

InSb红外焦平面阵列探测器局部分层失效机理研究

张江凤 田笑含 张晓玲 孟庆端

Research on local delamination failure mechanism of InSb infrared focal plane arrays detector

Zhang Jiangfeng, Tian Xiaohan, Zhang Xiaoling, Meng Qingduan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210133>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

数字化中波红外焦平面探测器组件研究进展

Review of digital mid-wave infrared focal plane array detector assembly

红外与激光工程. 2017, 46(1): 102003–0102003(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0102003>

共用桥腿式高性能非制冷红外焦平面探测器研究

Research of high-performance uncooled infrared focal plane array detector with common-leg structure

红外与激光工程. 2021, 50(3): 20200330–1–20200330–7 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200330>

中波碲镉汞红外偏振焦平面探测器的制备研究 (特邀)

Preparation of medium wave mercury cadmium telluride infrared polarization focal plane detector (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(1): 20211008–1–20211008–5 <https://doi.org/10.3788/IRLA20211008>

短波红外InGaAs焦平面探测器研究进展

Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors

红外与激光工程. 2020, 49(1): 0103006–0103006(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0103006>

64 × 64 InGaAs/InP三维成像激光焦平面探测器

64 × 64 InGaAs/InP 3D imaging laser focal plane detector

红外与激光工程. 2018, 47(8): 806004–0806004(5) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0806004>

InAs/GaSb二类超晶格中/短波双色红外焦平面探测器

Mid-/short-wavelength dual-color infrared focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattice

红外与激光工程. 2019, 48(11): 1104001–1104001(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1104001>

InSb 红外焦平面列阵探测器局部分层失效机理研究

张江风¹, 田笑含¹, 张晓玲², 孟庆端¹

(1. 河南科技大学 电气工程学院, 河南 洛阳 471023;
2. 河南科技大学 软件学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 批量生产中, 铟化镉红外焦平面列阵探测器 (InSb IRFPAs) 局部分层失效现象已成为制约其成品率提升的瓶颈。为探究 InSb IRFPAs 局部分层诱因, 借助内聚力模型, 在 InSb 芯片与底充胶的界面处铺满内聚力单元, 优选内聚力模型参数, 建立 InSb IRFPAs 局部失效分析二维模型。模拟结果得到了实测局部分层分布特征的证实, 即: (1) 局部分层大多出现在芯片周边区域, 涵盖一定宽度; (2) InSb 芯片与底充胶之间的界面局部脱开后, 逐渐向两侧扩展。为剖析局部分层诱因, 系统分析了张开型与滑开型裂纹扩展共同作用下混合模态比取不同值时局部分层分布特征的演化规律, 认为当张开型和滑开型裂纹扩展的混合比取 4:6 时, 模拟结果与实测结果高度吻合。至此笔者认为 InSb IRFPAs 局部分层源于界面法向应力与面内剪切应力的共同作用, 属于典型的混合型局部分层模式, 其中滑开型局部分层模式占主导。

关键词: 铟化镉红外焦平面列阵探测器; 内聚力模型; 局部分层; 混合模态比

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210133

Research on local delamination failure mechanism of InSb infrared focal plane arrays detector

Zhang Jiangfeng¹, Tian Xiaohan¹, Zhang Xiaoling², Meng Qingduan¹

(1. School of Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2. School of Software, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: Local delamination failure phenomena of indium antimonide infrared focal plane detectors (InSb IRFPAs) in their mass production have become a bottleneck restricting the improvement of their final yield. In order to determine the inducement of local delamination in InSb IRFPAs, the interface between the InSb chip and the underlying underfill with cohesion units was covered, and the specified parameters in cohesion model were optimized, finally the two-dimensional model of local delamination failure analysis of InSb IRFPAs was established. Simulation results are verified by the measured distribution characteristics of local delaminations, that is, (1) Most local delamination appears in the surrounding edges of InSb chip, and occupies a certain width; (2) Once the InSb chip is separated from the underlying underfill in the normal direction, the local delamination will expand gradually toward its both sides of the plane. In order to clarify the inducement of the local delamination,

收稿日期:2021-03-04; 修订日期:2021-05-14

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金 (61505048); 河南省高等学校重点科研项目 (19A510012); 河南省自然科学基金项目 (202300410157)

作者简介:张江风,男,硕士生,主要从事红外焦平面探测器可靠性方面的研究。

导师简介:孟庆端,男,教授,硕士生导师,博士,主要从事红外焦平面探测器结构可靠性方面的研究。

the evolution rule of the local delamination with different mixed-mode ratios is systematically analyzed under the jointed action of both the opening mode and sliding mode. The simulation results are highly consistent with the measured results when the mixed-mode ratio between the opening mode and the sliding mode is set to 4: 6. The local delamination of the InSb IRFPAs are ascribed to the jointed action of both the interfacial normal stress and the in-plane shear stress, is the typical mixed-mode local delamination mode, furthermore, the sliding local delamination mode is dominant.

