了解热冲击过程中芯片碎裂诱因, 基于所提出的等效模型, 孟庆

端<sup>[3-4]</sup>等人借助小面阵等效大面阵建立起  $128 \times 128$  阵列规模的 InSb 面阵探测器结构分析模型, 所得到的最大 Von Mises 应力位置及分布和典型碎裂光学照片相吻合。为明晰 InSb 芯片具体脱落和碎裂过程, 本文基于内聚力模型, 拟以应变为判据揭示 InSb 焦平面探测器的失效演变特性。

和经典的线弹性断裂准则相比, 内聚力模型

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金项目 (No. 61107083); 航空科学基金 (No. 20100142003) 资助。

**作者简介:** 贵磊 (1989 -), 男, 硕士研究生, 主要从事运用内聚力模型研究 InSb 焦平面探测器的失效工作。E-mail: gyl19890222@163.com

**收稿日期:** 2013-04-27

可在无预置裂纹情况下完成模型的结构稳定性分析,特别是对失效的起源预测以及裂纹扩展的演示,已在材料分层和碎裂分析中得到广泛应用。2011年,美国德克萨斯理工大学梅海霞博士<sup>[5]</sup>基于 ABAQUS 软件,运用内聚力模型,完成了硅薄膜在聚二甲硅氧烷(PDMS)衬底上因热失配引起的应变失效分析,模拟了硅薄膜产生褶皱,然后凸起成泡,形成分层的失效过程。Pandolfi 和 Weinberg<sup>[6]</sup>运用内聚力模型预测了硅薄板在过载荷作用下的碎裂模式,并得到了试验验证。针对具有闪锌矿结构的半导体材料,A. S. Verma<sup>[7]</sup>提供了与试验相符合内聚能失效参数,这为运用内聚力模型研究 InSb 面阵探测器在热冲击下的脱落和碎裂分析提供了参数选取依据。

## 2 内聚力模型理论

内聚力模型理论是由 Barenblatt 和 Dugdale<sup>[8-9]</sup>提出的,考虑到模型材料 InSb 的线弹性特征,本次分析采用由 Aifanoh 和 Crisfield<sup>[10]</sup>建立的双线性牵引分离内聚力模型。由于切线方向和法线方向参数性质相同,这里以法线方向参数为例进行介绍,内聚力牵引分离法则原理图如图 1 所示。

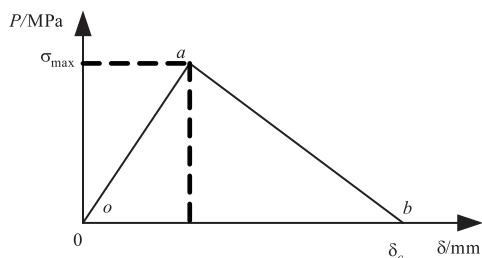


图1 双线性内聚力模型牵引分离法则示意图

Fig.1 Bilinear traction-separation relationship law of CZM

$P$  和  $\delta$  分别代表裂纹尖端的接触面牵引力和接触面分离量,  $\sigma_{\max}$  为最大牵引力,  $\delta_c$  为接触面临界失效分离量。材料的屈服应力为  $\sigma_y$ , 根据内聚法则可判断: 当裂纹尖端的接触面最大牵引力  $\sigma_{\max} < \sigma_y$  时, 裂纹不会扩展; 当  $\sigma_{\max} > \sigma_y$  时, 裂纹开始扩展, 直至接触面分离量达到  $\delta_c$  时, 裂纹扩展完成<sup>[11]</sup>。其中裂纹尖端接触面最大牵引力  $\sigma_{\max}$  和分离量  $\delta_c$  是试验中内聚力元素的重要参数。文献[5]~[7]中给出了硅和具有  $A^{III}B^V$  或  $A^{II}B^{VI}$  组合结构的闪锌矿半导体组件等材料的失效参数, 考虑到 InSb 材料与上述材料晶格结构完全相同, 这里借用文献中提供的内聚力模型参数来分析 InSb 芯片在热冲击下的脱落与碎裂失效问题。

