

# 基于内聚区模型的InSb面阵探测器分层研究\*

孟庆端<sup>1)†</sup> 贵磊<sup>1)</sup> 张晓玲<sup>2)</sup> 张立文<sup>1)</sup> 耿东峰<sup>3)</sup> 吕衍秋<sup>3)</sup>

1) (河南科技大学电气工程学院, 洛阳 471023)

2) (河南科技大学信息工程学院, 洛阳 471023)

3) (中国空空导弹研究院, 洛阳 471009)

(2014年1月19日收到; 2014年2月9日收到修改稿)

液氮冲击中InSb面阵探测器表面经常出现局部分层、开裂等失效模式. 为明晰材料分层、光敏元芯片断裂过程, 基于三维等效建模设想, 在易分层处添加内聚区模型, 合理选取界面分层开裂参数, 建立了128×128 InSb探测器结构分层模型. 模拟结果涵盖了典型碎裂照片中呈现的所有形变信息, 即1)在光敏元阵列区域, 复现出典型棋盘格屈曲模式; 2)在Negative电极区域上方, InSb芯片与下层材料逐渐分开, 且分层向两侧逐步扩展; 3)在面阵探测器周边区域, 表面起伏相对平整. 上述模拟结果证明了所建分层模型的正确性和参数选取的合理性, 为后续裂纹起源、传播过程的研究提供了模型基础.

**关键词:** 面阵探测器, 内聚区模型, 结构分层

**PACS:** 85.60.Gz, 61.50.Lt, 62.20.Mt

**DOI:** 10.7498/aps.63.118503

## 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<sup>[1-4]</sup>. 在单色探测领域, 碲化铟(indium antimonide, 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( $4k \times 4k$ )的红外探测器由美国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应用, 如弹道导弹防御系统<sup>[5]</sup>、红外成像制导导弹系统<sup>[6]</sup>和军用遥感卫星系统<sup>[7]</sup>. 造成这一局面的根本原因源于InSb面阵探测器的低温工作环境和特定层状结构. 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, Silicon ROIC)通过钢柱阵列互连混成, 之后在光敏元芯

片和Silicon ROIC的间隙中填入底充胶以提高钢柱焊点的可靠性. 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. 在液氮冲击过程中, 累积的热应力/应变在探测器的Negative电极附近极易引起局部分层、碎裂现象, 这严重制约着InSb面阵探测器的成品率, 成为批量生产中急需解决的问题. InSb面阵探测器碎裂后的典型照片如图1所示. 其形变特征为: 1)在光敏元阵列中心区域, 探测器表面呈现出典型棋盘格屈曲模式, 即凡是与钢柱阵列连接的InSb芯片均往上凸起, 凡是与底充胶连接的InSb芯片均往下凹陷; 2)在Negative电极上方区域, InSb芯片整体往上呈带状凸起, 分层现象明显, 并伴随有多条裂纹, 裂缝在Negative电极区域最宽; 3)在探测器周边区域, 探测器表面相对平整, 没有明显起伏.

在层状结构的分层研究中, 内聚区模型因能消除裂纹前沿的应力奇异点<sup>[8]</sup>, 被广泛用于模拟分层失效过程. 如梅海霞等<sup>[9]</sup>运用内聚区模型演示了硅薄膜/聚二甲硅氧烷衬底双层材料结构中因热失

\* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号:61107083, 61205090)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: qdmengly@163.com

配在硅薄膜中产生的褶皱、凸起成泡及分层失效过程; 还有一些研究组运用内聚区模型模拟异质材料界面内裂纹起源及扩展过程<sup>[10-12]</sup>. 为模拟 InSb 面阵探测器在液氮冲击中的局部分层现象, 理清发生在 InSb 面阵探测器中的局部分层、碎裂机理, 在本文中, 在易分层处引入双线性内聚区模型, 结

合前期提出的三维等效建模思想, 建立了 128×128 InSb 探测器结构分层模型, 模拟结果得到了典型碎裂照片及局部分层现象的支持, 这为接下来进一步研究面阵探测器中裂纹起源、裂纹传播提供了模型基础.