Key words: InSb IRFPAs; cohesive zone model(CZM); local delamination; mixed-mode ratios

0 引 言

红外焦平面阵列探测器 (Infrared Focal Plane Arrays Detector, IRFPAs) 具有灵敏度高、环境适应性好、抗干扰能力强、质量轻、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、医学及通信领域^[1-4]。在中波红外探测领域, 铋化钢 (InSb)IRFPAs 因具有材料均匀性好、时间稳定度高的优点, 备受科研人员的关注。批量生产中, 液氮冲击下 InSb IRFPAs 经常出现的局部分层、局部碎裂等失效现象已成为制约其成品率提升的瓶颈, 因此探究 InSb IRFPAs 局部分层失效机理成为目前迫切需要解决的问题。

针对 InSb IRFPAs 的局部分层失效问题, 贵磊等^[5-6]在局部分层易发生区域添加内聚力单元, 基于张开型内聚力模型对局部分层进行分析, 认为界面法向应力是引起局部分层的主要原因; 孟庆端等^[7]以面内剪切应力分布为判据, 认为局部分层源于面内剪切应力。这些研究能够部分解释局部分层失效现象, 但仅在易分层处添加内聚力单元的做法, 人为的因素过

重, 缺乏合理性及普适性; 仅考虑面内剪切应力而忽略面外法向应力的做法也有失偏颇。为了更全面、更深入剖析局部分层失效诱因, 文中拟采用在 InSb 芯片与底充胶的界面处铺满内聚力单元, 同时考虑界面法向应力, 通过改变张开型和滑开型裂纹扩展模式的比例, 系统分析局部分层分布特征随裂纹扩展混合比例的演化规律, 对比实测局部分层分布特征, 定量给出器件局部分层失效诱因和失效机理。

1 双线性内聚力模型

在线弹性断裂力学中, 根据驱动力与裂纹扩展之间的内在关系可将裂纹划分为张开型裂纹、滑开型裂纹和撕开型裂纹, 如图 1 所示。其中张开型裂纹扩展的特征为: 拉应力垂直于裂纹面, 裂纹扩展方向和拉应力垂直; 滑开型裂纹扩展的特征为: 剪应力位于裂纹面内, 并与裂纹扩展方向平行; 撕开型裂纹扩展的特征为: 剪应力位于裂纹面内, 并与裂纹扩展方向垂直。在因热失配引起的层状结构局部失效中, 不会出现撕开型裂纹扩展模式, 因此在文中只考虑张开型和滑开型裂纹扩展模式。

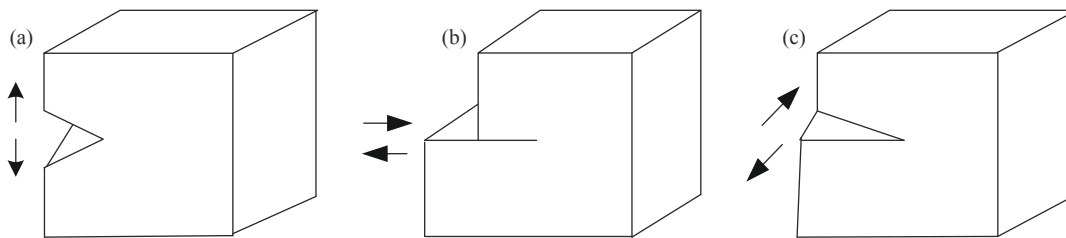


图 1 三种典型裂纹扩展模式示意图。(a) I 型裂纹 (张开型); (b) II 型裂纹 (滑开型); (c) III 型裂纹 (撕开型)

Fig.1 Schematic diagram of three typical crack expanding mode. (a) Mode I crack(opening mode); (b) Mode II crack(sliding mode); (c) Mode III crack(tearing type)

