

文章编号：1672-8785(2025)11-0064-18

风云气象卫星红外探测器发展综述

李向阳*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要：回顾总结了风云气象卫星红外探测器的发展历程和技术特点，并展望了红外探测器发展趋势。自风云一号卫星成功发射以来，中国风云卫星系列已成为全球气象观测体系中的重要组成部分。红外探测器作为气象卫星有效载荷的核心部件之一，其性能的提升直接关系到气象预报的准确性和时效性。首先介绍了红外探测器的基本原理和关键技术，随后梳理了风云气象卫星红外探测器从早期到最新型号的演进过程，包括技术革新、性能提升以及规模拓展等。同时还分析了当前红外探测器面临的技术挑战和未来发展方向，并讨论了相关技术路径。

关键词：风云气象卫星；红外载荷；红外探测器；光电探测器；热探测器；发展历程

中图分类号：TN215; P414.4 **文献标志码：**A

DOI：10.11972/j.issn.1672-8785.2025.11.006

Overview of the Development of Infrared Detectors for Fengyun Meteorological Satellites

LI Xiang-yang*

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: This paper reviews and summarizes the development history and technical characteristics of the infrared detectors for the Fengyun meteorological satellites, and looks forward to the development trend of infrared detectors. Since the successful launch of the Fengyun-1 satellite, China's Fengyun satellite series has become an important part of the global meteorological observation system. As one of the core components of meteorological satellite payloads, the performance improvement of infrared detectors directly affects the accuracy and timeliness of meteorological forecasts. This paper first introduces the basic principles and key technologies of infrared detectors, then sorts out the evolution process of Fengyun meteorological satellites' infrared detectors from the early stage to the latest version, including technological innovation, performance improvements, and scale expansion. At the same time, this paper also analyzes the current technical challenges and future development directions of infrared detectors, and discusses relevant technical pathways.

Key words: Fengyun meteorological satellite; infrared payload; infrared detector; photoelectric detector; thermal detector; development history

收稿日期：2025-11-10

作者简介(Biography)：李向阳(1969-),男,研究员,博士,主要从事红外探测器方面的研究。

***通讯作者(Corresponding Author)：**E-mail: lixy@mail.sitp.ac.cn

0 引言

温度高于绝对零度的物体都会向外辐射电磁波。不同温度的物体一般具有不同的辐射峰值波长。全球地表的平均气温在 15 ℃ 左右, 地球向太空辐射电磁波谱的峰值约为 10 μm, 处在长波红外波段。同时, 由于地球大气中的某些气体(如水汽、二氧化碳、臭氧等)对特定波长的红外辐射有强烈的吸收作用, 因而存在所谓的大气红外窗口。利用红外探测器测量这些地球和大气辐射, 可以得到地球表面温度和大气成分等信息, 且太空中的红外遥感仪器可以不受太阳光照条件的限制, 从而实现昼夜全天候工作。

因此, 作为气象卫星有效载荷的光电遥感仪器的重要能力之一就是红外成像与探测能力。随着全球气候变化日益严峻, 气象灾害频发, 人们对气象预报的准确性和时效性提出了更高要求。气象卫星是大气监测的重要手段, 其重要性日益凸显。红外遥感仪器作为气象卫星的核心载荷, 通过获取地球大气和地表的红外辐射信息, 可以为气象预报、灾害监测、农业生产、环境保护等领域提供重要数据支持。而红外探测器是此类仪器中实现光电转换的关键部件。

1960 年 4 月 1 日美国极轨气象卫星发射升空, 标志着人们开始进入气象观测的卫星遥感时代。风云系列卫星是我国自主研制的气象卫星。在 20 世纪 60 年代, 我国就着手进行发展极轨气象卫星的准备工作。1970 年, 周恩来总理提出“要搞我们自己的气象卫星”, 并亲自布置了相关任务, 从此开始了我国第一代极轨气象卫星——风云一号(FY-1)的研制和发展工作。01 批的 FY-1A 星于 1988 年 9 月 7 日发射, FY-1B 星于 1990 年 9 月 3 日发射。02 批的 FY-1C 星于 1999 年 5 月 10 日发射, FY-1D 星于 2002 年 5 月 15 日发射。目前风云一号卫星均已经停止工作。风云二号(FY-2)卫星是我国第一代地球静止轨道气象卫星, 成功发射 8 颗, 其中 FY-2A、FY-2B、FY-2C、FY-

2D、FY-2E 和 FY-2F 等 6 颗卫星已停止工作, 目前仍在轨运行并提供应用服务的是 FY-2G 和 FY-2H。FY-2 与极地轨道气象卫星(FY-1/3)相辅相成, 构成了我国气象卫星应用体系, 在重大的灾害性天气过程以及重大的气象自然灾害监测方面, 发挥着重要作用。作为我国第二代极轨气象卫星, 风云三号(FY-3)卫星是在 FY-1 气象卫星技术基础上的发展和提高, 能够获取全球、全天候、三维、定量、多光谱的大气、地表和海表特性参数。风云四号(FY-4)卫星是我国新一代静止轨道气象卫星, 在世界上首次实现静止轨道成像观测与红外高光谱大气垂直探测的综合观测。

目前我国已发射了 21 颗气象卫星, 其中 9 颗在轨运行, 分别实现了极轨卫星和静止卫星的业务化运行(见图 1)。我国是继美国、俄罗斯之后第三个同时拥有极轨气象卫星和静止气象卫星的国家。风云系列气象卫星已经成为代表中国力量、具有广泛国际声誉的对地观测卫星, 被联合国世界气象组织纳入全球对地观测业务卫星序列, 提升了我国及国际最先进的中长期数值天气预报模式的预报时效和精度; 风云系列气象卫星还承担了国际减灾宪章机制的中方值班卫星任务, 在国际气象防灾减灾工作中发挥着日益重要的作用^[1]。以上这些成就离不开气象卫星的红外遥感仪器。

从风云一号的多通道扫描辐射计, 到风云二号扫描辐射计, 以及风云三号十通道扫描辐射计、中分辨率光谱成像仪、红外分光计、地球辐射收支仪, 再到风云四号的先进多通道扫描辐射计、大气垂直探测仪等有效载荷都是由中国科学院上海技术物理研究所研制。这些仪器所使用的红外探测器全部是该所自主研制的。针对轨道高度和卫星平台稳定方式的差异, 对地观测遥感仪器有明显不同, 因此不同有效载荷对红外探测器也有不同要求。本文根据风云卫星仪器的特点, 回顾了红外探测器的基本情况, 然后对探测器研制中的一些问题进行了分析讨论, 并对探测器的未来技术方向进

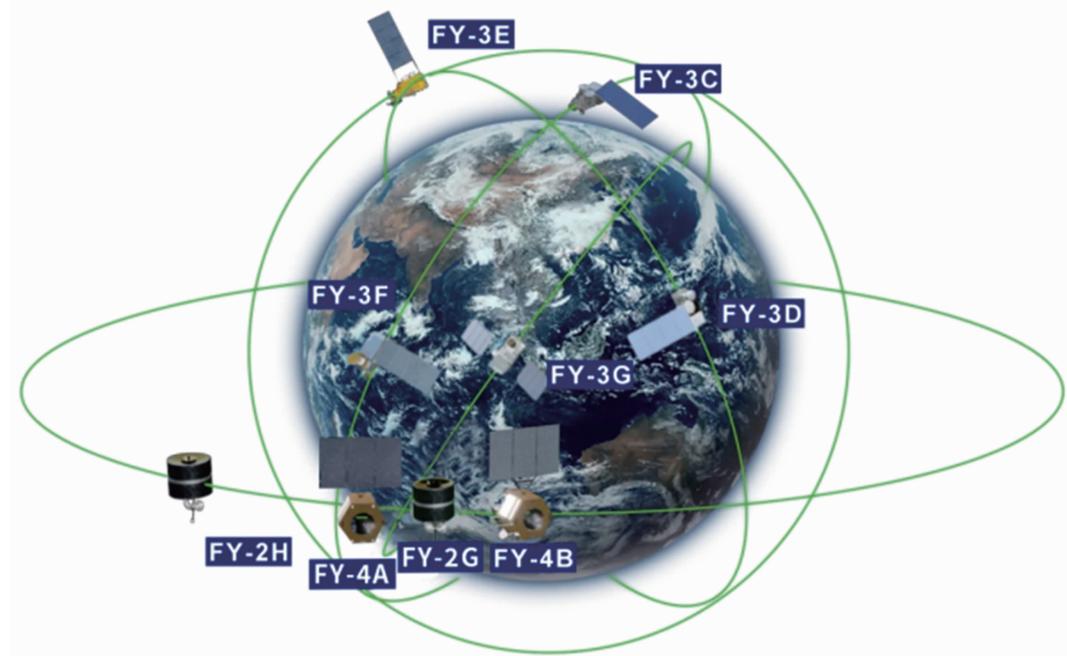


图1 我国气象卫星在轨布局(2024)^[1]

