

ICS

CCS

T/WXIOT

无锡市物联网产业协会团体标准

T/WXIOT XXX-2025

色选用近红外 InGaAs 焦平面探测器

参数测试方法

Test Method for Color Sorter of Near-infrared InGaAs Focal Pane Detectors

征求意见稿

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。
已授权的专利证明材料为专利证书复印件或扉页，已公开但尚未授权的专利申
请证明材料为专利公开通知书复印件或扉页，未公开的专利申请的证明材料为专
利申请号和申请日期。

2025-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

无锡市物联网产业协会 发布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号和单位 2

5 测试方法 3

 5.1 相对光谱响应、光谱因子 3

 5.2 像元黑体探测率、平均黑体探测率、响应率、响应率不均匀性、盲元率、行差 5

 5.3 MTF 测试 9

 5.4 杂光比测试 11

附录 A（资料性附录）《色选用近红外InGaAs焦平面探测器参数测试报告》模板
..... 13

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由无锡市物联网产业协会提出并归口。

本文件起草单位：无锡中科德芯感知科技有限公司、无锡市物联网产业协会、中科院上海技术物理研究所、上海济物光电技术有限公司、无锡迅杰光远科技有限公司、无锡菲谱光电技术有限公司、江苏理工学院、江苏信息职业技术学院

本文件主要起草人：王博、兰树明、宋家琪、吴卫华、朱爱玺、季云峰

色选用近红外 InGaAs 焦平面探测器参数测试方法

1 范围

本文件给出了色选用近红外InGaAs焦平面探测器的参数，包括相对光谱响应、光谱因子、像元黑体探测率、平均黑体探测率、响应率、响应率不均匀性、盲元率、行差、噪声电压及相应的测试方法。

本文件适用于线列、面阵色选用近红外InGaAs焦平面探测器。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 17444—2013 红外焦平面阵列参数测试方法

3 术语和定义

GB/T 17444确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

近红外 near infrared

探测器的标准响应波段为 0.8~2.5 μm 。

3.2

死像元 dead pixel

分阶段定义。

0.8~1.9 μm 波长范围内，像元响应率小于平均响应率 10%的像元。

1.9（不含）~2.5 μm 波长范围内，像元响应率小于平均响应率 30 %的像元。

3.3

过热像元 over hot pixel

分阶段定义。

0.8~1.9 μm 波长范围内，像元响应率大于平均响应率 10 %的像元。

1.9（不含）~2.5 μm 波长范围内，像元响应率大于平均响应率 30 %的像元。

3.4

行差

当探测器大于1行时，探测器各行扣除无效像元后。各行平均响应率的最大值与最小值之差。

3.5

杂光比

采集不遮挡位置光敏元输出的平均值，与安装遮光板前不遮挡位置光敏元输出的平均值做计算，得到杂光比。

4 符号和单位

表1给出了色选用近红外InGaAs焦平面探测器参数符号、名称和单位。

符号	名称	单位
$R(\lambda_i)$	相对光谱响应	无量纲
G	光谱因子	无量纲
P	黑体辐照功率	W
d	死像元数	无量纲
h	过热像元数	无量纲
V_S	黑体信号	V
\bar{V}_S	平均黑体信号	V
R_v	峰值电压响应率	V/W
R_λ	峰值电流响应率	A/W
UR	响应率不均匀性	无量纲
N_{bad}	盲元率	无量纲
E	行差	无量纲
MTF_{det}	待测器件MTF	无量纲
MTF_{optics}	光学系统MTF	无量纲
MTF_{system}	系统MTF	无量纲
MTF_{slit}	狭缝的MTF	无量纲
C	杂光比	无量纲
\bar{V}_0	安装遮光板前不遮挡位置光敏元信号	V
\bar{V}_R	安装遮光板后不遮挡位置光敏元信号	V

