

文章编号: 1672-8785(2022)07-0015-06

基于可靠性试验的 InSb 红外 探测器失效机理研究

张伟婷 宁 提 李忠贺 李春领

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 对于芯片加速寿命可靠性试验来说, 温度是其中最重要的一环。首先, 立足于芯片可靠性试验中温度的变化, 探究高温烘烤对 InSb 红外探测器芯片光电性能的影响; 然后对盲元的类型进行了分类, 并总结出了像元损伤的可能原因; 最后利用有限元分析软件对探测器结构进行了热应力仿真和分析, 进一步明确了芯片碎裂的机理。由仿真结果可知, 芯片中心位置受力较大, 其值在 680 MPa 左右, 这与 InSb 探测器中心位置易发生疲劳失效现象相吻合。提供了一种研究 InSb 探测器失效机理的新思路, 对于高性能 InSb 红外探测器的研制具有一定的实际指导意义。

关键词: 温度变化; InSb; 光伏探测器; 应力

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.07.003

Study on InSb Infrared Detectors Failure Mechanism Based on Reliability Test

ZHANG Wei-ting, NI Ti, LI Zhong-he, LI Chun-ling

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In the chip accelerated life reliability test, temperature is the most important part. Firstly, based on the temperature change in the chip reliability test, the effect of high-temperature baking on the photoelectric performance of the InSb infrared detector chip is explored. Then, the types of blind pixels are classified, and the possible causes of pixel damage are summarized. Finally, the finite element analysis software is used to simulate and analyze the thermal stress of the detector structure, and further clarify the mechanism of chip fragmentation. It can be seen from the simulation results that the force at the center of the chip is relatively large, and its value is about 680 MPa, which is consistent with the phenomenon that the center of the InSb detector is prone to fatigue failure. A new way of studying the failure mechanism of InSb detectors is provided, which has certain practical guiding significance for the development of high-performance InSb infrared detectors.

Key words: temperature variation; InSb; photoelectric detector; stress

收稿日期: 2022-04-22

作者简介: 张伟婷(1994-), 女, 安徽蚌埠人, 博士, 工程师, 主要从事红外焦平面探测器可靠性设计研究。

E-mail: zwt19940921@163.com

0 引言

由于各阶段半导体制造工艺过程和技术提升,芯片产品的寿命随之延长,全生命周期的检验时间较长。为满足寿命试验中试验样品多和试验时间长的需求,加速寿命试验技术由此诞生。在不改变芯片失效机理的前提下,单步或逐步提高试验应力,使其加速失效。这大大降低了试验损耗,缩短了试验时间,同时也提高了效率^[1]。

芯片加速寿命可靠性试验通过加大试验应力影响芯片本身的物理和化学变化,进而起到加速寿命的作用。一般来说,试验应力包括机械应力、热应力、电应力和其他应力等。考虑到芯片实际操作的适用性等各种因素,常采用高低温冲击、高温存储等方式进行寿命试验。由于实际使用中环境复杂多样,进行寿命试验时只能选择对芯片寿命最有影响的几个工作条件进行模拟,比如温度、电压和负载等。这些工作条件统称为应力,其取值即为应力水平^[2]。在这些环境因素中,温度因素是造成产品失效的关键原因^[3]。在高温烘烤试验中,芯片失效过程加速,使其缺陷得到暴露。这对于后续芯片的优化设计具有指导意义。因此分析温度对芯片的影响十分必要。

同时,随着焦平面阵列逐渐向大面阵、小像元的方向发展,探测器失效问题中的盲元和裂片已经严重地制约了器件的成品率,成为急需解决的关键问题^[4]。本文在可靠性试验的基础上,对 InSb 红外探测器失效进行分析,重点对失效问题中的盲元和芯片裂片进行研究。

1 芯片加速寿命试验模型

加速模型主要是为了建立芯片在外应力作用下的产品寿命特征和应力环境之间的关系,常用的有阿伦尼斯模型、艾林模型、逆幂律模型等。以温度为试验应力进行加速寿命试验时,可选用阿伦尼斯模型或艾林模型。实践结果表明,大多数电子元器件的失效符合阿伦尼斯模型。根据阿伦尼斯模型可得到产品寿命与

所处环境温度之间的关系^[5]:

$$\xi = Ae^{E_a/kT} \quad (1)$$

式中, ξ 是特征寿命; E_a 是失效机理的激活能; k 是玻尔兹曼常数, $k = 8.617 \times 10^{-5}$ eV/K; T 是绝对温度; A 是常数。