## 3 模型建立和载荷施加

为解决倒装焊结构复杂且单元数目较多的问

题, 采用等效思想, 用小面阵等效大面阵建立起  $128 \times 128$  元 InSb 面阵探测器结构分析模型, 如图 2 所示, 从上到下依次为 InSb 芯片、钢柱和底充胶(二者相间排布)、硅读出电路, 其中 InSb 芯片和 N 电极的厚度分别为  $10 \mu\text{m}$  和  $4 \mu\text{m}$ , 具体参数在文献[3]、[4]中有详细描述。

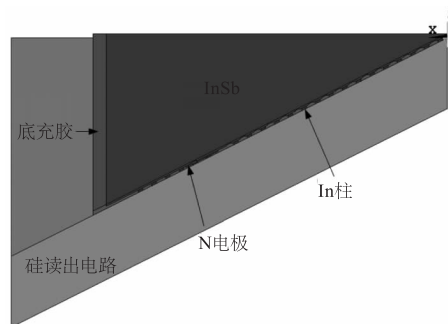


图2  $128 \times 128$  元探测器器件三维有限元模型

Fig.2 Three dimensional model of the  $128 \times 128$  infrared focal plane array

钢柱选用粘塑性单元 VISCO107, 其余材料选用 SOLID95 单元, 对模型进行自由网格划分。在 N 电极与 InSb 芯片接触面内或 N 电极上方 InSb 芯片的切分面内加入内聚力元素, 内聚力单元选用三维 8 节点的 CONTACT174 单元。在上述两个接触面内, 法线方向最大牵引力  $\sigma_{\max}$  分别取 600 MPa 和 1100 MPa, 切线方向分别取 550 MPa 和 1000 MPa。对探测器模型施加载荷, 包括对称面载荷和零位移载荷。温度载荷采用斜坡加载方式, 在 71 s 内从 370 K 逐步降到 77 K。

## 4 试验结果与分析

为研究在 N 电极区域 InSb 芯片脱落失效趋势, 在 InSb 芯片与 N 电极材料的交界面处设立内聚力单元, 热冲击后, 分别观察 InSb 芯片上/下表面的应力分布结果, 如图 3 所示。

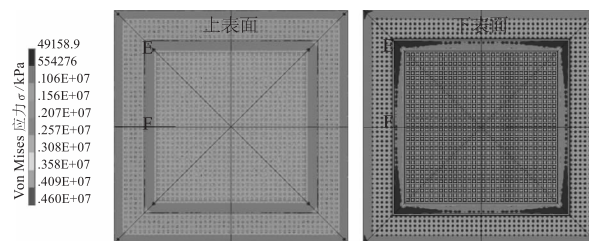


图3 InSb 芯片上/下表面 Von Mises 应力分布

Fig.3 Von Mises stress distribution of InSb chip top and bottom surface

模拟结果显示, N 电极上方的 InSb 芯片上下表面均存在应力梯度, 应力值较小区域主要集中在隔离沟槽一带, 呈带状分布。尤其在 InSb 芯片的下表面, 应力值较小区域主要位于 E 端附近, 且呈连续

分布,临近 F 端时,应力值较小区域面积开始减小且呈散状分布,而在 InSb 芯片的上表面应力值较小区域面积比较小,但分布情况和下表面基本相同。InSb 芯片下表面应力分布的差别表明 InSb 芯片和下方 N 电极的相对应变量的不同,其中在较小应力值区域相对应变较大,自由度较大,即在热冲击过程中,此区域是最易脱落失效的,特别是靠近 E 端的 InSb 芯片脱落失效的可能性最大。在 E 到 F 中间区域,应力值较小区域的散状分布特性体现了应变极值的不唯一性,一定程度上验证了在 N 电极区域 InSb 芯片中裂纹起源点的不唯一性<sup>[2]</sup>。

在 N 电极和 InSb 芯片接触区域由于隔离沟槽的存在而降低了 InSb 芯片的厚度,致使沟槽附近 InSb 芯片抗变形能力相对较弱。为观察 N 电极上方的 InSb 芯片碎裂起源特征,并考虑到图 3 模拟得到的有脱落隐患的 InSb 芯片主要是沿隔离沟槽分布,于是在沟槽附近,以直线 PQ 为基准对 InSb 芯片进行切分,并在切分面内同样建立内聚力元素,得到探测器模型热冲击后的应力分布效果,如图 4 所示。

