光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250901001

InGaAs短波红外焦平面特性参数测试方法

王力霞[1],冯巍巍[1],陈　扬[2*],乔建社[2],徐俊杰[2]
（1. 中国电子技术标准化研究院,北京 100176；2. 重庆光电技术研究所,重庆 400060）

摘　要： 铟镓砷短波红外焦平面探测器性能的精确评估对于应用系统的成像质量与定量化分析至关重要。为验证积分球均匀光源在铟镓砷短波红外焦平面探测器特性参数测试中的可行性,采用积分球均匀光源与高温黑体分别作为均匀光源,对不同阵列规模与像元尺寸的探测器进行响应率非均匀性与有效像元率对比测试。实验结果表明,积分球均匀光源测试所得响应率非均匀性指标均优于黑体光源,其中在2 560×2 048阵列规模下,响应率非均匀性由4.57%降至2.85%,相对改善幅度达60.35%;有效像元率由99.978%提升至99.984%。进一步分析表明,积分球均匀光源可有效消除黑体光源因朗伯辐射特性引入的辐照度分布不均与背景噪声影响,测试结果更接近器件真实性能,且操作更为便捷。

关键词： 铟镓砷；短波红外焦平面；特性参数；测试方法
中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2026)02－0315－05

Test Methods for Characteristic Parameters of InGaAs Short-Wave Infrared Focal Plane Arrays

WANG Lixia[1], FENG Weiwei[1], CHEN Yang[2], QIAO Jianshe[2], XU Junjie[2]
（1. China Electronics Standardization Institute, Beijing 100176, CHN; 2. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN）

Abstract: To verify the feasibility of using an integrating spherical uniform light source for testing the characteristic parameters of indium gallium arsenide short-wave infrared focal plane detectors, comparative tests were conducted using an integrating spherical uniform light source and a high-temperature blackbody as uniform light sources. The response non-uniformity and effective pixel ratio of detectors with different array sizes and pixel dimensions were evaluated. Experimental results show that the integrating sphere uniform light source yields superior response non-uniformity compared with the blackbody source. For a detector with a 2 560 × 2 048 array, the response non-uniformity decreases from 4.57% to 2.85%, which represents a relative improvement of 60.35%, while the effective pixel ratio increases from 99.978% to 99.984%. The analysis indicates that the integrating sphere uniform light source effectively eliminates the irradiance non-uniformity and background noise introduced by the Lambertian characteristics of the blackbody source, thus providing test results that reflect the actual performance of the device more accurately. Furthermore, the integrating spherical uniform light source offers greater operational convenience compared with the blackbody source. Considering its advantages, the integrating spherical uniform light source may be included as an optional light source in relevant testing standards.

Key words: InGaAs; short-wave infrared focal plane; characteristic parameters; test methods

收稿日期：2025－09－01.
*通信作者：陈　扬

0 引言

铟镓砷(InGaAs)短波红外(0.9～1.7 μm)焦平面探测器因其高量子效率、高灵敏度及可在室温下工作等优异特性,在空间遥感、天文观测、光谱分析、侦察识别、微光夜视、夜间成像及工业检测、机器视觉、生物医疗等领域受到广泛应用[1]。因此,其性能的精确评估对于应用系统的成像质量与定量化分析至关重要。

目前,国内对该类探测器的测试主要遵循国家标准《GB/T 17444-2013 红外焦平面阵列参数测试方法》[2](以下简称《方法》),其核心测试方式是使用高温黑体作为辐射源,通过一系列光学组件构成测试光路,评定响应率非均匀性、有效像元率、非线性度等关键光电参数。然而,该测试方法的计算是基于一个理想化的假设,即到达焦平面探测器靶面的辐照度是高度均匀的。在实际操作中,作为标准光源的黑体是一个典型的朗伯辐射体[3],当这种点状朗伯源与准直光学系统配合使用时,会在焦平面靶面上产生一个固有的、与角度相关的辐照度分布,轴心区域辐照度最强,并向边缘按余弦规律衰减[4]。这种因光源特性导致的辐照度不均匀性对日益增大的阵列规模(如 2 560×2 048,4 096×4 096 等InGaAs焦平面阵列)的影响已不可忽略。辐照度不均匀性与探测器固有的响应率非均匀性耦合,引入系统性的测量误差,显著影响有效像元率判据的准确性,增大响应率非均匀性的测试值,并干扰非线性度测试中信号强度的真实标定。

