

文章编号: 1672-8785(2019)04-0001-11

制冷焦平面探测器组件冷平台材料研究进展

余利泉^{1,2} 莫德锋^{1,3} 王 镇^{1,3} 龚海梅^{1,2,3*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200083;

2. 上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 201210;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 红外焦平面探测器在航空、航天、军事等多个领域具有广泛应用。我国亟需发展大面阵、轻量化和高可靠性的红外焦平面探测器及其杜瓦组件。介绍了国内外红外探测器组件的冷平台材料选用情况, 包括 Fe-Ni 膨胀合金、低膨胀高导热合金和新型陶瓷等。总结了红外焦平面探测器热失配应力的来源以及减小热失配应力的解决方案。最后给出了红外探测器研制过程中的冷平台材料选取建议以及在红外焦平面探测器组件发展趋势下需要重点研究的相关技术。

关键词: 红外探测器; 冷平台; 低膨胀材料

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.04.001

Research Progress on Cold Platform Materials for Cooled Focal Plane Detector Assembly

YU Li-quan^{1,2}, MO De-feng^{1,3}, WANG Zhen^{1,3}, GONG Hai-mei^{1,2,3*}

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Infrared focal plane detectors are widely used in aviation, aerospace, military and other fields. It is urgent to develop large format, lightweight and high reliability infrared focal plane detectors and their dewar assembly in China. The selection of cold platform materials for infrared detector assemblies at home and abroad is analyzed, including Fe-Ni expansion alloy, low expansion alloys with high thermal conductivity, new ceramic materials, and so on. The source of thermal mismatch stress in infrared focal plane detectors and the solution to reduce thermal mismatch stress are summarized. Finally, some suggestions on the material selection of cold platform during the development of infrared detector are given, while involving the key technologies which should be studied under the development trend of infrared focal plane detectors assembly.

Key words: infrared detector; cold platform; low expansion material

收稿日期: 2019-04-12

基金项目: 中国科学院青年创新促进会资助项目(2018274)

作者简介: 余利泉(1992-), 男, 四川巴中人, 硕士研究生, 主要从事红外探测器深低温封装研究。

*通讯作者: 龚海梅(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为航天遥感红外光电传感器、探测器组件及其抗辐射机理与可靠技术。E-mail: hmg@mail.sitp.ac.cn

0 引言

自两个世纪前人们发现红外辐射以来,红外技术获得了长足发展。特别是 20 世纪随着一些新材料如碲化铟(InSb)、碲镉汞(MCT)等的出现,红外探测技术进入了高速发展的现代红外技术时期^[1]。目前,该技术在航空、航天、科研和军事等领域具有广泛深刻的应用。其中,制冷型红外探测器以其灵敏度高、响应快、探测距离远等优点而在军事、航天等高端领域得到了广泛应用^[2]。该探测器一般采用杜瓦结构^[3]。

一直以来,红外探测器不断向着长线列、大面阵的方向发展^[4]。这一趋势对封装杜瓦提出了轻量化、低冷损、长寿命、高可靠性的要求。杜瓦的可靠性是制约整个探测器可靠性的关键因素。因此对杜瓦组件及其封装技术进行深入研究具有重要意义^[5]。图 1 为制冷型红外探测器封装杜瓦组件的结构示意图。其中,冷平台与芯片基板相结合,为整个芯片提供机械支撑和传递冷量。探测器冷头处的结构是图 2 所示的多层材料结构体系。杜瓦的机械设计和热控制设计等都需要优先考虑冷平台,尤其是要考虑其与硅读出电路及引线基板的热膨胀匹配性。本文针对新一代红外探测器杜瓦的研制需求,总结了目前国内外各类制冷红外焦平面探测器的冷平台材料,分析了设计冷平台时的材料选择方法,并提出了研制新一代红外焦平面组件需要发展的关键技术。

1 冷平台的材料类型

作为杜瓦组件的关键部分,冷平台对探测器的性能有着重要影响,其材料需要满足以下几个要求:(1)具有一定的机械强度,能承受机械振动以及温度循环冲击。(2)热导率较高。由于冷平台负责把制冷机冷指的冷量传导给芯片,导热性能差的材料会增加冷量损失。(3)具有适合的热膨胀系数。冷平台、芯片衬底以及读出电路的热膨胀系数匹配性会直接关系到焦平面的应力状态,从而决定了整个探测器的

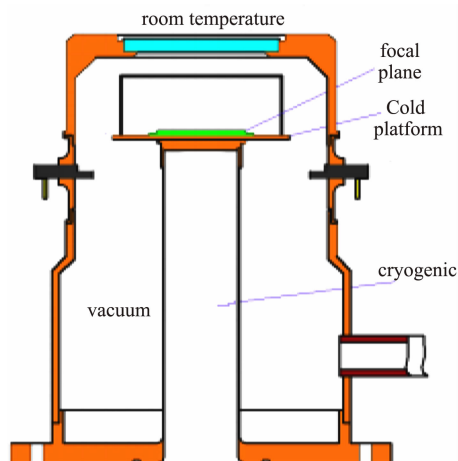


图 1 制冷型杜瓦结构的示意图

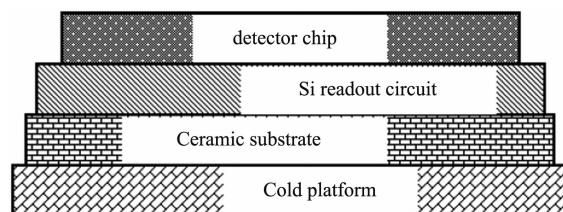


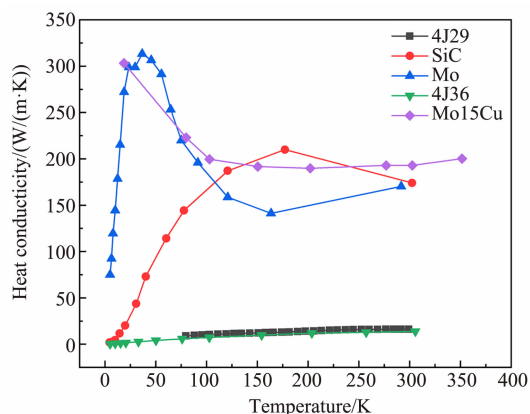
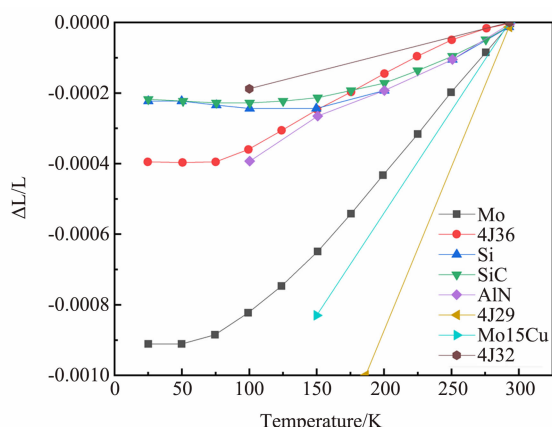
图 2 红外探测器焦平面的多层材料结构