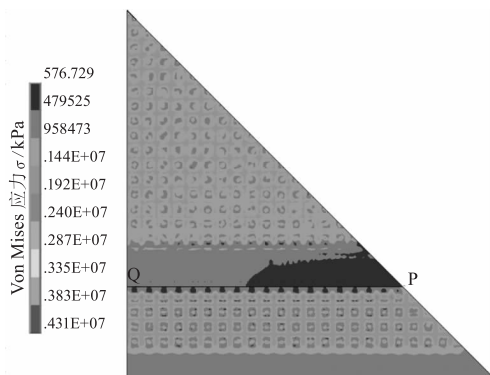


图 4 红外焦平面探测器 Von Mises 应力分布图

Fig. 4 Von Mises stress distribution of infrared focal plane array

在切分面 P 端部分 InSb 芯片应力值明显小于周围的区域,此部分 InSb 芯片的应力值与 Q 端相比有三个数量级之差,所以此区域内的 InSb 芯片应力值可忽略不计,可断定 P 端应力较小的 InSb 芯片处于完全自由状态,即已经脱离下方的 N 电极材料,而 Q 端的 InSb 芯片应力值为 750MPa 左右,显然还没有和下方的 N 电极材料脱离,说明 N 电极附近 InSb 芯片应力分布的不均匀性,可知 N 电极区域 InSb 芯片失效几率是不等的,且靠近 P 端的 InSb 芯片是相对易脱落的。从探测器的实际失效区域统计,可知以上模拟得到脱落失效的 InSb 芯片所在区域均是和探测器实际失效区域是相符合的<sup>[2]</sup>。

为观察切分面的碎裂应变效果,按从 Q 端到 P 端的顺序,从切分面中等间距的选取 20 个内聚节点,并统计出所选节点在热冲击完成后沿 X 轴方向的相对分离量,如图 5 所示。数据结果显示,从节点 1 到节点 11,相对分离量的变化比较平缓,而在节点 12 到节点 17 之间,节点相对分离量先明显的上升,然后再下降,尤其是在节点 15 处达到峰值,然后从节点 18 到节点 20,节点相对分离量又开始趋于平缓。可知在沿 Q 到 P 的切缝边沿上,节点的分离量存在明显的较大值情况。相对分离量的不均匀性同样可以说明 InSb 芯片失效几率的不等性,其中节点 12 到节点 17 所包含的 InSb 芯片区域是相对最不稳定的,这一区域同样和统计得到的探测器实际碎裂失效起源位置是相符合的。

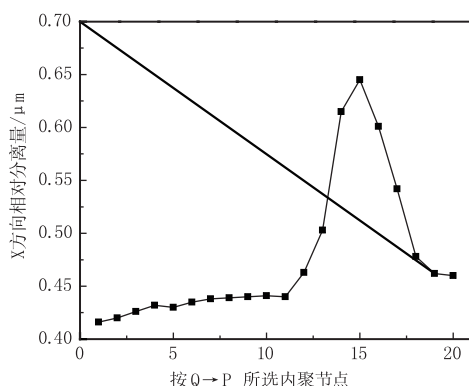


图 5 内聚节点沿 X 方向相对分离量

Fig. 5 X-components relative separation displacement of cohesive nodes

通过节点的应变趋势可以观测节点周围 InSb 芯片的应变情况,选取切分面上相对分离量最大的节点 15,以时间为变量绘制节点在 X、Y、Z 三个方向应变变化曲线,如图 6 所示。在整个热冲击过程中,节点在 X 和 Y 方向的应变趋势基本一致,但与 Z 方向应变趋势有显著差别。在 1~61 s 内,节点沿坐标轴各方向应变均比较缓慢,而在 61 s 时刻,各方向应变速率均发生突变,尤其是在 Z 方向应变