InGaAs焦平面与可见光成像器件同属于类光电效应的光子型探测器,在成像纹理、细节和直观视觉效果方面与可见光图像高度相似,很多性能指标参照了可见光的方法[5]。本文介绍了采用可见光测试常用的积分球均匀光源与黑体光源对不同阵列规模的InGaAs焦平面样品开展测试的情况,分析了具有朗伯辐射特性和点光源属性的高温黑体源在测试InGaAs焦平面的响应率非均匀性、有效像元率等关键指标时对测试准确性的影响,总结了采用积分球均匀光源在InGaAs短波红外焦平面测试过程中的便捷性,并提出了在《方法》中增补和修订测试条件的建议。

1 实验过程

为提升实验数据的显示度,实验中选用了不同阵列规模和像元尺寸的InGaAs焦平面探测器作为测试样品,样品编组如下:

1#样品:阵列规模 2 560×2 048,像元尺寸 10 μm×10 μm,光敏尺寸 25.60 mm×20.48 mm;

2#样品:阵列规模 1 280×1 024,像元尺寸 15 μm×15 μm,光敏尺寸 19.20 mm×15.36 mm;

3#样品:阵列规模 640×512,像元尺寸 15 μm×15 μm,光敏尺寸 9.6 mm×7.68 mm。

1.1 黑体测试法

1.1.1 响应率非均匀性测试

红外焦平面在一定帧周期或行周期条件下,动态范围内,像元每单位辐照功率产生的输出信号电压称为像元响应率,各有效像元响应率的均方根偏差与平均响应率的百分比称为响应率非均匀性。

响应率非均匀性参数按《方法》中方法3001进行测试,测试框图如图1所示。主要测试设备有黑体辐射源、数据采集处理系统,黑体辐射源采用SR200N型高温点源黑体,温度范围373～1 273 K,温度稳定性为0.5 K,发射率为0.97±0.01。

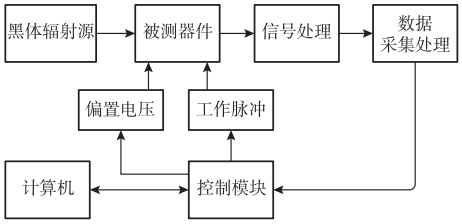


图1 测试系统框图

测试条件设计方面,暗场采用环境温度 T_0,高温黑体温度 T 设置为800 K。因样品1#,2#和3#光敏尺寸不一样,测试过程中调整样品光敏靶面到黑体输出孔径的距离,使辐射光源能均匀覆盖样品光敏区。同时,因高温黑体温度转换较慢,优化设置1#～3#样品的积分时间 τ 为8 ms,6 ms和4.5 ms,使输出信号强度位于半饱和附近。响应率非均匀参数按《方法》中规定的测试步骤进行,分别在暗场和黑体辐射下采集100帧数据,按公式(1)和(2)计算得出平均响应电压 $\overline{V}_s$ 和平均响应率 $\overline{R}$。为方便表述,本文采用数字量化(DN)值对像元响应电压信号进行表征。

$$\overline{V}_s=\frac{1}{M\times N-(d+h)}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}V_s(i,j) \quad (1)$$

$$\overline{R}=\frac{1}{M\times N-(d+h)}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}R(i,j) \quad (2)$$

式中,M 和 N 分别表示像元总行数和列数,d 表示死

像元，h表示过热像元，$V_s(i,j)$表示任意像元的响应电压，$R(i,j)$表示任意像元的响应率。

1.1.2　有效像元率测试

红外焦平面的有效像元率是总像元数扣除无效像元后总像元数占的百分比。无效像元包括死像元和过热像元，像元响应率大于或小于平均响应率1/2的像元为死像元d，像元噪声电压大于平均噪声电压2倍的为过热像元h。