性能。(4)可加工性及焊接性良好。冷平台的外形尺寸要求较高,且要与杜瓦芯柱进行气密焊接以保证杜瓦真空。(5)密度尽可能得小,特别是在航空、航天等对轻量化要求较为苛刻的特殊领域。

基于以上因素,冷平台材料一般选用热膨胀系数与硅读出电路及衬底材料较为匹配、导热系数较好、密度较低的金属材料,如可伐(4J29)和因瓦(4J36)等。随着材料制备技术的发展,一些性能与冷平台要求相匹配的新材料得到了应用,比如碳化硅陶瓷和高硅铝合金等。这些性能优异的新材料推动了第三代红外探测器的发展。图 3 和图 4 所示分别为常用冷平台材料的热导率以及膨胀性能与温度的关系^[6-9]。

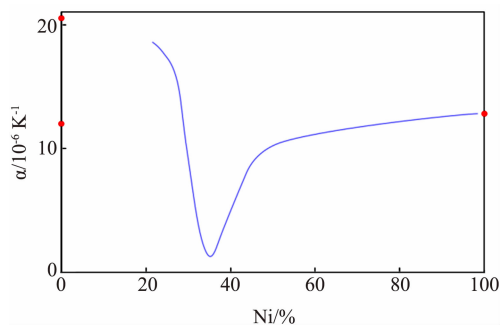
1.1 Fe-Ni 系膨胀合金

19 世纪末,法国人欧吉姆发现 Ni 含量为 36% 的 Fe-Ni 合金的尺寸在一定温度范围内几乎不变,于是将其取名为 Invar (因瓦合金,牌号 4J36)。图 5 所示为 Fe-Ni 合金的热膨胀系

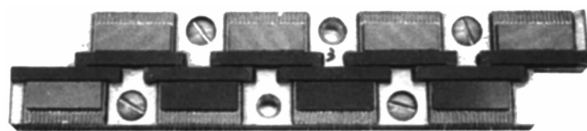
图 3 几种常用冷平台材料在低温时的热导率^[6,8-9]图 4 几种封装材料的膨胀曲线^[6-9]

数与 Ni 含量的关系。可以看出, 当 Ni 含量为 36% 时, 出现了反常的低热膨胀系数。这种反常现象的相关机理尚无定论。Fe-Ni 合金具有很严重的相变热滞, 其两相区平衡建立很缓慢。在一般的冷却环境下, 甚至在 $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 因瓦合金仍可能是单一的奥氏体组织。当以一部分 Co 替代奥氏体 Fe-Ni 合金中的 Ni 时, 也能使合金仍保持奥氏体组织, 并且在一定成分范围内仍有低膨胀特性。这就出现了新的一类膨胀合金——Fe-Co-Ni 合金。Fe-Ni 系膨胀合金的种类还有很多, 但在杜瓦冷平台上应用的主要是这两种。具体的合金牌号包括 Fe-Ni 系的 4J36 合金(因瓦)以及 Fe-Co-Ni 系的 4J32 合金(超因瓦)和 4J29 合金(可伐)。

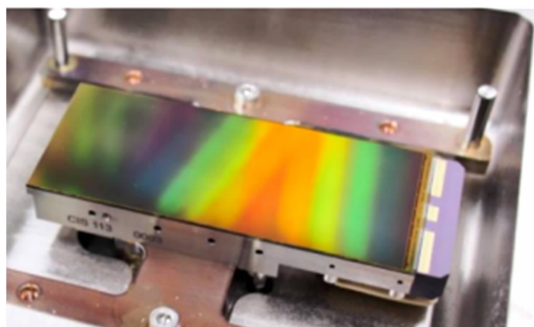
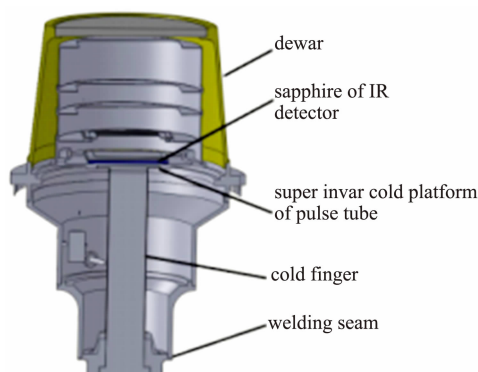
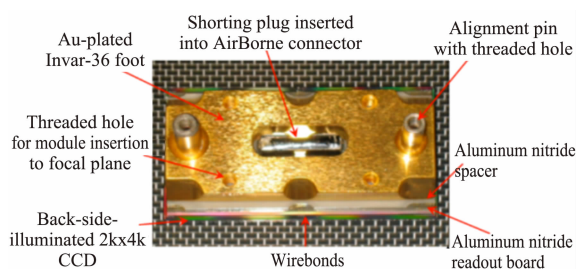
由于具有低膨胀性能、可加工性好以及来源广泛等原因, Fe-Ni 系膨胀合金在制冷焦平面冷平台上得到了广泛应用。王小坤等人报道了一种用于超长线列的红外探测器杜瓦。它的

图 5 Fe-Ni 合金的热膨胀系数与 Ni 含量的关系^[6]