根据特定加速寿命试验模型,可计算出相应的加速因子。加速因子是指正常工作条件下的产品寿命与加速环境作用下的产品寿命之比。通常用其表征加速试验的加速水平。它反映了加速试验中某加速应力水平的效果。由阿伦尼斯模型可计算温度加速因子:

$$T_{AF} = \frac{\xi_{normal}}{\xi_{stress}} = \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_{normal}} - \frac{1}{T_{stress}}\right)\right] \quad (2)$$

式中, ξ_{normal} 为正常工作条件下的寿命; ξ_{stress} 为高温环境作用下的寿命; T_{normal} 为室温; T_{stress} 为高温; E_a 为失效机理的激活能; k 为玻尔兹曼常数。

2 芯片高温烘烤试验

由阿伦尼斯模型可计算出芯片的高温烘烤条件。InSb 芯片在计算出的条件下进行高温烘烤后,部分芯片出现盲元增多、裂片等现象。InSb 芯片具有多层材料体系结构。常采用倒焊互连的方式,通过钢柱将探测器芯片和读出电路进行连接(见图 1)。其中任何一个部分的损伤都可能造成器件失效。因此,要控制器件成品的可靠性就需对其失效规律进行研究分析。

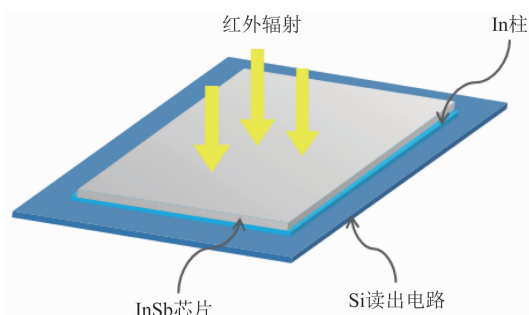


图 1 典型 InSb 探测器结构的示意图

InSb 红外探测器芯片的基本结构单元为 P-N 结,对温度变化十分敏感。P-N 结的性能-温度关系为

$$I_{re} = I_{reR} [e^{0.069(T-T_R)}] \quad (3)$$

式中, I_{re} 是温度为 T 时的反向漏电流; I_{reR} 是温度为 T_R 时的反向漏电流。根据式(1)可知, 温度每上升 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 反向漏电流会增加 1 倍。环境温度上升会使结温升高, 导致最高工作电压下降; 同时, 过高的温度会引起 P-N 结击穿损坏, 器件性能劣化, 最终使像元失效。

影响器件失效的因素有很多。不同的器件在同一应力环境下的失效模式和机理都可能不尽相同, 同一器件在不同应力环境下的失效状况也不同。所以, 观察盲元的类型和分布对于确定器件的失效位置至关重要。如图 2 所示, 在实际测试中, 经高温烘烤后的盲元分布类型大致分为中心集中型、四周型、裂片和混合型。

3 InSb 芯片的像元损伤

以探测器制作的完成时间为分界点, 盲元可划分为初始盲元和使用盲元两种^[6-7]。其中, 初始盲元一般是由器件本身原因造成的, 如材

料使用、器件结构设计和制造工艺等; 使用盲元则是制作完成后在使用过程中所产生的盲元。理论上来说, 可靠性试验是模拟器件长期使用的可靠性情况, 因此在高温烘烤试验中产生的盲元属于使用盲元。

红外探测器在使用过程中会面临振动、温度冲击和辐照等环境, 尤其是制冷型红外器件, 其工作特性决定了它在使用过程中会不断地经历高低温冲击。与其他类型的封装结构相比, 制冷型红外器件更容易产生疲劳失效。

初始盲元的形成可细分成前道工艺和后道工艺两个阶段。探测器芯片和读出电路的倒焊互连是前后道工艺的分界点。在高温烘烤试验过程中产生的使用盲元可由初始盲元演变和扩大。这些均暴露了材料及器件工艺过程中隐藏的缺陷^[8]。图 3 为探测器芯片在高温烘烤试验前后的电平图。可以看出, 高温烘烤后的使用盲元大部分都分布在高温烘烤前的初始盲元附近。

