

文章编号: 1672-8785(2022)02-0034-06

FIB-SEM 双束系统在红外焦平面探测器研制中的应用

李 乾 黄 婷 折伟林 王 丹 邢伟荣

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 聚焦离子束扫描电子显微镜(Focused Ion Beam Scanning Electron Microscope, FIB-SEM)双束系统结合了扫描电子显微镜与聚焦离子束系统的优势。基于该系统的高分辨率、原位加工及观测的特点, 研究了它在缺陷与像元解剖分析、透射电镜样品制备以及电路修复等方面的应用。详细介绍了用 FIB-SEM 系统定位问题像元的方法和修复电路的具体过程, 并阐明了它对红外焦平面探测器研制的重要作用。该系统是高性能红外探测器研制过程中不可或缺的重要表征手段。

关键词: 红外焦平面探测器; 聚焦离子束扫描电子显微镜; 电路修复

中图分类号: TN362 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.02.006

Applications of the FIB-SEM Dual Beam System in the Development of Infrared Focal Plane Detector

LI Qian, HUANG Ting, SHE Wei-lin, WANG Dan, XING Wei-rong

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

Abstract: The focused ion beam scanning electron microscope system combines the advantages of scanning electron microscope and focused ion beam system. Based on the advantages of high resolution, in-situ processing and observation, its applications in defect anatomical analysis, pixel anatomical analysis, transmission electron microscope sample preparation and circuit repair are studied in this paper. The method of locating pixels with problems and the specific process of circuit repair are introduced in detail, and its important role in the development of infrared focal plane detectors is illustrated. The system is an indispensable characterization means in the development of high-performance infrared detectors.

Key words: infrared focal plane detector; FIB-SEM; circuit repair

0 引言

随着应用任务的复杂化、应用环境的拓展以及红外隐身和干扰技术的进步, 红外焦平面

探测器的类型越来越多样化、集成化。尤其是第三代焦平面探测器技术, 其发展方向为 Swap(小尺寸、低重量、低能耗和低成本集为

收稿日期: 2021-10-18

作者简介: 李乾(1990-), 男, 山东泰安人, 工程师, 硕士, 主要从事红外材料研制及测试工作。

E-mail: liqianbuaa@126.com

一体)的先进焦平面探测器技术^[1]。该技术对材料、工艺、器件的要求越来越高,同时对其表征的需求也相应提升。

在红外焦平面探测器的研制中,需要对材料、器件和电路进行微观形貌与微区成分测试、材料缺陷分析表征、像元结构解剖分析、透射电镜样品制备以及读出电路修复。而 FIB-SEM 双束系统则能够解决这些问题。它融合了聚焦离子束在微纳米尺度加工和电子束成像分析方面的优点,使得双束系统在微纳加工领域具有独特优势。随着 20 世纪 70 年代 Ga^+ 液态离子源的研制,聚焦离子束系统得到了快速发展^[2],大大提高了其在材料、工艺、器件等方面分析和修补的精度及速度。双束系统已广泛应用于红外半导体领域,为材料、工艺、器件中的许多问题提供了解决方案,是高性能红外焦平面探测器研制中必不可少的仪器设备。本文介绍了 FIB-SEM 双束系统的原理与应用,并研究了该系统在红外焦平面探测器研制过程中的具体应用。

1 FIB-SEM 双束电镜简介

聚焦离子束系统与扫描电子显微镜系统的结构十分相似,而 FIB-SEM 双束系统由两者结合而来,可以被看作在扫描电子显微镜基础上增配聚焦离子枪而形成的双束集成系统。如

图 1 所示,将聚焦离子束系统安装在与扫描电子显微镜的电子束所在直线夹角呈 52° 的位置上,并在样品腔室背部增配多种气体注入系统。与扫描电子显微镜相比,聚焦离子束系统有两个主要的不同点:一是离子源。在众多离子源中液态离子源凭借其结构简单和工作环境要求低的优势得到广泛应用。二是静电透镜。可以利用电场将高能离子会聚成束斑大小为 10 nm 左右的聚焦离子束。双束系统的出现大大提升了微纳米尺度加工的精度。

