

集成透镜的多波段红外探测器组件封装技术

陈俊林^{1,2}, 莫德锋^{1,2*}, 蒋梦蝶^{1,2}, 朱海勇^{1,2}, 徐勤飞^{1,2}, 曾智江^{1,2}, 张晶琳^{1,2}, 杨晓阳^{1,2}, 李雪^{1,2}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中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

摘要 多光谱探测器的小型化和集成化已成为红外探测器的发展方向之一。针对多波段探测器集成低温光学透镜的特点,提出了一种集成透镜兼窗口的气密性封装组件结构。对同一组件多波段探测器不同焦面高精度光学配准、低形变滤光片支撑结构及防光学串扰、杂散光抑制等方面进行了研究。以某项目用短波红外组件为研究对象,通过 3 个 10 元探测器拼接后与 3 个波段滤光片和透镜低温配准、低形变多波段滤光片窄缝拼接结构设计、杂散光分析抑制等关键技术,实现了 3 波段探测器与滤光片拼接精度优于 $\pm 5 \mu\text{m}$,透镜与探测器配准精度优于 $\pm 15 \mu\text{m}$,滤光片低温形变小于 $0.9278 \mu\text{m}$,多波段间无明显光学串扰,并经受住 1500 h 长时间通电老练以及总均方根加速度为 $22.0 g$ 的随机振动和 $60g$ 的冲击加速度试验考核。解决了多波段探测器小型化和集成化封装中的高精度配准、低形变滤光片支撑、防光学串扰、杂散光抑制等一系列问题。该组件已成功应用于某项目用光谱成像仪中。

关键词 探测器; 多通道集成技术; 红外探测器组件; 滤光片低温形变; 光学串扰

中图分类号 TN215

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231119

1 引言

热红外(IR)波段多光谱连续综合观测,可实现云气溶胶、水汽、陆地表面特性、海洋水色等大气、陆地、海洋参量的高精度定量反演,观测数据主要用于天气预报、生态、环境、灾害监测业务及研究^[1]。空间遥感应用的光电探测系统对红外探测器组件的体积、重量、可靠性有严格的要求,并向着多通道集成和高空间分辨率方向发展^[2]。多波段集成探测器可以有效避免外界环境对探测率的影响,实现多谱段目标探测,同时将光学系统透镜集成在红外探测器的近表面可简化光学系统,特别是当光学系统的 F 数较小时,可大大缩小系统体积^[3-4]。

多波段多通道集成技术在国外发展较为迅速。约翰·霍普金斯大学应用物理实验室在美国宇航局地球科学技术办公室(ESTO)的资助下开发的紧凑型中波成像传感器(CMIS),探测器采用二类超晶格红外探测器,采用适用于云覆盖和温度探测的红外光谱中的 3 个特定敏感波段($2.25 \mu\text{m}$ 、 $3.75 \mu\text{m}$ 和 $4.05 \mu\text{m}$),并集成对应滤光片和透镜^[5]。美国地球静止天气卫星成像仪 GOES-ABI 采用 16 个通道,包括 2 个可见光通道、4 个近红外通道和 10 个红外通道,可以以高光谱分辨率测量地球辐射,利用这些数据提供大气的压力、温度和湿度剖面^[6]。美国陆地资源卫星 Landsat9 的 OLI 2 成像仪集成了 9 通道滤光片,实现了多谱段的光谱探测^[7]。2016 年发射的美国红外高光谱卫星^[8-9],采用了

3×3 的芯片阵列,每一个芯片集成一个柱状透镜,单个组件内共集成 9 个透镜,工作温度 $80 \sim 98 \text{ K}$ 。卫星在 9 透镜-芯片耦合集成方法方面,通过限位台阶或者限位支撑进行控制,在深低温应用时,这种方法的耦合精度受制于材料的低温变形,为了实现高精度,在材料选择和结构方面需精细设计,但详细设计未见报道。

国内,曾智江等^[10]报道了一种封装在杜瓦内的多透镜深低温红外探测器杜瓦结构,管壳作为透镜的支撑构件应用于杜瓦内,通过结构设计和定位装配实现了芯片与透镜组的精密机械配准,在芯片与透镜配准时无需实现密封。刘大福等^[11]报道了一种封装在杜瓦内的多透镜红外探测器管壳结构,用于第二代地球静止轨道(GEO)气象的扫描辐射计载荷,并描述了组件的结构以及达到的性能,如电性能、芯片配准、光学串扰和光谱响应。FY-3/MERSI 作为我国第二代极轨气象卫星的主载荷,提供全球的温、湿、云、辐射等参数,实现中期数值预报,监测大范围的自然灾害和生态环境,探测地球物理参数,研究全球气候变化与环境变化的规律,中分辨率光谱成像仪(MERSI 型)仪器共设置 25 个观测通道,其中太阳反射波段通道有 19 个,红外通道有 6 个,6 个通道具有 250 m 空间分辨率(包括 2 个长波红外分裂窗通道),其余通道空间分辨率为 1000 m ^[12]。

集成光学透镜的多波段红外探测器气密性组件封装技术未见文献报道,国内外相关研究集中在多波段探测器系统集成及真空杜瓦组件封装。集成光学透镜的

收稿日期: 2023-08-18; 修回日期: 2023-09-11; 录用日期: 2023-10-11; 网络首发日期: 2023-11-13

通信作者: *dfmo@mail.sitp.ac.cn

多波段红外探测器气密性组件封装的重点在于多波段红外探测器集成于组件管壳内部不同波段探测器之间的间距配准要求较高,同时由于在焦面不同位置,需要严格控制不同焦面探测器之间的轴向间距。多波段之间的滤光片由于距探测器焦面距离较小,不同波段滤光片间隔小,从而导致不同波段滤光片之间的光学串扰、光谱一致性等需要严格控制,同时集成透镜的探测器组件内部杂散光也需要严格控制,以防止不必要的光束进入组件内部。集成多波段探测器的滤光片工作在低温下(130 K 左右),滤光片在低温下的形变以及应力控制需要重点突破,以防止滤光片低温失效。将整机的后路光学元件透镜集成在组件内部,需要对多波段探测器的通道配准与滤光片配准进行严格的控制,同时保证透镜在管壳上高的可靠性。本文以某项目中分辨率光谱成像仪短波红外探测器为研究对象,对集成光学透镜的多波段红外探测器组件所需的多通道配准、低形变滤光片支撑、防光学串扰及组件内杂散光抑制等封装技术进行系统研究,成功研制出集成光学透镜的三波段短波红外探测器气密性组件,对于航天红外多波段探测器组件的小型化和集成化有一定的现实意义。