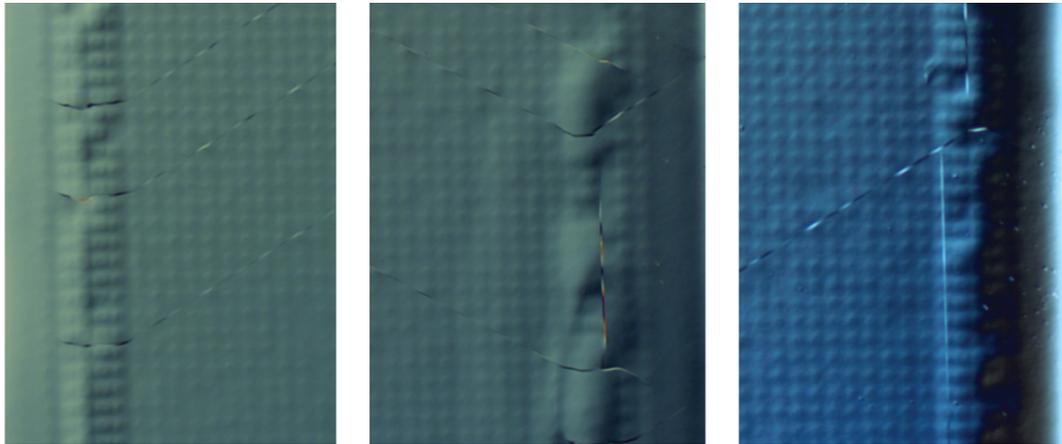


图1 历经液氮冲击后, 室温下拍摄的 InSb 面阵探测器典型碎裂照片

## 2 双线性内聚区模型及参数选取

在内聚区模型中, 通常把裂纹尖端定义为两个区域, 如图 2 所示, 区域 1 代表材料界面已完全分离, 内聚区域 O-A-B 是一个虚拟的裂纹扩展区域. 双线性内聚法则就是用图 2 (b) 所示的牵引力-分离位移双线性关系描述内聚区域内裂纹的扩展过程. 图中  $\sigma$  代表法线方向的牵引力,  $\sigma_{\max}$  为界面最大内聚强度,  $\delta$  表示材料界面分离位移量,  $\delta_c$  为界面完全分离时的临界分离位移量, O 点代表裂纹起源点. 在 O-A 段, 界面牵引力随分离位移的增加而线性增加, 当牵引力达到界面最大内聚强度  $\sigma_{\max}$  时, 界面分层开始自动扩展, 随之界面牵引力线性减小, 当界面分离位移达到临界分离位移  $\delta_c$  时, 界面

分层结束, 界面牵引力亦降至零.

内聚区模型中, 最大内聚强度  $\sigma_{\max}$  和临界分离位移量  $\delta_c$  是双线性内聚区模型中描述分层扩展状态的两个重要参数. Shet 等<sup>[8]</sup> 认为异质界面完全分离的临界值在  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  m 之间, Xu<sup>[13]</sup> 和 Han<sup>[14]</sup> 等在内聚区模型中设定的临界分离位移  $\delta_c$  分别为 36  $\mu\text{m}$  和 0.1  $\mu\text{m}$ ; 考虑到 InSb 面阵探测器中 InSb 芯片的厚度在 10  $\mu\text{m}$  左右, 在本文中, 我们设定 InSb 芯片与 Negative 电极之间的临界分离位移取 1  $\mu\text{m}$ , 这也是面阵探测器结构中隔离槽的典型深度值. Shet 等<sup>[8]</sup> 给出的金属-陶瓷界面的分层失效内聚强度值为数百兆帕, 本文选取 500 MPa 作为 InSb 芯片与 Negative 电极之间的最大内聚强度, 这一取值为界面两边材料最大杨氏模量的 4/1000—6/1000.

