

文章编号:1001-5078(2026)02-0239-06

· 红外材料与器件 ·

红外探测器模块结构应力研究

董金磊,高依然,付志凯,方志浩,王冠
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:本文针对低温环境下碲镉汞(HgCdTe)红外探测器芯片因热失配引发的结构应力问题,通过实验测量与有限元模拟相结合的方法,系统研究了其应力分布规律及可靠性优化策略。开发了基于低温应变片的直接测量技术,实现了对640×512碲镉汞芯片降温过程中应变与应力的实时监测,测得最大收缩应变为1042 $\mu\epsilon$,最大应力为69 MPa。结合ANSYS有限元仿真,建立了探测器模块的热力耦合模型,揭示了芯片中心区域应力集中(最大模拟应力63 MPa)、四周应力较小的分布特征,数值模拟与实验结果的相对误差小于20%,验证了模型的准确性。通过简化铟柱建模与均质化处理,提升了仿真效率,为探测器封装结构优化提供了理论支持。研究表明,结合实验修正的数值仿真方法可显著缩短设计周期,优化低应力封装方案,从而降低裂片风险,提升器件可靠性。

关键词:低温;红外探测器芯片;热失配;应力应变;数值仿真

中图分类号:TN214;O436 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.013

Structural stress study of infrared detector module

DONG Jin-lei, GAO Yi-ran, FU Zhi-kai, FANG Zhi-hao, WANG Guan
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Structural stress issues in mercury cadmium telluride (HgCdTe) infrared detector chips caused by thermal mismatch under cryogenic conditions are systematically investigated by integrating experimental measurements with finite element simulations. A direct measurement technique based on low-temperature strain gauge is developed, enabling real-time monitoring of strain and stress during the cooling process of a 640×512 HgCdTe chip. A maximum contraction strain of 1042 $\mu\epsilon$ and a maximum stress of 69 MPa are measured. A thermo-mechanical coupling model of the detector module is established using ANSYS finite element simulations, revealing stress concentration in the central region (maximum simulated stress: 63 MPa) and lower stress levels at the periphery. The relative error between numerical simulations and experimental results is less than 20%, validating the model's accuracy. Simulation efficiency is improved through simplified modeling of indium columns and homogenization treatment, providing theoretical support for optimizing detector packaging structures. The study demonstrates that the combined experimental-corrected numerical simulation method can significantly shorten design cycles and optimizes low-stress packaging solutions. Consequently, the risk of chip cracking is reduced, and device reliability is enhanced.

Keywords: cryogenic temperature; infrared detector chip; thermal mismatch; stress and strain; numerical simulation

1 引言

红外探测技术作为现代感知体系的重要分支,已在深空观测、生物医学成像、国防侦察及工

业无损检测等前沿领域实现关键性应用突破^[1-3]。基于半导体物理特性,深低温制冷工艺是保障探测器本征性能的核心技术路径,其通过

维持亚百开尔文量级的稳定温场,可显著降低载流子热激发噪声,进而优化器件信噪比与光谱响应灵敏度^[4]。以红外探测器典型代表 InSb 及 HgCdTe 焦平面阵列为例,常规制备工艺下其本征工作温区需严格控制在 77 ~ 90 K 阈值范围。值得注意的是,基于 HgCdTe 异质集成结构的探测器模组普遍存在多材料体系热机械适配性难题。该模组采用三元复合架构设计时,各功能层的热膨胀系数差异可达量级跨度。当器件经历由封装态常温骤降至约 77 K 的低温工况时,层间热膨胀系数失配引发的累积应力将导致模块出现微应变畸变。实验研究表明,这种非协调形变不仅会引发铜柱互联失效,更会造成 HgCdTe 光敏元出现载流子迁移率衰减及暗电流激增等本征特性劣化。当低温形变超过探测器组件所能承受的临界形变阈值时,将会产生灾难性断裂,导致探测器芯片因裂片而失效^[5-7]。在超宽谱段探测与实时动态成像技术迭代驱动下,现代红外系统对超大视场角覆盖和毫秒量级时序响应等核心指标提出严苛要求,推动探测器阵列规模突破百万级像元集成度。然而,深低温环境下大面阵探测器异质材料界面热膨胀系数失配引发的梯度热应力累积,将导致微裂纹沿晶界萌生与扩展的晶圆级结构断裂风险,该失效模式已成为制约高密度集成器件工程化应用的关键瓶颈^[8-9]。基于失效物理的加速寿命验证研究表明,红外焦平面组件在多循环温度冲击测试(-196 °C ~ +85 °C)中,交变热载荷引发的非弹性应变幅值会引发焊点界面分层及互连微桥断裂等界面退化效应。