2 集成透镜的多波段红外探测器组件特点

2.1 器件及探测器排布

短波红外 3 个通道为 $1.38\ \mu\text{m}$ ($1.365\sim 1.395\ \mu\text{m}$)、

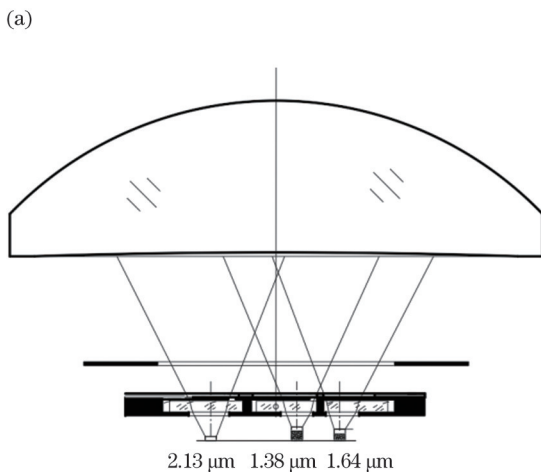


图 2 多波段红外探测器阵列拼接示意图。(a)纵向排布示意图;(b)多通道探测器平面排布示意图

Fig. 2 Layout of jointing of multi-band IR detector array. (a) Vertical layout diagram of multi-band detectors; (b) schematic diagram of multi-channel detector plane layout

2.2 集成透镜的多波段红外探测器组件

集成透镜的多波段红外探测器气密性封装组件结构如图 3 所示,包括组件外壳、盖板、透镜、一级光阑、滤光片支架、滤光片、芯片模块、电极板、滤光片支架支撑。芯片模块和电极板通过胶接固定于组件外壳的底面,电极板位于芯片模块的两侧,芯片模块的

$1.64\ \mu\text{m}$ ($1.615\sim 1.665\ \mu\text{m}$)和 $2.13\ \mu\text{m}$ ($2.105\sim 2.155\ \mu\text{m}$),采用光伏型碲镉汞(MCT)红外探测芯片、读出电路(带运算放大器)和滤光片组合成组件的技术路线,每个光谱通道探测器均为 1 条 10 元线列,光敏元尺寸为 $0.300\ \text{mm}\times 0.260\ \text{mm}$ 。图 1 为探测器芯片的光刻版图。探测器主要由碲镉汞、宝石衬底、环氧胶及硫化锌层、二氧化硅层组成。

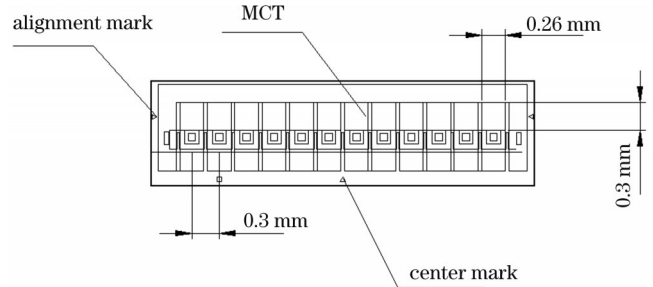
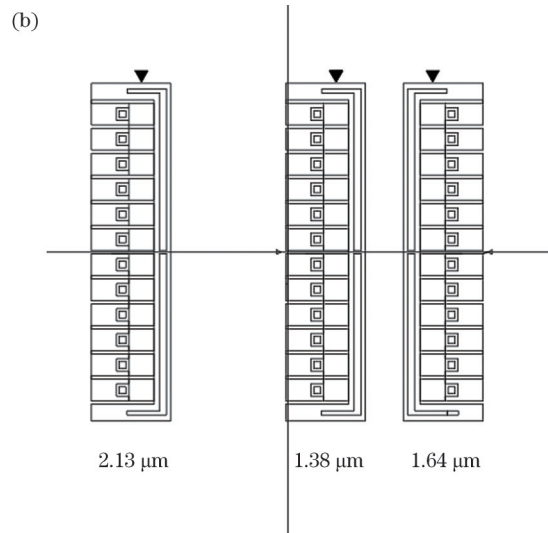


图 1 红外探测芯片结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared detector chip

红外探测器组件内集成多个红外通道,通道间配准要求极高,包括水平方向和垂直方向两个部分。对于短波探测器,水平方向芯片间隔误差要求为 $\pm 0.02\ \text{mm}$,通道间不平行度 $\leq 1^\circ$,另外,在多通道集成过程中,不同通道探测器模块不是位于同一焦面上,而是存在高度差,通道间对应光敏元纵向偏差 $\leq 0.05\ \text{mm}$,光敏面不平整度 $\leq 0.01\ \text{mm}$,如图 2 所示。



电信号通过引线键合引出至电极板,再通过引线键合引出至组件外壳的针脚。模块电极板和过渡引线电极板需要窄线条、低电阻、高绝缘、高黏合强度的金属导电层,以确保组件的各项电性能参数不受损耗,并保证电极的可靠性。滤光片支架支撑通过耐低温胶固定于芯片模块上表面,滤光片与滤光片支架支撑贴

合后整体固定于滤光片支架支撑上表面,一级光阑通过胶固定于组件外壳的台阶上。组件上集成透镜兼窗口,透镜与盖板采用低温胶密封,在密封焊接之前,集成透镜的盖板与芯片模块进行高精度光学配准,配

