

冷屏对红外焦平面探测器组件性能的影响

甘玉梅, 赵农, 于小兵

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘要:分析了国内早期中波 320×256 红外焦平面探测器组件与国外同类产品 in 装机性能上的差异, 采用三种实验方法检测了国内外探测器组件的光电性能, 通过对探测器组件光电转换和结构的分析, 确定出杂散光在冷屏内部的反射是导致测试结果差异的原因, 冷屏内表面黑化层和结构形式是影响组件实际应用的关键。冷屏结构改进后, 有效改善了国内探测器组件的实际应用性能。

关键词:冷屏; 辐射; 红外焦平面探测器; 杂散光

中图分类号: TN214; TN205 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.06.013

The impact of cold screens on the performance of infrared focal plane detector component

GAN Yu-mei, ZHAO Nong, YU Xiao-bing

(11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: In this paper, the differences in installed performance between early domestic medium-wave 320×256 infrared focal plane detector components and their foreign counterparts are analyzed. Three experimental methods are employed to test the photoelectric performance of detector components at home and abroad. By analyzing the photoelectric conversion and structure of the detector components, it is determined that the reflection of stray light inside the cold screen is the reason for the difference in the test results, and the blackened layer on the inner surface of the cold screen and the form of its structure are key to the practical application of the component. The improved structure of the cold screen effectively improves the practical application performance of domestic detector modules.

Keywords: cold screen; radiation; infrared focal plane detector; stray light

1 引言

红外探测器组件实际应用性能是评价其性能指标优劣的最终标准。与实际应用状态有差异的红外探测器参数测试方法有可能产生虚假结果, 应引起注意。

红外探测器组件的封装杜瓦结构对探测器实际应用有较大影响, 其中冷屏作为红外探测器组件重要部件之一的作用早已被人们所熟知: 在保证探测器视场的前提下, 阻挡和吸收视场外红外辐射, 降低红外背景噪声, 提高信噪比, 如图1所示。高水平设计制造的冷屏可有效抑制杂散光干扰, 减少杂散光

对焦平面探测器性能的影响, 冷屏对焦平面探测器应用性能起着重要作用。

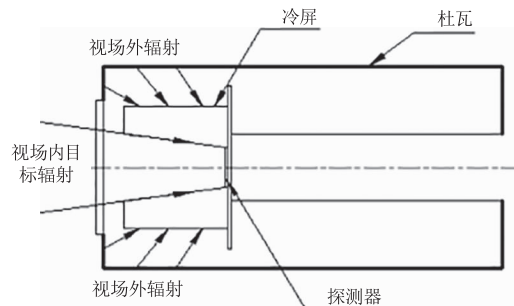


图1 红外辐射示意图

Fig. 1 Infrared radiation diagram

2 测试及实验

2.1 国内、外同类产品性能测试

国内研制的中波 320×256 碲镉汞红外焦平面探测器组件采用全金属杜瓦封装,冷屏光阑孔径为 $\phi 10$ mm,光阑孔至焦平面距离 20 mm,即光学 F 数为 2,组件封装制冷形式和冷屏外形尺寸与国外同类产品一致。国内早期产品与国外同类产品在相同积分时间条件下,按红外焦平面探测器标准测试方法检测光电性能,结果显示国内早期中波 320×256 碲镉汞红外焦平面探测器组件平均信号优于国外同类产品水平,响应率非均匀性劣于国外同类产品。

通过在红外整机系统上进行光电性能检测,在相同的测试条件下,发现该探测器响应信号小于国外同类产品,两种测试结果截然相反。

2.2 测试方法的比较

2.2.1 红外焦平面探测器标准测试方法

测试辐射源采用面源黑体,面源黑体辐射面距探测器组件窗口 10 mm 左右,充满探测器视场,面源黑体温度稳定性优于 ± 0.01 K。测试方法如图 2 所示。

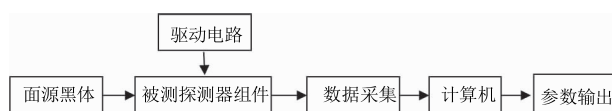


图2 红外焦平面探测器标准测试方法

Fig. 2 Standard test methods for infrared focal plane detectors

由于读出电路输出的焦平面探测器光敏元电平是光敏元光生电平与读出电路工作电平之和,为消除读出电路对探测器光生电信号的影响,在测量焦平面探测器有效信号时,分别设定面源黑体温度为 35 $^{\circ}\text{C}$ 和 20 $^{\circ}\text{C}$,测试出焦平面探测器光敏元输出电平 V_1 和 V_2 , V_1 和 V_2 的差值为该条件下焦平面探测器光敏元信号值,由计算机统计出光敏元阵列电信号,并进行其它参数的计算输出^[1]。