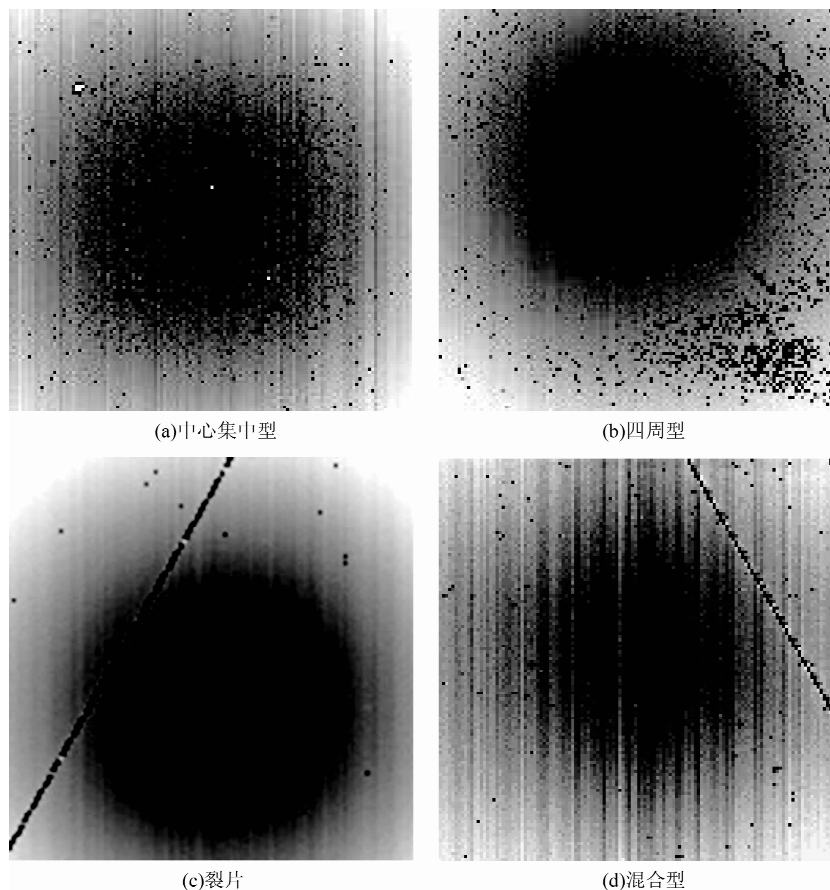


图 2 盲元的分布类型

从探测器的结构来看,芯片的像元损伤主要表现在三个部分,即探测器芯片、钢柱和硅读出电路。具体如下:其一,在探测器制作和生产过程中激发了材料或工艺缺陷,导致钝化层脱落且界面态发生变化,使暗电流变大、光响应异常,引起器件单元损伤,最终造成器件像元失效;其二,钢柱高度的不一致以及材料的不平整因素导致倒焊连通率降低,高低温循环、高温烘烤以及辐照等应力环境会激发钢柱缺陷,引起钢柱接触不良、粘连等现象,造成像元损伤;其三,过压及高低温冲击等应力可能会使电路模块遭到破坏,引起输出信号严重变形,最终导致像元无效。

4 InSb 探测器结构的热应力分析

探测器芯片的像元损伤几乎都与温度相关,而分析 InSb 器件结构的热应力也对研究

探测器失效现象十分有效。对于 InSb 探测器而言,其结构主要包括 InSb 芯片、钢柱互连区和硅读出电路等。在低温工作状态下,由于各层的热膨胀系数不同,InSb 芯片和钢柱之间会因产生应力而发生热失配^[9]。在应力作用下,芯片极有可能裂片,如图 2(c)所示。同时,在温度的作用下,应力的剧烈变化会使探测器阵列变形,钢柱也会产生侧向形变。因此,在数百次的温度循环过程中,钢柱会因反复形变而断裂,导致器件盲元增加、性能变差甚至完全失效。

因此,利用有限元软件对 InSb 探测器结构进行仿真,有助于分析器件结构的受力情况。图 4 为仿真结构的示意图。建立 InSb 红外焦平面探测器的应力仿真模型。该模型包括 128×128 (中心间距为 $50 \mu\text{m}$) InSb 芯片、钢柱、硅读出电路三个部分。表 1 和表 2 分别列出了模型尺寸数据和仿真使用的材料参数(工作温度设定为 70 K)^[10]。