5 测试方法

5.1 相对光谱响应、光谱因子

5.1.1 测试原理

采用光栅单色仪结合探测器测试系统即可进行探测器的光谱响应表征,对探测器阵列的光谱响应进行测试,初始化单色仪,通过单色仪为探测器提供单色光照,在软件中设置好选用的光栅、狭缝宽度、光源进出口、起止波长和扫描步进等参数,先测试 *InGaAs* 标准器件不同波长下的响应信号,再测试待测焦平面的响应信号,通过标准器件的响应光谱进行光谱归一化处理,获得待测焦平面的相对光谱响应。光谱因子 G 由计算得到。

5.1.2 测试框图

测试框图如图1所示,整个测试系统由点源黑体、单色仪、前置放大器、数据采集卡、供电电源、数字脉冲发生器、标准器件、计算机等部分组成。

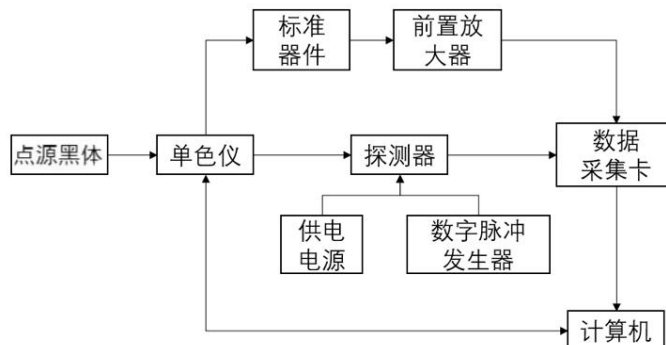


图 1 单色仪方法测试框图

5.1.3 测试条件

测试条件如下:

a) 辐射源

一般采用高温点源黑体作为辐射源,应满足下列要求:黑体温度稳定,输出不加调制;黑体辐射应保证探测器各像元均匀辐照;电源的电压稳定度应优于 $\pm 1\%$;电源的电流稳定度应优于 $\pm 0.5\%$ 。焦平面器件测试的黑体温度 T 推荐取900 K。

b) 单色仪

单色仪应满足下列要求：波长的可调范围应能覆盖被测探测器的光谱响应；单色辐射束的波长宽度应不大于中心波长的1/3；入射到被测探测器灵敏面上的辐照应是均匀的。

c) 标准器件

光谱响应应是已知的；应定期送计量部门校准。

d) 前置放大器

其功能是将探测器产生的响应信号进行放大。应该工作在线性范围，并且有平坦的幅频特性，其带宽和增益应满足测试要求，增益稳定度应优于±1%；探测器输出电压范围应与采集卡设备相符合；放大器带宽需大于器件信号输出带宽；放大器使用直通工作模式，不增加高通或低通滤波器。

5.1.4 测试步骤

测试步骤如下：

a) 按照图1连接测试系统。

b) 调节测试系统，使探测器处于正常工作状态。

c) 选择相应的光谱测试波长范围，以及被测器件的某一像元或某一区域测试位置。

单色仪的波长在计算机控制下，进行波段扫描，数据采集系统测得各波长点下被测焦平面的输出信号电压，对电压值进行计算得到相对光谱响应 $R(\lambda_i)$ 、光谱因子 G 。

5.1.5 计算

5.1.5.1 相对光谱响应

焦平面测得的光谱响应需用标准器件测得的光谱响应做校准处理，处理方法如公式（1）所示：

$$R(\lambda_i) = \frac{R_d(\lambda_i)}{R_r(\lambda_i)} \cdot R_{std}(\lambda_i) \dots\dots\dots \text{公式（1）}$$

式中， $R_{std}(\lambda_i)$ 为标准器件的标定光谱。从归一化的相对光谱响应曲线 $R(\lambda_i)$ 中可提取光谱响应范围和峰值波长。