2.2.2 红外整机系统测试方法

测试辐射源采用面源黑体,面源黑体温度稳定性优于 ± 0.01 K,面源黑体辐射面对准平行光管入射光阑靶标,面源光辐射通过平行光管转化为平行光,经红外光学镜头射入红外焦平面探测器光敏元阵列,光敏元阵列电输出通过数据采集处理,在计算机显示器上显示光阑靶标红外图像,

可随时检测红外靶标图像的电平值^[2]。测试方法如图 3 所示。

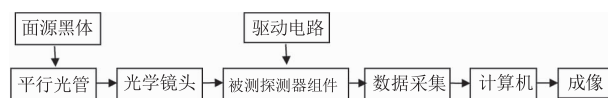


图3 红外整机系统的测试方法

Fig. 3 Test methods for infrared complete system

与红外焦平面探测器标准测试方法相同,分别设定面源黑体温度为 33 $^{\circ}\text{C}$ 和 28 $^{\circ}\text{C}$,检测出红外靶标图像中光敏元的两个电平值,两个电平值之差为焦平面探测器光敏元电信号值。

总结两种测试方法可知:红外整机系统测试方法比红外焦平面探测器标准测试方法多用了平行光管和光学镜头,相当于红外探测的实际应用状态,进行问题的分析和研究应采用该方法。

2.3 实验及测试结果

在红外整机测试系统的驱动电路、数据采集和计算机成像条件固定的情况下,对国内早期中波 320×256 碲镉汞红外焦平面探测器组件和国外同类产品实施了面源黑体、平行光管、光学镜头之间不同组合条件下的对比测试。

实验一:红外整机全套测试系统,如图 3 所示。

实验二:去掉红外整机全套测试系统的平行光管,光学镜头距面源黑体辐射面 10 mm,如图 4 所示。



图4 实验二测试方法

Fig. 4 Test methods for experiment 2

实验三:去掉红外整机全套测试系统的平行光管和光学镜头,组件窗口距面源黑体辐射面 10 mm,如图 5 所示。该方法基本与红外焦平面探测器标准测试方法相同。

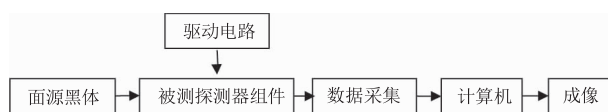


图5 实验三测试方法

Fig. 5 Test methods for experiment 3

三种实验得出的测试结果见表 1。从表 1 的实验结果可以看出,采用实验三测试方法,国内早期产品探测器信号明显优于国外同类产品,这与红外

焦平面探测器光电性能标准测试方法得出的结果相同。但采用实验二的测试方法,即面源辐射经光学镜头后,国内早期产品的探测器信号下降幅度大于

国外同类产品。采用实验一测试方法,国内早期产品探测器信号下降幅度更大,且明显小于国外同类产品。

表 1 国内早期产品与国外同类产品实验测试结果对比

Tab. 1 Comparison of experimental test results between early domestic products and similar foreign products

项目	国内早期产品			国外同类产品		
	2			2		
积分时间/ms						
实验方法	实验一	实验二	实验三	实验一	实验二	实验三
有效信号/mV	62	129	184	108	134	152
与实验三有效信号的比率	0.34	0.7	1	0.71	0.88	1
与实验二有效信号的比率	0.48	1	1.43	0.81	1	1.13

2.4 测试结果分析

从理论上讲,只要有红外探测器光谱响应范围内的光辐射至探测器光敏面上,探测器就会产生光生电平,在动态范围内,光辐射越强,探测器光生电平越大^[3]。

从实验的结果看,国内早期产品探测器装机灵敏度明显小于国外同类产品,三种实验方法差异于探测器入射光辐射的形式,光辐射到达探测器光敏面前必须经过窗片、滤光片、冷屏,这些光学元件会不会有问题?