冷平台采用可伐材料, 其尺寸为 $200\sim 300\text{ mm}$, 工作温度为 95 K ^[10]。如图 6 所示, 在李言谨等人研制的长波红外 2048 元线列 HgCdTe 焦平面器件中, 8 个 256 元线列焦平面器件交叉排列在一个可伐冷平台上^[11]。TAOSII 项目搭载了 17 个 $4.5\text{k}\times 2\text{k}$ CMOS 焦平面传感器(CIS 113), 其冷平台采用因瓦合金, 工作温度为 200 K (见图 7)^[12]。姜振华等人报道的用于嫦娥三号 and 天宫一/二号的超光谱成像仪的杜瓦组件(见图 8)冷平台选用了超因瓦材料(4J32)^[13]。Teledyne 公司在用于地基天文学(Ground Based Astronomy, GBA)的 HyViSi™模块和航天用 H2RG 模块的封装中采用因瓦合金作为冷平台材料^[9,14]。位于智利的暗能量相机(DECAM)采用了 74 个 CCD 模块, 其中 62 个 2048×4096 元 CCD 模块构成成像焦平面, 12 个 2048×2048 元 CCD 模块用于引导和聚焦。它们的工作温度为 233 K , 并且都通过了 173 K 下的测试。这些 CCD 模块封装用的材料为因瓦合金, 其封装外观及细节见图 9^[15]。

图 6 2048 元线列可伐冷平台^[11]

因瓦和可伐等 Fe-Ni 系膨胀合金在很多领域都占据着不可取代的重要地位。但是在红外探测器的规模越来越大, 精度、灵敏度、寿命等要求越来越高的发展趋势下, 因瓦和可伐在红外探测器杜瓦冷平台上的进一步应用很受限

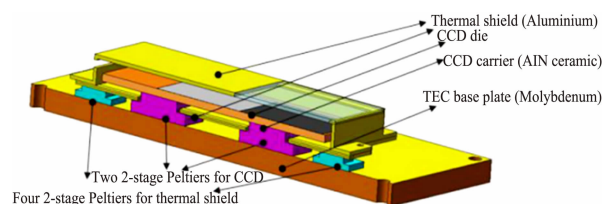
图 7 CIS 113 封装模块^[12]图 8 超光谱探测器的封装^[13]图 9 DECcam 的 CCD 封装模块^[15]

制。首先是密度较大的问题。因瓦、可伐合金和超因瓦合金等 Fe-Ni 系膨胀合金的密度都在 8 g/cm^3 左右。在航天领域轻量化要求日益苛刻的现状下，这一问题显得尤为突出。此外，由图 3 可知，Fe-Ni 系膨胀合金的热导率并不理想，导致制冷效率不高，制冷机负载增大，从而变相降低探测器的寿命。在低温下，因瓦及超因瓦合金的热膨胀系数与 Si 读出电路及陶瓷衬底的匹配度较高，但可伐合金的热膨胀系数与芯片及 Si 读出电路相差较大。而且可伐和超因瓦合金由于 Co 元素的加入降低了相稳定性，在低温下容易发生奥氏体/马氏体相转变，导致膨胀系数剧烈变化。

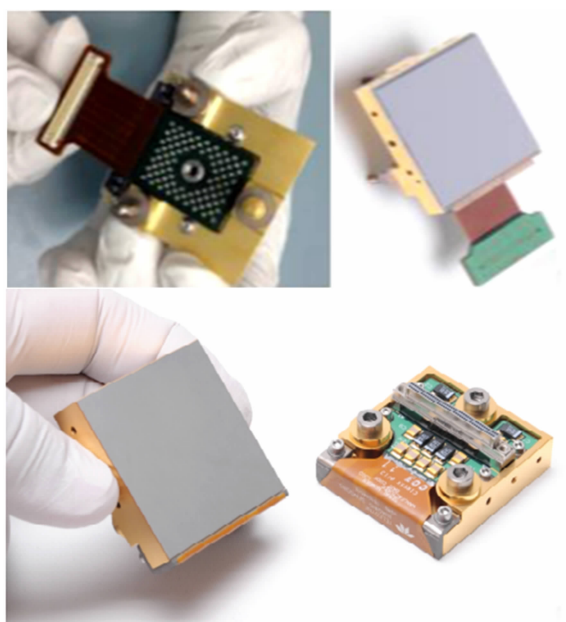
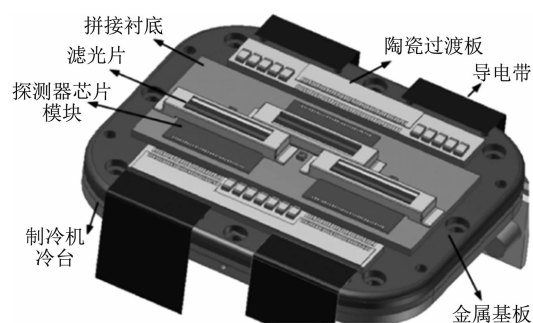
1.2 低膨胀高导热合金

除了因瓦、可伐等铁系膨胀合金之外，在电子封装领域还有很多金属及其合金材料也得到了大规模应用。其中见诸报道的可作为制冷探测器冷平台材料的有钼 (Mo)、钨铜合金 (WCu)、钼铜合金 (MoCu) 等。这些合金不仅具有必要的低热膨胀系数，而且它们相对于因瓦等铁系膨胀合金的最大优势在于其拥有很高的热导率。这与探测器冷平台功能的契合度极高，而且这些材料的加工和焊接性能都较好，所以在制冷探测器封装杜瓦冷平台上也得到了大量应用。

Liu D 等人报道了 80×1 元长波光电探测器和双频焦平面探测器的封装杜瓦。他们使用机械制冷机将探测器的工作温度降到 $60 \text{ K}/80 \text{ K}$ 。这两种探测器的封装杜瓦都采用钼作为焦平面的冷平台^[16]。杨文刚等人报道了一种用于天基望远镜的 CCD 焦平面 (见图 10)，其尺寸为 $12 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ ，工作温度低于 208 K ^[17]。Teledyne 公司在 GBA H2RG 模块和航天用 H2RG 模块中也都有采用钼金属作为冷平台材料。基于钼金属封装的 GBA H2RG 及航天用 H2RG 的外观模式与基于因瓦封装的 HyViSi™ 探测器及航天用 H2RG 的外观模式一致，如图 11 所示^[13-14]。以钼作为冷平台材料的航天用 H2RG 探测器的最新应用是 Euclid 空间望远镜，其近红外光谱仪 (NISP) 的探测器系统是一种由 16 个 H2RG ($2\text{k} \times 2\text{k}$ 像元) 和 16 个 SIDECAR ASIC SCE 模块组成的 4×4 焦平面，其工作温度为 100 K ^[18]。