在红外焦平面探测器中衬底材料通常选择 GaAs 或者 CdZnTe,这两种材料与硅读出电路的热膨胀系数相比差距较大,在高低温的变化时(从常温 293 K 到低温 77 K),将衬底厚度减薄可以提高因硅读出电路热形变制约而随之改变的能力,这在一定程度上抑制了探测器芯片的外延层与读出电路的热失配问题。在美国和欧洲等发达国家,衬底减薄工艺已成为常规,如美国洛克威尔公司研制的 Hubble 太空望远镜的短波规模为 1 k × 1 k 面阵和 James Webb 空间望远镜的中短波规模为 4 k × 4 k 的大面阵采用了去衬底工艺^[10]。对红外探测器模块低温下热失配导致结构应力的研究大多采用数值

仿真方法,数值仿真可有效反应探测器模块在低温冷平台集成后的应变应力状态^[11-12]。中国科学院上海技术物理研究所李言瑾团队^[13]采用有限元分析方法研究了碲镉汞红外焦平面器件在低温下由于不同热膨胀系数引起的热失配应力,对膨胀合金在低温条件下的相对膨胀系数和弹性模量进行了分析,提出了两种焦平面器件结构,可以有效地降低热应力,并应用于实际器件的制备,明显提高了碲镉汞焦平面器件的可靠性。然而,由于材料参数、边界条件等因素的影响,数值仿真与探测器实际热应力和应变存在一定范围的误差。因此,除数值仿真外,低温下探测器模块应变与应力的实验测量表征方法也得以发展。当前主要聚焦于多材料体系跨尺度热致微应变动态监测技术的开发。例如,采用激光干涉全场形貌分析系统,通过多光谱共轴相位解调算法解析异质界面层间热膨胀梯度场,创新性地构建了 Z 轴位移场与等效 Von Mises 应变的非线性映射模型,其位移分辨率可达 0.1 μm 量级^[14]。中国科学院上海技物所夏晨希等人^[15]研制了一种用于测试杜瓦冷平台封装集成后芯片热应变的方法,针对 4 个 512 × 512 规模的探测器芯片拼接而成的探测器杜瓦组件,使用应变片来测量红外探测器芯片处于自由状态下及与冷平台集成后的热输出,进而得到杜瓦集成后芯片的低温应变和应力。从以上研究看出,低温下探测器热失配导致的应力问题已经得到了国内外学者广泛的关注和研究。然而,如何精确测量红外探测器芯片低温下的应变和应力以及随降温时间的演化过程尚不清楚。

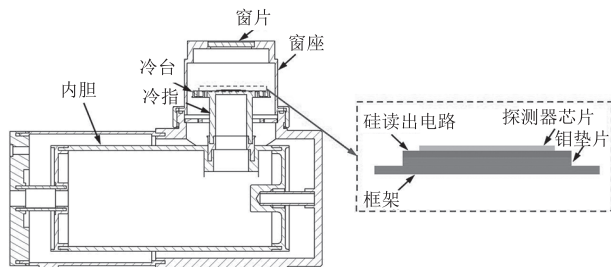
基于以上研究背景,本文发展了一种适用于红外探测器芯片模块低温下应变应力的测量表征技术。对 640 × 512 碲镉汞芯片(像元间距 25 μm)在降温过程中的应变和应力进行直接测量与表征,并结合数值仿真对红外探测器芯片热应力进行分析,为红外探测器模块结构应力优化和可靠性提升提供重要数据基础和支撑。