通过检测国内早期产品锗窗片和锗低温滤光片的光学性能和形位精度,结果满足使用要求。

冷屏用来阻挡背景光干扰,仅允许组件视场角范围内的光辐射到达光敏面,其 F 数为 2,光阑孔径和光阑孔至光敏面距离与国外同类产品相同。如果由于冷屏的原因,外界杂散光或冷屏本身光辐射叠加在目标信号上,将造成探测器接收到的光辐射量增多,使国内早期产品探测器在实验三的有效信号大于国外同类产品。

2.4.1 冷屏本身热辐射对探测器性能影响的分析

为降低冷屏内表面对探测器的热辐射及吸收进入冷屏内部的杂散光,冷屏安装在杜瓦冷头上的探测器旁边,探测器被制冷的同时,冷屏也会被制冷至低温,使冷屏内表面热辐射最低^[4]。冷屏内表面进行了发黑处理,目的是使内表面黑化层尽可能多的吸收杂散光。通过测试发现,当探测器被制冷至 80 K 时,由于冷屏较大,各处温度不均匀,冷屏的温度在 80 ~ 100 K 之间。我们假设冷屏的温度都为 100 K,计算其对探测器光敏面的辐射功率;同时计

算 28 °C 面源黑体对 F 数为 2,即 FOV 为 0.21 探测器光敏面的辐射功率。计算公式如下^[5] :

$$P = \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} \left\{ \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k T_1}} - 1)} - \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k T_2}} - 1)} \right\} \Delta\lambda \cdot FOV \cdot \varepsilon$$

其中, λ 为探测器响应波长,取 3.7 ~ 4.8 μm ; h 为普朗克常数, $6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; c 为光速, $2.998 \times 10^{10} \text{ cm/s}$; k 为波尔兹曼常数, $1.380662 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; T_1 为辐射源温度; T_2 为探测器温度; ε 为辐射源发射率,取 1。

计算结果见表 2,可以看出,100 K 冷屏对探测器的光辐射相对于 28 °C 面源黑体光辐射,相差 8 个数量级,因此,冷屏本身热辐射对探测器性能影响完全可以忽略不计。

表 2 探测器光敏元接收的辐射功率

Tab. 2 Radiation power received by detector photosensitive element

探测器接收到 100 K 冷屏的辐射功率/ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	探测器接收到 28 °C 面源黑体的辐射功率/ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)
5.5×10^{-13}	2.9×10^{-5}

2.4.2 外界杂散光对探测器性能影响的分析

外界红外辐射射入探测器组件窗口后,探测器视场内的辐射是被探测目标,探测器视场外的辐射则为杂散光^[6],如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,由于焦平面探测器冷屏比较大,其内表面尤其是侧表面积很大,接收到的杂散光很多,如果冷屏内表面发黑层的发射率为 1,则杂散光都会被冷屏吸收,不会在冷屏内反射。但任何黑化表面的发射率都不会是 1,比较好的黑化表面发射率也就是 0.95 左右,即有 5 % 左右的杂散光到

达冷屏内表面后发生反射,有部分杂散光反射至探测器光敏面,形成假信号,表现为同等条件下探测器的有效信号高。

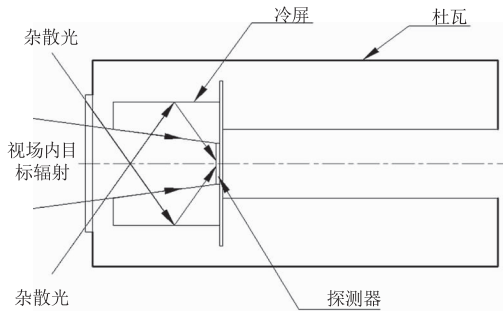


图6 红外杂散光示意图

Fig. 6 Diagram of infrared stray light

杂散光在冷屏内表面的反射现象可解释实验一、实验二和实验三测试结果。

在实验三中,由于探测器窗口正对面源黑体辐射面,面源辐射可通过窗口透光区到达冷屏内表面,部分辐射将反射到探测器光敏面上,辐射源温度越高,反射到探测器光敏面上的辐射强度越大。如果国内早期产品冷屏内表面反射到探测器光敏面上的辐射明显强于国外同类产品,在实验三条件下,国内早期产品探测器接收到的光辐射则多,探测器有效信号高于国外同类产品也就顺理成章了。