以波长为横坐标，相对光谱响应 $R(\lambda_i)$ 为纵坐标，绘制出相对光谱响应曲线，对应的前、后截止波长之间为光谱响应范围，除非另有规定，推荐前截止波长为峰值的10%，后截止波长为峰值的50%。

5.1.5.2 光谱因子

光谱因子 G 由相对光谱响应与黑体辐射谱叉乘得到：

$$G = \frac{G(\lambda_p) \int_0^\infty \phi(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty G(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)} d\lambda} = \frac{\sigma T^4}{\int_0^\infty G(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)} d\lambda} \dots\dots\dots \text{公式 (2)}$$

式中:

T ——焦平面测试时的黑体温度, 单位为开尔文 (K);

$\phi(\lambda)$ ——黑体的单色辐射功率, 单位为瓦特 (W);

$G(\lambda)$ ——响应率的测量曲线;

λ_p ——峰值响应波长;

$G(\lambda_p)$ ——相对峰值响应率, 相对单色响应率;

$C1$ —— $3.742 \times 10^4 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{cm}^2$;

$C2$ —— $1.439 \times 10 \mu\text{m} \cdot K$;

其中 $\phi(\lambda)$ 如公式 (3) 所示:

$$\phi(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}} \dots\dots\dots \text{公式 (3)}$$

式中:

λ ——波长;

h ——普朗克常数 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;

c ——真空光速 $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$;

k ——玻尔兹曼常数 $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

通过相对光谱响应提取起始波长、截止波长和峰值波长, 同时计算确定黑体温度下对应的 G 因子, 为基于黑体辐射源建立焦平面测试系统, 测量探测器信号提取器件量子效率提供依据。

5.2 像元黑体探测率、平均黑体探测率、响应率、响应率不均匀性、盲元率、行差

5.2.1 测试原理

黑体源发出的红外辐射照射在待测探测器上。以点源黑体为例, 计算照射在探测器上的功率。因为黑体辐射有连续波谱而且各波长的发射率不同, 探测器产生的信号应是各个波长辐射产生的信号总和。在焦平面测试系统中, 直接测量的物理量为信号 $V_s[(i, j)]$, 和暗信号 $V_{ds}[(i, j)]$ 通过帧暗信号 $V_{ds}[(i, j)]$ 的均方根偏差, 在扣除无效像元后计算获得 $V_n(i, j)$, 计算平均信号 \bar{V}_S 。

响应率是指输出信号电压或电流与入射光功率的比值,也就是单位入射光功率所生成的电流或电压信号,入射光功率一致,而入射光的波长不同所产生的响应也不尽相同,因此常结合器件光谱响应曲线,提取光谱因子 G ,用峰值响应率表征探测器的光电转换能力。

需要时,本条目规定的测试应在探测器工作状态下进行。

5.2.2 测试框图

测试框图见图2,整个测试系统由点源黑体、数据采集卡、供电电源、数字脉冲发生器、计算机等部份组成。

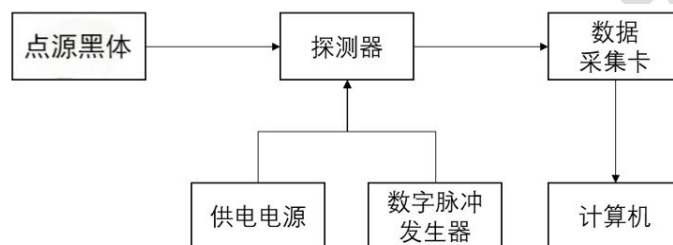


图2 黑体辐照功率的黑体信号测试框图

5.2.3 测试条件

测试条件如下:

a) 供电电源

应能提供探测器组件正常工作所需的供电电压、电流;电压范围、精度、纹波系数、供电电流、稳定性等应满足测试要求。

b) 数字脉冲发生器

脉冲频率可调,能输出保证器件正常工作的最大频率;脉冲电压满足器件工作电压要求;脉冲支持多通道同时输出,满足器件数字逻辑通道数量;脉冲可编辑修改,满足器件各增益、曝光时间的控制与修改。

c) 数据采集卡

输入阻抗与器件相匹配;采集速率可调,满足器件工作速率,且可与器件时钟同步;采集模拟信号需大于器件输出摆幅范围,不满足可增加前置放大器进行调制后再接入采集卡;数字信号需大于等于器