图 10 某天基望远镜的 CCD 焦平面^[17]

除钼以外的一些低膨胀高热导材料如钨铜、钼铜等在冷平台上也有应用。东海杰等人报道了用于“高分五号”卫星全谱段光谱成像仪

图 11 H2RG 的铅金属封装^[9,14,18]图 12 “高分五号”卫星的全谱段光谱成像仪^[19]

(见图 12)的红外探测器组件结构。整个探测器系统集成两个不同谱段的工作温度为 60 K 的 3072×3 元短波红外探测器、两个不同谱段的工作温度为 60 K 的 1536×3 元中波红外探测器以及 4 个不同谱段的工作温度为 80 K 的 1536×3 元长波红外探测器。整个长行列探测器组件封装用冷台面结构的设计尺寸为 $95 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 冷平台采用钼铜合金材料^[19]。钨铜的性能与钼铜较为接近, 而目前还没有文献明确报道将其作为冷平台材料。但是在整个探测器冷头中, 基于钨铜材料制作的连接件、垫片和引脚等小零件被大量使用。

钼、钨铜和钼铜等材料具有较低的热膨胀系数和极高的热导率, 在冷平台的应用环境中具有极大优势, 可在较低的热失配水平下大幅

降低焦平面的热梯度。但密度过大是其应用受到限制的主要原因。而且它们的热膨胀系数与探测器芯片、读出电路以及陶瓷衬底之间还是有差异的。

1.3 陶瓷材料

在红外探测器焦平面结构中, 与冷平面直接接触的是引线基板, 其材料一般为绝缘度高、平整度好、强度高的陶瓷材料, 如氧化铝陶瓷、碳化硅 (SiC) 陶瓷和氮化铝 (AlN) 陶瓷等。而基板材料与冷平台材料之间的热失配应力越小越好, 所以将陶瓷材料作为冷平台材料具有极大的优势。冷平台对导热性能的要求使得 SiC 和 AlN 陶瓷这类导热性能优异的陶瓷材料拥有极其广阔的应用前景。由于 SiC 具有与硅读出电路紧密匹配的热膨胀系数, 用其封装时不再需要平衡层, 使得焦平面阵列的封装变得更简单。与 AlN 陶瓷等材料相比, SiC 具有更优越的可加工性, 便于加工成更复杂的形状。不同于常规金属封装, 利用 SiC 很高的导热系数可控制焦平面的温度梯度, 同时它的密度要低得多, 这在航天及空间应用中是一个重要优势。特别是最近一些先进的大体积陶瓷制备技术的出现对陶瓷材料的工程应用进展起到了极大的推动作用。

基于大体积 SiC 陶瓷加工工艺, SiC 陶瓷作为冷平台材料已经得到了大规模应用并取得了非常好的效果。2010 年, Teledyne 公司为其工作温度在 $77 \sim 120 \text{ K}$ 的 2048×2048 元 H2RG 系列探测器开发了航天用 SiC 封装技术^[14]。2016 年, 该公司研制出了像元数为 $4\text{k} \times 4\text{k}$ 、像元间距为 $10 \mu\text{m}$ 的低噪音硅混合 CMOS 可见光焦平面阵列。由于结合了硅 PIN 探测器层, 该产品被称为 HyViSITM。H4RG-10 探测器同样采用轻质 SiC 封装 (见图 13)^[20]。同时, Teledyne 公司设计并生产了像元间距为 $15 \mu\text{m}$ 的 $4\text{k} \times 4\text{k}$ 元 H4RG-15 探测器。完整封装的 H4RG-15 器件的尺寸为 $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$, 最佳使用温度为 92 K ^[21]。除了 Teledyne 公司的 HxRG 系列探测器的模块封装用到 SiC 之外, 伯克利

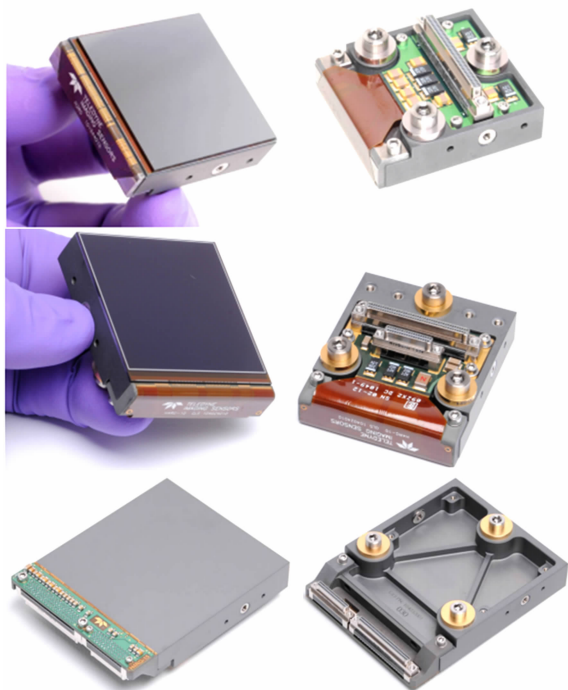


图 13 H2RG(上)、H4RG-10(中)和 H4RG-15(下)的 SiC 封装模块^[20-21]

劳伦斯实验室(LBNL)也报道了基于 SiC 封装的 CCD 模块^[22]。

除了用于探测器封装模块的冷平台以外, SiC 材料的最大优势还在于它可以用作超大规模焦平面探测器的冷平台材料。伯克利劳伦斯实验室开发了一种超大规模焦平面探测器。它由 16 个 LBNL CCD 阵列和 16 个 Teledyne H2RG 探测器阵列组成。这 32 个探测器模块排列组装在一个 SiC 冷板上, 如图 14 所示^[23]。整个焦平面探测器的工作温度低于 120 K。用于斯巴鲁望远镜的 HSC 宽视场光学相机具有 116 个像元间距为 $15\ \mu\text{m}$ 的 $2\text{ k} \times 4\text{ k}$ 元 CCD, 其焦平面直径约为 600 mm, 厚度为 20 mm, 工作温度为 -100°C , SiC 冷平台及组装情况见图 15^[24]。