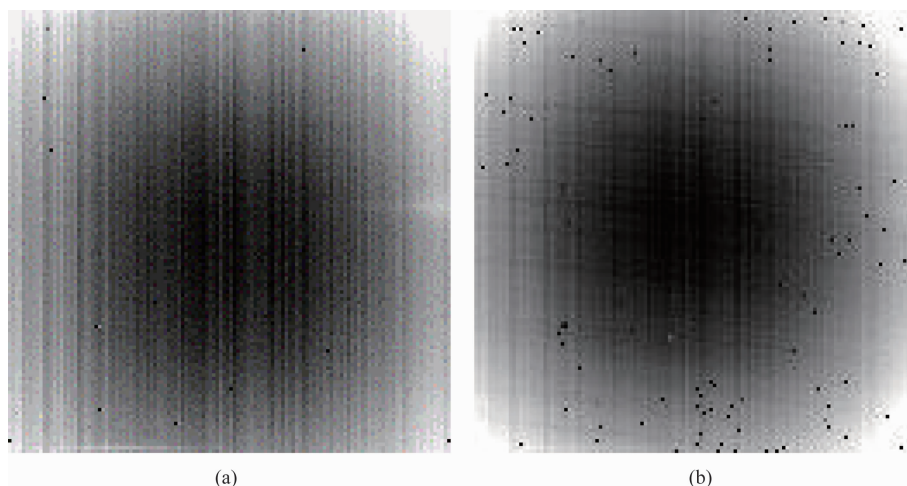


图 3 探测器芯片电平图:(a)高温烘烤前;(b)高温烘烤后

表 1 模型尺寸

名称	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm
InSb 芯片	7	7	0.015
In 柱	7	7	0.01
Si 读出电路	10	10	0.6

表 2 仿真模型的材料参数^[10]

名称	泊松比	杨氏模量/GPa	热膨胀系数/ 10^{-6} K^{-1}
InSb 芯片	0.35	409	5.04
In 柱	0.45	10.6	33
Si 读出电路	0.28	163	2.50

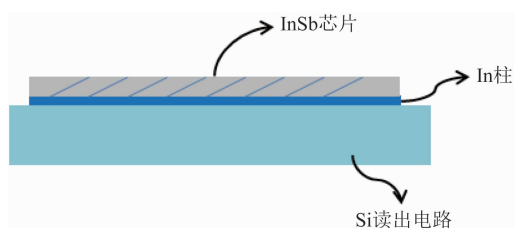


图 4 仿真结构示意图

使用有限元分析软件对 InSb 器件进行了模拟(结果见图 5)。从图中可以直观看出,在此模型下芯片中心位置受力较大,其值在 680 MPa 左右,这与 InSb 探测器中心位置易发生疲劳失效现象相吻合。芯片形变情况为边缘形

变量比中心位置大。边缘的形变量大有效缓解了应力的作用,因此盲元和裂纹几乎分布在芯片中心区域。在实际制作过程中,InSb 芯片受工艺影响可能存在材料损伤、缺陷等,甚至在芯片内部有微小裂纹。而且,在背减薄工艺后,芯片的厚度极薄,短时间内受到大幅度应力改变会引起晶体收缩不均,导致晶体微小裂纹附近出现应力集中等现象。应力突然增加会导致部分区域发生滑移,从而产生位错。位错决定裂纹的扩展行径,最终导致芯片碎裂^[11-13]。