2 测试方法与原理

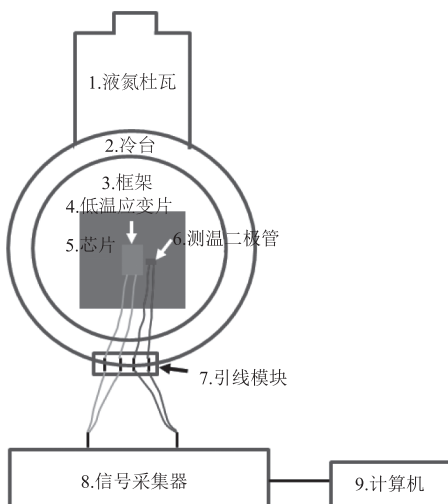
2.1 测试方法

本次测试采用液氮杜瓦结构进行低温应力测量技术的可行性验证,液氮杜瓦结构如图 1(a)所示。红外焦平面探测器结构模块示意图如图中虚线框所示,主要包括四个部分:红外探测器芯片、读出电路、

钼垫片和氧化铝框架,其中位于结构最顶端的是红外探测器芯片,它是用来接收入射的红外辐射并将该信号转变为电信号输出的器件,探测器芯片 CdZnTe 衬底通过减薄完全去除。而探测器芯片的下方则是硅读出电路,两者通过钢柱互连,用以读取探测器芯片上每个光敏元的电信号,通过放大处理之后再时序输出。为了对结构进行热应力优化,在硅读出电路下加一层钼垫片作为平衡层,钼垫片热膨胀系数与探测器芯片相近,降温时用于压缩读出电路,使得其在温度下降过程中和探测器芯片的收缩程度相近。用钼垫片对硅读出电路进行热匹配使之与探测器芯片收缩相一致,以此来提高探测器的温度循环能力。氧化铝框架在最底部,它具有为读出电路和红外探测器芯片提供电学连接、机械支撑和输出端的功能。红外探测器芯片低温应变应力测量装置示意图如图 1(b) 所示。该装置主要包括:液氮杜瓦、用于芯片制冷的杜瓦冷台、电学引出框架、低温应变片、红外探测器芯片、测温二极管、引线模块、信号采集器及计算机。



(a) 液氮杜瓦结构和探测器芯片结构示意图



(b) 红外探测器芯片低温应变应力测试装置示意图

图 1 液氮杜瓦及应力应变测试装置示意图

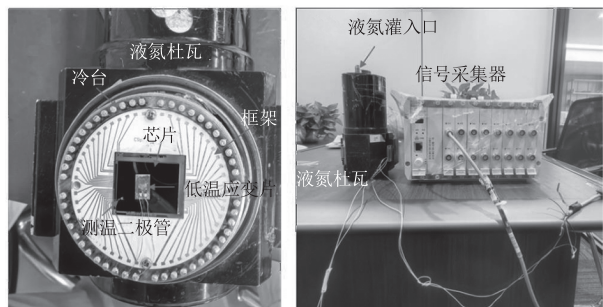
Fig. 1 Schematic diagram of the liquid nitrogen Dewar and strain and stress testing device

在工具显微镜下将 640×512 (像元间距 $25 \mu\text{m}$) 碲镉汞芯片和氧化铝电学引出框架通过低温胶定向粘接到液氮杜瓦冷台端面。芯片尺寸为 $13.4 \text{ mm} \times 16.6 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$, 读出电路尺寸为 $16.9 \text{ mm} \times 19.4 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 电学引出框架直径为 43.4 mm 。使用化学溶剂如无水乙醇、丙酮等进行芯片表面清洁,清除油脂等脏物。本文采用低温电阻应变片进行芯片低温下应变的采集,应变片是由敏感栅等构成用于测量应变的元件。其工作原理是基于应变效应制作的,即导体或半导体材料在外界力的作用下产生机械变形时,其电阻值相应的发生变化^[13]。应变片的电阻变化率 ($\Delta R/R$) 与应变 (ε) 成正比,关系式为:

$$\frac{\Delta R}{R} = G \cdot \varepsilon \quad (1)$$

式中, ΔR 为电阻变化量; R 为应变片的原始电阻; G 为应变系数 ($G = 2$), 表征材料的应变的敏感度; $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ 为应变, 其中 ΔL 为长度变化量, L 为原始长度。应变片基底尺寸为 $6.4 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ (长 \times 宽), 敏感栅尺寸为 $2.8 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ (长 \times 宽)。值得注意的是,应变片尺寸是小于探测器芯片的,应变片主要测量探测器芯片局部区域的应变值。本实验应变片贴在探测器芯片的中间位置,测量数据为芯片中间部分应变值。后续我们将此技术推广至大面阵探测器低温应变测量,大面阵探测器可同时在探测器芯片中间位置和四周粘贴应变片进行不同位置的应变测试。

如图 2(a) 所示,用低温胶将应变片粘贴到待测部位,并放置固化 24 h。测温二极管粘贴同上。在金丝焊接机上进行低温应变片、测温二极管与框架之间的内引线键合以及进行框架外引线键合。上述完成后利用万用表测量低温应变片和测温二极管电学引出线电阻值是否正常。最后将红外探测器杜瓦结构窗座与上述部件利用螺钉等连接件紧固进行耦合密封,成品在真空排气台下进行真空排气,保证杜瓦内部真空度在 10^{-3} Pa 以下以减少对外热传导并保持真空环境。如图 2(b) 所示,将低温应变片和测温二极管的电学引出线接入信号采集器的不同通道,待信号采集器稳定之后,向液氮杜瓦中灌入液氮实现芯片的制冷。数据实时通过采集器采集,频率为 10 Hz ,数据输入计算机得到应变与应力结果。



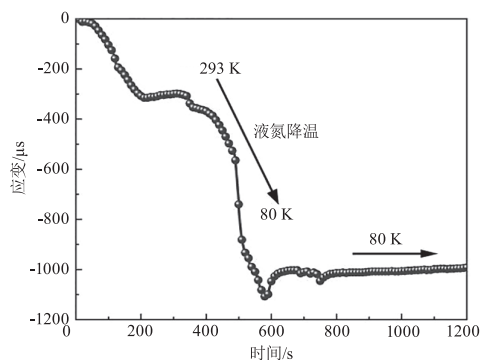
(a) 红外探测器应变片粘贴实物图 (b) 探测器芯片低温应变应力测试装置实物图

图 2 低温应力测试装置实物图

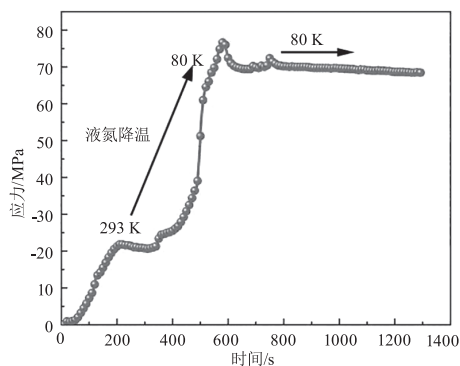
Fig. 2 Real figure of low temperature stress testing device

2.2 测试结果与讨论

将液氮倒入液氮杜瓦中实现探测器芯片的快速降温,降温过程中信号采集系统实时记录应变数据。图 3(a)展示了该装置测量得到的探测器芯片在室温至低温降温过程中的应变结果。由图 3(a)可观察到芯片降温过程中逐渐收缩,应变片采集应变为负。随着温度降低,芯片收缩应变经过平台后迅速增加,最大收缩应变为 $1042 \mu\epsilon$,之后温度降到 80 K,应变趋于稳定。应力可由应变与被测材料(碲锌镉)弹性模量计算得到。计算得到的应力结果如图 3(b)所示,芯片降温过程中应力逐渐增加,最大应力为 69 MPa,之后芯片温度降到 80 K,应力趋于稳定。



