

文章编号: 1672-8785(2024)12-0034-06

像素级滤光片的微米级 装配工艺研究

冯志攀 方志浩 刘建娇 付志凯 邢艳蕾
刘亚泽 林国画 王 冠

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 为满足红外探测器多通道精细分光的应用需求, 像素级滤光片需精准地集成在红外探测器组件的冷头上, 且滤光片 X、Y、Z 向装配精度需要控制在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以内, 以降低不同通道间的杂散光干扰。基于 $320\times 256@30\text{ }\mu\text{m}$ 中波红外探测器进行像素级滤光片设计。以探测器上相邻的四个像元为一组, 每个像元在像素级滤光片上的对应区域有各自的吸收谱段。通过对比分析胶黏剂和金属滤光片支架分别作为像素级滤光片的支撑结构时的四像元光谱吸收曲线, 发现前者的 Z 向装配间距可低至 $2\sim 10\text{ }\mu\text{m}$, 截止波段外的杂散光吸收较后者可降低 $25\%\sim 50\%$ 。结果表明, 将胶黏剂作为滤光片的微支撑结构的装配工艺能够有效解决像素级滤光片的杂散光干扰问题。

关键词: 红外探测器; 像素级滤光片; 封装工艺

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.12.005

Study on the Micron-Scale Assembly Process of Pixel-Level Filters

Feng Zhi-pan, Fang Zhi-hao, Liu Jian-jiao, Fu Zhi-kai, Xing Yan-lei,
Liu Ya-ze, Lin Guo-hua, Wang Guan

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

Abstract: To meet the application requirements of multi-channel fine spectrometry of infrared detectors, pixel-level filters need to be accurately integrated on the cold head of infrared detector assembly, and the assembly accuracy of the filters in the X, Y and Z directions needs to be controlled within $10\text{ }\mu\text{m}$ to reduce the stray light interference between different channels. The pixel-level filter is designed based on a $320\times 256@30\text{ }\mu\text{m}$ mid-wave infrared detector. Four adjacent pixels on the detector are grouped together, and each pixel has its own absorption spectrum on the corresponding region of the pixel-level filter. By comparing and analyzing the spectral absorption curves of the four pixels when the adhesive and the metal filter bracket are respectively used as the supporting structure of the pixel-level filter, it is found that the Z-direction assembly spacing of the former can be as low as $2\sim 10\text{ }\mu\text{m}$, and the stray light absorption outside the cutoff band can be reduced by

收稿日期: 2023-11-21

作者简介: 冯志攀(1995-), 女, 河南郑州人, 硕士, 主要从事红外探测器组件封装结构设计仿真与工艺开发研究。E-mail: 18811073819@163.com

25%–50% compared with the latter. The results show that the assembly process using adhesive as the micro-support structure of the filter can effectively solve the stray light interference problem of pixel-level filters.

Key words: infrared detector; pixel-level filter; packaging process

0 引言

红外滤光片以锗、硅等红外透过材料为基片, 其表面的红外截止膜可以抑制特定区域和谱段的红外光透过^[1]。随着高光谱成像技术的发展, 滤光片型高光谱相机因其结构简单、分辨率高等特点得以迅速发展^[2]。其中, 由于滤光片镀膜、拼接等工艺的成熟, 阵列式排列的红外滤光片由多谱段拼接型^[3]逐渐向像元阵列型多谱段^[4]发展。红外探测器组件也从单一谱段吸收, 转为同时获取多谱段或单像素级的光谱通道信息, 其目标分辨的准确性和抗干扰能力得到明显提升。

通常将单通道红外滤光片安装在冷屏顶部。滤光片对光轴方向(Z向)和安装平面上(X向、Y向)的安装精度要求不高, Z向安装间距为毫米级或厘米级。相比较之下, 多谱段拼接滤光片则是借助滤光片支架安装在探测器上方^[5]。在滤光片表面光刻标的辅助下, X向、Y向装配精度为微米级(1~20 μm)。但由于滤光片装配中有多道误差传递等因素, 滤光片与红外探测器 Z 向间距装配精度通常大于 100 μm , 极大地影响了多谱段红外探测器的成像质量和光谱效果。除此之外, 像素级滤光片上的微结构区域与探测器像元存在一一对应的位置关系, 且滤光片上的微结构面积与像元大小一致, 导致不同谱段间的杂散光串扰与 Z 向装配间距密切相关。因此, 像素级滤光片的微米级装配工艺成为影响多谱段红外探测器组件最终成像或光谱效果的关键因素。