准后盖板和组件外壳采用点焊固定。密封前先对整个组件抽真空排气,然后再充装惰性气体,最后通过平行缝焊实现密封,气密性满足载荷提出的长寿命要求。

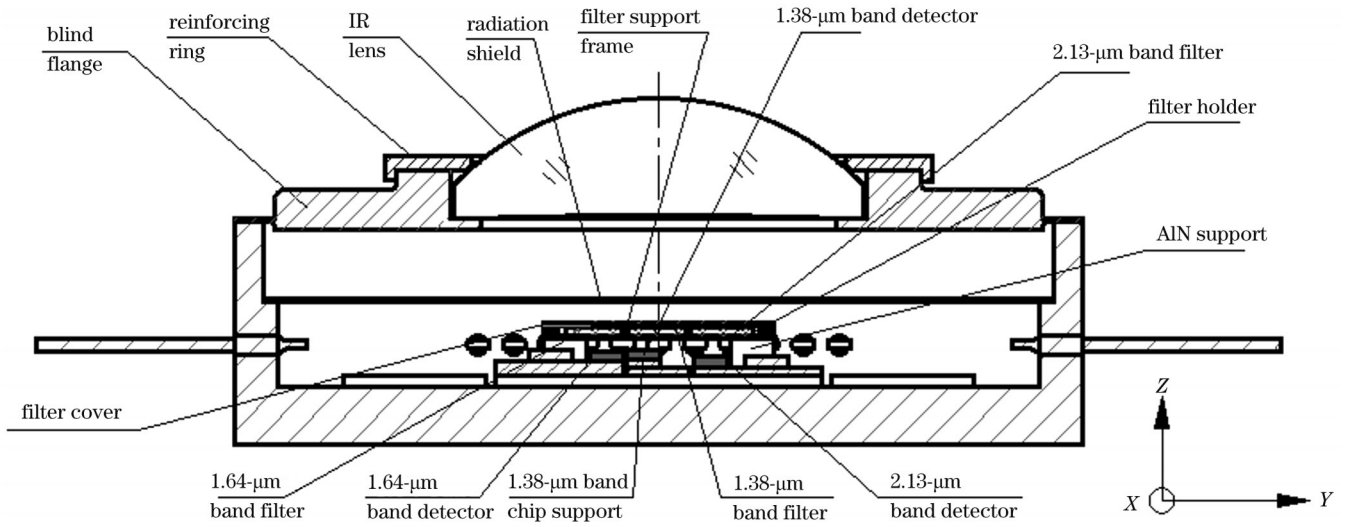


图 3 探测器管壳组件结构图

Fig. 3 Schematic diagram of detector shell assembly

2.2.1 低形变多波段滤光片窄缝拼接结构

目前多通道滤光片集成方式主要有拼接胶合法和单片集成法^[13]。拼接胶合法实现形式简单,对滤光片镀膜要求低,应用广泛,可将不同波段的滤光片独立制备后切割成规定尺寸的小片,在滤光片支架上直接拼接,但传统的拼接结构在高密度集成时相邻滤光片易尺寸干扰,易引入光学串扰。单片集成法的实现形式主要有可调谐滤光片、滤光片阵列等。可调谐滤光片是以法布里-珀罗(F-P)干涉仪式的结构进行窄带滤光片的设计,通过电、热、声等方式对结构中谐振腔层的厚度或折射率进行控制,以实现滤光片的光谱扫描,但这种方式控制机构复杂。另外,每次只能形成一个通道,不能让多个通道同时工作,无法满足集成化的需求。滤光

片阵列可实现多通道同时工作,但通道间易串扰,其成品率随着集成数目的增加而呈指数下降,而且对于高密度集成滤光片,各个通道滤光片尺寸往往很小,很难在制备过程中对单通道滤光片进行测量、筛选^[14]。

滤光片支架与滤光片通常采用环氧胶粘接固定,靠近粘接位置的滤光膜不可避免地会与环氧胶接触,成为粘接面。滤光片本体与支架在材料的膨胀系数等属性上通常存在差异,降温后滤光片膜层不可避免地会承受热应力。试验表明这种热失配引起的应力会导致滤光片光谱特性的变化,从而引起光谱变形,严重时会导致探测器组件失效而不能使用^[15]。

本文提供一种可以实现低温下应用的多波段滤光片窄缝拼接的结构,如图 4 所示,包括滤光片支架下底

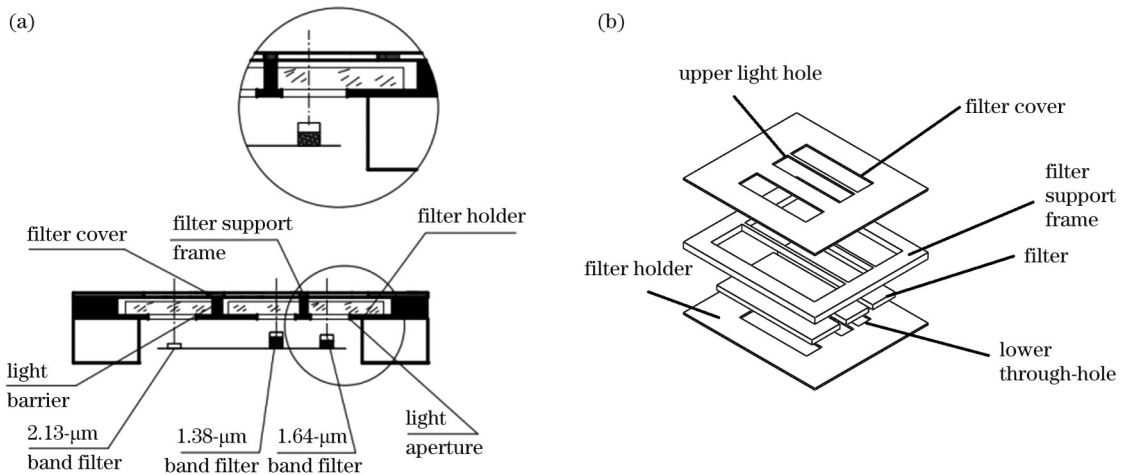


图 4 多波段滤光片组件整体示意图。(a)滤光片拼接结构;(b)滤光片组件三维爆炸图

Fig. 4 Overall schematic diagram of multi-band filter assembly. (a) Filter assembly structure; (b) 3D exploded view of filter assembly