在描述裂纹的萌生与扩展时, 以计算精度和成本为判据, 通常认为双线性模型在众多本构关系模型中

性能最佳, 故文中采用由 Aifanoh 和 Crisfield^[8]建立的双线性牵引-分离内聚力模型。这里以张开型裂纹

扩展为例介绍内聚力模型的参数设置,模型中运用的牵引-分离法则如图 2 所示:右下角的横坐标代表界面在法向拉应力作用下发生的分离量 δ , 纵坐标表示界面法向拉应力 σ 。当界面法向拉应力从 0 增加到 σ_{\max} 的过程中, 界面之间的位移线性增加而不发生分

层, 法向拉应力一旦越过 σ_{\max} , 开始萌生界面局部分层, 局部分层萌生后施加于界面上的法向拉应力则线性降低, 当界面法向拉应力从 σ_{\max} 减小到 0 时, 界面完全脱开, 界面分层完成, 此时对应的界面间距为 δ_n 。

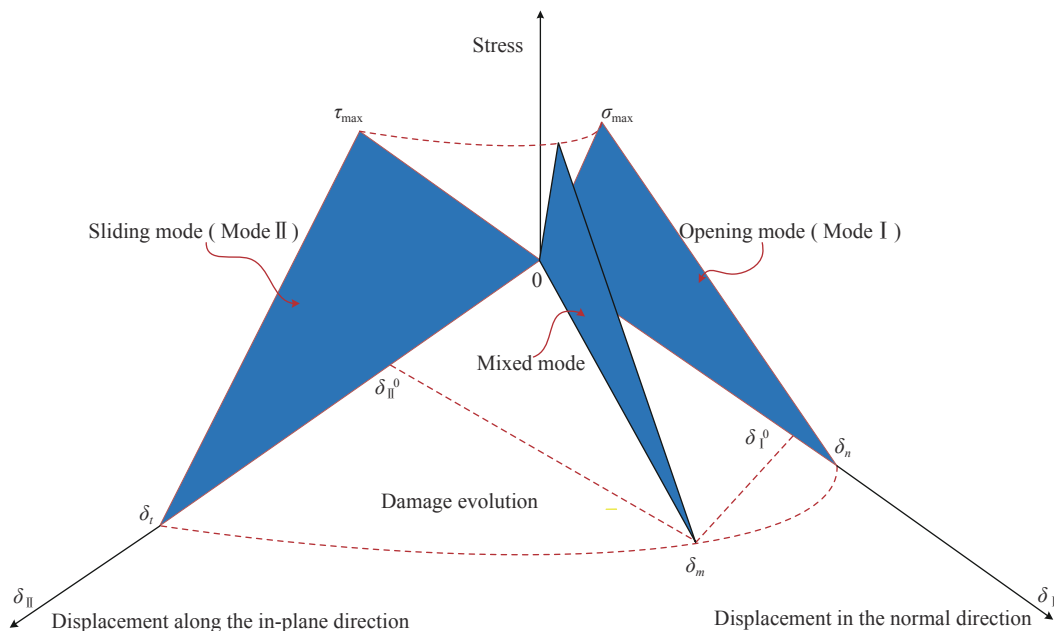


图 2 双线性内聚力模型牵引分离法则示意图

Fig.2 Diagram of bilinear traction-separation rule of cohesive zone modeling

在双线性内聚力模型中, 张开型模式下的 σ_{\max} 和 δ_n 与滑开型模式下的 τ_{\max} 和 δ_t 是内聚力模型设置的重要参数。文中着重研究 InSb 芯片和底充胶 (Underfill) 之间的界面脱粘开裂过程, 故而内聚力模型中参数的设置由界面断裂能决定。Xu 等^[9]对复合材料结构粘接破坏的统一内聚力模型及其参数识别进行研究, 实验测得双线性内聚力模型下界面断裂能为 0.873 N/mm。周清春等^[10]对衬底界面粘接力学特性进行研究, 实验测得胶粘剂与衬底之间 I 型界面断裂能普遍在 0.9 N/mm。Guo 等^[11]通过实验测得胶粘剂与粘接界面之间 I 型和 II 型断裂能分别为 0.3 N/mm 和 0.6 N/mm。Bellali 等^[12]通过内聚力模型和有限元分析法预测复合材料对铝缺口增强板损伤的补偿特性, 测得用胶粘剂 AV138 粘接界面时的 I 型和 II 型断裂能分别为 0.2 N/mm 和 0.38 N/mm。在上述粘接结构脱粘开裂的研究中, I 型和 II 型断裂能值普遍分布在 0.1~1 N/mm, 故而笔者选取 Underfill