除了用于探测器冷平台之外, 大体积 SiC 陶瓷材料凭借其热导率高、强度大、密度小、稳定性高、膨胀系数低等特点在很多领域特别是航天领域有着巨大的应用前景, 比如空间光学仪器的工作台、空间望远镜的反射镜和超高稳定结构等^[25]。目前市面上有多家掌握大体

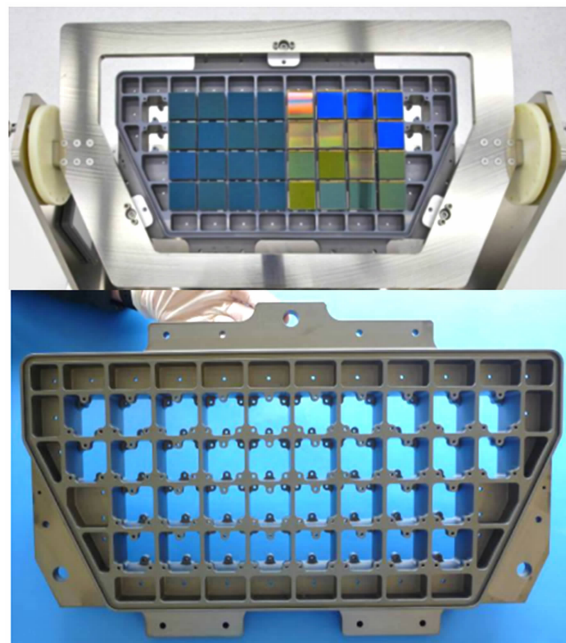


图 14 伯克利劳伦斯实验室开发的超大规模焦平面探测器^[23]

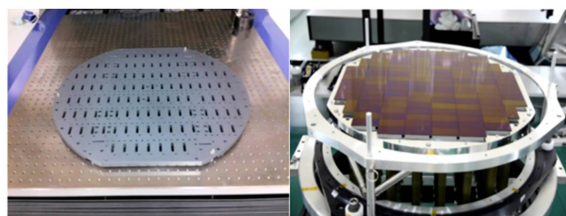


图 15 斯巴鲁望远镜的 SiC 冷平台^[24]

积 SiC 陶瓷成型及加工技术的公司。表 1 列出了几家公司的产品及其部分性能参数^[26]。AlN 陶瓷是人们从 20 世纪 90 年代开始深入研究的一种新型材料。与传统的 Al_2O_3 陶瓷相比, 它在导热性能、热膨胀系数和强度等方面都有较大提升, 其导热率达到 $300\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 且热膨胀系数与芯片材料更接近。在探测器领域, 一般都将它作为衬底材料, 以取代传统的 Al_2O_3 陶瓷。前面说过, 冷平台材料与衬底材料最好能保持一致, 所以 AlN 陶瓷材料有用作冷平台材料的潜力。但就目前来讲, 该材料的烧结工艺复杂, 要求严苛, 而且其产品性能不稳定, 生产线少^[27]。因此很少见到将 AlN 作为冷平台材料的详细报道。大多都是采用 AlN 作为衬底材料或过度基板, 然后冷平台依然采用因瓦合金或 SiC 陶瓷^[28-29]。

表 1 几种 SiC 材料的力学性能和热性能比较^[26]

材料性能	单位	ACM-300 (Orange E&C)	HB-CESIC® (ECM)	BOOSTEC® SiC (MERSEN)	SUPERSIC®-SP (PCPO)
密度	g/cm ³	3.05	2.96	3.15	3.04
杨氏模量	GPa	360	350	420	373
抗弯强度	MPa	370	266	400	220
热膨胀系数	10 ⁻⁶ /K	2.2	2.3	2	2.4
热导率	W/(m·K)	—	145	180	224

2 冷平台材料选取方法

2.1 多层结构热失配模型

探测器的冷平台结构在前文中已有说明。对于这种多层材料结构体系,如图 16 所示, t_i ($i=1,2,\dots,n$)为第 i 层材料的厚度,材料长度为 L 。当温度发生变化时,材料会由于热膨胀系数不同而产生上凸或者下凹的宏观形变。

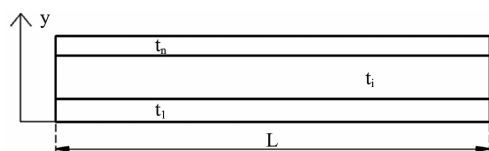


图 16 多层材料模型

假设图 16 中的体系在温度改变时产生了图 17 所示的宏观形变,其程度会随着温度变化范围、热膨胀系数差异以及每层厚度的不同而不同。根据纯弯曲理论可推导出中性层的曲率半径 R 和中性层到第一层材料底面的距离 Y_c :

$$R = \frac{(\sum E_i t_i Y_i) - (\sum E_i I_i)(\sum E_i t_i)}{(\sum E_i t_i Y_i)(\sum E_i t_i \alpha_i \Delta T) - (\sum E_i t_i)(\sum E_i t_i Y_i \alpha_i \Delta T)} \quad (1)$$

$$Y_c = \frac{(\sum E_i I_i)(\sum E_i t_i \alpha_i \Delta T) - (\sum E_i t_i Y_i)(\sum E_i t_i Y_i \alpha_i \Delta T)}{(\sum E_i t_i Y_i)(\sum E_i t_i \alpha_i \Delta T) - (\sum E_i t_i)(\sum E_i t_i Y_i \alpha_i \Delta T)} \quad (2)$$

式中, I_i 为第 i 层材料的单位长度惯性矩, $I_i = t_i/12 + 2Y_i t_i$; Y_i 为第一层材料底部到第 i 层材料中心的距离; E_i 和 α_i 分别为第 i 层材料的弹性模量和热膨胀系数; ΔT 为温度变化。