(a) 红外探测器芯片低温应变图



(b) 红外探测器芯片低温应力图

图 3 红外探测器芯片测试数据

Fig. 3 Infrared detector chip test data

3 数值仿真

面向先进电子封装的智能数值仿真体系研究显示,基于多物理场耦合的虚拟验证技术已深度融入微电子器件可靠性设计范式。以 Ansys Mechanical APDL 与 LS-DYNA 协同仿真平台为代表的高保真度数值建模工具,通过构建热-力-电多物理约束协同设计框架,可系统性优化探测器结构应力等关键指标^[6-7]。研究表明,协同仿真平台结合数字孪生迭代优化技术,能实现封装失效概率较传统方法降低 57%,工艺验证周期压缩至传统实验的 33%。成为智能失效预测与寿命评估系统的核心模块。因此,为了进一步分析探测器芯片低温环境下的应变和应力,本文采用 Ansys 软件对探测器模块降温过程进行热力耦合模拟。

数值模拟建模过程中,探测器芯片结构三维模型尺寸与实验尺寸保持完全一致。读出电路与芯片通过钢柱进行倒装互连,并在钢柱区填充胶来增加两者的机械强度。由于钢柱数目过多,计算所需的网格数目过大导致计算机显存不够,无法完成模型建立。因此,将钢柱与灌封胶简化为刚性接触。红外焦平面探测器结构模型主要包括四个部分: HgCdTe 红外探测器芯片、Si 读出电路、Mo 垫片和 Al_2O_3 框架。三维模型网格划分如图 4 所示,设置模型网格尺寸为 0.5 mm。将有限元模型上的工作温度设置为从室温 298 K 均匀变化到 77 K,也即温度激励载荷的初始点是 298 K(和零应力状态相对应),结束温度点是 77 K,用斜坡加载的方式载入。

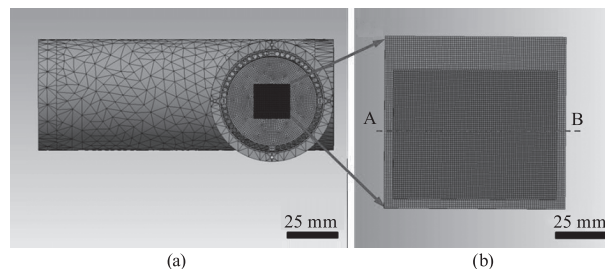


图 4 模型有限元网格划分

Fig. 4 Finite element mesh of model

材料参数值直接影响数值模拟结果,由于 HgCdTe、Si、 Al_2O_3 、Mo 低温 77 K 下参数文献报道较少。为了得到较为准确的低温材料参数,团队与中国科学院理化技术研究所合作,利用力学试验机进行低温拉伸、压缩测量样品弹性模量。利用应变片

测量样品低温下形变与温度的关系,计算得到样品热膨胀系数。利用弛豫法测量样品比热,通过稳态热流法测量样品比热容,测量得到的材料参数如表 1 所示。图 5 为碲镉汞探测器芯片数值仿真应力云图。随温度降低,探测器中间部分热应力逐渐增加,四个边角热应力较小,整个芯片中心区域的应力达到最大值。本实验中应变片贴在探测器芯片的中间

位置,测量数据为芯片中间区域应力值,因此取数值模拟芯片中间区域应力值作为比较。模拟得到的探测器芯片中心部分应力约为 63 MPa,数值模拟所得的结果与实验测量的应力值基本吻合,相对误差为 20 % 以内,进一步验证了本文对探测器模块数值分析网格划分、载荷设置及分析结果的准确性。

表 1 实际测量的 77 K 下数值仿真材料参数

Tab.1 Material properties by experimental measurement

材料	弹性模量 GPa	泊松比	热膨胀系数/ $10^{-6} \cdot K^{-1}$	热导率/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	比热容/ $(J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$	密度/ $(g \cdot cm^{-3})$
HgCdTe	66	0.26	3.70	1.2	0.13	5.68
Si	190	0.25	1.32	328	0.18	2.33
Al ₂ O ₃	380	0.22	4.22	15	0.06	3.98
Mo	320	0.31	2.80	142	0.15	10.22