与 InSb 芯片脱粘时 I 型和 II 型断裂能应介于 0.1~1 N/mm 之间。在研究胶粘剂与衬底之间的分层实验中, 测得的分层位移大多在毫米量级, 故此文中选取 1 mm 作为 Underfill 与 InSb 芯片脱粘时的临界位移分离量。

考虑到器件局部分层主要发生在界面处, 张开型和滑开型裂纹扩展混合模态比可从纯滑开型 (0:10) 演变到纯张开型 (10:0)。当张开型和滑开型混合模态比设置为 4:6 时, 模拟结果与实测结果高度吻合。此时设置的张开型与滑开型界面断裂能分别为 0.292 N/mm 和 0.441 N/mm, 对应的法向粘接力 and 切向粘接力分别为 882.6 kPa 和 583.5 kPa。笔者注意到 Chen 等^[13]在研究 Underfill 材料对倒装焊结构可靠性影响时, 测得的 Underfill 与芯片之间的界面粘接强度普遍介于 122~851 kPa 之间, 这间接证实了文中参数选取的合理性。内聚力参数的选取如表 1 所示。

表 1 不同混合模态比下的内聚力模型参数设置

Tab.1 Parameter setting of cohesive zone modeling under different mixed-mode ratios

Mixed-mode ratios, ω	Normal cohesive traction	Normal displacement jump	Tangential cohesive traction	Tangential displacement jump
	σ^0/kPa	δ_I^0/mm	τ^0/kPa	δ_{II}^0/mm
9 : 1	116.7	1	1050	1
8 : 2	257.2	1	1029	1
7 : 3	414	1	975	1
6 : 4	583.5	1	882.6	1
5 : 5	750	1	750	1
4 : 6	882.6	1	583.5	1
3 : 7	975	1	414	1
2 : 8	1029	1	257.2	1
1 : 9	1050	1	116.7	1

2 模型建立及载荷加载

InSb IRFPAs 通常由三层材料堆叠而成, 采用倒装技术将最上面的 InSb 光敏元芯片与最下面的 Silicon ROIC(Readout Integrated Circuits) 通过钢柱阵列进行互连, 钢柱阵列和 Underfill 相间排列构成中间层, 这里 Underfill 呈网状结构环绕着钢柱阵列。在钢柱阵列和 Underfill 的相间排列区域, 钢柱阵列的体积通常不超过整个中间层体积的 16%, 在局部分层易发生区域, 钢柱更少。为便于分析, 文中暂且忽略钢柱对局部分层的影响。考虑到 InSb IRFPAs 结构的对称性, 选取整个探测器结构的 1/2 进行建模。在建立的

模型^[14-15]中, InSb 芯片、Underfill、和 Silicon ROIC 的厚度分别为 10 μm , 10 μm 和 300 μm , 其中 Underfill 边缘部分的厚度为 20 μm , 呈 fillet 结构包围着 InSb 芯片, 这源于器件加工过程中的底充胶填充固化后, 通常包围着 InSb 芯片的缘故。模型中 InSb 芯片、固化后的 Underfill 和 Silicon ROIC 都视为线弹性材料, 其具体材料参数如表 2 所示。网格单元采用 PLANE182, 在 InSb 芯片与 Underfill 的界面处全部覆盖上接触单元 CONTA172, 目标单元选用 TARGE169, 接触算法设置为增强拉格朗日算法, 接触模式为 Bonded (多数), 用于实现界面分层。二维结构模型示意如图 3 所示。

表 2 InSb IRFPAs 的相关材料参数

Tab.2 Related material parameters of InSb IRFPAs

Materials	Elastic modulus, E/GPa	Poisson's ratio, μ	Temperatures, T/K
InSb chip	409(in plane)123(out of plane)	0.35	77-300
Underfill	0.0002/ α	0.30	77-300
Silicon ROIC	163	0.28	77-300