件工作速率；采集卡分辨率大于器件标称的最大动态范围及信噪比要求；采集卡输入通道需大于等于器件正常工作状态信号输出通道，若不满足可使用多卡同步采集。

5.2.4 测试步骤

测试步骤如下：

a) 按照图2连接测试系统。

b) 调节测试系统，使探测器处于正常工作状态。

c) 设置点源黑体温度，以及被测器件的某一像元或某一区域测试位置。数据采集系统采集被测探测器的输出信号，使用公式计算得到像元黑体探测率 V_S 、平均黑体探测率 \bar{V}_S 、响应率 R_v 、响应率不均匀性 UR 、盲元率 N_{bad} 。

5.2.5 计算

5.2.5.1 黑体辐照功率

黑体辐照功率按式（4）计算：

$$P = \frac{\sigma \times (T_2^4 - T_1^4) \times A_D}{4 \times (L/D)^2 + n} \dots\dots\dots \text{公式（4）}$$

当 $L/D > 1$ 时， n 取值为1；当 $L/D \leq 1$ 时， n 取值为0。

式中：

T —— 黑体温度，单位为开尔文（ K ）；

T_0 ——背景温度，单位为（ K ）；

d —— 黑体辐射孔径，单位为厘米（ cm ）；

A_D ——光敏元面积，单位为平方厘米（ cm^2 ）；

L —— 黑体出射孔至焦平面像元面垂直距离，单位为厘米（ cm ）；

σ —— 斯特藩常数 $5.673 \times 10^{-2} W/(cm^2 \cdot K^4)$ 。

5.2.5.2 像元黑体信号

第（ i, j ）元黑体信号，按式（5）计算：

$$V_S(i, j) = \frac{1}{K} \left\{ \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F V_s[(i, j), f] - \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F V_b[(i, j), f] \right\} \dots\dots\dots \text{公式（5）}$$

式中：

$V_s[(i, j), f]$ ——第 (i, j) 像元的第 f 帧黑体信号，单位为伏特 (V)；

$V_b[(i, j), f]$ ——第 (i, j) 像元的第 f 帧背景信号，单位为伏特 (V)；

K ——测试系增益 ($K=1$)；

F ——采样帧数。

5.2.5.3 平均黑体信号

探测器平均黑体信号按式 (6) 计算：

$$\bar{V}_S = \frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_s(i, j) \dots\dots\dots \text{公式 (6)}$$

式中：

M ——焦平面行数；

N ——焦平面列数；

d ——死像元数；

h ——过热像元数。

5.2.5.4 响应率和响应率不均匀性

(1) 峰值电压响应率

峰值电压响应率按式 (7) 计算：

$$R_v = G \cdot \frac{V_s}{P} \dots\dots\dots \text{公式 (7)}$$

式中， G 因子从相对光谱响应中获得； P 为黑体辐照功率；

(2) 峰值电流响应率

峰值电流响应率和峰值电压响应率的转换关系如式：

$$R_\lambda = \frac{R_v \cdot C_{int}}{A_v \cdot \tau} \dots\dots\dots \text{公式 (8)}$$

式中：

C_{int} ——放大器输入级的积分电容；

A_v ——放大器的增益系数；

τ ——焦平面测试的积分时间。

(3) 响应率不均匀性

响应率不均匀性按式 (9) 计算：

$$UR = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [V_s(i, j) - \bar{V}_s]^2} \times 100\% \quad \text{公式 (9)}$$