Fig. 1 The in-orbit deployment of China's meteorological satellites (2024)^[1]

行了展望。本文旨在对风云气象卫星红外探测器的发展历程、技术特点、性能提升以及未来发展趋势进行梳理和总结，对于推动我国气象卫星技术的进一步发展贡献绵薄力量。

1 红外探测器的基本原理与技术基础

1.1 红外探测器的工作原理

红外探测器是一种能够将红外辐射转换为电信号的器件，其工作原理基于红外辐射与物质相互作用所产生的各种效应，如红外加热效应、红外光电效应等。在气象卫星中，常用的红外探测器主要有热电探测器和光电探测器两大类型。

热电探测器有时也称为热探测器，比如热敏电阻红外探测器，就是利用红外光对探测器材料的加热效应来实现的。在红外光的照射下，热敏电阻温度升高，引起器件电阻变化。由于需要探测的红外光能流一般都是很弱的，热探测器的光吸收体的热容量必须努力做小，同时还要尽量减小热传导损失。这导致热探测器的动态响应时间较长，一般从数毫秒到数十毫秒。在以单元器件为主的发展早期，由于热敏电阻红外探测器工作在室温下，并且原理和

制作工艺相对简单，最早在地平仪等航天仪器上得到了很好的应用。然而，随着红外成像单元扫描速度的要求不断提高，热探测器由于响应时间长而很难满足系统要求。

红外光电探测器是利用窄禁带半导体内光电效应构建的探测器。常见的有光导和光伏两种器件工作模式的探测器。其中，红外光导探测器就是红外光照射导致探测器电阻变小的敏感元件。利用本征半导体就可以制作性能良好的光导探测器。由于入射光子能量必须大于半导体禁带宽度，才能激发价带电子本征光电跃迁到导带中引起电导率增加，因此半导体光电探测器响应光谱上都有一个截止波长。所有的光电探测器都存在一个截止波长与工作波长相匹配的问题。

从探测器响应光谱来讲，经过表面黑化处理的热探测器一般被认为光谱选择性不强，光谱近似一条平线；而光电探测器则涉及光子转换为电子的过程，理想的响应光谱是一个三角形，具有明显的长波限(即长波截止波长)。截止波长越长，对应的禁带宽度越窄，半导体中的热激发就越严重。因此，红外光电探测器要

达到高性能表现，一般需要制冷至低温下工作。由于光电转换后的直接探测以及环境制冷的优良条件，光电探测器的灵敏度一般比热探测器高 2 个数量级。一般用比探测率(通常用 D^* 表示)表征红外探测器的灵敏度。它是指单位入射能量下单位面积的探测器在单位电子学带宽下获得的信噪比。热探测器的 D^* 一般为 $10^7 \sim 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ，长波光电探测器的 D^* 一般为 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

光伏探测器工作中利用了半导体 pn 结的光生伏打效应，光激发的非平衡载流子在 pn 结内建电场的作用下，收集到器件 pn 结两侧并从两个短路电极输出为与入射光成正比的光电流。显然，制作 pn 结需要采用掺杂工艺。相对来说，也需要更低一些的工作温度来降低暗电流和保证结阻抗。然而，光伏探测器可以零偏置工作，因此更容易实现阵列化集成。特别是可以方便地与硅基互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)读出电路倒焊互连混成形成背入射结构的二维面阵，即红外焦平面阵列探测器。

1.2 窄禁带半导体材料是红外探测器的研制基础

探测器材料是红外探测器的核心组成部分，其性能直接影响到探测器的灵敏度和分辨率。目前，常用的红外光电探测器材料包括碲镉汞、锑化铟和铟镓砷，常用的红外热探测器材料有氧化钒、非晶硅、锰钴镍热敏电阻等。这些材料具有不同的光谱响应特性和工作温度范围，可根据具体应用需求进行选择。近年来，随着纳米技术和薄膜技术的不断发展，新型人工结构的红外探测器材料的研发也取得了显著进展。

碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)目前仍然是制作高灵敏度红外探测器的最佳材料。由于碲镉汞具有可选择禁带宽度的直接带隙，以及电子有效质量小、光吸收系数高、少子寿命长、电子迁移率高、载流子的热产生速率较低、介电常数等相对较小等一系列优点，自发明以来，在红外

材料和器件领域就一直占有主导地位。到目前为止，随着半导体材料能带工程的理论和实践不断发展，虽然有各种材料和器件的不断出现与完善，但碲镉汞红外探测器始终保持了领先地位。

中国科学院上海技术物理研究所早在 1968 年就布局碲镉汞材料的研究。以沈杰、汤定元等为代表的研究人员开启了碲镉汞体材料的研制工作^[2]。碲镉汞是半导体材料碲化镉和半金属材料碲化汞的合金。通过改变组分 x 可以调节材料的禁带宽度，因此能够制作截止波长匹配探测工作波段的红外探测器。比如，短波 $1.64 \mu\text{m}$ 的室温碲镉汞探测器可以用 x 为 0.62 的材料制作，中波 $3.93 \mu\text{m}$ 的探测器(105 K 下工作)可以采用 x 为 0.34 的碲镉汞材料，长波 $12.5 \mu\text{m}$ 的探测器可以采用 x 为 0.20 的碲镉汞材料，甚长波探测器则需要组分更小。褚君浩、汤定元等人曾对碲镉汞禁带宽度与组分及温度的关系给出过一个经验公式^[3]。

随着碲镉汞材料的工作波段向长波不断延伸，组分值越来越小；同时组分值的微小变化所引起的截止波长变化却越来越大。因此，无论是从材料制备的角度，还是从材料筛选的角度，对碲镉汞材料组分均匀性的要求都随着工作波长的增加而不断提高。不难看出，甚长波红外探测器的研制难度远大于中波红外探测器。

与此同时，碲镉汞材料也有缺点。由于汞的蒸气压高、易于分凝，很难制备出无宏观缺陷、光学电学性质均匀的大面积体单晶。晶体中 Hg–Te 键弱，在不太高的温度下就会离解，形成汞空位及间隙原子，且容易移动。移动到表面后就可能会挥发到体外，损害晶体的稳定性。器件制造过程的操作温度一般都要确保低于 80°C 才能保障芯片特性。

另外，由于体材料晶体制备特性限制，大规模焦平面探测器基本不可能使用碲镉汞体材料制作。因此需要发展碲镉汞外延生长技术来制作大规模面阵探测器。碲镉汞常用的外延薄

膜生长技术包括液相外延、分子束外延以及气相外延等。其中，液相外延是在液相固相点附近生长，属于近平衡态生长，因此相对容易得到晶格质量好一些的材料。但是，分子束外延等技术可以精确地监控材料生长过程，所以更容易得到特定功能结构的外延材料。从混成互连大面阵的研制角度来看，在硅基材料上进行异质外延得到碲镉汞薄膜，其热膨胀系数与硅CMOS电路匹配，因此是超大规模碲镉汞焦平面探测器的优选路线。然而，这需要克服大面积碲镉汞材料外延生长中的很多问题^[4-5]。

外延技术的终极基础是衬底片的晶格匹配程度和外延衬底表面缺陷密度。与碲镉汞晶体晶格匹配的目前多为碲锌镉晶体材料。因此，晶格匹配的衬底材料的体晶生长技术水平也扮演越来越重要的角色。

同样的机理在铟镓砷外延层和磷化铟衬底上也有所展现。我们可以看到，晶格匹配的1.7 μm 铟镓砷探测器的性能远优于波长延伸器件^[6]。

1.3 多波段集成技术是航天红外遥感仪器用红外探测器研制的必由之路

由于红外大气窗口在1~3 μm、3~5 μm、8~14 μm 波长范围内，气象卫星红外遥感仪器需要选用合适的相应波段材料。不同的波段对应不同的光子能量。探测不同光子能量的材料最好具有相应的禁带宽度，这时的光电转换量子效率可以达到80%以上。由于碲镉汞的禁带宽度可调，我们在风云一号卫星上利用碲镉汞覆盖了1~12 μm 整个红外波段。不同组分的碲镉汞需要不同的生长工艺条件，因此在研制中，瞄准需求制作组分合适的碲镉汞材料是首要工作。其次，材料晶片的组分筛选是保证波段合适的另一重要工作。在探测器芯片制作工艺中，不同组分材料表现出的特性也有一定的差异，需要注意区分。