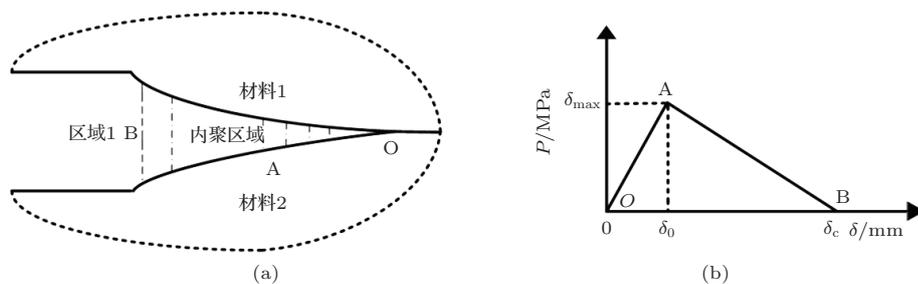


图2 (a) 裂纹尖端的微观结构示意图; (b) 双线性内聚区模型示意图

### 3 模型建立和载荷施加

InSb 面阵探测器通常由三层结构组成, 包括最上层的 InSb 光敏元芯片、最下层的 Silicon ROIC 和位于二者之间的钢柱阵列和底充胶, 这里底充胶和钢柱阵列相间排布, 底充胶呈网状分布. Negative 电极位于光敏元阵列四围, 具体分布如图 3(a) 和 (b) 所示. 在 InSb 面阵探测器中, 光敏元阵列通常采用台面结构, 光敏元隔离槽的引入使得面阵探测器的特征尺寸涵盖微米到毫米量级, 这在网格划分时将会引入众多结构单元, 导致求解困难. 为解决大面阵模型中因单元数众多无法求解的问题, 孟庆端等人基于等效设想, 利用小面阵等效大面阵建立起了适用于  $128 \times 128$  InSb 探测器的结构分析模型. 模型中以  $32 \times 32$  小面阵为原型, 通过人为增加相邻材料间线膨胀系数之差的方式, 用小面阵等效大面阵, 总体上使得二者产生的热失配位移在等效前后保持不变, 详细理论在文献 [15, 16] 已有具体描述. 考虑到面阵探测器的对称性, 通常仅选取整个探测器结构的  $1/8$  进行建模, 在对称面处施加面对称约束, 通过结构拓扑可显示整个模型的形变结果. 在模型中, InSb 芯片、底充胶、Negative 电极和 Silicon ROIC 的厚度分别为  $10 \mu\text{m}$ ,  $10 \mu\text{m}$ ,  $8 \mu\text{m}$  和  $300 \mu\text{m}$ . 钢柱选用黏塑性单元 VISCO107, 用于描述其在液氮冲击中的黏塑性行为. 其余材料在液氮冲击过程中主要呈现出温度相关线弹性特征, 模型中选用 SOLID95 单元. 网格划分时, 采用自由网格划分方法, 在 Negative 电极区域附近进行网格加密. 在 InSb 芯片与 Negative 电极界面处, 内聚区单元选用零厚度的 INTERFACE204 单元, 分层模型中共有 15672 个内聚区单元, 用于显示材料分层及扩展过程.

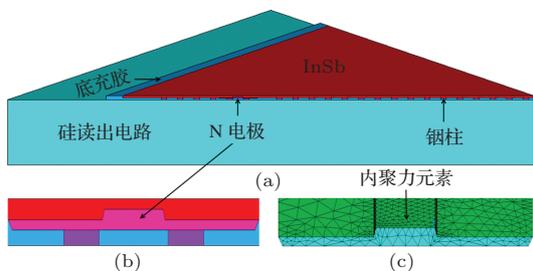


图 3 (a)  $128 \times 128$  面阵探测器结构等效模型; (b) Negative 电极区域放大示意图; (c) 加入内聚区单元后 InSb 芯片和 Negative 电极界面示意图

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. 为准确反映液氮冲击下 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 Silicon ROIC 和 Negative 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, 具体数值在文献 [15, 16] 已有详细描述.

载荷施加包括约束载荷及激励载荷的施加. 约束载荷: 对称面处施加面对称约束, 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, 之后自然冷却到室温, 填入底充胶, 升温固化后降至室温, 历时 10 min. 随后快速降温到液氮温度 77 K, 历时 10 s. 之后在 77 K 保温 20 min, 保温结束后, 自然升至室温, 氮气吹干, 拍摄表面形貌. 求解过程采用瞬态分析的方法, 载荷步采用斜坡加载方式. 温度激励载荷的时间历程如图 4 所示.