板、滤光片支架支撑框、滤光片支架上盖板,通过精密激光加工或化学刻蚀等方法加工成型,投影外边界尺寸一致,表面需发黑处理。具体介绍如下。

1) 滤光片支架支撑框和滤光片上盖板同时限光的结构,其中滤光片支架下底设置下透光孔为精确限光,可有效降低背景辐射,减小探测器噪声,提高探测器性能,滤光片支架上盖板上透光孔为粗略限光,并遮挡各波段滤光片切割边,有效降低因切割过程中边缘膜层崩裂而引入的杂光。

2) 滤光片支撑框之间设置挡条,可以有效防止相邻波段间的光学串扰。通常多波段滤光片拼接时其限位结构直接设置在光阑上,通过机械铣加工等方式设置定位槽,而一体加工槽底难以有效去除圆角,滤光片安装面平面度难以保证,从而难以实现窄缝和高精度拼接。

3) 滤光片支架下底板、滤光片支撑框及滤光片支架上盖板均采用低膨胀合金材料,每个滤光片两头均通过耐低温胶与滤光片支架支撑框胶接固定,并控制耐低温胶量,防止耐低温胶渗入滤光片下底和滤光片支架上面,可减小滤光片组件在低温应用时由于热失配引起的形变应力。

通过有限元分析软件,对不同短波通道间的滤光片进行低温下的形变分析,分析结果如图 5 所示。选取不同波段滤光片透光孔区域对角线之间的距离的低温形变进行分析,其中 1.64 μm 波段滤光片在 130 K 下的最大低温形变为 0.9278 μm ,而 2.13 μm 和 1.38 μm 波段滤光片在 130 K 下的最大低温形变为 0.2292 μm ,且变化趋势基本相同。对胶接之后的滤光片支撑组件进行了 10 次高低温冲击试验,液氮冲击后镜检表面状态,未发现膜层脱落的情况。

通过三层夹心低形变多波段滤光片支架拼接结构设计,实现了多个小滤光片胶接在低形变应力滤光片支架结构上。该结构同样适用于多片中波、长波滤光片与探测器的拼接,克服了传统拼接胶合法易发生尺寸干扰和单片集成制备复杂、成品率低等问题,实现了低形变多波段滤光片与探测器的耦合。

2.2.2 同一组件多波段探测器不同焦面拼接技术及光学配准

集成光学透镜的多波段探测器拼接在同一组件

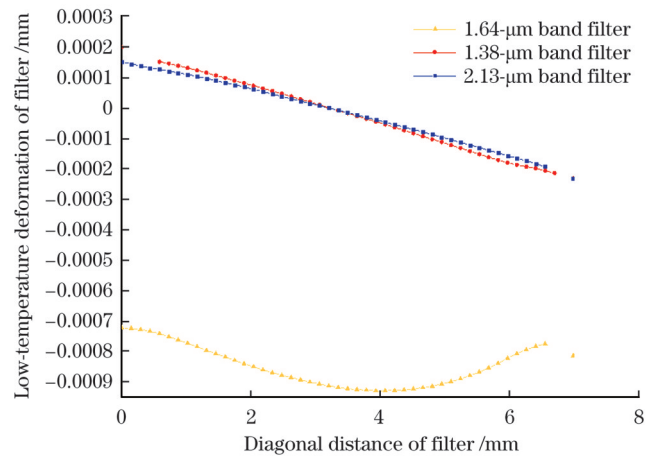


图 5 滤光片低温形变

Fig. 5 Low-temperature deformation of filter

内,需要着重解决红外探测器的拼接精度以及与光学元件配准的问题,以实现多波段探测器集成的低串扰、高性能。重点问题包括多波段探测器 X 向和 Y 向的拼接精度、不同焦面探测器的 Z 向高度、不同光学元件的 Z 向精度、集成透镜和滤光片的配准精度等^[16]。

由于通道间距离较近,1.38 μm 通道电路将放置于芯片侧面,如图 3 所示。同时,由于 3 个通道芯片不位于同一焦面,将通过设计不同厚度的模块电极板和陶瓷垫片解决。其中 1.64 μm 通道模块和 2.13 μm 通道模块采用不同厚度电极板,1.38 μm 通道则采用在模块电极板上再粘贴垫块的方法来实现同一组件内多波段探测器的不同焦面。芯片经过筛选并和电路互连合格后,在大视场投影仪下,采用基准传递的手段进行敏感元的微米级对位拼装。形成一个三排 10 元的带读出电路的 HgCdTe 探测器,在 20 倍投影仪下,可控制通道间不平行度小于 1°。

在探测器组件外部集成光学透镜,需要着重考虑常温 and 低温配准、背压、低温形变以及环境适应性问题。在低温配准方面,针对集成光学透镜集成和评价的需求,对透镜和探测器采用共轴集成方法对中。透镜集成时通过透镜安装台阶面对上下透镜间共轴组精度进行控制,通过透镜定位片对透镜左右间隔距离精度进行控制。对透镜组装结果进行评测,结果显示相应透镜组装配定位精度较高,装配偏差均值为 $\pm 15 \mu\text{m}$,满足使用需求。

表 1 共轴透镜集成设计结果

Table 1 Design results of coaxial lenses integration

Material of lens	Material of blind flange	Assembly method	Fit clearance control /mm
SK16	4J29	Cementation fixation	± 0.015

由于透镜和透镜盖板的材料不同,且热膨胀系数并不一致,在低温下将发生透镜变形从而导致焦距的变化。为此,透镜盖板采用低膨胀系数合金,并且在透镜和盖板之间采用耐低温胶,并控制胶量,严格控制不

同材料由于膨胀系数不一致导致的形变差异。通过仿真分析软件计算,透镜在 130 K 低温下的轴向形变仅为 10 μm 左右,在整机光校中测试良好。同时为了保证透镜在背压下由于大气压导致的变形乃至失效问