有效像元率参数按《方法》中方法3005进行测试，测试原理框图如图1所示，测试设备、测试条件和测试步骤与响应率非均匀性指标基本一致。根据测试步骤，分别在T_0和T温度下采集100帧数据，依次按公式(2)～(6)测试计算出样品的$\overline{R}$和平均噪声电压$\overline{V}_N$，死像元d和过热像元h，再计算得出有效像元率N_{ef}。

$$\overline{V}_N=\frac{1}{M\times N-(d+h)}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}V_N(i,j) \quad (3)$$

$$R(i,j)-\frac{1}{2}\overline{R}<0 \quad (4)$$

$$V_N(i,j)-2\overline{V}_N>0 \quad (5)$$

$$N_{ef}=(1-\frac{d+h}{M\times N})\times 100\% \quad (6)$$

式中，$V_N(i,j)$表示任意像元的噪声电压。

1.2　积分球均匀光源测试

1.2.1　响应率非均匀性测试

响应率非均匀性参数仍按《方法》中方法3001进行测试，用积分球均匀光源替代黑体辐射源。积分球直径为850 mm，出光孔径为120 mm，开孔比约为0.5%。光源采用溴钨灯复色光源，光源波段为400～2 500 nm，能全部覆盖InGaAs短波红外焦平面探测器的工作谱段。光场强度可通过电动光阑调节，光场非均匀性小于1%。

在测试过程中，为保证测试样品在相同的技术状态下测试，同样将1#～3#样品的积分时间τ设置为8 ms，6 ms和4.5 ms。首先全部关闭电动光阑达到近似暗背景，采集暗场状态下的100帧数据，再打开光阑，调节电动光阑控制光场强度，使得样品的响应输出在半包和附近，采集高温状态下的100帧数据，计算得出$\overline{V}_s$和$\overline{R}$，再计算得出样品在积分球均匀光下测试的响应率非均匀性。

1.2.2　有效像元率测试

有效像元率参数按《方法》中方法3005进行测试，根据测试步骤要求，分别在T_0和T温度下采集100帧数据，依次测试计算出样品的$\overline{R}$，$\overline{V}_N$，d和h，最后计算得出样品在积分球均匀光下测试的有效像元率。

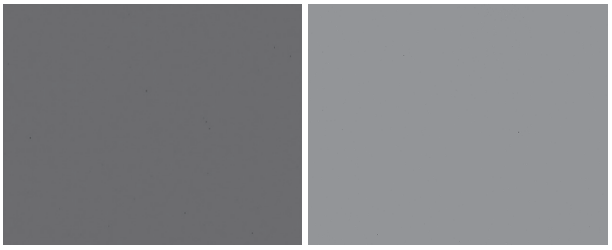
2　测试结果

通过两种方法对比测试，计算得出1#～3#样品的响应率非均匀性和有效像元率参数数据，积分球均匀光源测试方法指标优于黑体光源测试法，且随着样品的阵列规模变大，参数差异越明显，见表1。

表1　两种测试方法的对比结果

样品及参数		方法1（黑体光源）	方法2（积分球光源）	相差百分比
1#	响应率非均匀UR	4.57%	2.85%	60.35%
	有效像元率N_{ef}	99.978%	99.984%	<0.1%
2#	响应率非均匀UR	3.94%	3.28%	20.12%
	有效像元率N_{ef}	99.85%	99.92%	<0.1%
3#	响应率非均匀UR	3.28%	2.91%	12.71%
	有效像元率N_{ef}	99.89%	99.96%	<0.1%