不同波段的探测器芯片在制作与筛选后，还要与微型滤光片集成在一起。冷滤光片可以限制背景辐射。在微型滤光片的近光敏面封装

中，需要关注滤光片的低温特性、低温可靠性以及杂光串扰等问题。微型滤光片的低应力集成封装技术也是保证组件响应光谱满足系统工作波段内外框限制要求的考虑点之一。这个问题在风云二号03批组件研制过程中得到了认识和加强。滤光片金属支架材质不同导致的温度应力不同曾经显著地影响了组件响应光谱的形状。另外，杜瓦封装也是红外探测器技术内容之一。它由红外探测芯片、杜瓦、指令和电控制部件等组成。杜瓦组件封装的主要技术包括杜瓦结构设计、热力学优化设计、杜瓦引线技术、红外芯片的高精度安装及光学配准技术、焊接技术、检漏技术、表面处理技术、组件可靠性技术等^[7]。

显然，集成封装不仅对探测器性能表现具有最优解，而且对降低遥感仪器系统体积和重量也有很大的作用。因此，多波段集成探测器组件技术实质上是航天仪器所有波段追求极致性能的必然选择^[8]。

2 风云气象卫星红外探测器的发展历程

2.1 风云一号卫星红外探测器

风云一号卫星是中国第一代极轨气象卫星，采用860 km 轨道高度和三轴稳定卫星平台。星载扫描辐射计利用卫星的运动和扫描镜的转动完成二维扫描成像。首星FY-1A于1988年成功发射，其红外探测器采用了当时先进的碲镉汞光导探测器和辐射制冷器技术，遥感仪器的扫描速率从预研阶段的36转/分改进到120转/分再提高到360转/分，实现了对地观测的地面分辨率从8 km 到4 km 再到1.1 km 的不断提升，达到了当时的国际先进水平。FY-1A/B星具有5个通道，其波长范围分别为0.48~0.53 μm、0.53~0.58 μm、0.58~0.68 μm、0.725~1.1 μm、10.5~12.5 μm；FY-1C/D星具有10个通道，其波长范围分别为0.43~0.46 μm、0.48~0.53 μm、0.53~0.58 μm、0.58~0.68 μm、0.84~0.89 μm、0.900~0.965 μm、1.58~1.64 μm、3.55~3.93 μm、10.3~11.3 μm、11.5~12.5 μm。风

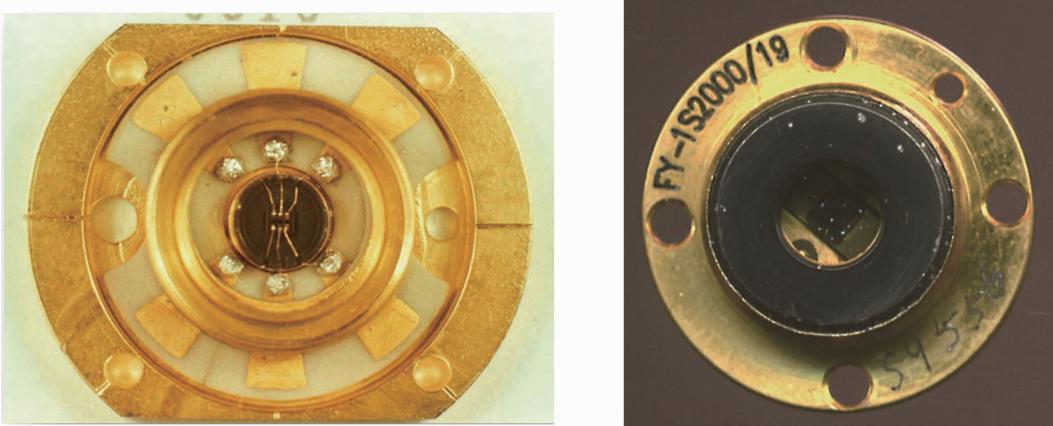


图 2 FY-1C 三通道碲镉汞红外探测器和短波红外探测器照片

Fig. 2 Photographs of the FY-1C three-channel HgCdTe infrared detector and short-wave infrared detector

云一号 A 星的红外探测器是单元碲镉汞光导长波红外探测器。风云一号 02 批的 C 星则扩展到三通道中长波探测器组件。该组件工作在 105 K 的二级辐射制冷器上。短波波段采用室温工作的碲镉汞光伏探测器(见图 2)。

在风云一号气象卫星红外探测器的研制过程中, 方家熊等人根据实际研制工作的需求, 提出了波段探测率的概念, 从而更恰当地表征在特定波段工作的红外探测器的性能; 另外还开创性地进行电老化和寿命试验以确定器件的平均寿命; 同时确认了 1500 h 老化的气象卫星红外探测器的试验标准, 并沿用至今^[9]。

2.2 风云二号卫星红外探测器

风云二号卫星是我国自行研制的第一代地球静止轨道气象卫星, 其轨道高度为 36000 km, 卫星平台是自旋稳定的。星载扫描辐射计利用卫星自旋和扫描镜转动完成对地球圆盘的二维扫描成像, 可获取白天可见光云图、昼夜红外云图和水气分布图, 同时收集气象、水文和海洋等数据收集平台的气象监测数据, 监测太阳活动和卫星所处轨道的空间环境, 为卫星工程和空间环境科学的研究提供监测数据。它可实现对地球表面与大气分布的定向覆盖和连续遥感监测, 实时性强、时间分辨率高并具有客观性和生动性等优点。中国地球静止气象卫星预定的定点位置有 5 个: 79°E、86.5°E、105°E、112.5°E 和 123°E。其中, 105°E 为业

务卫星的定点位置, 79°E 为“一带一路星”的定点位置。

中国第一代地球静止气象卫星分为三个批次: (1) 01 批卫星属于试验型地球静止气象卫星, 包括 2 颗星: FY-2A 于 1997 年 6 月 10 日搭载长征三号火箭从西昌卫星发射中心成功升空, FY-2B 于 2000 年 6 月 25 日搭载长征三号火箭从西昌卫星发射中心成功升空。(2) 02 批为业务型地球静止气象卫星。与 01 批卫星相比, 02 批卫星的技术性能有较大改进(主要是星载扫描辐射计由 01 批的 3 通道增加到 5 通道)。02 批包括 3 颗星: FY-2C 于 2004 年 10 月 19 日发射, FY-2D 于 2006 年 12 月 8 日发射, FY-2E 于 2008 年 12 月 23 日发射。(3) 03 批卫星的主要目的是确保在轨运行的第一代地球静止气象卫星实现向第二代地球静止气象卫星的连续、稳定过渡, 卫星性能在 02 批卫星的基础上有适当改进。03 批包括 3 颗星: FY-2F 于 2012 年 1 月 13 日发射, FY-2G 于 2014 年 12 月 31 日发射, FY-2H 于 2018 年 6 月 5 日发射。目前在轨运行并提供应用服务的是 FY-2G 和 FY-2H 卫星。

风云二号 01 批的红外探测器是水汽和热红外双波段组件。徐国森等人报道了风云二号首星用水汽/热红外双波段(6.3~7.6 μm 和 10.5~12.5 μm)四元碲镉汞探测器的性能及相关情况^[10]。当工作温度为 100 K 时, 热红外波段探

测器的 D^* 为 $3.4 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz} \cdot \text{W}^{-1}$ ；水汽波段探测器的 D^* 为 $1.1 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

风云二号 02 批、03 批星的红外探测器扩展到中波、水汽、热红外 1 和热红外 2 (这两个波段也称为热红外分裂窗)四波段组件(见图 3)。表 1 列出了风云二号卫星红外探测器(组件编号为 2010/11)的性能数据(93 K 温度下)。在风云二号探测器的研制中,还发现了碲镉汞光敏元表面反射光与蓝宝石衬底反射光产生等厚干涉的机理。李向阳、许金通、朱龙源等人设计并验证了带有抗反射膜和围墙结构的高性能探测器光谱调控技术路线,在一定程度上改善了光导探测器响应光谱形状的问题(见图 4)^[11]。