题,在透镜上表面胶接了固定环,以适应严苛的环境力学试验。

信号串扰会对焦平面通道的观测图像产生显著的条纹影响。由于通道间的间距较小,为避免通道间光学串扰,需要将滤光片耦合在芯片的近表面,设计的滤光片与 $1.38\ \mu\text{m}$ 芯片表面间距为 $0.4\ \text{mm}$ 。滤光片将采用滤光片支架,通过四点支撑的方式固定。把符合要求的滤光片组装到探测器光敏元上面。

对红外探测器组件进行了相应的光谱测试,测试结果如图 6 所示: $1.64\ \mu\text{m}$ 、 $1.38\ \mu\text{m}$ 和 $2.13\ \mu\text{m}$ 通道间并无明显的光学串扰。在成像仪测试中,短波红外焦平面串扰属于像元间串扰,主要由同一通道其他像元引起^[17]。

本文通过多波段红外探测器不同焦面的微调节技术以及共轴透镜调节技术,实现了同一组件内三波段探测器不同焦面与滤光片拼接精度优于 $\pm 5\ \mu\text{m}$,透镜与探测器配准精度优于 $\pm 15\ \mu\text{m}$ 。并通过集成透镜的红外探测器组件进行了光谱测试,测试结果表明通道间并无明显的光学串扰。

2.2.3 组件杂散光抑制设计

对红外光学系统进行杂散抑制设计是保证其在轨成像质量的前提。探测器管壳组件是红外成像系统的重要组成部分,且管壳组件自身红外辐射更容易

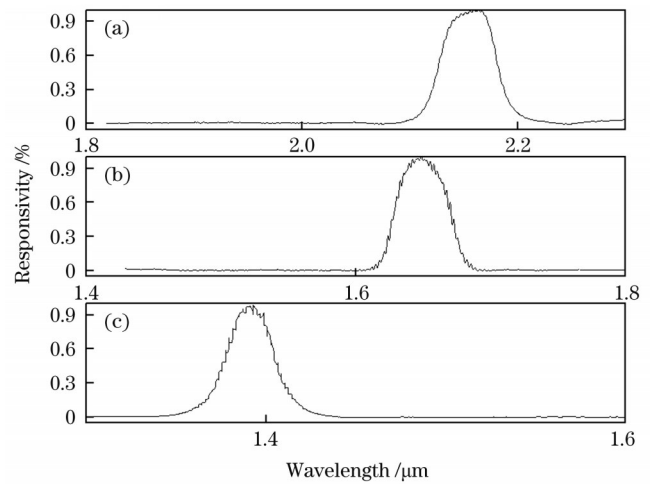


图 6 红外探测器组件光谱曲线。(a) $2.13\ \mu\text{m}$ 通道;(b) $1.64\ \mu\text{m}$ 通道;(c) $1.38\ \mu\text{m}$ 通道

Fig. 6 Spectral curves of infrared detector assembly. (a) $2.13\text{-}\mu\text{m}$ channel; (b) $1.64\text{-}\mu\text{m}$ channel; (c) $1.38\text{-}\mu\text{m}$ channel

对探测器成像产生影响。管壳组件通过辐冷器一级制冷,组件工作温度保持 $130\ \text{K}$ 左右。在管壳面向探测器的表面 A、B、E 和 F 面设置发射源,并利用 Tracepro 软件对管壳组件自身辐射杂散占比进行分析,结果如图 7 所示。在管壳组件设计中,为了抑制杂散光,尽可能消除滤光片边缘的影响,在滤光片之间设置支撑

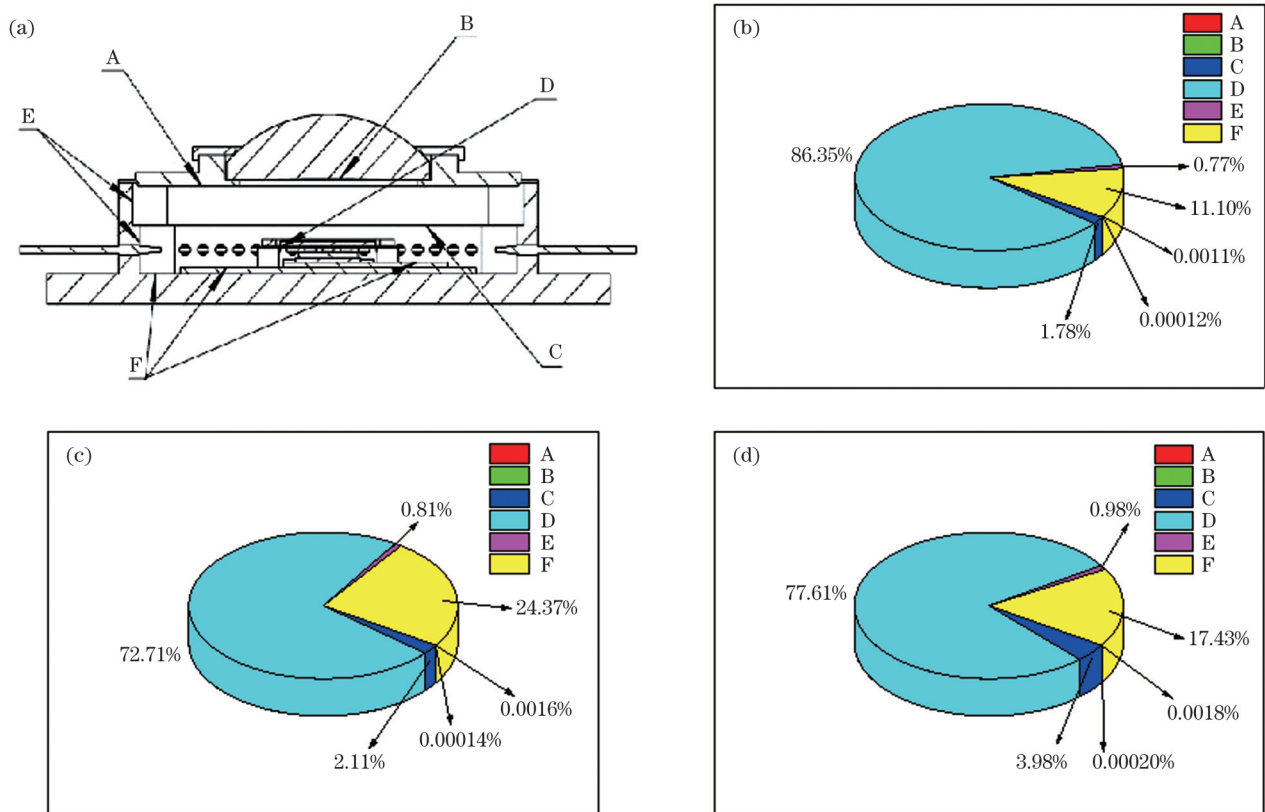


图 7 组件杂散光分析。(a) 组件结构;(b) $1.365\sim 1.395\ \mu\text{m}$ 杂散光分布;(c) $1.615\sim 1.665\ \mu\text{m}$ 杂散光分布;(d) $2.105\sim 2.155\ \mu\text{m}$ 杂散光分布