为了探究降低像素级滤光片微结构区域间杂散光串扰的工艺方案, 本文根据 320×256@30 μm 中波红外探测器像素级滤光片装配精度和材料低温匹配性的要求, 通过相邻四像元光谱吸收曲线中杂散光透过率的对比, 研究了金

属滤光片支架和胶黏剂粘接两种装配工艺对探测器光谱吸收曲线的影响, 探索了一种像素级滤光片的微米级装配工艺, 有效抑制了杂散光的透过率, 为提升多谱段红外探测器的成像质量和光谱效果奠定了基础。

1 结构设计

像素级滤光片的下表面是 320×256 个微结构区域, 相邻四个微结构区域为一组: 左上角微结构的吸收谱段是 4.3~5 μm (以下简称“谱段 1”), 在 4.3 μm 处进行前截止处理; 对角微结构的吸收谱段是 3.5~4.3 μm (以下简称“谱段 2”), 在 4.3 μm 处进行后截止处理; 其余两个谱段为 3.5~5 μm 的带通波段(以下简称“谱段 3”)。滤光片的上表面镀增透膜, 四周有光刻标, 用于校准滤光片 X、Y 向装配精度。像素级滤光片的外观与谱段分布如图 1 所示。

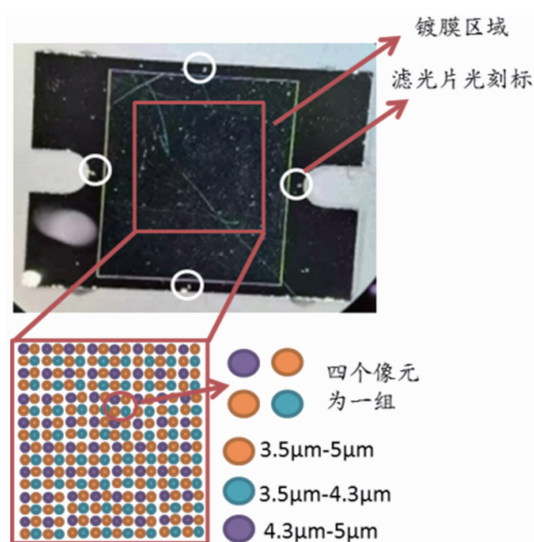


图 1 像素级滤光片的结构示意图

像素级滤光片装配于 320×256@30 μm 中波红外探测器的杜瓦结构, 其常规装配工艺为滤光片支架法。这种方法是将两个滤光片支架粘接在杜瓦冷头的框架上, 分布于探测器两侧。

将像素级滤光片粘接在滤光片支架上, 悬于红外探测器上方, 然后利用滤光片支架与探测器的高度差, 控制滤光片与探测器上表面的间距。不考虑胶黏剂的厚度时, 滤光片支架高度与探测器厚度之差为 Z 向装配间距(0.5 mm)。

本文探索的装配工艺是胶黏剂粘接法, 如图 2 所示。这种方法是将滤光片边缘用胶黏剂粘接在电路上, 利用胶黏剂厚度与探测器上表面到电路的高度差两者之间的差值控制滤光片与红外探测器的 Z 向装配间距。探测器顶部与电路之间的高度差约为 $20 \pm 2 \mu\text{m}$, 胶黏剂厚度的经验测试结果为 $26 \pm 2 \mu\text{m}$, Z 向装配间距估计在 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 。冷屏顶部的单谱段滤光片依照需求选择是否装配。以上两种装配方法的 X、Y 向装配精度均小于 $10 \mu\text{m}$ 。

组件装配完成后, 耦合 XD-5 制冷机。在相同杜瓦和像素级滤光片条件下, 基于 GB/T 17444-2013 红外焦平面阵列参数测试方法, 通过 OPUS 红外光谱仪随机对两种工艺条件下的相邻四像元进行单像元红外吸收光谱测试。