针对色选行业，像元黑体信号波动范围一般控制在平均黑体信号的±10%内，放宽要求在±30%内。

5.2.5.5 盲元率

色选行业规定单线列盲元分布不得出现2个及以上连续盲元，且规定在像元黑体信号波动范围之外的像元定义为盲元。

盲元分为两类：一类是像元黑体信号小于像元黑体信号控制范围的下限，称为死像元，记为 d ；一类是像元黑体信号大于像元黑体信号控制范围的上限，称为过热像元，记为 h 。

盲元率按式（10）计算：

$$N_{bad} = \frac{d+h}{M \times N} \times 100\% \quad \text{公式 (10)}$$

5.2.5.6 行差

第 I 行黑体平均信号，按式（11）计算：

$$\bar{V}_{S, I} = \frac{1}{N - (d+h)} \sum_{j=1}^N V_s(I, j) \quad \text{公式 (11)}$$

行差按式（12）计算：

$$E = \frac{MAX_{V_{S, I}} - MIN_{V_{S, I}}}{MIN_{V_{S, I}}} \times 100\% \quad \text{公式 (12)}$$

5.3 MTF 测试

5.3.1 测试原理

调整狭缝像的位置使其与待测光敏芯片垂直，通过位移台带动光敏元以亚像元步长依次扫过 x_j, \dots, x_n 位置，采集光敏元在各个位置的输出，就得到了狭缝的线扩散函数曲线 LSF。为了抑制随机噪声和固定图形噪声对测试的干扰，对光敏元每个位置的输出进行多次采样，取平均结果作为该位置的最终输出。

5.3.2 测试框图

测试框图与原理图如图3所示，整个测试系统框图由卤钨灯、光学系统、数据采集卡及计算机等组成。

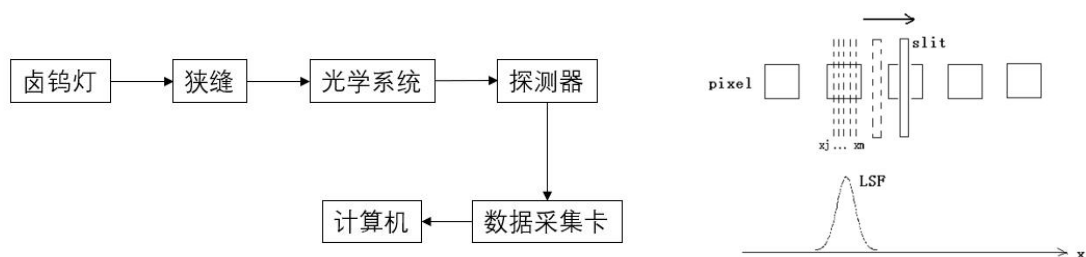


图 3 MTF 测试框图与原理图

5.3.3 测试条件

测试条件如下：

a) 卤钨灯

卤钨灯光谱范围覆盖器件光谱范围；卤灯尽量使用直流电源供电，卤灯光强稳定，抖动小。

b) 狭缝

狭缝宽度可调，出射光能均匀覆盖于焦平面；

c) 光学系统

确保入射焦平面的光为平行匀光；不满足平行光入射，需增加平行光调制系统。

5.3.4 测试步骤

测试步骤如下：

a) 按图4连接测试系统，进行系统预置。

b) 光源照射狭缝目标，通过成像光学形成高质量的目标像，并被待测的离散采样器件接收。

c) 通过位移台带动狭缝对离散采样系统进行物方扫描，可以得到离散采样器件每个光敏元对狭缝能量的扫描曲线LSF或ESF。

d) 由MTF测试单元对LSF或ESF进行计算可以得到离散采样系统的MTF。

5.3.5 计算

按式（17）采用加权的单次高斯函数对LSF曲线进行拟合：

$$f(x) = a_0 + a \exp\left[-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right] \dots\dots\dots \text{公式 (17)}$$