FIB-SEM 双束系统的应用由其本身的加工尺寸决定,仅限于微纳米尺度材料的加工。随着纳米技术向物理、化学、生物、新材料、农业、环境和能源等多个领域的渗透,FIB-SEM 双束系统作为一代新型纳米加工技术而被广泛应用在各个领域。如图 2 所示,它的应用主要集中在微纳加工、表面修饰和表面成像分析三个方面^[3]。如图 3 所示,微纳加工包括刻蚀和沉积两种加工方式,主要使用辅助气体来进行材料的刻蚀加工和特定材料的沉积,即借助 XeF 进行辅助刻蚀,利用 $\text{W}(\text{CO})_6$ 、 $\text{C}_5\text{H}_5\text{Pt}(\text{CH}_3)_3$ 和 $\text{C}_7\text{H}_{10}\text{AuF}_3\text{O}_2$ (t-fac) 等作为前驱体进行沉积。材料的表面修饰方法以离子注入为主;材料表面测试分析主要是成像检测,类似于扫描电镜成像(此处不赘述)。

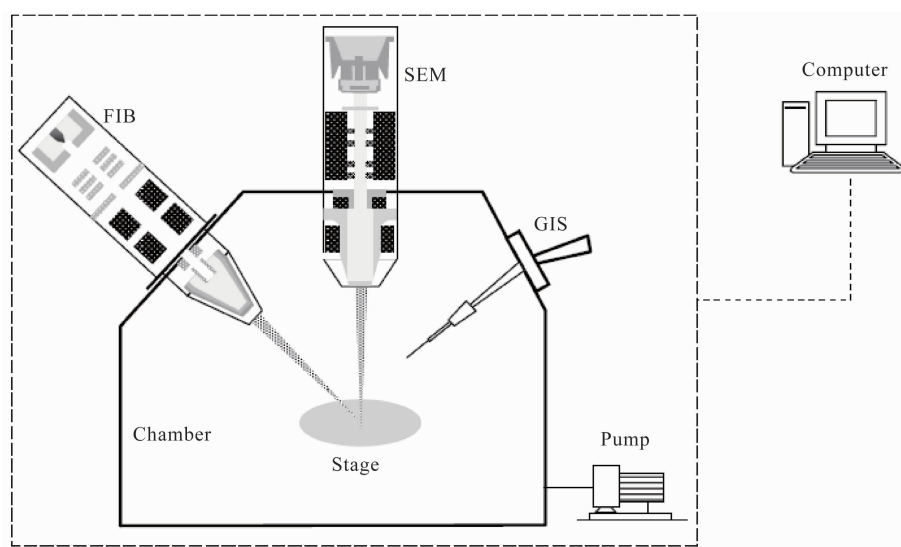


图 1 FIB-SEM 双束系统的结构示意图

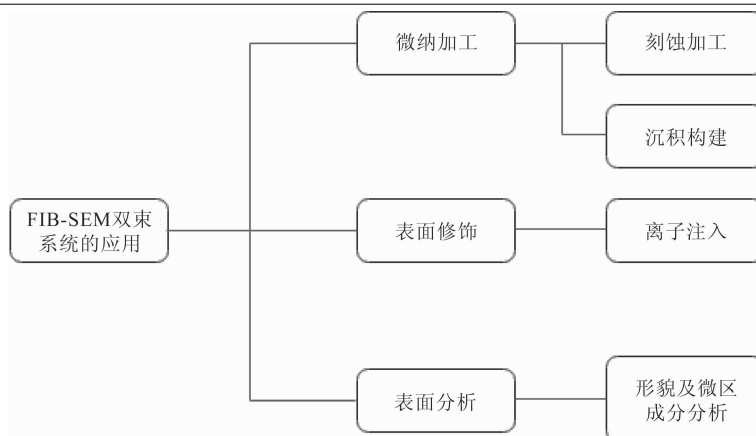


图 2 双束系统的主要应用

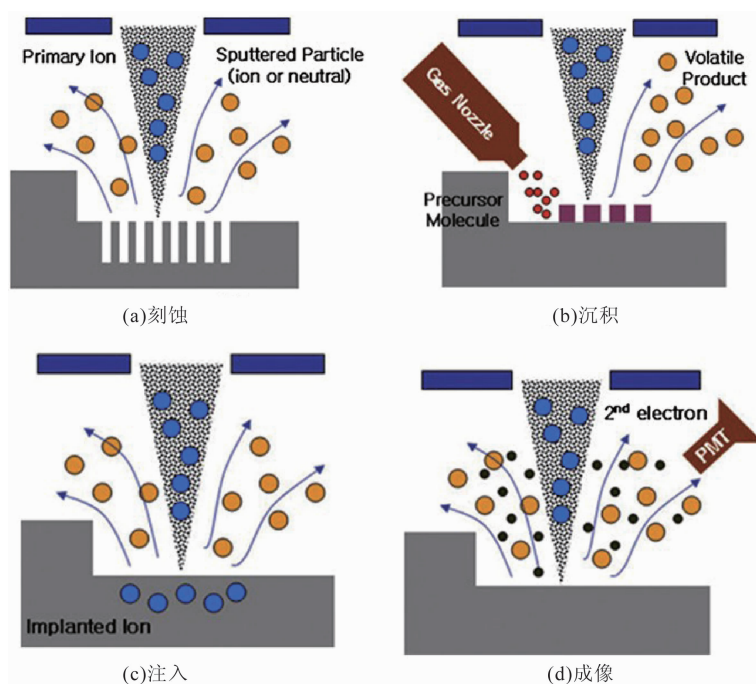


图 3 微纳加工、表面修饰和表面分析等应用

2 在红外焦平面探测器研制中的应用

2.1 微观缺陷分析

碲镉汞表面及碲锌镉与碲镉汞界面处的缺陷(如位错、层错、凹坑等)较多。利用聚焦离子束对碲锌镉基碲镉汞表面凹坑进行截面解剖,然后使用扫描电子束观察剖面。可以清楚地看到碲锌镉衬底与碲镉汞薄膜间的界线,证明挖孔深度已经超过碲镉汞薄膜厚度。