$\alpha = 22.46 \times 10^{-6} + 5.04 \times 10^{-8} \times (T-273)$, K 是开式温度单位



图 3 InSb 红外焦平面阵列探测器的二维有限元模型

Fig.3 Two-dimensional finite element model for InSb IRFPAs

3 模拟结果分析与讨论

历经液氮冲击后, 模拟得到的探测器的位移分布

见图 4 中的左上半部分所示。显然, 在 InSb 芯片与 Underfill 的界面处出现了局部分层, 局部分层临近器件边缘区域。为明晰局部分层的演化过程, 提取了 300 K、200 K、100 K 和 77 K 时模拟得到局部分层分布结果, 如图 4 的右半部分所示。在液氮冲击前, 对应的温度为 300 K, InSb 芯片与 Underfill 粘合在一起; 伴随着器件温度的不断降低, 局部分层开始萌生并不断扩展, 当温度 $T=200$ K 时, InSb 芯片与 Underfill

之间沿法线方向呈分离状态, 面间最大分离距离为 0.04 μm , 界面分层涵盖的归一化坐标范围为 0.872~0.944; 当温度 $T=100\text{ K}$ 时, InSb 芯片沿法向方向高高隆起, 局部分层呈现出进一步向两侧扩展的态势, 面

间最大分离距离为 0.08 μm , 界面分层涵盖的归一化坐标范围为 0.855~0.933; 当温度降到 77 K 时, InSb 芯片与 Underfill 之间局部分层更加明显。在整个降温过程中, Underfill 上表面始终保持在相对平整的状态。

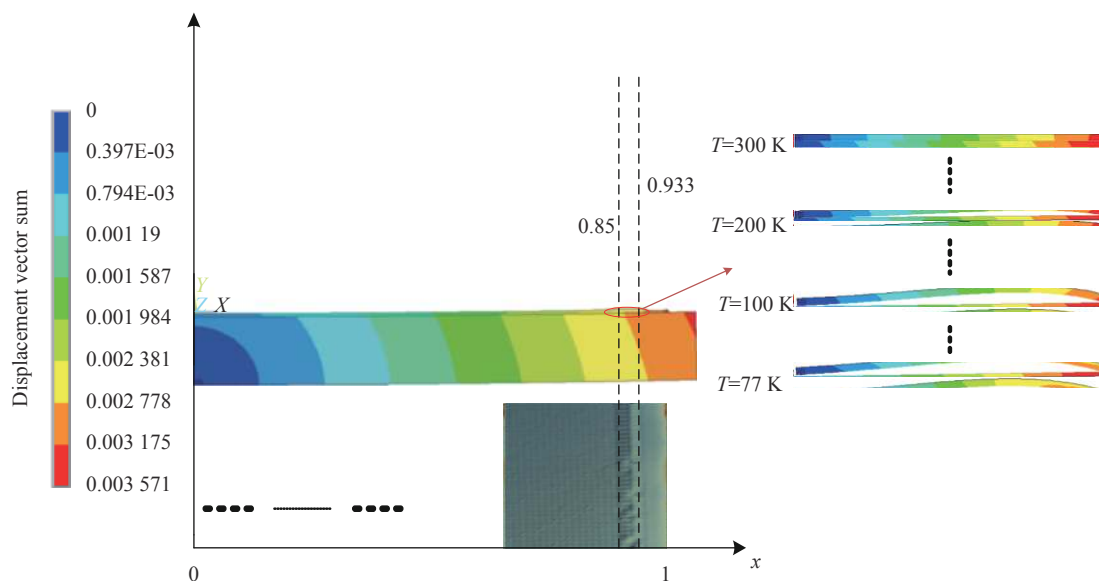


图 4 液氮冲击后, InSb IRFPAs 探测器位移矢量和模拟结果与实测照片对比图

Fig.4 Simulated results for displacement vector sum vs. the measured photograph of InSb IRFPAs detector after the liquid nitrogen shock

为明确 IRFPAs 局部分层失效机理, 笔者将 InSb IRFPAs 分层模拟结果与实测局部分层照片分别进行归一化处理, 见图 4 的左下半部分。对于实测局部分层照片, 以钢柱位置为参考, 结合器件加工光刻版图, 认为实测局部分层涵盖范围对应于从器件中心点起始的第 64 个钢柱至第 68 个钢柱之间的区间, 归一化坐标区间为 0.853 ~ 0.933。对于模拟结果而言, 局部分层范围的确认是以发生局部分层的节点进行判断的, 归一化坐标区间为 0.85 ~ 0.933。显然, 模拟结果与典型实测局部分层涵盖范围基本一致, 证实了 InSb IRFPAs 局部分层应该属于张开型和滑开型共生的混合型局部分层失效的设想。