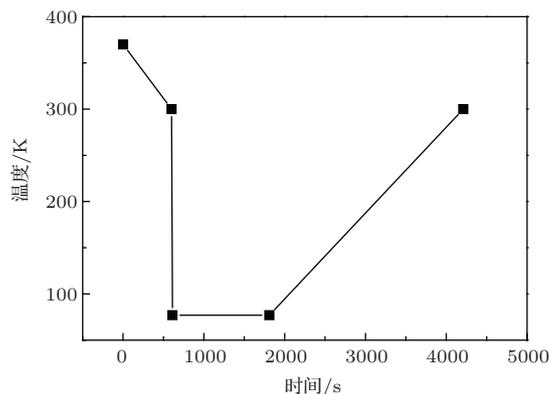


图 4 探测器温度载荷加载历程

### 4 模拟结果与分析

液氮冲击结束后, 模拟得到的 InSb 面阵探测器法线方向应变分布如图 5 所示. 1) 显然凡是与钢柱阵列连接处的 InSb 芯片均往下伸长, 凡是与底充胶连接处的 InSb 芯片均略微缩短, 二者面积大致相当, 呈二维周期性分布; 2) 四周区域 InSb 芯片相对平坦. 3) Negative 电极区域, InSb 芯片往上呈带状凸起, Negative 电极附近局部剖面呈对称的钟形分布, 这意味着液氮冲击过程中在 Negative 电极附近确实发生了局部分层. 这也说明分层模型中有关内聚区模型中参数选取的合理性. 和液氮冲击后

室温拍摄的InSb面阵探测器表面形貌分布特征相比, 77 K下模拟得到的法线方向形变分布在探测器四周区域完全符合, 在Negative电极区域也基本符合. 二者最大的差别在于InSb芯片的形变方向与典型碎裂照片中呈现的形变方向完全相反, 这在InSb芯片与钢柱阵列连接处尤为明显.

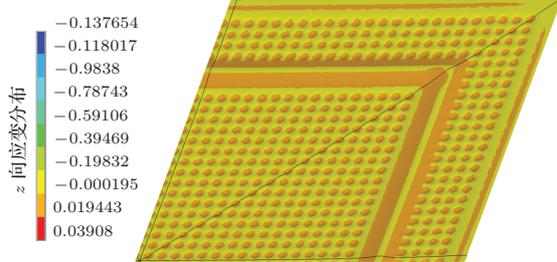


图5 (网刊彩色) 液氮温度下模拟得到InSb IRFPAs上表面法线方向应变分布图

考虑到探测器结构模型中仅有钢柱阵列为黏塑性模型, 并呈离散分布, 其余材料均为温度相关线弹性模型, 如果在液氮冲击保温结束后, 按照温度加载曲线直接模拟InSb面阵探测器的形变演化过程, 室温时将得到近乎平整的探测器表面形貌分布, 液氮冲击中累积的热应变将依照弹性规则恢复到未经液氮冲击前的水平. 这显然与图1中拍摄的形变分布严重不符. 为解决这一问题, 结合液氮冲击中InSb面阵探测器不同材料的形变演化规律, 提出了液氮冲击结束时InSb面阵探测器表面近乎平整, 液氮冲击中产生的局部分层仅限于Negative电极附近的设想. 在这一前提下, 依据升温曲线, 模拟升温过程中InSb面阵探测器的形变规律及分布. 模拟结果如图6所示, 为清晰显示形变分布, InSb面阵探测器旋转了一定的角度. 显然, 模拟结果几乎与拍摄的典型碎裂照片完全一致. 1) 凡是与钢柱阵列连接处的InSb芯片均往上凸起, 凡是与底充胶连接处的InSb芯片均往下凹陷, 凸起与凹陷面积大致相当, 呈二维周期性分布. 2) Negative电极区域, InSb芯片往上呈带状凸起, 具有明显的局部分层现象. 3) 四周区域InSb芯片相对平坦. 至此我们认为液氮冲击结束时InSb面阵探测器表面近乎平整的设想是合理的. 在后续的研究中, 我们将在液氮温度下拍摄InSb面阵探测器的表面形貌, 进一步印证本文提出设想的正确性. 当然我们也可对碎裂的面阵探测器再次进行液氮冲击试验, 依据图5得到的模拟结果, 与钢柱阵列相连接的InSb芯片往下伸长, 呈凹陷状态, 可以预测液氮温度下InSb面阵探测器的表面起伏要远小于室温下拍摄