在实验二中,由于探测器窗口前面增加了镜头,镜头限制了面源射入窗口的区域,面源辐射射入到冷屏内表面的区域小于实验三,产生的额外信号则会小于实验三,所以实验二相对实验三,国内早期产品探测器有效信号下降幅度明显大于国外同类产品。

实验一中,面源黑体光辐射通过平行光管,变化成平行光,射入光学镜头后汇聚到探测器光敏面上。由于是平行光,冷屏内表面没有接收到面源光辐射,所以这种测试方法测试出的探测器有效信号是没有面源杂散光干扰的,应该也是比较真实的探测器灵敏度。

实验一、实验二和实验三中,冷屏内侧面都能接收到环境辐射,环境辐射杂散光经冷屏内侧面能反射到探测器光敏面上,形成额外电平,叠加在探测器电平上。但有效信号是两种黑体温度条件下探测器电平值之差,而环境温度恒定,所以在三项实验中,探测器有效信号不包含环境辐射杂散光电平。

3 分析及优化结果

通过对国外同类产品的解剖分析得知,国外冷屏在不影响探测器视场的前提下,内部附加了三层隔板,见图7。当杂散光入射到冷屏内侧表面时,隔板阻挡了杂散光,避免了绝大部分杂散光直接反射到探测器光敏面上。隔板阻挡杂散光一次,就会吸收一大部分杂散光,即当黑化表面发射率为0.95时,第一次反射5%,第二次反射0.25%,多次反射后,只有极少数杂散光到达探测器光敏面。

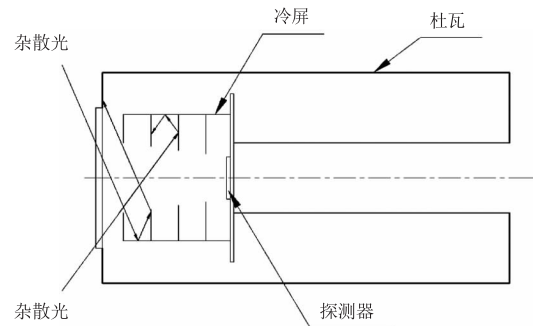


图7 冷屏隔板抑制红外杂散光示意图

Fig. 7 Diagram of cold shield suppressing infrared stray light

采用国外冷屏设计结构加工了新冷屏,发黑冷屏内表面及三层隔板,封装早期中波 320×256 碲镉汞红外焦平面探测器后,进行了实验一和实验二的光电性能测试,测试结果见表3。

表3 国内早期产品冷屏改进后组件实验结果

Tab. 3 Experimental results of components of early domestic products after cold shield improvement

项目	国内早期产品		国外同类产品	
光谱响应范围/ μm	4.6~4.8		3.7~4.8	
积分时间/ms	5		2	
实验方法	实验一	实验二	实验一	实验二
有效信号/mV	72	89	108	134
与实验二有效信号的比率	0.81	1	0.81	1

从表3可以看出,改进冷屏后组件在实验一与实验二中有有效信号的比值明显大于无三层隔板冷屏探测器组件,与国外同类产品相同,这说明冷屏内表面黑化层的发射率达到了国外同类产品水平。

4 总结

背景杂散光叠加在目标辐射上,降低了焦平面探测器的动态范围,提高了焦平面探测器的背景噪声,不仅影响了探测器光电灵敏度,而且由于杂散光在冷屏内表面反射的不均匀性,也会降低

焦平面探测器的响应均匀性,最后的结果是影响热成像质量。

建议进一步深入研究杂散光通过冷屏对焦平面探测器光电性能的影响,在冷屏黑化、表面形貌、发射率和结构上进行细致研究,不断提高冷屏抑制杂散光的能力。

参考文献:

- [1] He Li, Yang Dingjiang, Ni Guoqiang, et al. Introduction to advanced focal plane technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
何力, 杨定江, 倪国强, 等. 先进焦平面技术导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [2] Zhang Jingxian, Li Yudan, Jin Weiqi. Low-light and infrared imaging technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [3] Chen Jishu, Yan Zhangrong, Xu Pingmao. Infrared detectors [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1986. (in Chinese)
陈继述, 研掌荣, 徐平茂. 红外探测器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [4] Yang Simin, Tao Wenquan. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [5] 中华人民共和国信息产业部. 4N 红外焦平面探测器杜瓦组件参数测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [6] 卷三: 光电元器件[M]//红外与光电系统手册, 天津: 航天工业总公司第三研究院八三五八所, 1998.