Fig. 7 Stray light analysis of module. (a) Module structure; (b) stray light for $1.365\sim 1.395\ \mu\text{m}$; (c) stray light for $1.615\sim 1.665\ \mu\text{m}$; (d) stray light for $2.105\sim 2.155\ \mu\text{m}$

框 D。组件内还设计了消除杂散光的限制光阑 C。采用物理和化学方法在光阑表面形成一层致密的黑色涂层,涂层在红外波段反射率极低,可以有效抑制杂散光,其发射率相对于统计的其他面大得多,相应的滤光片支架 D 和冷光阑 C 占总的自身辐射比例较大。在图 7 中统计的 3 个波段下滤光片支架下表面辐射占比均大于 70%,远大于统计的其他面。这是由于滤光片下表面的辐射光线可以不经过滤光片而直达探测器像面上。因此,对滤光片支架 D 和冷光阑 C 的杂散抑制设计是实现组件低背景杂散的前提。

图 8(a)和图 8(b)分别为冷光阑 C 和滤光片支架 D

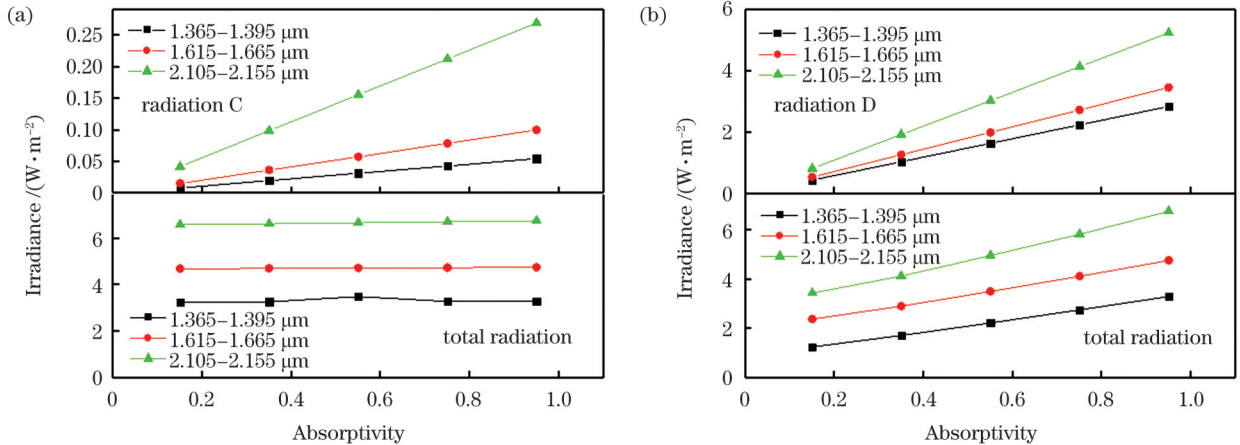


图 8 组件辐射曲线。(a)冷光阑 C 辐射和组件辐射与冷光阑吸收率关系曲线;(b)滤光片支架 D 辐射和组件辐射与滤光片支架吸收率关系曲线

Fig. 8 Radiation curves of module. (a) Cold aperture radiation (radiation C) and module radiation (total radiation) versus cold aperture absorption; (b) radiation of filter holder (radiation D) and module radiation (total radiation) versus absorption of filter holder

3 产品及主要性能指标

对封装完成后的组件进行了一系列的环境试验及可靠性考核,包括 60g 的半正弦冲击、鉴定级正弦振动、22g(均方根值)的随机振动以及 1500 h 的老练试验。振动试验其他条件如下。1) 正弦扫描振动试验中,频率范围 5~12 Hz 时,振动水平为最大位移 20.68 mm [单峰值(0-P)];频率范围 12~100 Hz 时,加速度为 12g;扫描频率为 2 oct/min。2) 随机振动试验中,频率范围 20~100 Hz 时,加速度功率谱密度为 +3 dB/oct;频率范围 100~600 Hz 时,加速度功率谱密度为 $0.5g^2 \text{ Hz}^{-1}$;频率范围 20~100 Hz 时,加速度功率谱密度为 -6 dB/oct。

在可靠性试验完成后,对组件的漏率、器件性能进行复测,试验后,无一失效,没有发生芯片脱落、电极开路等失效故障。从试验前后组件响应率变化表中可以看出,1.38 μm 通道最大变化率为 -8.5%,1.64 μm 通道最大变化率为 -7.5%,2.13 μm 通道最大变化率为 7.3%,组件未发生异常,结果如图 9 所示。

研制的集成光学透镜的三波段短波红外探测器气

自身辐射和组件辐射与自身吸收率的关系曲线。从图 8(a)可以观察到,随着冷光阑 C 吸收率的升高,冷光阑 C 自身辐射呈线性增加,而管壳组件总辐射略微波动,变化幅度不大。这是由于随着冷光阑 C 吸收率的增加,通过冷光阑 C 反射和散射的杂散辐射下降,其下降幅度和冷光阑 C 自身辐射的增加量相当。因此考虑到外部杂散光抑制设计,冷光阑 C 进行发黑处理。与之相对,随着滤光片支架 D 发射率的增加,组件总的杂散辐射增加,这是因为滤光片支架 D 面自身辐射远远大于其他面通过滤光片支架 D 面反射和散射的杂散辐射,因此从杂散光抑制角度,滤光片支架 D 面采用不发黑处理。