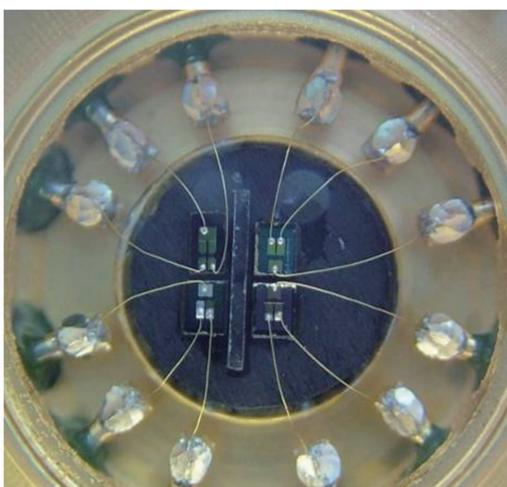


图 3 风云二号四波段红外探测器封装前的管芯照片
Fig. 3 Photo of the die of the Fengyun-2 four-band infrared detector before packaging

2.3 风云三号卫星红外探测器

风云三号卫星是我国的第二代极轨气象卫星。FY-3A 是 2008 年 5 月 27 日发射升空的(注:我国采用奇数命名极轨系列、偶数命名地球同步系列的方式;卫星在地面研制期间按照数字排序,即 01 星、02 星……;成功发射上天后改称为 A 星、B 星……)。卫星采用三轴稳定的方式,装载多台仪器。其中,有红外通道的载荷主要包括十通道扫描辐射计(VIRR)、红外分光计(IRAS)、中分辨率光谱

成像仪(MERSI)、地球辐射收支仪(ERM)等。地球辐射收支仪采用室温工作的响应光谱平坦、宽谱覆盖的热敏电阻红外探测器对地球总的红外辐射进行探测。其余的三台设备均采用了高灵敏度的制冷型碲镉汞探测器。扫描辐射计和中分辨率光谱成像仪均采用了波段匹配的碲镉汞探测器芯片与低温微型滤光片集成封装的方案。红外分光计则采用带光锥聚光设计的单元大面积碲镉汞探测器,通过滤光片轮切换通道的方式进行工作。由于红外分光计需要探测 $15 \mu\text{m}$ 以上的甚长波波段,在风云三号 01 星的研制过程中,基于小组分碲镉汞材料的大面积探测器提供高性能是一个研制重点。另外,中分辨率光谱成像仪的长波通道采用了 40 元探测器,这是当时最大规模的航天碲镉汞红外探测器芯片。卫星仪器不仅功能多样,而且在地面分辨率、探测灵敏度、探测谱段等方面实现了一次飞跃。

从风云三号 04 星开始,红外分光计被高光谱傅里叶变换红外光谱(Fourier-Transform Infrared spectroscopy, FTIR)仪器替代。这种仪器的分光方式与滤光片不同,采用迈克尔逊干涉仪的方式,通过动镜移动获得干涉图,再经过傅里叶变换得到光谱信息。这种 FTIR 遥感仪器的首次航天应用是在风云四号 A 星上成功实现的。由于要求宽响应光谱、高探测性能,FTIR 仪器研制与特定波段探测器相比,需要额外特别关注光谱的宽度及形状。因此在探测器研制任务书中一般要标明三个波长性能考核点,即最短要求波长、最长要求波长以及响应峰值位置这三个点的探测率。另外,由于动镜的移动速度处在某个范围,探测器还需特别关注不同频率下的探测率表现,特别是在几十到几百千赫兹的范围内。

风云三号卫星上红外仪器多、通道布置复杂、种类也多样。具体的配置情况见本文附表 1。以中分辨率光谱成像仪的 06 星中波组件(M210304)为例,探测器的性能数据如表 2 所示。

表 1 风云二号卫星红外探测器(组件编号为 2010/11)的性能数据(93 K 温度下)

Table 1 Performance data of the Fengyun-2 infrared detector labelled as 2010/11 at 93 K temperature

波段/ μm	电阻值/ Ω	偏流/mA	波段响应率/(V/W)	波段探测率/($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)
3.5~4.0	287.4	1	8.6×10^4	3.3×10^{11}
	290.2	1	8.6×10^4	3.0×10^{11}
6.3~7.6	48.2	2	2.4×10^4	9.9×10^{10}
	49.0	2	2.2×10^4	8.7×10^{10}
10.3~11.3	26.5	4	2.8×10^4	7.9×10^{10}
	26.7	4	2.6×10^4	7.7×10^{10}
11.5~12.5	21.7	4	1.7×10^4	7.4×10^{10}
	22.5	4	1.7×10^4	7.5×10^{10}

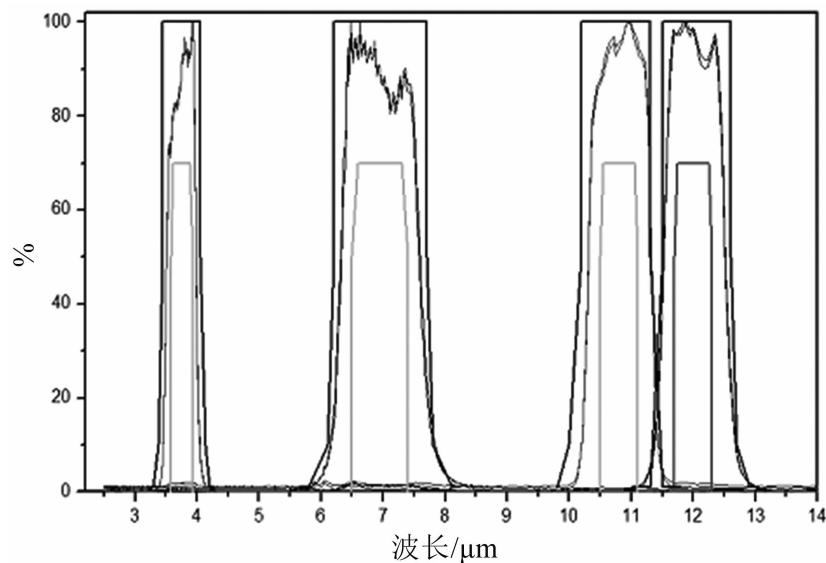


图 4 风云二号四通道红外探测器组件的响应光谱(类似规则矩形的内外方框是卫星应用部门提出的量化考核要求限制框)

Fig. 4 Response spectra of the Fengyun-2 four-channel infrared detector assembly (the inner and outer boxes resembling regular rectangles are the quantitative assessment requirement limits proposed by the satellite application department)

表 2 风云三号 06 星红外探测器(组件号为 M210304)的性能数据^[12]Table 2 Performance data of the infrared detector labelled as M210304 of Fengyun-3 (06) satellite^[12]

像元	波段探测率/($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)			
	3.8 通道	4.05 通道	7.2 通道	8.55 通道
1	1.13×10^{12}	9.18×10^{11}	1.14×10^{11}	1.27×10^{11}
2	1.15×10^{12}	8.92×10^{11}	1.03×10^{11}	1.23×10^{11}
3	1.16×10^{12}	8.68×10^{11}	1.09×10^{11}	1.20×10^{11}
4	1.18×10^{12}	8.90×10^{11}	1.08×10^{11}	1.22×10^{11}
5	1.19×10^{12}	9.10×10^{11}	1.08×10^{11}	1.20×10^{11}
6	1.18×10^{12}	8.74×10^{11}	1.06×10^{11}	1.21×10^{11}
7	1.19×10^{12}	9.15×10^{11}	1.09×10^{11}	1.23×10^{11}
8	1.17×10^{12}	9.08×10^{11}	1.13×10^{11}	1.32×10^{11}
9	1.16×10^{12}	8.88×10^{11}	1.14×10^{11}	1.20×10^{11}
10	1.21×10^{12}	9.14×10^{11}	1.18×10^{11}	1.25×10^{11}

2.4 风云四号卫星红外探测器

风云四号卫星是我国的第二代静止气象卫星。FY-4A是2016年12月11日发射升空的。卫星采用三轴稳定的方式，其中扫描辐射计和垂直探测仪是两大主要载荷。2017年2月27日，我国新一代静止气象卫星FY-4A获得首批图像和数据。全球首幅静止轨道地球大气高光谱图正式亮相。扫描辐射计有10个通道：短波通道采用了铟镓砷探测器，中长波通道采用了碲镉汞探测器。