2 结果与分析

图 3(a)所示为使用滤光片支架装配像素级滤光片、冷屏顶部未安装单色滤光片时测量的单像元光谱透过曲线。谱段 1 对应的像元实际吸收谱段为 $4.35 \sim 5.3 \mu\text{m}$, 前截止波段之前的透过率为 $30\% \sim 40\%$; 谱段 2 对应的像元实际吸收谱段为 $2.85 \sim 3.9 \mu\text{m}$, 后截止波段之后的光谱透过率为 $40\% \sim 50\%$ 。

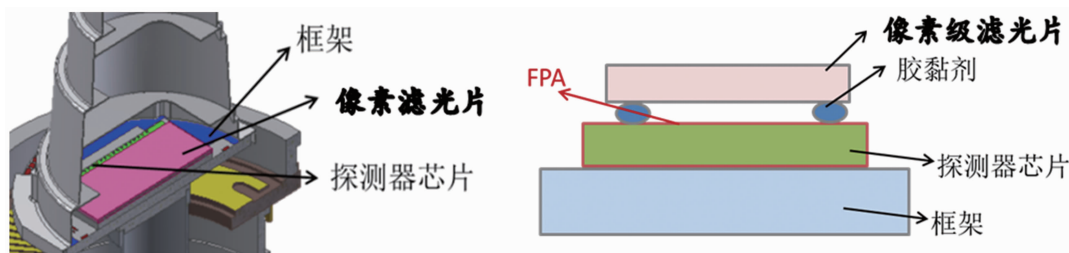


图 2 胶黏剂粘接法的示意图

图 3(b)所示为使用胶黏剂粘接结构装配像素级滤光片、冷屏顶部未安装单色滤光片时测量的单像元光谱透过曲线。与图 3(a)相似, 由于未安装单色滤光片, 谱段 3 实际的光谱吸收波段远宽于设计值。谱段 1 对应的像元实际吸收谱段为 $4.3 \sim 5.3 \mu\text{m}$, 前截止波段之前的透过率为 $20\% \sim 30\%$; 谱段 2 对应的像元实际吸收谱段为 $2.85 \sim 3.85 \mu\text{m}$, 后截止波段之后的光谱透过率为 30% 。与滤光片支架装配结构相比, 谱段 1 和谱段 2 的杂散光透过率明显降低。

使用滤光片支架装配时, 谱段 1 和谱段 2 的截止波段前后非目标波段的光谱吸收曲线趋势与谱段 3 对应波段保持一致。使用胶黏剂粘接法时, 谱段 1 和谱段 2 的截止波段前后非目标波段的光谱吸收曲线趋势与谱段 3 没有明显对应关系, 初步表明 Z 向装配间距减小对像元间的杂散光干扰有明显的抑制作用。

如图 4 所示, 从理论计算分析, 当冷屏开口直径 d 、冷屏开口到光敏面的距离 h 、像素级滤光片单像素区域直径 φ 、滤光片与光敏面之间的 Z 向装配间距 δ 等参数确定后, 可计算出通过冷屏开口的有效光线经过滤光片的单像素区域时辐射在光敏面上的圆形面积, 其直径为

$$a = \varphi + \frac{\delta(d + \varphi)}{h - \delta} \quad (1)$$

使用滤光片支架结构时(见图 4(a)), 根据 320×256 杜瓦结构的冷屏尺寸和滤光片支架高度, 可计算出滤光片单像素区域在光敏面上的辐射区域的直径 $a_1 = 300 \mu\text{m}$, 光敏面像元直径为 $30 \mu\text{m}$, 则辐射区域面积是单个像元面积