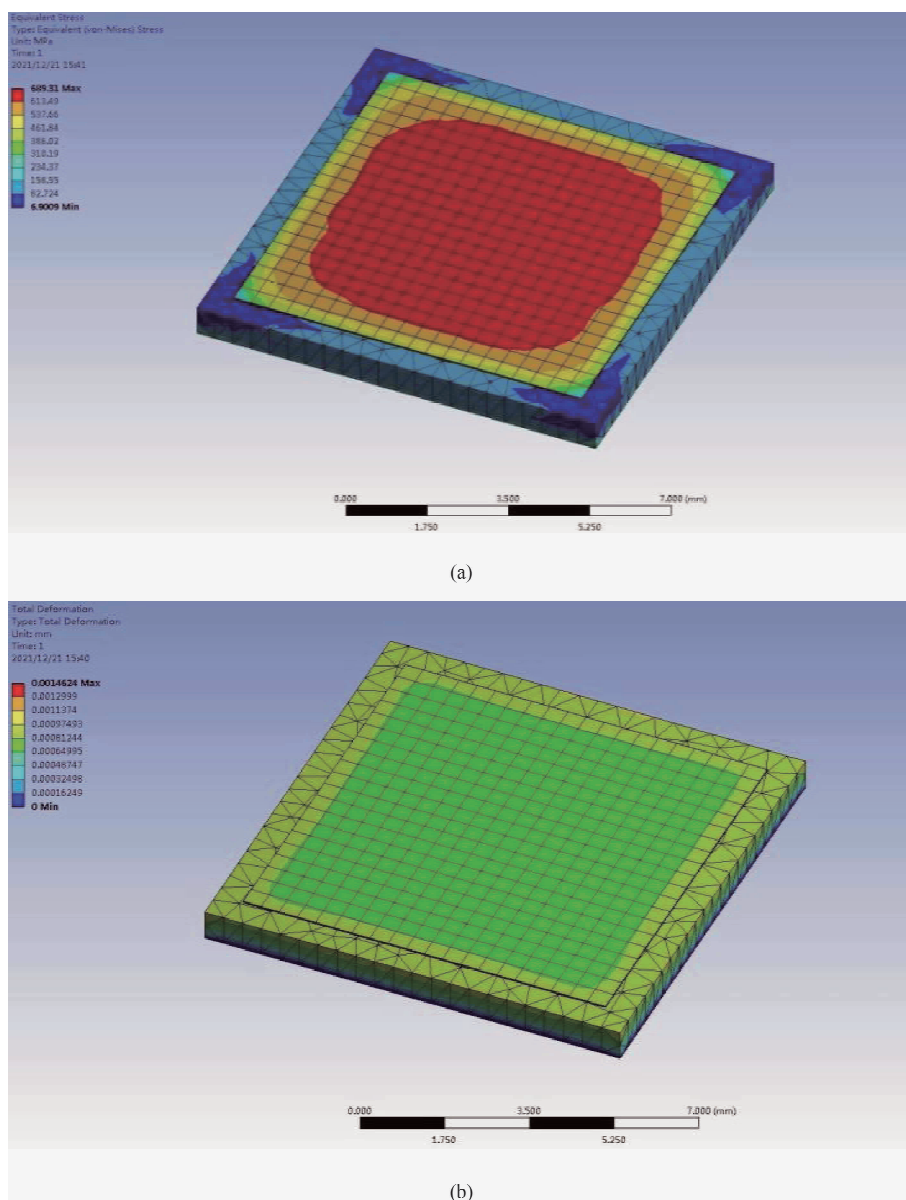


图 5 模拟结果: (a) InSb 探测器结构的应力情况; (b) InSb 探测器结构的形变情况

5 结束语

InSb 红外焦平面探测器工作时需要将温度从室温降到液氮温度。在此温度冲击过程中,芯片常出现疲劳失效现象,具体表现为盲元增多、出现裂纹甚至芯片碎裂。本文以芯片加速寿命试验模型作为切入点,引入芯片高温烘烤试验所需的条件,在高温可靠性试验的基础上,对 InSb 红外探测器芯片失效的原因进行了探究,并通过分析像元损伤情况总结出了像元损伤的可能原因。利用有限元分析软件对 InSb 探测器结构应力进行了分析,进一步明确了芯片碎裂的机理,提供了 InSb 探测器结构优化设计的思路,对实际工艺起到了一定的指导意义。根据热应力的仿真结果合理调整结构参数以缓解探测器芯片失效的现象,是下一步工作的重点。

参考文献

- [1] 王剑,翁雷,张慧. 基于加速环境的可靠性指标验证试验 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2010, **28**(4): 6-10.
- [2] 赵建印,刘芳. 产品加速退化失效模型与统计分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, **40**(12): 2088-2090.
- [3] 郭春生,谢雪松,马卫东,等. 加速试验中失效机理一致性的判别方法 [J]. 半导体学报, 2006, **27**(3): 560-563.
- [4] 陈宝国,樊养余,王巍. 红外焦平面阵列盲元判据的相关性研究 [J]. 激光与红外, 2013, **43**(2): 186-189.
- [5] 吴松,吕晶晶,李小康. 可靠性加速寿命试验综述 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, **39**(1): 94-100.
- [6] 郝立超,黄爱波,赖灿雄,等. 盲元作为红外焦平面可靠性分析手段的探讨 [J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(5): 0504004.
- [7] 王巍,樊养余,司俊杰,等. 红外焦平面阵列盲元的电平判别法 [J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(12): 3173-3175.
- [8] 周慧鑫,殷世民,刘上乾,等. 红外焦平面器件盲元检测及补偿算法 [J]. 光子学报, 2004, **33**(5): 598-600.
- [9] 陈星,何凯,王建新,等. 碲镉汞线列红外探测器模块温度循环的可靠性 [J]. 红外与毫米波学报, 2014, **33**(4): 369-374.
- [10] 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.
- [11] 钱才富,李慧芳,崔文勇. I 型裂纹尖端塑性区和无位错区及其对裂纹扩展的影响 [J]. 材料研究学报, 2007, **21**(6): 599-603.
- [12] 张丽娜,吴学仁,刘建中. 恒幅和单峰超载疲劳裂纹尖端区域残余应力场的数值模拟 [J]. 机械强度, 2011, **33**(5): 735-738.
- [13] 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): 111-116.