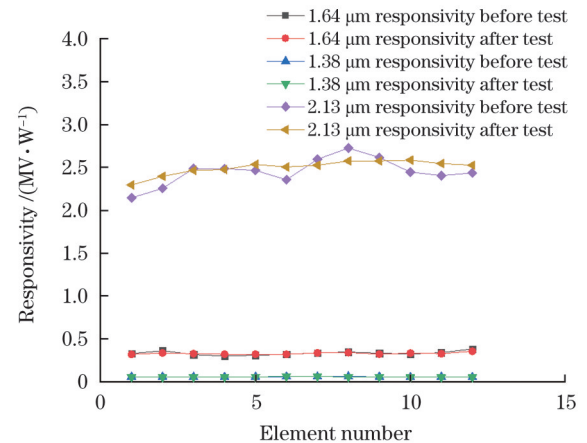


图 9 可靠性试验前后的响应率曲线

Fig. 9 Responsivity curves before and after reliability test

密性组件主要性能指标如表 2 所示。在 130 K 环境温度下,其波段探测率优于 $1.5 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,在严苛的环境试验前后波段响应率变化率最大绝对值为 8.5%。得到了高性能的多光谱集成的红外探测器组件,试验结果表明探测器工作正常,组件性能正常。图 10 为管壳组件的照片。

表 2 组件主要性能指标
Table 2 Main performance indexes of module

Item	Value	Item	Value
Plane array structure	3×10	Noise /V	7×10^{-4}
Wave bands / μm	1.38 (1.365–1.395), 1.64 (1.615–1.665), 2.13 (2.105–2.155)	Working temperature /K	130
Photosensitive element size /mm	0.300×0.260	Maximum size /mm	$40 \times 40 \times 13$
Center distance between adjacent photosensitive elements in same channel /mm	0.300 ± 0.005	Adapter cooler	Radiation refrigeration
Band detection rate at 130 K /($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)	$> 1.5 \times 10^{11}$	Packaging	Shell

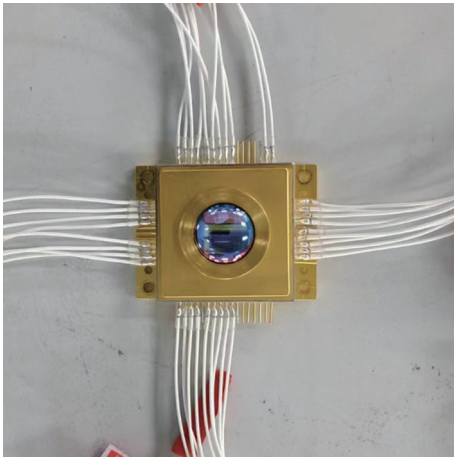


图 10 管壳组件照片
Fig. 10 Photo of shell

4 结 论

集成多波段的红外探测器组件可以获得更丰富的红外谱段信息,并且通过集成光学透镜有利于红外探测器组件的小型化,惰性气体封装形式更适用于空间辐射制冷场合,是航天红外遥感重要的发展方向之一。本文着重解决多通道集成红外探测器组件的封装技术,提出了集成透镜的多波段红外探测器气密性封装组件,并对其同一组件多波段不同焦面拼接与透镜共轴配准技术、多片滤光片窄缝拼接高可靠支撑结构、杂散光抑制等关键技术进行了重点研究,实现了三波段探测器与滤光片拼接精度优于 $\pm 5 \mu\text{m}$,透镜与探测器配准精度优于 $\pm 15 \mu\text{m}$,滤光片低温形变小于 $0.9278 \mu\text{m}$,多波段间无明显光学串扰。解决了多通道集成的红外探测器组件的高精度配准、低应力控制、低光学串扰、低功耗和探测器高可靠性等难题,得到了性能较好的集成透镜的多波段红外探测器组件。

致谢 感谢吴家荣、杨旭峰、张磊、孙闻、徐琳、沈一璋、焦玉萍、洪斯敏等在组件封装中的工作。

参 考 文 献

[1] 钮新华,周巨广,陈帅帅,等. FY-3/中分辨率光谱成像仪星上黑体的在轨太阳污染模拟与抑制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7):

1822-1828.
Niu X H, Zhou J G, Chen S S, et al. Simulation and suppression of solar on-orbit pollution of FY-3/MERSI onboard blackbody[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1822-1828.

[2] 徐勤飞. 近室温多模块焦平面封装技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2021.
Xu Q F. Study on assembly of near-room temperature focal plane detectors[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.

[3] Singer M, Oster D. Design of a cryogenic IR detector with integrated optics[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7660: 76601Z.

[4] Hirsh I, Shkedy L, Chen D, et al. Hybrid dual-color MWIR detector for airborne missile warning systems[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8353: 83530H.

[5] Goldberg A C, Kelly M A, Boldt J, et al. Calibration of the compact mid-wave imaging system (CMIS), a candidate for low-cost, low SWaP instrument for weather satellites[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11422: 1142204.

[6] D'Souza A I, Robinson E, Masterjohn S, et al. Detectors and focal plane modules for weather satellites[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9881: 988115.

[7] Malone K J, Schrein R J, Bradley M S, et al. Landsat 9 OLI 2 focal plane subsystem: design, performance, and status[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10402: 1040206.

[8] Stumpf K D, Overbeck J A. CrIS optical system design[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4486: 437-444.

[9] Masterjohn S A, D'Souza A, Dawson L C, et al. Cross-track infrared sounder FPAA performance[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5655: 343-352.

[10] 曾智江, 杨力怡, 郝振贻, 等. 集成冷光学的双波段杜瓦组件技术[J]. 中国激光, 2023, 50(18): 1810002.
Zeng Z J, Yang L Y, Hao Z Y, et al. Dewar assembly integrated with cryogenic optics for dual band IR detector[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(18): 1810002.

[11] 刘大福, 徐勤飞, 汪洋, 等. 第二代静止轨道气象卫星用多波段红外探测器封装及性能(英文)[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 109-116.
Liu D F, Xu Q F, Wang Y, et al. Multi-band infrared detector assemblies and performances for 2nd-generation GEO meteorological satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4): 109-116.