的表面形貌起伏, 这也从另一个侧面印证了本文中提出的液氮冲击结束时InSb面阵探测器表面近乎平整这一设想的合理性.

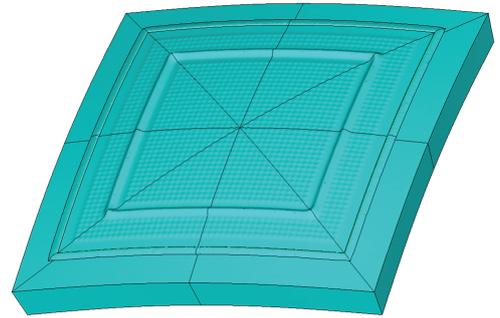


图6 升至室温后模拟得到的InSb IRFPAs法线方向应变分布图

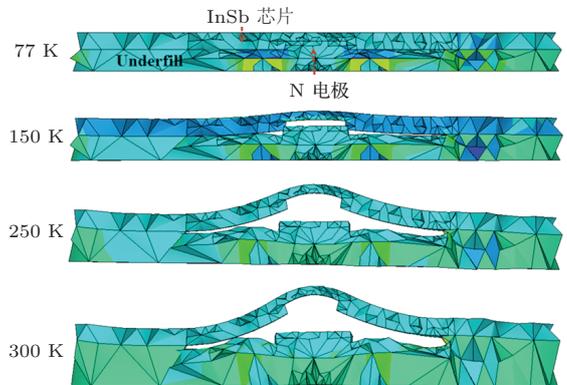


图7 (网刊彩色) 不同温度下模拟得到的InSb芯片和Negative电极界面处分层剖面图

为了解分层随温度的演化过程, 选取几个典型温度点, 截取Negative电极附近分层剖面图, 如图7所示. 在升温初期, 见77 K模拟结果, Negative电极与上方的InSb芯片贴合得很紧密, 二者界面处没有缝隙存在. 随着温度逐步升高, 在Negative电极上方, InSb芯片与Negative电极上表面有较窄的裂缝, 缝隙宽度随远离Negative电极中间区域而逐渐变窄, 在Negative电极两端处, InSb芯片与Negative电极紧密贴合, 见150 K模拟结果. 当温度升高到250 K时, 整个Negative电极与上方的InSb芯片完全分离开来, InSb芯片高高隆起. 当温度升至300 K时, InSb芯片与Negative电极之间的间隙进一步增加, 局部隆起更为明显. 在整个升温过程中, 面阵探测器的形变幅度最大值始终位于InSb芯片与Negative电极连接沟槽处. 局部分层发生过程中, Negative电极上表面始终保持在相对平整状态. 需要指出的是图7的模拟结果并不说明

局部分层一定发生在升温过程中,因为在降温过程中,也观测到了明显的局部分层现象,如图5所示.至此我们认为InSb面阵探测器在液氮冲击中的局部分层由界面性质决定,在升温或者降温过程中,只要达到内聚区双线性模型中最大内聚强度 $\sigma_{\max}$ 和界面分离临界位移 $\delta_c$ ,就会发生明显的局部分层现象.

## 5 结 论

基于等效建模思想,在易分层处添加内聚区模型,建立了InSb面阵探测器结构分层模型.模拟结果能够给出典型碎裂照片中提供的全部形变特征,也能够提供不同温度下局部分层的动态演化过程,说明了本文中所建分层模型的正确性及分层参数选取的合理性.该模型可为后续研究InSb芯片中裂纹起源及扩展演化提供模型基础.