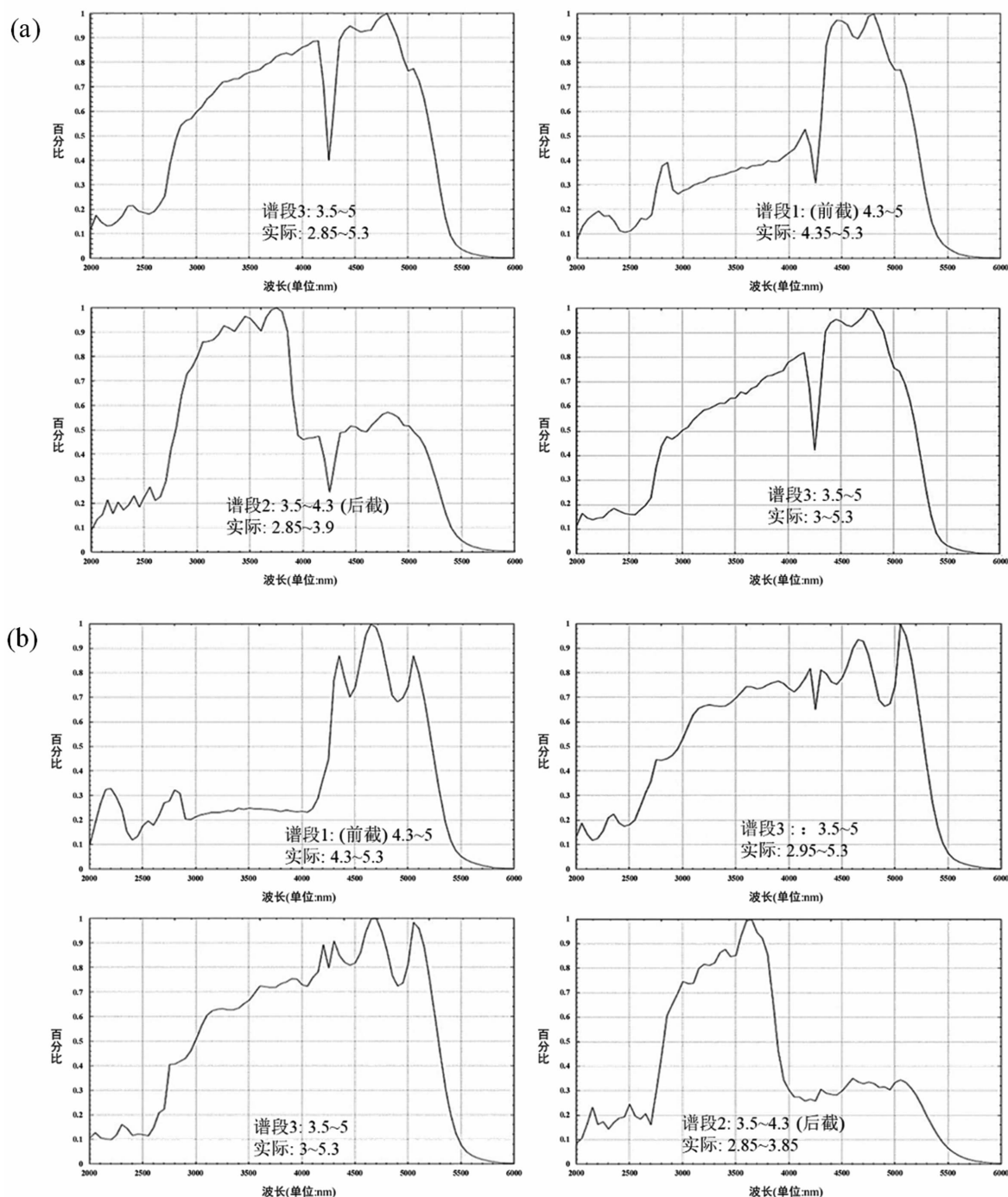


图 3 (a)使用滤光片支架法时红外探测器组件的光谱吸收曲线;(b)使用胶黏剂粘接法时红外探测器组件的光谱吸收曲线(均未在冷屏顶部安装单色滤光片)

的 100 倍。当滤光片的单像素区域为谱段 3 时,谱段 1 和谱段 2 在光敏面上对应的像元被认为接收到了杂散光,此时杂散光占比 c 为 0.25;当滤光片的单像素区域为谱段 1 时,谱段 2 对应的像元所接收的光线被认为是杂散光,此时杂散光占比 c 为 0.0625;当滤光片的

单像素区域为谱段 2 时,谱段 1 对应的像元所接收的光线被认为是杂散光,杂散光占比 c 为 0.0625,此时总杂散光占比为 0.375。

使用胶黏剂粘接结构时(见图 4(b)),若 Z 向装配间距 δ 为 $10\ \mu\text{m}$,根据 320×256 杜瓦结构的冷屏尺寸则可计算出滤光片单像素区域在