第一层材料底面的曲率半径为 $r = R - Y_c$ 。

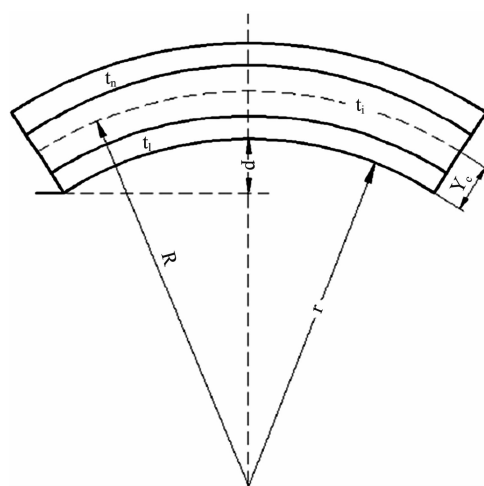


图 17 多层材料弯曲的示意图

曲率半径 R 和 r 比多层结构的长度 L 及总厚度大得多,实际产生的形变比图示结果微弱许多。近似推导出弯曲形变 d 与曲率半径 r 的关系式:

$$d = r [1 - \sqrt{1 - (L/2r)^2}] \quad (3)$$

然后利用弯曲形变评价多层材料体系的热失配^[29]。

一般在研究红外探测器焦平面处的热失配时都采用有限元方法进行模拟分析,然后将其与实际结果进行对比。孙闻以 256×320 元中波红外探测器为对象,使用 ANSYS 软件分析了冷平台材料的热膨胀系数对探测器芯片应力应变的影响,发现在常规探测器焦平面结构中芯片应变和应力的最小值分别出现在冷平台材料的热膨胀系数为 $6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 $2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 时。除此以外,他还对比分析了在冷平台处添

加平衡层时的情况,发现相对常规结构芯片的应力和应变均有减小,且与实际测量结果相吻合^[30]。

2.2 降低红外焦平面热失配应力的策略

拥有多层材料体系的红外探测器焦平面通常是再次常温封装储存,但却在低温下工作,所以器件芯片、硅读出电路和杜瓦冷平台之间的热失配是无法避免的问题。解决这一问题的技术方案主要聚焦在降低读出电路与芯片之间的热失配上,比如外延衬底减薄技术或者去衬底技术、热匹配外延衬底、优化结构尺寸和增加复合平衡层等。

2.2.1 外延衬底减薄技术或去衬底技术

红外探测器常用的 CdZnTe 衬底及 GaAs 衬底与硅读出电路的热膨胀系数相差较大。在受到常温低温循环冲击时,较薄衬底抵抗来自硅读出电路的形变制约能力较强,可有效改善芯片外延衬底与硅读出电路的热失配问题。法国 CEA-LETI 研究中心制造的 512×512 和 240×320 等面阵探测器以及美国 Rockwell 公司生产的大规模面阵都采用了衬底减薄工艺^[22,31-32]。Teledyne 公司的 HxRG 系列探测器则采用了去衬底技术^[9,14,18,20-21]。

2.2.2 热匹配外延衬底

常规衬底选择时主要考虑到与芯片材料晶格常数和热性能的匹配。MBE 和 MOCVD 等方法的出现使得在晶格常数适配不好的衬底材料上外延生长探测器薄膜成为可能。Rockwell

公司在 1024×1024 元和 2048×2048 元碲镉汞短波红外探测器上成功应用了宝石片衬底。若要解决衬底与硅读出电路的热失配, Si 就是最理想的衬底材料。但是基于 Si 衬底生长出的器件薄膜缺陷大,而且芯片与衬底之间的热失配应力对器件性能的影响比衬底与读出电路之间的热失配应力更大。

2.2.3 优化结构尺寸和增加复合平衡层

在硅读出电路的背面添加一层高热膨胀系数的压缩层。利用这一压缩层限制硅读出电路,使其与芯片收缩一致。Rockwell 公司的 1024×1024 元焦平面探测器在宝石外延衬底下引入了一个复合平衡层,极大提升了探测器的可靠性。李言谨等人在 256×1 元和 256×256 元碲镉汞焦平面器件中分别引入因瓦和可伐两种平衡层(引入方式和结构见图 18),明显改善探测器抵抗温度循环冲击的能力以及光电性能^[11]。范广宇等人也在 640×480 元面阵探测器上验证了这一技术方案的可行性。结果表明,优化后探测器的性能保持及温度循环适应能力大大提高^[33]。在国外一些大面阵探测器焦平面如用于 Euclid 任务的 H2RG 探测器的钼金属封装模块中,Teledyne 公司将平衡复合结构置于复合结构和钼基座之间,以迫使读出电路与基座一样收缩,在低温使用期间不会变形^[17]。在用于“高分五号”卫星全谱段光谱成像仪的红外探测器组件中,为了应对大尺寸宝石拼接基板与钼铜材料的热失配,将金属基板

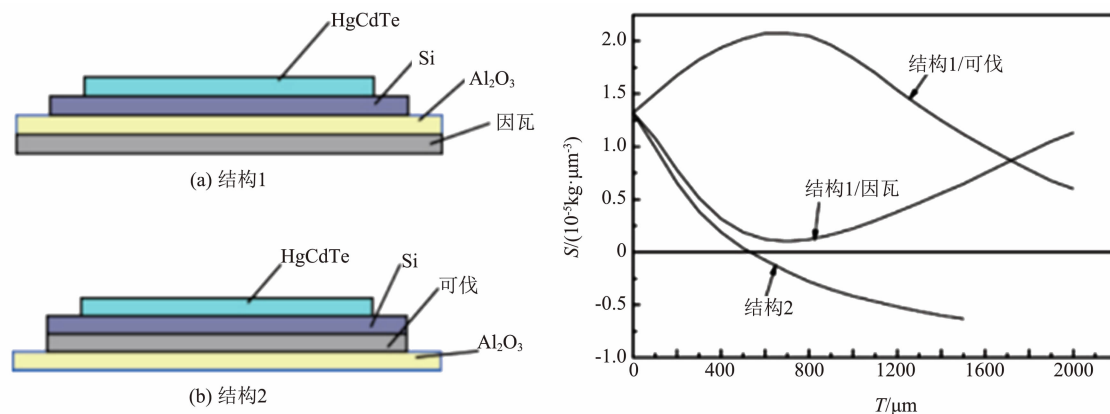
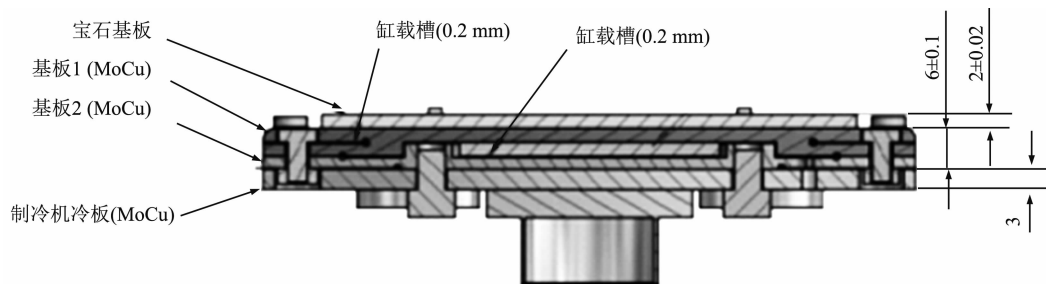