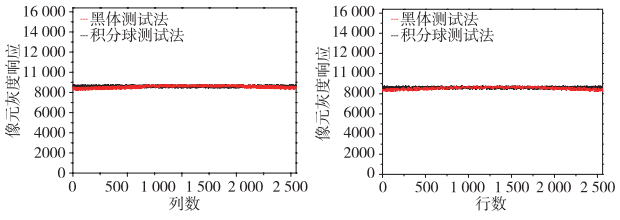
图2为样品在不同方法下测试的像元平均响应电压的DN值图。



（a）1#样品，τ=8 ms，黑体光源　（b）1#样品，τ=8 ms，积分球光源

图2　样品像元电压响应DN值图

为更准确分析像元响应率在两种测试方法中的不同表现，提取1#样品DN值图的中心行和中心列的数据，绘制出像元响应率与行、列像元位置的对比曲线图，如图3所示。



（a）1#样品，τ=8 ms，中心列　（b）1#样品，τ=8 ms，中心行

图3　像元响应电压曲线图

从图中可以明显看出，黑体测试法的像元响应强度在行、列方向上的边缘区域有缓慢下降的趋势，而积分球光源没有变化。这表明黑体均匀光源

的辐照强度沿光源中心向外逐渐减弱，从而在测试过程中引入了系统误差，导致不同阵列规模的样品在响应率非均匀性测试时差异明显。

在有效像元率的测试方面，通过软件计算，提取3#样品的死像元和过热像元的数量和位置信息，均匀光源测试法的测试指标优于黑体测试法，如图4所示。在黑体测试法中，死像元数量323个，过热像元38个；在积分球测试法中，死像元数量102个，过热像元29个。经进一步分析，黑体测试法中增多的死像元，大部分为像元响应超过了死像元判别阈值。这些增多的死像元，暗信号偏大，在积分球测试过程中，光响应处于阈值以下，在黑体测试过程中，黑体高温辐射增强，变相增大了像元暗信号，像元响应输出超过阈值，导致死像元增多。



(a)3#样品，τ=4.5 ms，黑体光源(b)3#样品，τ=4.5 ms，积分球光源

图4 样品有效像元分布图

3 比较与分析

3.1 均匀性分析

InGaAs短波红外焦平面工作在0.9～1.7 μm波段范围，测试光源在《方法》中规定为黑体，为匹配波段辐射峰值，需选用高温黑体。因设计制造难度等因素，高温黑体大多为腔式点源结构。黑体辐射功率可通过公式(7)计算得出：

$$P=\frac{\sigma\times(T^4-T_0^4)\times A_D}{4\times(L/D)^2+n} \tag{7}$$

式中，斯忒潘常数σ=5.673×10^{-12}[W/(cm^2·K^4)]，D为黑体孔径，A_D为焦平面像元面积，L为黑体孔径到焦平面像元距离。

在测试计算过程中，通常将L作为焦平面焦面上全部像元的光功率计算依据。而实际上，对于辐射源与像元表面平行但像元中心法线与辐射源中心法线不重合的情况，非中心像元与辐射源存在一个夹角θ，如图5所示。腔式高温黑体辐射口是高度相似的朗伯辐射源，具有朗伯辐射特性。在辐射方向上，与中心法线不一致的区域，辐射强度含有余弦衰减因素，即朗伯余弦定理，如公式(8)所示：

$$P_{(i,j)}=P_0\cos\theta \tag{8}$$

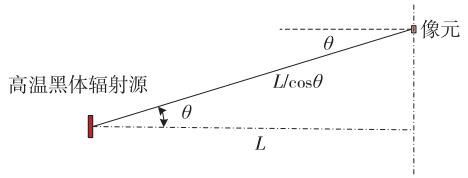


图5 辐射源与焦面中心垂直但与像元中心法线不重合的情况

对于焦平面探测器阵列中的任一像元M(i,j)(i为焦平面阵列的列，j为焦平面阵列的行)，以阵列中心O为原点，像元M距离中心O的距离坐标为(x,y)，cosθ的具体计算式为：

$$\cos\theta=\frac{L}{\sqrt{L^2+x^2+y^2}} \tag{9}$$

从上述理论分析结果看出，高温黑体因辐射源的辐射角在焦平面上的不同位置的像元上不同，导致辐射功率存在差异。测试响应率非均匀性等参数将引入系统性偏差，焦平面光敏尺寸越大，系统偏差越大，这是高温黑体固有属性决定的。为提升测试的准确性，在采用高温黑体作为光源的测试过程中，首先需要将焦平面光敏中心与黑体光源中心严格对齐，其次是将辐射接收角θ控制在45°以内，降低非朗伯性偏差，最后在数据处理上进行朗伯特性校准，通过任意像元辐射通量的校准，响应非均匀可提升3%以上[6]。