4 混合模态分析研究

工程实际中界面分层通常既包含张开型裂纹扩展模式, 也包含滑开型裂纹扩展模式。在这两种模式共同作用下, 界面断裂能量 G 是张开型裂纹扩展断裂能 G_n 和滑开型裂纹扩展断裂能 G_t 的和, 其中 G_n 和 G_t 分别用下式描述:

$$G = G_n + G_t \quad (1)$$

$$G_n = \int_0^{\delta_n^0} \sigma d\delta \quad (2)$$

$$G_t = \int_0^{\delta_t^0} \tau d\delta \quad (3)$$

对于混合型分层模式, 法向应力和切向应力均对界面断裂能量 G 有贡献, 在 G_n 和 G_t 分别达到各自的临界断裂能 G_{cn} 和 G_{ct} 之前就可以实现界面分层, 这可采用基于幂次律的能量准则^[16]来定义局部分层过程:

$$\left(\frac{G_n}{G_{cn}}\right)^2 + \left(\frac{G_t}{G_{ct}}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

其中

$$G_{cn} = \frac{1}{2} \sigma_{\max} \delta_n, G_{ct} = \frac{1}{2} \tau_{\max} \delta_t \quad (5)$$

由公式 (1)~(4) 可知, 混合模态在张开型和滑开型裂纹扩展模式之间以椭圆形式平稳地变化, 由此可得张开型和滑开型裂纹之间的扩展权重, 即混合模态比 ω 可定义如下:

$$\omega = \frac{G_t}{G_n} = \frac{\tau^0 \delta_{II}^0}{\sigma^0 \delta_I^0} \quad (6)$$

式中： σ^0 、 τ^0 分别为混合模式下系统达到界面分层时的法向粘接力 and 切向粘接力； δ_I^0 、 δ_{II}^0 分别为混合模式下系统达到界面分层时的法向位移分离量和切向位移分离量。

为了更全面地剖析局部分层诱因，明晰张开型和滑开型裂纹扩展权重对 InSb IRFPAs 局部分层分布特征的影响，笔者在内聚力模型中调整混合模态比例，系统研究张开型与滑开型裂纹扩展权重的比例取不同值时，局部分层涵盖范围的变化规律。

混合模态比取不同值时局部分层涵盖范围的模拟结果如图 5 所示。当张开型和滑开型裂纹扩展权重比从 9:1 依次调整到 4:6 的过程中，局部分层的左边缘坐标由 0.733 逐渐增加到 0.85，局部分层的右边缘坐标从 0.872 逐渐增加到 0.933；当混合模态比越过 4:6 时，局部分层左边缘坐标由 0.85 逐渐降低并趋于稳定到 0.839，局部分层右边缘坐标则一直稳定在 0.933 附近。

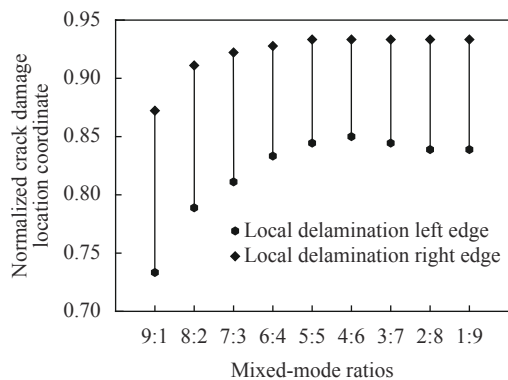


图 5 不同混合模态比下的局部分层位置

Fig.5 Local delamination position under different mixed-mode ratios

为便于对比，笔者提取了局部分层涵盖范围随混合模态比的演化趋势，如图 6 所示。当张开型和滑开型裂纹扩展权重比从 9:1 依次调整到 4:6 时，模拟得到的局部分层归一化坐标宽度近似线性减小；扩展权重比一旦越过 4:6，局部分层归一化坐标宽度则线性增加，最后稳定在 0.094 附近。当裂纹扩展权重比取 4:6 时，模拟得到的局部分层宽度和归一化坐标涵盖位置最接近实测照片中的局部分层宽度和分层位置，由此笔者断定 InSb IRFPAs 局部分层混合失效

