

紫外-短波红外航天遥感探测器光电性能测试装置的研制和标定

张 钊^{1,2}, 屈 炜³, 万 志⁴

(1. 上海科学技术交流中心, 上海 200235; 2. 上海军民两用科学技术促进会, 上海 200235;
3. 上海卫星工程研究所, 上海 200240; 4. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为解决紫外-短波红外探测器光电性能测试和评价问题, 研制了一套探测器的光谱响应、时间响应和偏压响应测试装置, 为紫外-短波红外探测器的光谱响应和光电特性参量测试提供测试装置和评价依据, 以便评价其综合性能指标是否满足设计和使用要求。介绍了测试装置的研制和标定过程, 该测试系统由宽光谱复合光源、样品室、单色仪、锁相放大器、标准探测器等构成, 实现了 200~2 500 nm 光谱范围内光电探测器绝对/相对光谱响应度、量子效率、归一化探测率、频响特性、偏压响应度和时间响应参量的测试功能。最后分析了照明光斑波长校准和光谱辐射照度标定的重要性, 并给出标定方法和结果。

关键词: 探测器; 光谱响应; 量子效率; 时间响应; 偏压特性

中图分类号: O 432.1

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.05.008

Development and Calibration of Photoelectric Property Test Device for Ultraviolet-Short Wave Infrared Detector

ZHANG Zhao^{1,2}, QU Wei³, WAN Zhi⁴

(1. Shanghai Science and Technology Exchange Center, Shanghai 200235, China; 2. Shanghai Association for Promotion of Dual-use Science and Technology, Shanghai 200235, China; 3. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China; 4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China)

Abstract: A spectral response test device for ultraviolet-infrared detector is developed, with which the evaluation basis of infrared detector with visible light-short infrared waveband could be achieved by spectral response test and photoelectric property test. In this paper, the design and calibration of the test device are illustrated. The device mainly consists of combined lamp, sample room, monochrometer, lock-in amplifier, and standard detector. It can be used to obtain the absolute/relative spectral response, quantum efficiency, normalized detectivity, frequency response, bias voltage response, and time response parameters of photoelectric detector in the spectral range from 200 nm to 2 500 nm. Finally, the importance of wavelength calibration and spectral irradiance calibration are analyzed, and the calibration process and results are described.

Key words: detector; spectral response; quantum efficiency; time response; bias voltage response

0 引言

探测技术的核心部件就是探测器^[1-3], 探测器性能直接决定探测设备的使用效果。随着紫外到红外波段的探测器越来越广泛地应用于国防、科研和

工业生产过程监视等领域, 国内对于探测器的需求也日趋增多。国外进口器件虽然性能和可靠性较好, 但是价格高昂, 且从事航天军工等敏感行业的单位受出口禁运制约, 很难获得高等级器件, 这已

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-06-28

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分); 卫星应用共性关键技术项目(50-Y20A38-0509-15/16)

作者简介: 张 钊(1989—), 男, 博士, 主要研究方向为航天遥感器技术。

经成为限制我国探测器行业发展的瓶颈^[4-7]。为了摆脱这种局面,国内一些高校和科研院所开始自主研发探测器,探测器的制造厂家为了控制产品的质量,必须对探测器的各项光电性能指标进行严格测试,筛选出性能接近或一致的个体产品^[8-11]。由于材料和制作工艺等条件限制不能保证其所生产的所有探测器都能达到技术等级要求,必须通过测试来检验和甄别所生产的探测器是否合格^[12]。由于各个厂家生产的探测器类型、封装型式、工作谱段以及结构尺寸都各不相同,因此,在市面上很难采购到现成的测试设备^[13-14]。

基于上述分析,本文设计并研制了一套用于多谱段探测器光电性能测试的设备。该设备可以对紫外谱段到短波红外谱段的探测器进行光谱响应和光电特性参量测试,测试内容包括:绝对/相对光谱响应度、量子效率、归一化探测率、频响特性、偏压响应度和时间响应。本文首先介绍测试系统的设备组成和测试原理,然后对于各项测试原理和方法进行具体介绍,最后分析对照明光斑波长校准和光谱辐射照度标定的重要性,介绍标定方法,给出标定结果。