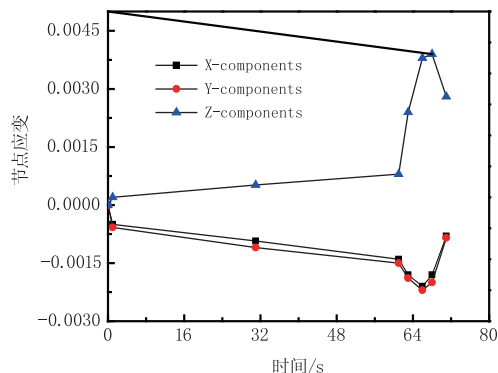


图 6 沿坐标轴各分量的节点应变曲线

Fig. 6 Node strain as a function of time in the X, Y and Z direction

较为明显,这主要是因为 61 ~ 71 s 内的降温幅度大所致,而在 66 s 时刻,节点的应变趋势开始沿反方向变化。由节点应变方向的变化可判断 InSb 芯片完全碎裂失效,结合图 4 模拟得到的处于失效状态 InSb 芯片分析:在 61 s 时刻,节点沿 Z 正方向应变较 X 和 Y 方向明显,节点附近 InSb 芯片向上形成凸起,在达到屈服应力时刻瞬间碎裂,节点和 InSb 芯片单元会因应力的突然消失使其位置发生改变,即节点在 66 s 时刻应变速率和方向的改变。节点的应变可反映 InSb 芯片形成凸起以及碎裂失效等应变趋势,更加符合 InSb 芯片的真实失效模式,对 InSb 芯片中失效裂纹模式的判断提供依据。

## 5 结 论

为明晰探测器 N 电极区域 InSb 芯片的失效起源以及真实失效应变趋势,在特定的内表面内建立内聚力元素,不但从数据上分析了 InSb 芯片的脱落应变变化趋势,而且又从应变云图中直观的演示了 N 电极区域 InSb 芯片失效现象,把探测器 InSb 芯片的失效几率和失效模式可视化,从内聚节点应变变化中可观测出 InSb 芯片的失效趋势以及碎裂临界点的应变情况。试验结果和实际失效模式的相符性一定程度上证明采用内聚力模型研究探测器分层和碎裂等失效问题的有效性,同时为后续研究裂纹在 InSb 芯片中的起源和扩展等微观失效过程提供了研究方法和分析工具。

## 参考文献:

- [1] H H Yu, John W Hutchinson. Influence of substrate compliance on buckling delamination of thin films[J]. International Journal of Fracture, 2002, 113: 39 - 55.
- [2] Luo Hong. Failure analyses of InSb PV detector no Voc performance[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(7): 720 - 724. (in Chinese)  
罗宏. 光伏型碲化铟红外探测器开路失效研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 720 - 724.
- [3] Meng Qingduan, Zhang Xiaoling, Zhang Liwen, et al. Structural modeling of 128 × 128 InSb focal plane array detector[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(19): 190701. (in Chinese)  
孟庆端, 张晓玲, 张立文, 等. 128 × 128 InSb 探测器结构模型研究[J]. 物理学报, 2012, 61(19): 190701.
- [4] Meng Qingduan, LV Yanqiu, Zhang Liwen, et al. Stress in InSb infrared focal plane array detector analysis with ANSYS[J]. Journal of infrared and millimeter waves, 2010, 29(6): 431 - 434. (in Chinese)  
孟庆端, 吕衍秋, 鲁正雄, 等. InSb 红外焦平面探测器结构应力的 ANSYS 分析[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(6): 431 - 434.
- [5] Haixia Mei, Rui Huang. Fracture and delamination of elastic thin films on compliant substrates: modeling and simulations[D]. 2011: 75 - 78.
- [6] A Pandolfi, B Weinberg. A numerical approach to the analysis of failure modes in anisotropic plates[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011 (78): 2052 - 2069.
- [7] A S Verma, B K Sarkar, V K Jindal. Cohesive energy of zincblende structured solids[J]. Indian Academy of Sciences, 2010, 74(5): 851 - 855.
- [8] D S Dugdale. Yielding in steel sheets containing slits[J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8: 100 - 104.
- [9] G I Barenblatt. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture[J]. Advances in Applied Mechanics, 1962, 7: 55 - 129.
- [10] G Aifanoh M A Crisfield. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites; mechanical and computational issues[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, 50: 1701 - 1736.
- [11] B R K Blackman, H Hadavinia, A J Kinloch, et al. The use of a cohesive zone model to study the fracture of fibre composites and adhesively-bonded joints[J]. International journal of Fracture, 2003, 119: 25 - 16.