## 参考文献

- [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(第一版)(北京:国防工业出版社)第1页]
- [2] Zhou P, Li C F, Liao C J, Wei Z J, Yuan S Q 2011 *Chin. Phys. B* **20** 028502
- [3] Huo Y H, Ma W Q, Zhang Y H, Huang J L, Wei Y, Cui K, Chen L H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 098401 (in Chinese)[霍永恒, 马文全, 张艳华, 黄建亮, 卫扬, 崔凯, 陈良惠 2011 物理学报 **60** 098401]
- [4] Xiong D Y, Li N, Li Z F, Zhen H L, Lu W 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1403
- [5] Tidrow M Z 2005 *Proceedings of SPIE*, Bellingham, WA, March 25–28, 2005 p217
- [6] Raytheon, <http://www.raytheon.com/au/rtnwcm/groups/rau/documents/download/raufactsheetaim-9x.pdf> [2012.3.20]
- [7] Gong H M, Liu D F 2008 *Infrared Laser Eng.* **37** 18 (in Chinese) [龚海梅, 刘大福 2008 红外与极光工程 **37** 18]
- [8] Shet C, Chandra N 2002 *J. Eng. Mater. Technol.* **124** 440
- [9] Mei H X 2011 *Ph. D. Dissertation* (American: University of Texas at Austin)
- [10] Yang Q D, Cox B 2005 *Int. J. Fracture* **133** 107
- [11] Ghasemenjad H, Aboutorabi A 2011 *J. Mater. Sci. Eng.* **5** 61
- [12] Yan Y B, Shang F L 2009 *Int. J. Solids Struct.* **46** 2739
- [13] Xu Q, Lu Z X 2013 *Int. J. Plasticity* **41** 147
- [14] Han J B, Siegmund T 2009 *Wear* **267** 1680
- [15] Meng Q D, Zhang X L, Zhang L W, Lv Y Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 190701 (in Chinese)[孟庆端, 张晓玲, 张立文, 吕衍秋 2012 物理学报 **61** 190701]
- [16] Meng Q D, Yu Q, Zhang L W, Lv Y Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 226103 (in Chinese) [孟庆端, 余倩, 张立文, 吕衍秋 2012 物理学报 **61** 226103]

# Delamination study of InSb infrared focal plane arrays using a cohesive zone model\*

Meng Qing-Duan<sup>1)†</sup> Gui Lei<sup>1)</sup> Zhang Xiao-Ling<sup>2)</sup> Zhang Li-Wen<sup>1)</sup>  
Geng Dong-Feng<sup>3)</sup> Lü Yan-Qiu<sup>3)</sup>

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

2) (School of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

3) (China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

( Received 19 January 2014; revised manuscript received 9 February 2014 )

## Abstract

Local interfacial delamination and cracking, appearing in the top surface of InSb infrared focal plane arrays (IRFPAs), are typical failure patterns observed in liquid nitrogen shock tests. In order to explore the delamination mechanism and cracking process, based on the thought of three-dimensional equivalent modeling, we employ the cohesive zone model (CZM) for the interface where delamination appears most easily, and create the structural model of 128×128 InSb IRFPAs. Simulation results contain all the deformation characteristics appearing in the typical optical fracture photographs. That is, firstly, in the photosensitive element array, the global square checkerboard buckling pattern reappears; secondly, in the negative electrode material, the InSb chip is gradually separated from the negative electrode, and the width of delamination is widened gradually; thirdly, on the periphery of InSb IRFPAs, the surface is flat. All these findings suggest that the model created in this paper is correct, and the parameters selected are suitable. Based on the delamination model, it is possible to find the initiation and propagation rule of cracks in the research that follows.

**Keywords:** IRFPAs, cohesive zone model, structural delamination

**PACS:** 85.60.Gz, 61.50.Lt, 62.20.Mt

**DOI:** [10.7498/aps.63.118503](https://doi.org/10.7498/aps.63.118503)

---

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61107083, 61205090).

† Corresponding author. E-mail: [qdmengly@163.com](mailto:qdmengly@163.com)