[12] 胡秀清, 张里阳, 郑照军, 等. FY-3A 中分辨率光谱成像仪热红外通道的多探元辐射定标[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 1972-1980.
Hu X Q, Zhang L Y, Zheng Z J, et al. FY-3A multi-detector radiometric calibration for infrared band of medium resolution spectral imager[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9): 1972-1980.

[13] 陈俊林, 王小坤, 朱海勇, 等. 冷光学用多波段长波红外探测器杜瓦封装技术[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2110002.
Chen J L, Wang X K, Zhu H Y, et al. Dewar packaging

- technology of multiband long-wave infrared focal plane array detectors for cryogenic optics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2110002.
- [14] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
Tang J F, Gu P F, Liu X. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [15] 周晟, 王凯旋, 刘定权, 等. 3.2~3.8 μm 和 4.9~5.4 μm 红外双色滤光片的研制[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 536-543.
Zhou S, Wang K X, Liu D Q, et al. Research on infrared dual-color filters with 3.2-3.8 μm and 4.9-5.4 μm bands[J]. Chinese Optics, 2021, 14(3): 536-543.
- [16] 徐勤飞, 刘大福, 徐琳, 等. 集成双热电致冷器超长线列 InGaAs 组件封装技术[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(11): 135-141.
Xu Q F, Liu D F, Xu L, et al. Packaging for long linear InGaAs FPA with two thermoelectric coolings[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(11): 135-141.
- [17] 肖达, 徐娜, 胡秀清, 等. FY-3D MERSI-II 信号串扰效应在轨检测及订正[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1011001.
Xiao D, Xu N, Hu X Q, et al. On-orbit detection and correction of crosstalk effect of FY-3D MERSI-II signals[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1011001.

Research on Packaging Technology of Multi-Band Infrared Detector Assembly with Integrated Lens

Chen Junlin^{1,2}, Mo Defeng^{1,2*}, Jiang Mengdie^{1,2}, Zhu Haiyong^{1,2}, Xu Qinfei^{1,2}, Zeng Zhijiang^{1,2}, Zhang Jinglin^{1,2}, Yang Xiaoyang^{1,2}, Li Xue^{1,2}

¹State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract

Objective The miniaturization and integration of multispectral detectors have become one of the development directions for infrared detectors. This paper proposes a component structure that integrates a lens and window with airtight packaging, focusing on the characteristics of integrating low-temperature optical lenses for multispectral detectors. Various aspects are investigated, including high-precision optical alignment for different focal planes of the same component multispectral detector, low deformation filter support structure, and suppression of optical crosstalk and stray light. These studies address a series of issues related to high-precision alignment, low deformation filter support, prevention of optical crosstalk, and suppression of stray light in the miniaturization and integration packaging of multispectral detectors. The developed component has been successfully applied in a spectral imaging instrument for a specific project.

Methods A component structure for a multispectral infrared detector with an integrated lens has been designed (Fig. 3). The airtight packaging component structure of the multispectral infrared detector with an integrated lens includes a component housing, cover plate, lens, primary aperture, filter holder, filter, chip module, electrode plate, and filter holder support. Before packaging, the entire component is evacuated, followed by filling with inert gas, and finally sealed using parallel seam welding. The airtightness meets the long-term requirements of the payload.

By designing a three-layer laminated low-deformation multispectral filter holder assembly, multiple small filter pieces are adhered to the low-stress filter holder structure. This structure can also be used for the assembly of multiple mid-wave and long-wave filter pieces with the detector. It overcomes the problems of size interference and complex integration process with low yield associated with traditional bonding methods. It achieves the coupling of low-deformation multispectral filters with the detector (Fig. 4).

This study employs the micro-adjustment technique for different focal planes of the multispectral infrared detector and the coaxial lens adjustment technique. It achieves a precision deviation of less than $\pm 5 \mu\text{m}$ between different focal planes and the filter assembly for a three-band detector within the same component. The lens-to-detector alignment precision within $\pm 15 \mu\text{m}$ is achieved (Table 1). Spectral tests are performed using the infrared detector component with an integrated lens, and the results indicate no significant optical crosstalk among channels (Fig. 6).

Results and Discussions Through the design of a three-layer laminated structure with low deformation, multiple small filters have been successfully bonded to the low deformation stress filter frame. The maximum low-temperature deformation of the 1.64 μm filter at 130 K is 0.9278 μm , while the maximum low-temperature deformation of the 2.13 μm and 1.38 μm filters at 130 K is 0.2292 μm (Fig. 5). By using micro-adjustment techniques for different focal planes of the multi-band infrared detectors and coaxial lens adjustment techniques, the deviation in the alignment between different focal planes of the three-band detectors and the filters within the same component is better than $\pm 5 \mu\text{m}$, and the alignment precision between the lens and the detectors is better than $\pm 15 \mu\text{m}$.

Spectral testing is conducted using the integrated lens infrared detector component. The results of the spectral testing indicate that there is no significant optical crosstalk among channels. A series of low-stress design and process improvements are applied to the low-temperature lens, and the results show that the band detection rate is greater than $1.5 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ (130 K). The maximum absolute variation in band response rate before and after rigorous environmental testing is 8.5% (Fig. 9). The high-performance multi-spectral integrated infrared detector component is obtained, and the experimental results confirm that the detector functions properly and the component performs well (Table 2).

Conclusions This article focuses on solving the packaging technology of multi-channel integrated infrared detector components, proposes a multi-band infrared detector airtightness packaging component with integrated lenses, and emphasizes the key technologies such as jointing of different focal planes for different bands and coaxial lens adjustment technology for the same component, high reliability support structure for multi-filter narrow seam splicing, and stray light suppression, solving the high-precision alignment of multi-channel integrated infrared detector components, low stress control, low optical crosstalk, low power consumption, and high reliability of the detector. A high-performance multi-band infrared detector component with integrated lenses has been obtained.

Key words detectors; multi-channel integration technology; infrared detector assembly; low-temperature deformation of filter; optical crosstalk