模式中张开型和滑开型裂纹扩展的权重比为 4:6，其中滑开型裂纹扩展模式占主导，这与 Xiao^[17] 所做的结论基本一致，这进一步证实了文中所得结论的正确性。

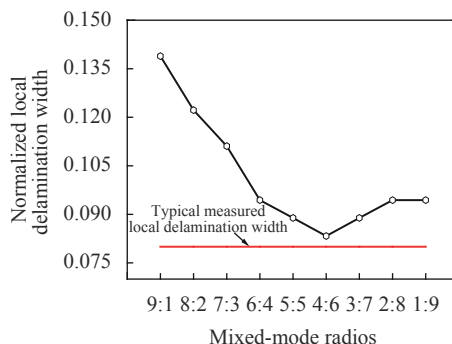


图 6 不同混合模态比下的局部分层涵盖宽度

Fig.6 Local delamination occupying width under different mixed-mode ratios

5 结 论

为了明晰 InSb IRFPAs 局部分层的失效诱因和机理，采用混合型内聚力模型，在接触面铺满内聚力单元，建立二维结构模型进行分析。认为当张开型和滑开型裂纹扩展的权重为 4:6 时，模拟得到的局部分层宽度和局部分层归一化坐标位置与典型实测局部分层照片完全一致，表明 InSb IRFPAs 的局部分层源于界面法向应力和面内剪切应力共同作用，属于典型的混合型局部分层模式，并且滑开型局部分层模式占主导。

参考文献：

- [1] Mou H S. Status and progress of InSb IRFPA detector [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(4): 394-399. (in Chinese)
- [2] Bhan R K, Dhar V. Recent infrared detector technologies, applications, trends and development of HgCdTe based cooled infrared focal plane arrays and their characterization [J]. *Opto-Electronics Review*, 2019, 27(2): 174-193.
- [3] Klipstein P, Aronov D, Ezra M B, et al. Recent progress in InSb based quantum detectors in Israel [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 59: 172-181.
- [4] Bai W. Development status of InSb infrared focal plane array detectors [J]. *Infrared*, 2019, 40(8): 1-14. (in Chinese)
- [5] Gui L, Meng Q D, Zhang L W, et al. Failure analysis of InSb infrared detector based on CZM [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(12): 1368-1371. (in Chinese)

- [6] Meng Q D, Lv Y Q, Lu Z X, et al. Stress in InSb infrared focal plane array detector analyzed with ANSYS [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(6): 431-434. (in Chinese)
- [7] Meng Q D, Zhang X L, Lv Y Q, et al. Local delamination of InSb IRFPAs in liquid nitrogen shock tests [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2017, 86: 207-211.
- [8] Alfano G, Crisfield M A. 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(7): 1701-1736.
- [9] Xu Y J, Guo Y Q, Lian L H, et al. A unified cohesive zone model for simulating adhesive failure of composite structures and its parameter identification [J]. *Composite Structures*, 2017, 182: 555-565.
- [10] Zhou Q C. Study on the adhesive mechanical properties of hydroxyl-terminated polybutadiene propellant/linear interface[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [11] Guo W, Chen P J, Yu L Y, et al. Numerical analysis of the strength and interfacial behavior of adhesively bonded joints with varying bondline thicknesses [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020, 98: 102553.
- [12] Bellali M A, Mokhtari M, Benzaama H, et al. Using CZM and XFEM to predict the damage to aluminum notched plates reinforced with a composite patch [J]. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2020, 15(2): 185-201.
- [13] Chen K M, Jiang D S, Kao N H, et al. Effects of underfill materials on the reliability of low-K flip-chip packaging [J]. *Microelectronics Reliability*, 2006, 46(1): 155-163.
- [14] Zhang X L, Meng Q D, Lv Y Q, et al. Assessment of InSb infrared detector arrays assembly procedure employing ANSYS [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51(4): 1-8.
- [15] Zhang L W, Meng Q D, Zhang X L, et al. Modeling and stress analysis of large format InSb focal plane arrays detector under thermal shock [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60: 29-34.
- [16] Camanho P P, Davila C G, De Moura M F. Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials [J]. *Journal of Composite Materials*, 2003, 37(16): 1415-1438.
- [17] Xiao Y Y, Shi W K, Han Z H, et al. Residual stress and its effect on failure in a DLC coating on a steel substrate with rough surfaces [J]. *Diamond & Related Materials*, 2016, 66: 23-35.