风云四号01星辐射计的正样辐冷装机件(编号为LW2015/02、WV2014/07、SM2014/18)的探测器性能如表3所示。其中的探测率范围是指4个或8个光敏元探测器的最小值至最大值的范围。图5所示为风云四号01星长波组件LW2015/02的响应光谱。

表3 风云四号01星红外探测器性能数据
Table 3 Performance data of the infrared detector of Fengyun-4 (01) satellite

波段/ μm	波段探测率/($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)
2.1~2.35	$1.44 \times 10^{12} \sim 1.54 \times 10^{12}$
3.5~4.0	$1.21 \times 10^{12} \sim 1.33 \times 10^{12}$
5.8~6.7	$9.14 \times 10^{10} \sim 10.7 \times 10^{10}$
6.9~7.3	$2.11 \times 10^{11} \sim 2.3 \times 10^{11}$
8.0~9.0	$1.6 \times 10^{11} \sim 1.82 \times 10^{11}$
10.3~11.3	$1.01 \times 10^{11} \sim 1.15 \times 10^{11}$
11.5~12.5	$8.18 \times 10^{10} \sim 8.73 \times 10^{10}$
13.2~13.8	$5.62 \times 10^{10} \sim 6.88 \times 10^{10}$

在风云四号垂直探测仪的甚长波光导阵列探测器的研制中，通过激光镂刻蓝宝石微通孔阵来实现光导面阵多金属三维接力互连技术，缓解了阵列引线拥挤问题，提升了探测器占空比，有效改善了整体光电转换效率。在研制过程中发展了元素提纯技术，合成出迁移率高、少子寿命长且禁带宽度小于75 meV的碲镉汞晶体材料；提升低噪声芯片成型工艺，制备出截止波长为16.5 μm 的高量子效率探测器芯片。所制备的碲镉汞甚长波红外光导面阵探测器(见图6)的平均峰值探测率达到 $7.26 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ，且响应截止波长大于16.5 μm 。

3 风云气象卫星红外探测器的技术特点

3.1 探测灵敏度与分辨率提升

灵敏度是遥感仪器的最核心性能参数之一，其中红外探测器的探测率可在一定程度上加以反映。风云卫星红外遥感仪器上大多采用高探测率的碲镉汞探测器。目前研制的红外探测器的探测率已经逼近300 K的背景极限。背景辐射的红外光入射到探测器上的光子数量起伏带来的噪声起主要作用时便决定了探测器的总噪声，而此时的探测器性能就达到了背景极限。在多光谱遥感仪器的低温滤光片组件中，由于滤光片与探测器集成封装在一起，滤光片起到了限制背景光子通量的作用，当前在我们实验中可以清晰地观察到封装后探测器的 D^* 值明显高于芯片制备过程中的筛选测试值。

当单个探测器的能力逼近极限的时候，我们还可以利用探测器规模的效应来实现更好的成像和探测。图7为风云卫星所用红外探测器的最大规模数值随时间的变化走势图。从风云卫星的探测器发展中可以清晰地看出，随着对探测精度、地面分辨率以及探测通道要求的提高，探测器的规模也在不断增加。从三十多年的统计情况来看，大约每三年整星的总光敏元数量翻一番。

3.2 从窄波段探测到宽光谱覆盖的演变

从遥感仪器的光谱来看，扫描辐射计具有窄带特性：1个光谱通道——1个窄带滤光片——1个探测光敏元(后来发展到1个光谱通道有多个探测光敏元)。这种类型的探测器可以近似地只关注峰值波长位置的性能表现。而高光谱类的分光计和FTIR高光谱仪器则是利用仪器变化工作波长，此时探测器不仅需要保证峰值探测率，还要关注整个波长范围内的情况。

采用光导碲镉汞探测器制备FTIR甚长波红外器件，可以同时提供解决宽波段、高性能、工作温度限制等问题的可行方法。其基本原理大致如下：首先，甚长波代表着半导体存在严重热激发。基于本征窄禁带半导体光电效

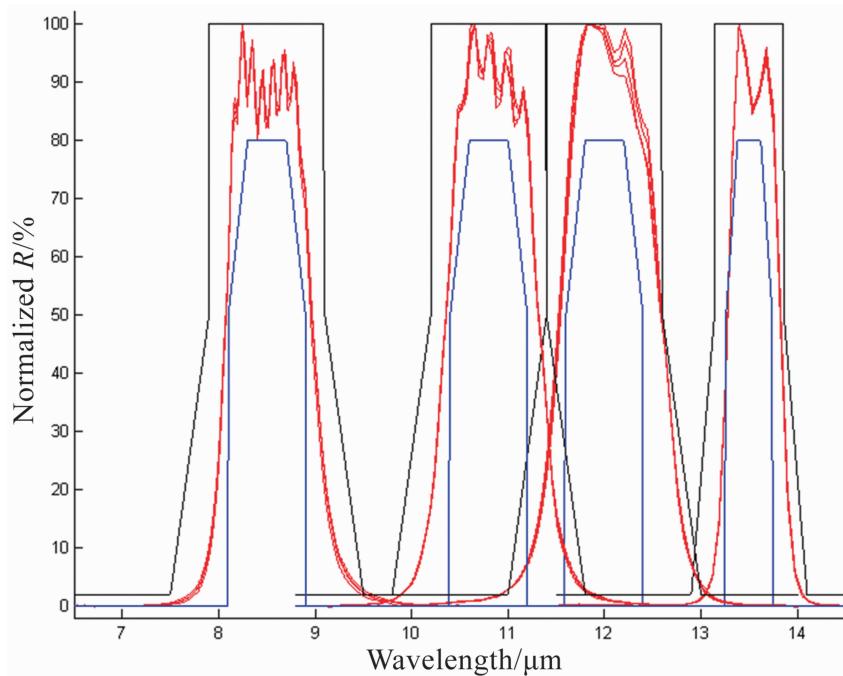
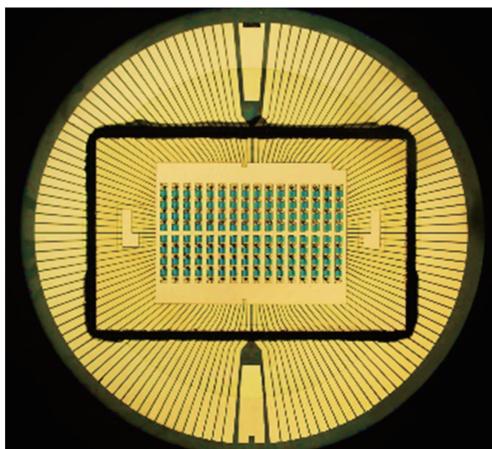


图 5 风云四号 01 星长波组件 LW2015/02 的响应光谱

Fig. 5 Response spectra of Fengyun-4 (01) long-wave assembly labelled as LW2015/02

图 6 FY-4B 甚长波红外光导面阵(16×8)探测器照片Fig. 6 Photo of the FY-4B VLWIR photoconductive detector array (16×8)

应的光导器件在工作温度方面具有明显优势，而利用掺杂半导体构成 pn 结的光伏器件一般需要更低的工作温度。其次，高性能探测器需要选择高吸收系数的半导体材料，然而这种高吸收直接带隙半导体材料的使用，意味着对短波光子的吸收发生在材料表面附近。但材料的表面和界面往往有深能级或者表面悬挂键存在，形成非平衡载流子复合中心。

也就是说，表面复合速度的大小深刻影响探测器响应光谱短波部分的形状，即表面和界面可以严重影响探测器的短波波段光谱。光伏器件的工作原理是利用了不同掺杂构建的 pn 结内建电场，而电场位于材料体内，离表面总是有一定距离的，因此光伏探测器光谱在短波方面没有能力与同波段光导器件相媲美。因为光伏器件通常需要利用一个能带近似平带的表面提高 $R_o A$ 值来保证器件探测率，而光导器件可以构建一个重积累的光入射表面来抑制表面复合速度和扩展响应光谱，所以目前实验室仪器中的甚长波 FTIR 器件仍以碲镉汞光导探测器为主。然而，利用光导探测器制作大规模面阵存在严重困难。光伏阵列器件在规模化上表现出优势。