对拟合后的一维LSF数据按式（18）进行离散傅里叶变换：

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi kn/N} \dots\dots\dots \text{公式 (18)}$$

式中：

- X——输入的LSF序列；
- N——x中的元素数量；
- Y——离散傅里叶变换后的结果。

对拟合后LSF进行离散傅里叶变换，在0频处归一化，并剔除狭缝MTF和光学系统MTF后的结果如式（19）所示：

$$MTF_{det} = \frac{MTF_{system}}{MTF_{optics}MTF_{slit}} \dots\dots\dots \text{公式 (19)}$$

式中：

- MTF_{det} ——待测器件MTF；
- MTF_{system} ——系统MTF，由测试系统直接得到，包含了待测器件、测试系统的综合贡献；
- MTF_{optics} ——光学系统MTF；
- MTF_{slit} ——狭缝的MTF，由狭缝的非理想性引起，是狭缝宽度的函数。

5.4 杂光比测试

5.4.1 测试原理

调整遮光板的位置使其与待测光敏芯片垂直，通过位移台带动遮光板，使其不间断遮挡 X（X一般取10%~50%）的像元，采集不遮挡位置光敏元输出的平均值，与安装遮光板前不遮挡位置光敏元输出的平均值做计算，得到杂光比。原理图详见图5。

5.4.2 测试框图

测试框图如图5所示，整个测试系统框图由点源黑体、遮光板、数据采集卡及计算机等部分组成。

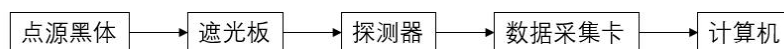


图 4 杂光比测试框图

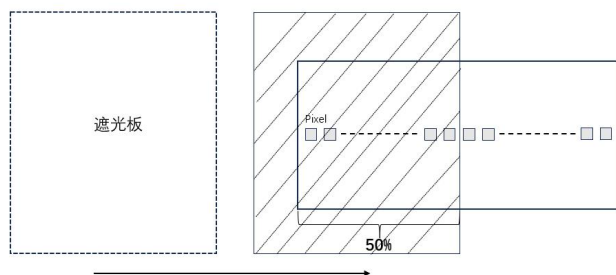


图 5 杂光比测试原理图

5.4.3 测试步骤

测试步骤如下：

- 按图5连接测试系统，进行系统预置。
- 光源照射目标，采集信号 \bar{V}_0 。
- 通过位移台带动遮光板对焦平面10%~50%的光敏元进行遮挡，采集信号 \bar{V}_R 。推荐50%。
- 计算得到杂光比 C 。

5.4.4 计算

安装遮光板前不遮挡位置光敏元信号按式（20）计算：

$$\bar{V}_0 = \frac{1}{A \times B - (d+h)} \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^B V_s(i, j) \quad \text{.....公式 (20)}$$

式中：

A ——不遮挡焦平面行数；

B ——不遮挡焦平面列数；

安装遮光板后不遮挡位置光敏元信号按式（21）计算：

$$\bar{V}_R = \frac{1}{A \times B - (d+h)} \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^B V_s(i, j) \quad \text{.....公式 (21)}$$

探测器杂光比按式（22）计算：

$$\text{杂光比} = \frac{\bar{V}_0 - \bar{V}_R}{\bar{V}_0} \times 100\% \quad \text{.....公式 (22)}$$

上述杂光比测试方法为一种近似的参考测试，可表达探测器光敏元对杂光的收集能力。

附录 A

(资料性附录)

《色选用近红外 InGaAs 焦平面探测器参数测试报告》模板

产品描述	
产品名称	
产品型号	
测试条件	
环境温度	
相对湿度	
点源黑体温度	
点源黑体孔径	
...	
测试参数	
像素规模	
中心距/ μm	
光谱响应范围 / μm	
盲元率/%	
不均匀性/%	
行差/%	
杂光比/%	
...	...
相对光谱响应	
光谱图	
测试结论	
...	