从截面可以清楚地看到,碲镉汞薄膜接近碲锌镉衬底的部分出现了异常,长度约为 $5\mu\text{m}$ 。它位于表面缺陷的正下方,可以推断表面缺陷的起源就是这里。接近衬底上方的生长问题导

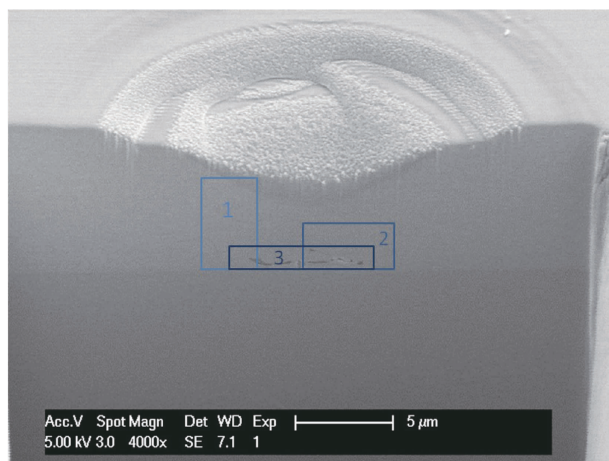


图 4 碲锌镉基碲镉汞缺陷

致薄膜表面出现直径约为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、深度约为 $2\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 的凹陷。

对该区域进行能谱测试, 共测试 3 个区域(见图 4)。薄膜中间部分(即区域 1、2)的碲、镉、汞三种元素的含量基本保持一致。其中, Hg 占 $7\%\sim 9\%$, Cd 占 33% 左右, Te 占 $58\%\sim 59\%$ 。底部区域 3 中的 Cd 含量为 42.47% (增量明显), Te 元素变化不大, Hg 元素降低到 1.69% 。可以看出, 该区域的 Hg 元素缺失, 而 Cd 元素占比异常, 出现了成分偏移。

由于碲锌镉衬底的边缘比较疏松, 在生长前衬底的处理过程中, 衬底边缘的颗粒很容易脱落, 部分颗粒会附着在衬底表面; 在生长外延过程中, 附着的颗粒被生长熔液包裹起来, 形成缺陷。

2.2 透射电镜样品的制备

透射电镜是材料晶格结构分析的重要手段, 但是对材料样品制备的要求极高。根据透射电镜电子能量, 一般要求样品厚度为 $5\sim 500\text{ nm}$ (见图 5)。其它的样品制备方法难度较大, 位置难以确定。FIB-SEM 利用气体沉积系统对材料表面沉积保护, 并使用离子束刻蚀功能实现定位加工。同时, SEM 可以实现对样品的原位观测, 从而轻松完成透射电镜样品的制备^[4]。