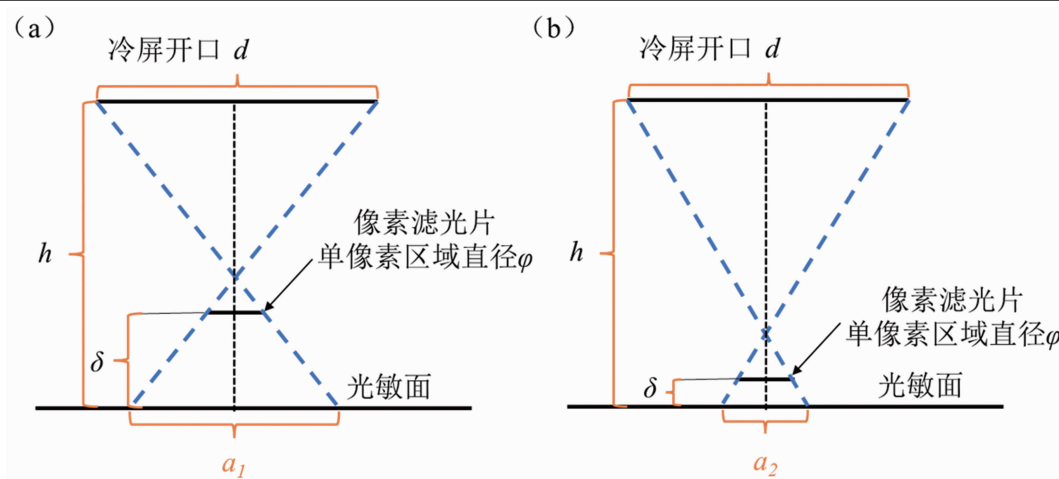


图 4 光线分布示意图：(a)滤光片支架装配法；(b)胶黏剂粘接法

表 1 两种滤光片装配工艺对应的滤光片单像素区域理论杂散光占比

滤光片单像素区域	谱段 3 时的杂散光占比	谱段 1 或谱段 2 时的杂散光占比	总杂散光占比
滤光片支架法 $a_1=0.3 \text{ mm}$	0.25	0.125	0.375
胶黏剂粘接法 $a_2=0.035 \text{ mm}$	0.132	0	0.132