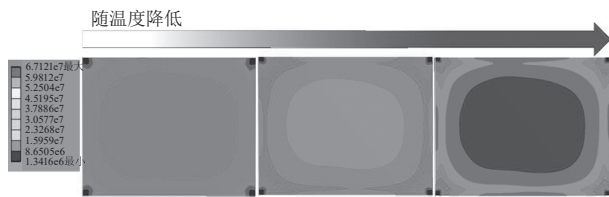
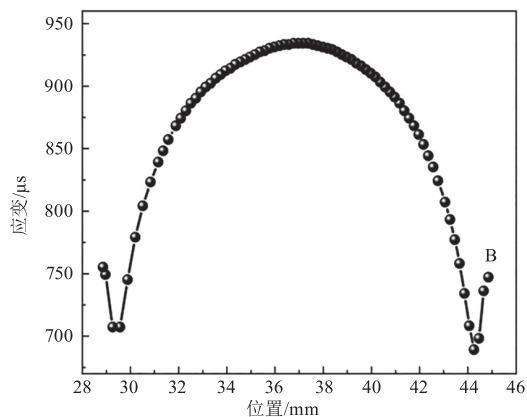


图 5 探测器芯片低温应力随时间演化

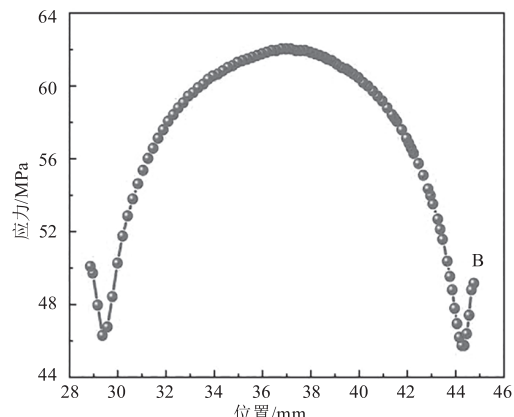
Fig.5 Time-dependent stress variation in detector chips under low-temperature conditions

图 6 为探测器芯片数值仿真应变和应力分析结果,A 点和 B 点为图 4 中探测器芯片 AB 连线。由图 6 可知,在 A 点和 B 点处,由于边界效应使得应变

和应力相比于 29.5 mm 处高。低温下芯片的应变和应力曲线整体都呈现向上凸起的趋势,在 29.5 mm 至 37 mm 处应变和应力逐渐增加,在探测器中心处应变和应力值达到最大值分别为 934 $\mu\epsilon$ 和 63 MPa。本文提供了适用于红外探测器芯片低温工作过程中的直接应力和应变的表征方法,基于实验测试可有效修正模拟仿真,提高探测器模块应力仿真能力,缩短设计周期,得到最小应力封装方案以保证探测器工作过程中的低应力状态,有效防止因应力较大而产生的裂片及像元退化问题,为红外探测器应力环境优化和可靠性提升提供重要支撑。



(a) 探测器芯片应变随位置变化



(b) 探测器芯片应力随位置变化

图 6 探测器芯片数值仿真应变和应力分析

Fig.6 Numerical simulation of strain and stress analysis of detector chip

4 结论

本文通过实验与数值仿真系统分析了碲镉汞红外探测器模块在低温下的热失配应力演化规律,得出以下结论:

1) 基于低温应变片开发的直接测量技术,成功实现了对 640 × 512 碲镉汞芯片降温过程中应变与应力的实时表征,实验测得最大应变为 1042 $\mu\epsilon$,最大应力为 69 MPa,为应力分析提供了可靠数据基础。

2)测量结果表明随着温度从室温降低到 80 K, 芯片降温过程中逐渐收缩,最大收缩应变为 1042 $\mu\epsilon$ 。芯片降温过程中应力逐渐增加,最大应力为 69 MPa,之后应力与应变趋于稳定。