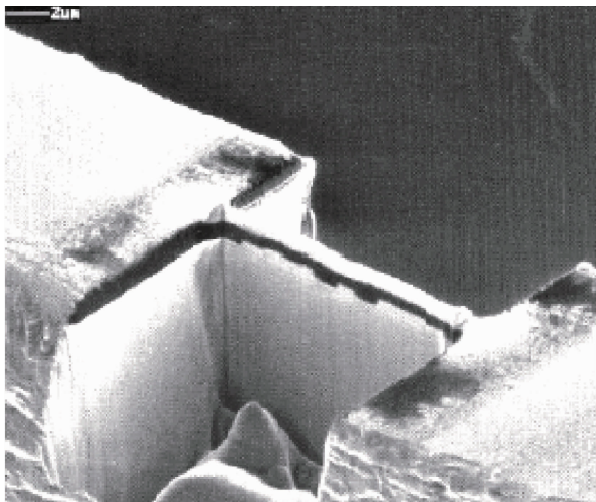


图 5 用 FIB-SEM 制备的透射电镜样品

2.3 像元结构分析

采用 FIB-SEM 双束系统进行像元剖面的制备及观测, 可以进一步确定问题像元产生的原因。去除铋化铟红外焦平面混成芯片的表面增透膜, 并使用氢氟酸与双氧水的混合腐蚀液对其表面铋化铟材料进行腐蚀。由于芯片表面边缘处的腐蚀速度较快, 当边缘处台面裸露出来且中心区域有 $2\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 厚的铋化铟层残留时, 即可停止腐蚀^[5] (见图 7(a))。以腐蚀暴露出的边缘像元为起始点, 结合电平图(见图 6)中十字盲元的像元坐标来计算盲元的实际位置, 并使用聚焦离子束系统对该位置进行观测。

聚焦离子束系统的离子源为可电离形成 Ga 离子的 Ga 源。它们在 30 kV 的高压作用下加速进入镜筒, 经过透镜和光阑作用形成高能离子束。带电高能离子束轰击材料表面, 将电荷传递给材料表面。电荷沿铋化铟电极-铟柱-硅电路-样品台被导走。腐蚀后芯片四周暴露出台面的正常像元在聚焦离子束系统中呈亮白色, 而十字盲元的像元由于没有形成完整的通路而呈黑色, 如图 7 所示。这种方法可以验证是否找对了盲元位置。未被腐蚀出台面的中心区域由于表面铋化铟层导电而没有出现相同现象, 需要对上侧和左侧目标像元进行刻蚀, 并将其作为刻蚀目标像元的参考标尺。

使用聚焦离子束对像元进行解剖时, 选用大束流离子束来轰击材料, 使得材料被逐层剥离, 从而形成凹坑。待达到所需刻蚀深度后, 使用小束流对凹坑上边缘进行细修, 保证最终剖面位于像元中央。这样能够准确地获得铟球高度与大小、电极孔大小等真实尺寸, 同时还能确认互连是否成功以及问题像元的起因。问题像元与正常像元分别如图 8(a)和图 8(b)所示。