3.3 不断创新、追求卓越是风云气象卫星红外探测器的发展动力

回顾历史，风云气象卫星红外探测器从无到有，性能也在不断地改进提高。光电探测器单元性能日益逼近背景极限，阵列规模不断增加，光谱形状日趋完美。从可用到好用再到好看，精益求精，不断满足应用需求。

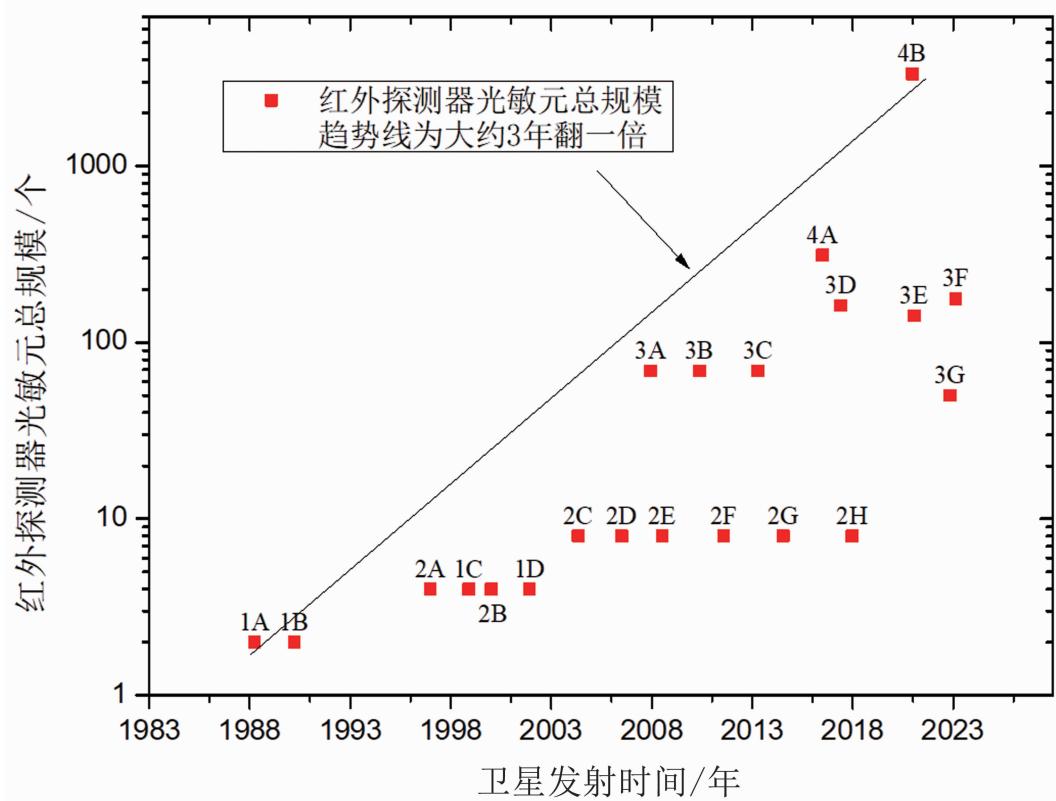


图 7 风云卫星所用红外探测器的像元规模走势图

Fig. 7 The trends of total elements of infrared detectors in Fengyun satellites

同时，为了整体提高系统性能，中国科学院上海技术物理研究所发挥专业垂直集成的特点，从满足国家应用需求的角度出发，在技术牵引和需求推动之间不断迭代优化，发展出一些风云系列探测器特有的技术。比如，碲镉汞材料是比较脆的，因此在探测器上引出金线电极是一项考验设计和工艺的技术。最早我们有钢球焊接技术，后来发展到超声键合，目前则大多采用金丝球焊和蓝宝石过孔互连技术以及钢柱倒焊互连技术。另外还有：(1)低温胶结技术、高深宽比刻蚀成型技术以及光敏区限制保护环技术等；(2)风云二号中波探测器的用于抑制扫出效应的单向叠层技术；(3)风云三号 40 元长波探测器采用与扫描成像匹配的倾斜光敏面设计技术，配合整机时序完成像元成像时序的配准；(4)根据 FTIR 仪器特点设计的引线电极下置的减反射结构，以及配合辐冷光伏探测器的低温前放集成技术。以上这些技

术是系统工作者与探测器工作者大力协作的产物，为整机系统的优异表现贡献了力量。

4 风云气象卫星红外探测器面临的技术挑战与未来发展趋势

4.1 技术挑战分析

新一代卫星将有更高的地面分辨率、更高的时间分辨率、更精细的光谱分辨率、更高的温度分辨率以及更高的辐射定量精度。这些都对探测器提出了要求：探测器规模需要进一步增加，探测器的光电性能以及响应光谱需要进一步优化，探测器的稳定性和可靠性需要进一步提升。因此，衬底材料的晶圆尺寸需要扩大，外延材料的晶圆尺寸需要扩大、性能需要提升，芯片制作工艺的控制水平需要提高，封装的尺寸需要扩大、精度需要提高。另外，随着探测器规模的不断增加，探测器芯片上的海量数据传输和处理也将面临挑战。

4.2 未来发展趋势预测

随着未来遥感仪器要求的不断提升,探测器的发展将沿着规模增加、性能优化以及智能化方向发展。

在光子能流密度大、积分时间长的场景中,利用大规模、长积分时间以及低成本获得优势的非制冷焦平面探测器在成像方面可能会获得一些应用。在高光谱、高分辨率、快速成像等方面还是以制冷光子探测型焦平面阵列器件为主。多波段多色集成的焦平面探测器可能会有一些新应用。探测器芯片上将带有模数转换、信息处理等专用功能,对获取的海量数据进行预处理,以方便后续任务。未来研制的光子探测器芯片的动态范围将会得到大幅度改善,焦平面探测器的等效噪声温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)将进入到1 mK水平。

在探测器材料方面,衬底材料向6~8 in发展,外延技术在晶圆尺寸上进军6~8 in,具有能带工程特征的多层外延技术发展出更多功能的探测器芯片。在探测器制造方面,探测器晶圆加工能力从当前的4~6 in发展到6~8 in,光刻关键线条的尺寸发展到亚微米量级。在工艺控制方面,普遍采用自动化技术提升制造成品率,并结合人工智能提升制程的控制水平。预期5至10年内探测器规模达到12k×12k,气象卫星可在地球同步轨道上获得对地球圆盘的1 km分辨率、1 mK灵敏度的实时凝视观测视频(每秒10帧)。

4.3 技术路径探讨

我国风云气象卫星的自主发展历史告诉我们,建设从材料到器件到仪器再到整星的全过程自主发展的道路是正确且必要的。红外探测器的发展首先要重视材料的基础作用;其次,瞄准应用需求的同时,材料与器件共同发展是快速技术突破的有效途径。发展工艺技术和研发专用工艺装备是当今探测器自力更生发展的努力方向之一。

5 结论与展望

本文回顾了风云气象卫星及其探测器的发展历程和相关技术特点,展望了红外探测器的发展趋势。作为气象卫星有效载荷的核心部件之一,红外探测器的性能直接关系到气象遥感仪器的性能,从而影响气象预报的准确性和时效性。风云卫星红外探测器的发展是与风云卫星遥感仪器的发展紧密关联的,整个过程体现了中国科研人员自立自强的不断自我施压、为圆满完成国家任务而不断努力创新超越的精神。本文还分析了当前红外探测器面临的技术挑战和未来发展方向,并提出了可能的解决方案和技术路径。

参考文献

- [1] 国家卫星气象中心. 风云系列气象卫星 [EB/OL]. [2024-11-15]. <http://www.nsme.org.cn/nsme/cn/satellite/index.html>.
China National Satellite Meteorological Center. Fengyun Series Satellites [EB/OL]. [2024-11-15]. <http://www.nsme.org.cn/nsme/cn/satellite/index.html>.
- [2] 沈杰, 陈建中, 汤定元. $Hg_{0.80}Cd_{0.20}Te$ 在液线温度的汞汽压 [J]. 科学通报, 1981, 26(10): 593~595.
Shen J, Chen J Z, Tang D Y. Mercury vapor pressure of $Hg_{0.80}Cd_{0.20}Te$ at the liquidus temperature [J]. Chinese Science Bulletin, 1981, 26(10): 593~595.
- [3] 褚君浩, 徐世秋, 汤定元. $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 三元半导体的禁带宽度 [J]. 科学通报, 1982, 27(7): 403~405.
Chu J H, Xu S Q, Tang D Y. Bandgap of $Hg_{1-x}-Cd_xTe$ ternary semiconductor [J]. Chinese Science Bulletin, 1982, 27(7): 403~405.
- [4] 陈路, 王元樟, 巫艳, 等. Si 基 CdTe 复合衬底分子束外延研究 [J]. 激光与红外, 2005, 35(11): 62~65.
Chen L, Wang Y Z, Wu Y, et al. Research on molecular beam epitaxy of Si-based CdTe Composite Substrates [J]. Laser & Infrared, 2005, 35(11): 62~65.