图 18 红外焦平面结构优化设计及其应力改善效果^[11]

图 19 冷平台卸载结构设计^[19]

设计成两体结构。在金属基板上设计了一种用于改善探测器焦平面应力分配的卸载槽结构, 以避免冷台面结构中心区域的应力变形的增大。冷台面结构与制冷机耦合之间采用填充胶与螺钉耦合紧固方式。在金属基板的集成过程中, 采用塞尺对卸载槽的尺寸进行控制。图 19 为冷平台卸载结构设计的示意图^[19]。

2.3 冷平台材料的选择策略

探测器焦平面的工作环境和多层材料的结构特点对冷平台提出了热膨胀系数与 Si 比较接近、热导率高以及具有一定强度等要求。但这些要求的严苛程度会随探测器规模增大和使用环境温度降低而不断提升。下面就以有限的的数据来探讨下不同规模和使用温度时探测器焦平面冷平台材料的选择问题。

图 20 所示为各种探测器焦平面规模和使用温度对应下的冷平台材料。其中, X 轴表示方阵焦平面的规模, Y 轴表示探测器的工作温度。对由多个探测器模块组装而成的拼接焦平面取像元和。由于因瓦合金具有极低的线膨胀系数及其与 Si 较好的匹配度, 无需特别措施就能使焦平面处于很低的应力状态, 所以该材料很广泛地应用于各种探测器焦平面冷平台。Fe 系膨胀合金中的其他牌号合金由于膨胀系数的不匹配以及低温下容易发生相转变而仅应用于中小规模或者工作温度较高的探测器。Mo、WCu 和 MoCu 等合金具有极高的导热系数以及合适的线膨胀系数, 在低温焦平面冷平台材料的应用上有极大优势。特别是在制冷要求较高的探测器(比如工作温度在液氮及液氮温区以下的探测器)中有部分选用这类材料。

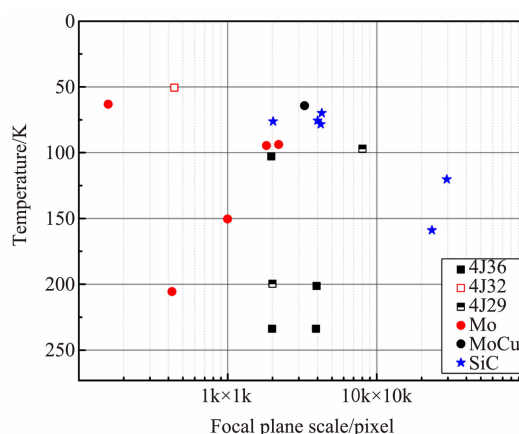


图 20 不同材料在冷平台上的应用情况

自 2010 年开始被 Teledyne 公司用作冷平台材料以来, SiC 陶瓷材料在大面阵、深低温探测器的冷平台上得到了大量应用。

如前文所述, 冷平台的功能要求其材料具有与 Si 相匹配的低膨胀性能以及良好的导热性能。在探测器规模不断变大以及航天应用需求持续增加的情况下, 冷平台材料的密度也需要较低。传统低膨胀封装合金的性能难以完全贴合这些要求, 而新型 SiC 陶瓷材料在这三方面都可以很好地满足冷平台材料的需求。但是短时间内 SiC 陶瓷仍难以在冷平台上完全取代因瓦和 Mo 等材料, 而且在某些探测器上的竞争力甚至还不如它们。陶瓷材料相对于金属材料的缺点在于其较脆性, 可加工性不高, 且成型条件苛刻。在将陶瓷材料作为冷平台材料时, 整个探测器的封装工艺变得更为复杂。图 21 为冷平台材料中有代表性的三种材料的关键性能对比图。

因此在探测器冷平台材料的选择中, 当焦平面规模不大、使用温度较高时, Fe 系膨胀

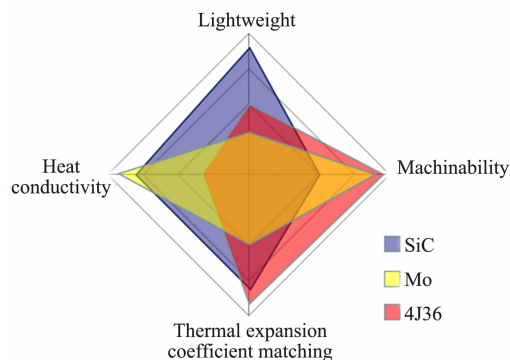


图 21 冷平台材料的关键性能对比

合金、Mo 和 MoCu 等合金均能满足使用要求。当规模较大、使用温度区间较低、寿命要求较低时，可以使用因瓦合金；当制冷效率等要求较高时，可以采用 Mo 和 MoCu 等低膨胀高导热合金。在超大面阵和拼接探测器组件的冷平台材料中，SiC 陶瓷是一个不错的选择。除了本文提及的材料之外，还有一些材料(如高硅铝可控膨胀合金、SiN 陶瓷材料)在性能上有潜力成为新的冷平台材料，但目前尚未见诸报道。

3 结束语

目前红外探测器正向着超长线列、超大面阵的方向发展。探测器各层材料之间的热失配应力状态会随着规模增大而不断恶化。这对红外探测器封装杜瓦冷平台材料的多方面性能提出了更高要求。综合考虑各方面因素，传统的封装材料如因瓦、可伐和 Mo 等依旧被用作冷平台材料。但传统材料的性能已经无法全面符合冷平台功能，其难以满足未来探测器发展对封装杜瓦冷平台提出的要求也是毋庸置疑的。陶瓷材料特别是 SiC 陶瓷以其优异的性能而在杜瓦冷平台材料上得到了良好的应用并具有良好的发展前景。考虑到红外探测器的工作环境及杜瓦结构，新型材料的低温性能数据都较为匮乏。因此，在后续开发新材料的同时，对其低温性能表征以及焊接性与气密焊接工艺等进行研究都具有重要意义。

参考文献

[1] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择 [J].