积分球的核心价值在于其腔体内部表面多次漫反射产生的朗伯体(余弦)辐射特性，能在出口处提供空间角度分布均匀的光辐射，从根本上消除了黑体光源因朗伯特性导致的辐照度分布不均问题，实现对被测器件表面的均匀照明，降低了均匀性参数测试的系统性偏差。从表1中也可以看出，同一器件样品，采用积分球均匀光源测试的响应率非均匀性指标全部优于黑体光源测试指标，应该更接近器件真实水平[7]。

3.2 背景影响与便捷性分析

InGaAs短波红外焦平面探测器的暗电流对温度非常敏感，芯片温度每升高8℃像元暗电流就增加1倍[8]。在测试读出噪声、有效像元率等涉及探测器暗信号参量时，黑体光源的高温辐射将会引入额外的背景噪声，影响低偏压型的InGaAs焦平面探测器测试准确性。高温黑体光源维持恒定高温

的难度较大，温度的波动会引起辐射强度的变化，辐射不稳定会导致空间噪声不可忽略，提高测试难度。尤其是对于对光强变化敏感的短波红外焦平面探测器，可能导致非均匀性测量结果的不稳定性和不确定性。积分球光源灯珠远离且避开了直接照射探测器芯片，背景热辐射影响较小，对读出噪声、有效像元率等参数测试更为准确。

高温黑体受热容量、导热速率、材料强度等物理和加热/制冷功率上限等工程设计限制，使用时需要较长的启动和稳定时间。在测试非线性度等需要快速变化光功率强度等指标时，测试时间被拉长，系统温度不稳的风险将增加测试结果的不确定性。积分球光源强度调节通过光阑而非改变卤素灯驱动电源，光强调节速度快、波动小，在不改变光谱分布的前提下完成非线性度等参数的测试，操作更为便捷、高效。

4　结论

本文为验证积分球均匀光源用于铟镓砷短波红外焦平面探测器特性参数测试的可行性，采用积分球均匀光源和高温黑体分别作为均匀光源，对不同阵列规模和像元尺寸的探测器，对比测试其响应率非均匀性和有效像元率。实验结果表明：高温黑体的朗伯特效应在测试大阵列规模焦平面探测器时引入的系统非均匀不可忽略，高温辐射背景会引入一定的系统噪声，且高温黑体辐射能量调整存在热惯性，难以匹配快速、稳定调整的测试需求。积分球均匀光源辐射能量完全覆盖短波红外范围，且更容易获得高稳定、高均匀性、大动态、大尺寸的面光源。建议在《方法》的响应率非均匀性测试、有效像元率、非线性度、稳态功率等参数测试要求中，增加积分球均匀光源选项，以降低InGaAs短波红外焦平面探测参数器测试的系统性误差，提升测试便捷性。

参考文献：

[1] 褚君浩．窄禁带半导体物理学[M]．北京：科学出版社，2005.

[2] 国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会．红外焦平面阵列参数测试方法：GB/T 17444—2013[S]．北京：中国标准出版社，2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Measuring Methods for Parameters of Infrared Focal Plane Arrays: GB/T 17444—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.

[3] Howell J R, Menguc M P, Daun K, et al. Thermal Radiation Heat Transfer[M]. Boca Raton: CRC Press, 2021.

[4] 郝允祥，陈遐举，张保洲，等．辐射度学和光度学[M]．北京：北京师范大学出版社，2013.

[5] Teledyne Imaging. Shortwave infrared (SWIR) imaging: an introduction[R/OL]. 2018[2025-09-01].

[6] 庄继胜，王忆锋，范乃华，等．红外焦平面探测器测试数据的校正[J]．红外与激光工程，2011，40(2)：195-198.
Zhuang Jisheng, Wang Yifeng, Fan Naihua, et al. Correction of test data of infrared focal plane detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 195-198.

[7] Rogalski A, Ciupa R. Performance limitations of short wavelength infrared InGaAs detectors[J]. Infrared Physics & Technology, 1995, 36(7): 1037-1045.

[8] Vögelin S. Characterization of SWIR InGaAs focal plane arrays using an integrating sphere source[J]. Proc. of SPIE, 2019, 11002: 110022G.

作者简介：

王力霞(1983—)女，河北省石家庄市人，高级工程师，主要从事元器件可靠性方面的研究；

陈　扬(1976—)，男，四川省中江县人，高级工程师，主要从事InGaAs焦平面探测器方面的研究。