- (11): 62–65.
- [5] 胡晓宁, 张海燕, 李言谨, 等. 硅基 HgCdTe 面阵焦平面器件结构热应力分析 [J]. 激光与红外, 2006, 36(11): 1020–1022.
Hu X N, Zhang H Y, Li Y J, et al. Thermal stress analysis of Si-based HgCdTe area array focal plane device structure [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(11): 1020–1022.
- [6] 李雪, 龚海梅, 邵秀梅, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面研究进展 [J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 129–138.
Li X, Gong H M, Shao X M, et al. Recent advances in short wavelength infrared InGaAs focal plane arrays [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(1): 129–138.
- [7] 王小坤, 朱三根, 龚海梅. 星用红外探测器封装技术及其应用 [J]. 红外, 2005, 26(11): 15–20.
Wang X K, Zhu S G, Gong H M. Packaging technology of infrared detector on satellite and its application [J]. *Infrared*, 2005, 26(11): 15–20.
- [8] 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.
Gong H M, Shao X M, Li X Y, et al. Advanced technology and application of spaceborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*,
- 2012, 41(12): 3129–3140.
- [9] 方家熊, 徐国森, 张林法, 等. 卫星用长波 HgCdTe 探测器的研究 [J]. 红外研究, 1990, 9(2): 123–128.
Fang J X, Xu G S, Zhang L F, et al. Study of long wavelength HgCdTe Detector for satellite [J]. *Infrared Research*, 1990, 9(2): 123–128.
- [10] 徐国森, 方家熊, 朱三根, 等.“风云二号”卫星用水汽/热红外双波段探测器 [J]. 红外与激光工程, 2000, 29(4): 50–54.
Xu G S, Fang J X, Zhu S G, et al. Water-vapor/infrared dual band detector in FY-2 satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(4): 50–54.
- [11] 陈伯良, 李向阳. 航天红外成像探测器 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 210–221.
Chen B L, Li X Y. *Infrared Imaging Detectors for Space Applications* [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd, 2016: 210–221.
- [12] 乔辉, 王丽, 贾嘉, 等. 硒镉汞光导器件在风云气象卫星中的应用 [J]. 激光与红外, 2023, 53(10): 1534–1544.
Qiao H, Wang N L, Jia J, et al. HgCdTe photoconductive detectors for the Fengyun meteorological satellites [J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(10): 1534–1544.

附表 1 风云气象卫星航天有效载荷红外探测器芯片及研制概况情况

卫星型号及序列	发射时间	光子型红外探测器服役的有效载荷	红外探测器组件及工作环境情况	工作波段/ μm	光敏元尺寸/mm	探测器芯片特征	工艺方案	其他情况
FY1A	1988.09.07	扫描辐射计(SR)	长波芯片滤光片透镜组件 ②二级辐冷 105 K	10.5~12.5	0.28×0.26	碲镉汞光导单元	本征 n 型体材料	首次应用
FY1B	1990.09.03					基本情况同上		
风云一号	1999.05.10	多通道扫描辐射计(MVISR)	短波芯片滤光片组件 @ 常温 中长波三通道芯片滤光片 透镜组件 @ 二级辐冷	1.58~1.64 3.53~3.93 10.3~11.3 11.5~12.5	0.4×0.4 0.28×0.26 0.28×0.26 0.28×0.26	碲镉汞光伏单元	掺 Sb p 型体材料, 离子注入掺杂 短波 碲镉汞 材料	
FY1D	2002.05.15					基本情况同上		
FY2A	1997.06.10	扫描辐射计(S-VISSR)	三通道长波水汽两通道芯片滤光片 组件 @ 二级辐冷	6.3~7.6 10.5~12.5	0.082×0.082 0.082×0.082	碲镉汞光导双元	本征 n 型体材料; 光敏元双备份 配置	小光敏元
FY2B	2000.06.25					基本情况同上		
风云二号	2004.10.19	扫描辐射计(S-VISSR)	五通道中波、水汽、热红外分裂窗 四通道芯片滤光片组件 ③二级辐冷	3.5~4.0 6.3~7.6 10.3~11.3 11.5~12.5	0.082×0.082 0.082×0.082 0.082×0.082 0.082×0.082	碲镉汞光导双元	叠层电极结构 本征 n 型体材料 同上 同上	增加中波 通道
FY2D	2006.12.19					基本情况同上		
FY2E	2008.12.23					基本情况同上		
FY2F	2012.01.13	五通道扫描辐射计	四通道芯片滤光片组件 ④二级辐冷	3.5~4.0 6.3~7.6 10.3~11.3 11.5~12.5	0.082×0.082 0.082×0.082 0.082×0.082 0.082×0.082	碲镉汞光导双元	弱 p 型高阻值 高响应技术 光谱平坦化	增加光谱 形状考核
FY2G	2014.12.31					基本情况同上		
FY2H	2018.06.05					基本情况同上		

续附表 1 风云气象卫星航天有效载荷红外探测器芯片及研制概略情况

卫星型号 及序列	发射时间	光子型红外 探测器服役 的有效载荷	红外探测器组件及 工作环境情况	工作波段/ μm	光敏元尺寸/ mm	探测器芯片 特征	工艺方案	其他情况
扫描辐射计 (VIRR)	2008.05.27	十通道	短波双波段芯片滤光片 组件@常温	1.325~1.395 1.58~1.64	0.4×0.4 0.4×0.4	碲镉汞光伏单元 碲镉汞光伏单元	掺 Sb 体材料 同上	增加 1.3 μm 短波通道
		三通道芯片滤光片透镜 组件@二级辐冷	3.53~3.98 10.3~11.3	0.28×0.26 0.28×0.26	碲镉汞光导单元 碲镉汞光导单元	本征 n 型体材料 本征 n 型体材料	本征 n 型体材料 本征 n 型体材料	
			11.5~12.5	0.28×0.26	碲镉汞光导单元			
红外分光计 (IRAS)	2008.05.27	短波 1, 单元芯片光锥 透镜组件 @ 常温	1.19~1.29	Φ2.5	碲镉汞光伏单元	掺 Sb 体材料		
		短波 2, 同上	1.58~1.70	Φ2.5	碲镉汞光伏单元	同上		
风云二号 中分辨率 光谱成像仪 (MERSI-1)	2010.11.05	中波单元芯片光锥透镜 组件@二级辐冷	3.7~4.6	Φ2.2	碲镉汞光导单元	汞空位 p 型材料		大面积; 基长波 梳状工艺提高 响应率
		甚长波, 同上	6.5~15	2.2×2.2	碲镉汞光导单元			
地球辐射 收支仪 (ERM)	2013.09.23	短波双通道芯片焦平面滤 光片组件@一级辐冷	1.615~1.665	0.30×0.26	碲镉汞 10 元光伏	延伸电极、宝石 基板与读出电路 间接互连	CTIA 线列	
		长波线列滤光片 组件@二级辐冷	2.105~2.155	0.30×0.26	碲镉汞 10 元光伏			
FY3B	2010.11.05	宽光谱热敏 @ 室温	0.6~20 (宽带)	0.40×0.40	热敏电阻单元	锰钴镍热敏电阻		
FY3C	2013.09.23	同星服役的三台仪器载荷及其相应的红外探测器的研制基本情况同 FY3A	同上					