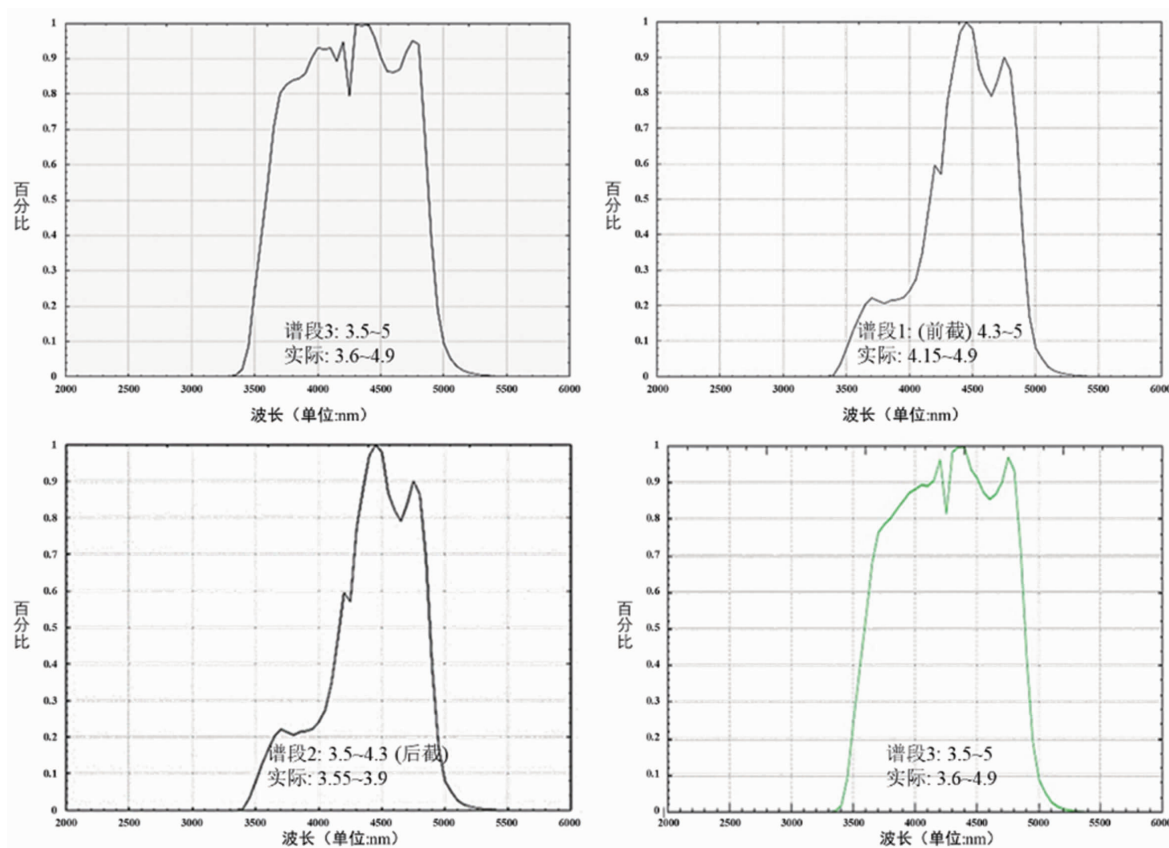


图 5 在冷屏顶部加装单波段滤光片时,使用胶黏剂粘接结构的红外探测器组件的光谱吸收曲线

光敏面上的辐射区域的直径 $a_2 = 35 \mu\text{m}$ 。当滤光片的单像素区域为带通波段时,由像素级滤光片的谱段排布方式可知,探测器上对应像元

的相邻像元的吸收波段为谱段 1 和谱段 2,相邻像元所接收的光均被认为是杂散光。此时,杂散光占比 = $(1 - \text{对应像元面积} / \text{辐射总面积})$

$\times 0.5 = 0.132$; 当单像素区域为谱段 1 或谱段 2 时, 从滤光片结构上来看, $a_2 = 35 \mu\text{m}$ 所覆盖的像元区域的吸收波段为带通波段, 杂散光占比约等于 0; 因此, 总杂散光占比为 0.132, 理论计算结果统计于表 1 中。

由以上结果可知, 胶黏剂粘接结构的理论总杂散光占比是滤光片支架结构的 0.352 倍。当降低滤光片装配位置时, 谱段 1 和谱段 2 截止波段前后的杂散光透过率能得到明显抑制。采用这两种装配方法时光谱中均出现了低温下截止波长漂移和截止波段前后透过率有差异的现象。这是由滤光片截止膜系材料设计问题导致的, 与本文中讨论的滤光片装配工艺无关, 因此暂不讨论此现象。

由于像素级滤光片设计时未在 $3.5 \mu\text{m}$ 之前和 $5 \mu\text{m}$ 之后做截止膜, 为了获得更加精确的红外光谱数据, 需考虑在冷屏顶部增加单带通滤光片。如图 5 所示, 在冷屏顶部加装单波段滤光片 ($3.65 \sim 4.95 \mu\text{m}$) 时, 有效光谱区域之外的杂散光明显得到抑制。

3 结束语

本文基于 $320 \times 256 @ 30 \mu\text{m}$ 中波红外探测器, 对比了胶黏剂粘接法和滤光片支架法两种像素级滤光片装配工艺对红外探测器组件光谱吸收曲线的杂散光透过率的影响, 验证了胶黏

剂粘接工艺对抑制杂散光透过率的可行性。结果表明, $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 的 Z 向装配间距能有效抑制杂散光。此外, 当像素级滤光片的设计波段中有带通波段或者截止区间较窄时, 可在冷屏顶部加装单带通滤光片, 进一步降低不同通道间的杂散光串扰。随着像素级滤光片与探测器的 Z 向装配间距达到微米级, 整体结构的低温匹配性和可靠性成为影响该工艺成品率的关键因素。因此, 后续像素级滤光片结构的精细化设计和低温热应力仿真有待进一步探究。

参考文献

- [1] 曹红红. 红外探测器用滤光片的技术现状及应用 [J]. 红外, 2017, 38(1): 43-48.
- [2] 刘春雨, 丁祎, 刘帅, 等. 滤光片分光型高光谱相机发展现状及趋势 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 309-323.
- [3] 王润福, 王多书, 范栋, 等. 短中波红外长线阵拼接集成滤光片技术研究 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 171-178.
- [4] 罗朝, 梁海锋, 蔡长龙, 等. 紧凑式多光谱成像系统设计和优化 [J]. 光学技术, 2023, 49(2): 143-149.
- [5] 孟令伟, 东海杰, 张懿. 多谱段集成长线列红外探测器研究进展 [J]. 激光与红外, 2023, 50(6): 697-702.