3)数值模拟结果表明,随温度降低,探测器中间部分热应力逐渐增加,四个边角热应力较小。在探测器中心处应变和应力值达到最大值分别为 934 $\mu\epsilon$ 和 63 MPa。数值仿真所得的结果与实验测量的应力值较好吻合,进一步验证了数值仿真的准确性。

未来研究需进一步优化多物理场耦合模型,探索复杂边界条件下的热-机械行为,并开发更高精度的原位测量技术,以推动大面阵红外探测器在极端环境中的可靠性提升与工程化应用。

参考文献:

- [1] Lei W, Antoszewski J, Faraone L, et al. Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors[J]. Applied Physics Reviews, 2015, 2(4): 041303.
- [2] Capper P, Garland J. Mercury cadmium telluride: growth, properties, and applications[M]. Hoboken: Wiley, 2011.
- [3] Gravrand O, Destefanis G, Bisotto S, et al. Issues in HgCdTe research and expected progress in infrared detector fabrication[J]. Journal of Electronic Materials, 2013, 42(11): 3349 - 3358.
- [4] Ding R J, Yang J R, He L, et al. Development of technologies for HgCdTe IRFPA[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(1): 0103010. (in Chinese)
丁瑞军, 杨建荣, 何力, 等. 碲镉汞红外焦平面器件技术发展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(1): 0103010.
- [5] Fu Z K, Li X L, Zhang L, et al. Thermal stress analysis and optimization of large array HgCdTe chip[J]. Infrared, 2021, 42(4): 25 - 29. (in Chinese)
付志凯, 李雪梨, 张磊, 等. 大面阵碲镉汞芯片的热应力分析与优化[J]. 红外, 2021, 42(4): 25 - 29.
- [6] Li J. Key technologies of Dewar packaging for ultra-large scale linear infrared focal plane array[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Science; Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
李俊. 超大规模线列红外焦平面杜瓦封装关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 中国科学院上海技术物理研究所, 2021.
- [7] Zhang W T. Research on reliability of HgCdTe large format infrared focal plane detector[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Science, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
张伟婷. 碲镉汞大面阵红外焦平面探测器的可靠性技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 中国科学院上海技术物理研究所, 2021.
- [8] Liu M, Wang C, Zhou L Q. Development of small pixel HgCdTe infrared detectors[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(3): 037804.
- [9] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies[J]. Infrared Physics & Technology, 2011, 54(3): 136 - 154.
- [10] D'Orsogna D, Lamarre P, Bellotti E, et al. A novel stress characterization technique for the development of low-stress ohmic contacts to HgCdTe[J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(8): 1698 - 1706.
- [11] Zhang W T, Chen X, Ye Z H. Stress in HgCdTe large infrared focal plane array detector analyzed with finite element analysis[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2021, 40(3): 308 - 313. (in Chinese)
张伟婷, 陈星, 叶振华. 碲镉汞大面阵红外探测器模块结构应力的有限元分析[J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(3): 308 - 313.
- [12] Meng Q R, Lyu 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)
孟庆瑞, 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.
- [13] Li Y J, He L, Yang J R, et al. Study on thermal mismatch stress of HgCdTe Infrared focal plane array[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(6): 409 - 412. (in Chinese)
李言瑾, 何力, 杨建荣, 等. 碲镉汞红外焦平面器件热失配应力研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(6): 409 - 412.
- [14] Xia C X, Sun W, Wang X K. Test study of strain after integration of large scale infrared detector chip into cryogenic cold platform at low temperature[J]. Infrared, 2017, 38(8): 23 - 26. (in Chinese)
夏晨希, 孙闻, 王小坤. 大面阵红外探测器与低温冷平台集成后的应变测试研究[J]. 红外, 2017, 38(8): 23 - 26.
- [15] Xia C X. Research on low temperature coupling of large scale infrared detector and single point cold source[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Science, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
夏晨希. 超大规模红外探测器与单点冷源的低温耦合研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 中国科学院上海技术物理研究所, 2017.