2.4 电路修复

常见的碲镉汞、铋化铟红外焦平面探测器芯片都是红外焦平面阵列与读出电路通过铟柱互连而成的混成芯片, 可实现光电信号的转换与传输。读出电路在设计、加工、测试以及可

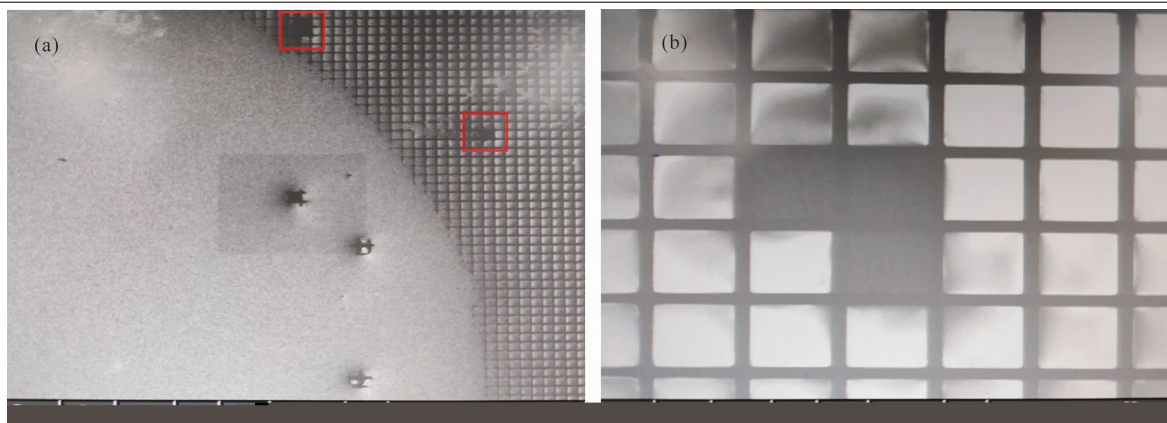


图 6 含有盲元的铋化锑红外探测器的电平图

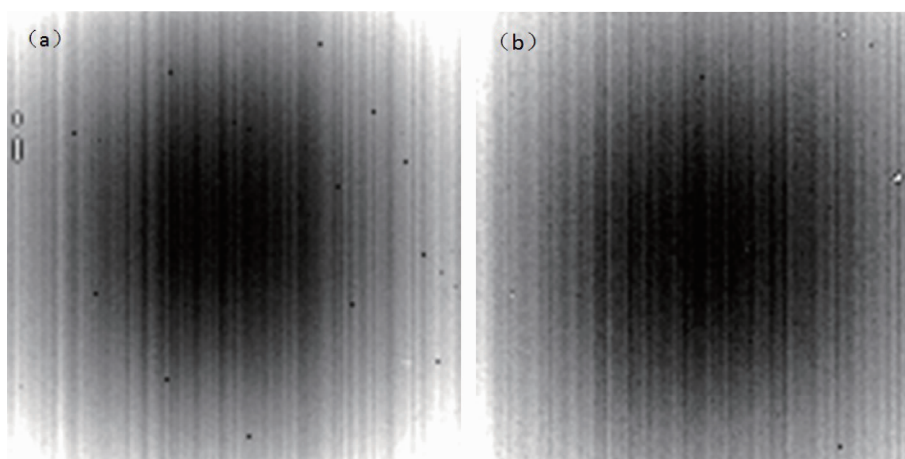


图 7 聚焦离子束系统下十字盲元与正常像元的衬底图

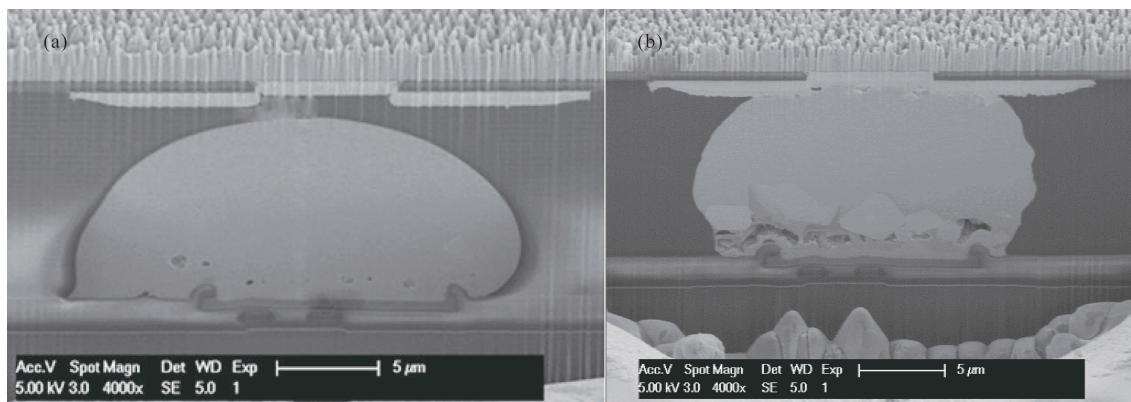


图 8 像元截面图：(a)问题像元；(b)正常像元

靠性试验过程中会出现部分残次品，因此需要确认其失效机理，从而有效提升电路质量。

利用 OBIRCH 和 TCR 技术可以定位失效点^[6]。使用 FIB-SEM 对其进行刻蚀加工，能够观察到截面，或者对电路进行修改（见图 9），即裁断多余电路，并利用气体注入系统沉积金属形成新电路。