红外技术, 2013, **35**(1): 1–8.

[2] 李意, 雷志勇, 李青松. 红外探测技术的应用与发展 [J]. 国外电子测量技术, 2018, **37**(2): 80–83.

[3] 龚海梅, 邵秀梅, 李向阳, 等. 航天先进红外探测器组件技术及应用 [J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(12): 3129–3140.

[4] Rogalski A. Next Decade in Infrared Detectors [C]. SPIE, 2017, **10433**: 104330L.

[5] 陈星. 碲镉汞红外焦平面探测器可靠性相关技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.

[6] 膨胀合金手册编写组. 膨胀合金手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1979.

[7] 文佳佳, 张添, 陆燕. 可伐合金材料低温热物性及弹性模量测试 [J]. 低温工程, 2016, **38**(6): 43–47.

[8] 王光宗, 郭宏, 尹法章, 等. 钼铜的低温导热研究 [J]. 热加工工艺, 2012, **41**(16): 13–15.

[9] Blank R, Anglin S, Beletic J W, et al. The HxRG Family of High Performance Image Sensors for Astronomy [C]. Maui: 6th ASP Conference on Solar Polarization, 2011.

[10] 李俊, 王小坤, 张磊, 等. 超长线列红外探测器杜瓦真空寿命评估方法 [J]. 激光与红外, 2018, **48**(7): 854–859.

[11] 李言谨, 杨建荣, 何力, 等. 长波红外元线列碲镉汞焦平面器件 [J]. 红外与毫米波学报, 2009, **28**(2): 90–92.

[12] Wang S Y, Geary J C, Amato S M, et al. High Speed Wide Field CMOS Camera for Transneptunian Automatic Occultation Survey [C]. SPIE, 2014, **9147**: 914772.

[13] Jiang Z, Wu Y. A Miniature Ppulse Tube Cryocooler Used in a Superspectral Imager [C]. SPIE, 2017, **10180**: 1018003.

[14] Blank R, Anglin S, Beletic J W, et al. H2RG Focal Plane Array and Camera Performance Update [C]. SPIE, 2012, **8453**: 845310.

[15] Kubik D, Alvarez R, Annis J, et al. Automated Characterization of CCD Detectors for DECam [C]. SPIE, 2010, **7735**: 77355C.

[16] Liu D, Xu Q, Mo D, et al. Structural Analysis of

- an Infrared Focal Plane Dewar Assembly for Meteorological Satellite [C]. *SPIE*, 2018, **10626**: 106260F.
- [17] Xiangli B, Kim D W, Xue S, et al. Telescope and Space Optical Instrumentation-Design and Verification of Focal Plane Assembly Thermal Control System of One Space-based Astronomy Telescope [C]. *SPIE*, 2015, **9678**: 96780Q.
- [18] Bai Y, Farris M, Fischer L, et al. Manufacturability and Performance of 2.3 μm HgCdTe H2RG Sensor Chip Assemblies for Euclid [C]. *SPIE*, 2018, **10709**: 1070915.
- [19] 东海杰, 张磊, 白绍竣, 等. 长线列红外探测器组件冷台面结构设计 [J]. *激光与红外*, 2018, **48**(8): 1020-1022.
- [20] Bai Y, Tennant W, Anglin S, et al. 4 K $\times$ 4 K Format 10 μm Pixel Pitch H4RG-10 Hybrid CMOS Silicon Visible Focal Plane Array for Space Astronomy [C]. *SPIE*, 2012, **8453**: 84530M.
- [21] Blank R, Beletic J W, Cooper D, et al. Development and Production of the H4RG-15 Focal Plane Array [C]. *SPIE*, 2012, **8453**: 84530V.
- [22] Ballester O, Cardielsas L, Castilla J, et al. The Dark Energy Camera Readout System [C]. *SPIE*, 2012, **8453**: 84532Q.
- [23] Besuner R W, Bebek C J, Hart P A, et al. A 260 Megapixel Visible/NIR Mixed Technology Focal Plane for Space [C]. *SPIE*, 2011, **8155**: 81550D.
- [24] Obuchi Y, Komiyama Y, Kamata Y, et al. Hyper Suprime-Cam: Implementation and Performance of the Cryogenic Dewar [C]. *SPIE*, 2012, **8446**: 84666Q.
- [25] Devilliers C, Kroedel M R. CESIC: A New Technology for Lightweight and Cost Effective Space Instrument Structures and Mirrors [C]. *SPIE*, 2006, **5494**: 285-296.
- [26] Lee H B. Trade Study of All-SiC Lightweight Primary Mirror and Metering Structures for Spaceborne Telescopes [C]. *SPIE*, 2015, **9574**: 95740D.
- [27] 王玉龙, 张磊, 赵秀峰, 等. 红外探测器封装陶瓷衬底材料特性及其应用研究 [J]. *激光与红外*, 2018, **48**(5): 61-66.
- [28] Baltay C, Emmet W, Rabinowitz D, et al. Space-qualified, Abutable Packaging for LBNL p-Channel CCDs, Part I [C]. *SPIE*, 2010, **7742**: 77422E.
- [29] Hsueh C H. Modeling of Elastic Deformation of Multilayers Due to Residual Stress and External Bending [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **91**(12): 9652-9656.
- [30] 孙闻. 制冷型红外探测器组件低温热特性研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2017.
- [31] Ziegler J, Eich D, Hanna S, et al. Recent Results of Two-dimensional LW- and VLW- HgCdTe IR FPAs at AIM [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 766038.
- [32] Fieque B, Jamin N, Chorier P, et al. New Sofradir VISIR-SWIR Large Format Detector for Next Generation Space Missions [C]. *SPIE*, 2012, **8535**: 853513.
- [33] 范广宇, 龚海梅, 李言谨. 红外焦平面器件温度循环可靠性研究 [J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(4): 607-610.