续附表 1 风云气象卫星航天有效载荷红外探测器芯片及研制概况情况

卫星型号及序列	发射时间	光子型红外探测器服役的有效载荷	红外探测器组件及工作环境情况	工作波段/ μm	光敏元尺寸/mm	探测器芯片特征	工艺方案	其他情况
		高光谱大气垂直探测仪(HIRAS)	中波 II: 2×2 芯片透镜组件 @二级辐冷	3.92~4.64	$\Phi 1.25$	锑化铟光伏单元	扩散成结	锑化铟材料
FY3D 2017.11.15			中波 I: 同上	5.71~8.26	$\Phi 1.25$	锑镉汞光伏单元	LPE 材料芯片 双层钝化	
			甚长波: 同上	8.80~15.39	$\Phi 1.25$	锑镉汞光导单元		
			短波三通道芯片焦平面滤光片组件 @一级辐冷	1.38±0.03/2 1.64±0.05/2 2.13±0.05/2	0.30×0.26 0.30×0.26 0.30×0.26	碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光伏	蓝宝石基板引线 转折解决拼接 间距问题	
		中分辨率光谱成像仪 II (MERSI-2)	中波水汽四通道光导光路芯片滤光片组件 (@二级辐冷)	3.8±0.18/2 4.05±0.155/2 7.2±0.5/2 8.55±0.3/2	0.40×0.40 0.40×0.40 0.40×0.40 0.40×0.40	碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光伏	低温前放电路 本征 n 型体材料	
			长波分裂窗线列滤光片场镜组合件 @二级辐冷	10.8±1.0/2 12.0±1.0/2	0.10×0.12 0.10×0.12	碲镉汞 40 元光导 碲镉汞 40 元光导	芯片电极板互连 模块金丝电极键合	
			3×3 芯片透镜组件 (@二级辐冷)	3.92~4.64	$\Phi 0.84$	锑化铟光伏单元	扩散成结	
		高光谱大气垂直探测仪(HIRAS)	同上	5.71~8.26	$\Phi 0.82$	锑镉汞光伏单元	离子注入	
			同上	8.80~15.39	$\Phi 0.76$	锑镉汞光导单元	本征 n 型体材料	
FY3E 2021.07.05			短波组件 @TEC 室温	1.24±0.020/2	0.30×0.30	铟镓砷 10 元光伏	外延片	
		中分辨率光谱成像仪 II 微光型 (MERSI-2)	中波、水汽四通道光导光路芯片滤光片组件 (@二级辐冷)	3.8±0.18/2 4.05±0.155/2 7.2±0.5/2 8.55±0.3/2	0.40×0.40 0.40×0.40 0.40×0.40 0.40×0.40	碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光伏	带放大器 带放大器	
			长波分裂窗线列滤光片场镜组件 @二级辐冷	10.8±1.0/2 12.0±1.0/2	0.10×0.12 0.10×0.12	碲镉汞 40 元光导 碲镉汞 40 元光导	本征 n 型体材料	

续附表 1 风云气象卫星航天有效载荷红外探测器芯片及研制概略情况

卫星型号 及序列	发射时间	光子型红外 探测器服役 的有效载荷	红外探测器组件 的工作环境情况	工作波段/ μm	光敏元尺寸/ mm	探测器芯片 特征	其他情况	
							LPE 材料	n 型/体材料
FY3F	2023.08.03	高光谱大气 垂直探测仪 (HIRAS)	3×3 芯片透镜组件 @二级辐冷	3.92~4.64	Φ0.84	碲镉汞光伏单元	LPE 材料	
			同上	5.71~8.26	Φ0.82	碲镉汞光伏单元	LPE 材料	
			同上	8.80~15.39	Φ0.76	碲镉汞光伏单元	本征 n 型/体材料	
			短波三通道组件 @一级辐冷	1.38±0.03/2 1.64±0.05/2 2.13±0.05/2	0.30×0.26 0.30×0.26 0.30×0.26	碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光伏	沿用 04 星工艺	
			中分辨率 光谱成像 仪 II 微光型 (MERSI-II)	中波、水汽四通道组件 @二级辐冷	3.8±0.18/2 4.05±0.155/2 7.2±0.5/2 8.55±0.3/2	0.40×0.40 0.40×0.40 0.40×0.40 0.40×0.40	碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光导 碲镉汞 10 元光导	沿用 04 星工艺
			长波分裂窗组件 @二级辐冷	10.8±1.0/2 12.0±1.0/2	0.10×0.12 0.10×0.12	碲镉汞 40 元光导 碲镉汞 40 元光导		
			短波组件 @室温 TEC	1.38±0.030/2 1.64±0.050/2	0.30×0.30 0.30×0.30	铟镓砷 10 元光伏 铟镓砷 10 元光伏	单片外延材料集成 双波段芯片	
			中分辨率 光谱成像仪 IV (降水型)	中长波柱瓦组件 @制冷机 80 K	3.8±0.180/2 10.8±1.000/2	0.30×0.30 0.30×0.30	碲镉汞 10 元光伏 碲镉汞 10 元光导	
				12.0±1.000/2	0.30×0.30	碲镉汞 10 元光导		
			近红外双通道线阵芯片滤光 片透镜组件 @常温	1.36~1.39 1.58~1.64	0.105×0.105 0.105×0.105	铟镓砷 8 线阵	单片外延材料 集成双波段芯片	铟镓砷 材料
			扫描辐射计 (AGRI)	短波、中波光伏芯片前放滤 光片透镜组件 @二级辐冷	2.1~2.35 3.5~4.0	0.056×0.056 0.056×0.056	碲镉汞 8 元光伏	首次 光伏带 低温前放
FY4A	2016.12.11	风云四号					控制光敏芯片应 力向收集效应	

续附表 1 风云气象卫星航天有效载荷红外探测器芯片及研制概略情况

卫星型号 及序列	光子型红外 探测器服役 的有效载荷	发射时间	红外探测器组件及 工作环境情况	工作波段/ μm	光敏元尺寸/ mm	探测器芯片 特征	工艺方案		其他情况	
							n型体 材料	本征n型体 材料		
FY4A 2016.12.11	扫描辐射计 (AGRI)		水汽双通道芯片滤光片 透镜组件@二级辐冷	5.8~6.7 6.9~7.3	0.056×0.056 0.056×0.056	碲镉汞 4 元光导 碲镉汞 4 元光导	控制刻蚀 陡度、控制 响应光谱	小光敏元	红外	
			长波四通道芯片滤光片 透镜组件@二级辐冷	8.0~9.0 10.3~11.3 11.5~12.5	0.056×0.056 0.056×0.056 0.056×0.056	碲镉汞 4 元光导 碲镉汞双 4 元光导				
				13.2~13.8	0.056×0.056	碲镉汞 4 元光导				
	大气垂直 探测仪 (GHIRS)		中波 32×4 芯片和长波 32×4 芯片滤光片透镜杜瓦 组件@制冷机 65 K	4.44~6.06 8.6~15.0	0.24×0.24 0.18×0.18	碲镉汞 32×8 光伏 碲镉汞 128 元光导	LPE 碲镉汞倒焊 并伸电极金丝球	小规模面 阵探测器		
			近红外双通道线阵芯片 滤光片透镜组件@常温	1.36~1.39 1.58~1.64	0.105×0.105 0.105×0.105	铟镓砷 8 元线阵	互连 焊电极板	性能改进		
			短中波光伏前放滤光片 透镜组件@二级辐冷	2.1~2.35 3.5~4.0	0.056×0.056 0.056×0.056	碲镉汞 8 元光伏 碲镉汞 8 元光伏				
	扫描辐射计 (AGRI)		水汽三通道芯片滤光片 透镜组件@二级辐冷	5.8~6.7 6.75~7.15 7.24~7.6	0.056×0.056 0.056×0.056 0.056×0.056	碲镉汞 4 元光导 碲镉汞 4 元光导 碲镉汞 4 元光导	沿用 FY4-01 星工 艺	增加了一个 水汽通道		
				8.0~9.0	0.056×0.056	碲镉汞 4 元光导				
			长波四通道芯片滤光片 透镜组件@二级辐冷	10.3~11.3 11.5~12.5	0.056×0.056 0.056×0.056	碲镉汞双 4 元光导				
FY4B 2021.06.03	大气垂直 探测仪 (GHIRS)		中波 16×8 芯片和长波 16×8 芯片滤光片透镜杜瓦 组件@制冷机 65 K	4.44~6.06 8.6~15.0	0.24×0.24 0.18×0.18	碲镉汞 16×8 光伏 碲镉汞 16×8 光导	背照射焦平面 通孔电极板扇出	背照射焦平面 通孔电极板扇出		
			短波组件@室温 TEC	1.371~1.386 1.58~1.64	0.02×0.02 0.02×0.02	铟镓砷				
			杜瓦组件@制冷机 65 K	10.5~12.5	0.028×0.028	碲镉汞	1024×2 线阵	中等规模背照 平面探测器	256×4 线阵	