3 结束语

本文介绍了 FIB-SEM 双束系统在红外焦平面探测器研制中的四个应用：（1）分析外延层缺陷，对缺陷起源追溯具有较大帮助。（2）制备透射电镜样品，有助于研究材料界面。（3）解剖互连后的像元，有利于追溯问题像元

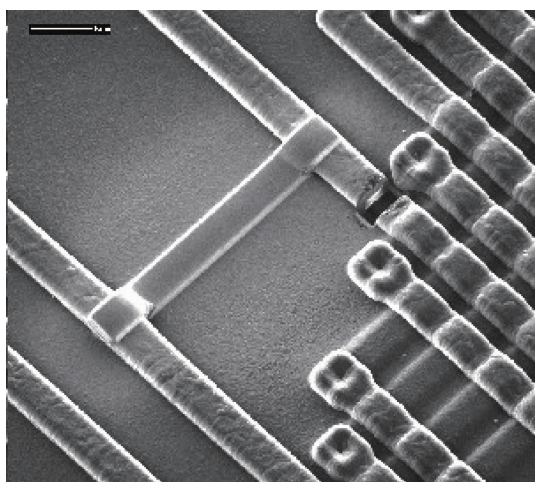


图 9 基于 FIB-SEM 的电路修补图

的产生原因。详细介绍了问题像元的定位及解剖,从而改进工艺和提升产品质量。(4)修复问题电路,可大大降低电路设计及加工成本。随着 FIB-SEM 双束系统分辨率与加工精度的不断提升,可解决更多其他测试设备无法表征的问题。该系统也将在红外焦平面探测器的研制过程中扮演越来越重要的角色。

参考文献

- [1] 周立庆, 宁提, 张敏, 等. 10 μm 像元间距 1024 $\times$ 1024 中波红外探测器研制进展 [J]. *激光与红外*, 2019, **49**(8): 915-920.
- [2] 马向国, 刘同娟, 顾文琪. 聚焦离子束技术及其在微纳加工技术中的应用 [J]. *真空*, 2007, **44**(6): 74-78.
- [3] Kim C S, Ahn S H, Jang D Y. Review: Developments in micro/nanoscale fabrication by focused ion beams [J]. *Vacuum*, 2012, **86**(8): 1014-1035.
- [4] 罗浒. 聚焦离子束电子束系统集成及应用研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.
- [5] 程雨, 李忠贺, 谢珩, 等. InSb 红外焦平面探测器十字盲元问题的研究 [J]. *红外*, 2021, **42**(4): 15-20.
- [6] 车羿. 失效分析在半导体制造中的原理及应用 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [7] Zhang L, Li Y, Zhang J, et al. Numerical Analysis of Temperature and Stress Fields in Hybrid Indium Antimonide Arrays Detector with Laser Irradiation [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, **51**(8): 1-16.
- [8] Zhang H, Lu H. Analysis of the Thermal Stress of IRFPA Assembly Using FEM [C]. *SPIE*, 2008, **6835**: 68350J.
- [9] Zhang W T, Ye Z H, Chen X. A FEA Study on Thermal Stress of HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays Detector [C]. *SPIE*, 2018, **10624**: 106241X.
- [10] 刘伟, 张冬亮, 闫杰, 等. 超长线列碲镉汞探测器组件的冷头结构设计 [J]. *红外*, 2021, **42**(6): 12-18.
- [2] 张伟婷, 陈星, 叶振华. 大面阵红外探测器的发展现状与趋势 [C]. 苏州: 红外、遥感技术与应用研讨会, 2019.
- [3] Starr B, Mears L, Fulk C, et al. RVS WFIRST Sensor Chip Assembly Development Results [C]. *SPIE*, 2016, **9915**: 99150Q.
- [4] Rogalski A. Recent Progress in Infrared Detector Technologies [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(3): 136-154.
- [5] Chen X, He K, Wang J, et al. Thermal Cycling Reliability of Indirect Hybrid HgCdTe Infrared Detectors [C]. *SPIE*, 2013, **8907**: 890749.
- [6] Geng D, Zheng K, He Y. Fracture Analysis of InSb Focal Plane Arrays Chip under Thermal Shock [C]. *SPIE*, 2014, **9300**: 93002I.

(上接第 27 页)