1 系统组成和原理

红外探测器光电性能测试系统主要由复合光源、单色仪、扩束光路、样品室、标准参考探测器、光电信号采集处理电路、A/D 模数变换器、锁相放大器以及数据采集处理软件和 PC 机组成。系统设备组成和工作原理如图 1 所示。

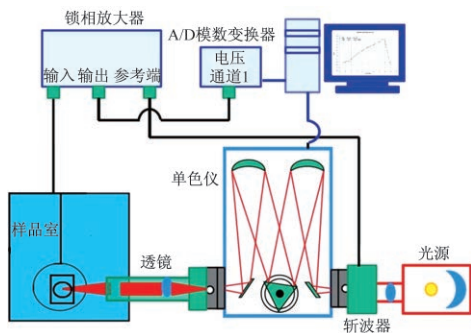


图 1 系统原理图

Fig.1 System principle diagram

光源组件采用背透式复合光源。复合光源是将 30 W 氙灯和 250 W 卤钨灯集成在一个光源室内,先使卤钨灯成像在氙灯灯丝上,再将两者一起

成像在出光口处。这样既可以同时点亮,也可以分别点亮,从而得到从 200~2 500 nm 的宽光谱连续光源。卤钨灯材料为德国 OSRAM 原装进口灯泡,光源具有光效高、发光稳定、使用寿命长等特点,其光谱范围为 300~2 500 nm。氙灯材料为进口紫外增强型氙灯,光源具有光效高、光通稳定、使用寿命长等特点,其光谱范围为 200~400 nm。同时采用双石英透镜聚焦,自动延时冷却。光学系统包含扩束镜和聚焦镜头,可准直、聚焦和发散输出,并能够调节光斑大小,以满足不同尺寸的被测探测器光敏面的照明需求。氙卤灯光源光谱分布曲线如图 2 所示。

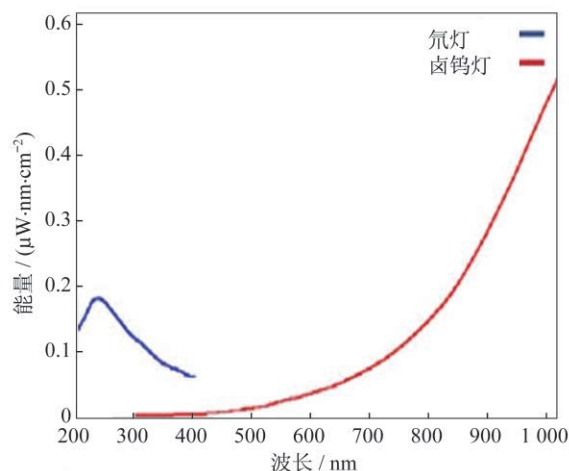


图 2 氙卤灯光源光谱分布曲线

Fig.2 Spectral distribution curves of deuterium and halogen tungsten lamps

另外,宽波段复合光源与分光部件的结合使用,可产生紫外到短波红外谱段的单色辐射信号。该辐射信号经过扩束光学系统后,在待测试红外探测器光敏面上产生均匀的单色照明光斑,通过参考标准探测器与待测探测器之间输出电信号的比对应来实现光谱响应测试功能。分光组件采用标准产品 71SW302 三光栅光谱仪。该单色仪包括各波段的光栅、消高级光谱滤光片轮、光谱扫描步进电机驱动控制电路、单片机程序,以及上位机和下位机的通信指令等。六挡电动滤光轮用来消除多级光谱,自动控制扫描中的滤光片更换。在启用状态可自动归零定位,实现扫描过程中的滤光片自动更换。该滤光片轮安装 3 块长波通滤光片,第 1 挡为空,第 2 到第 4 挡标准配置滤光片材料分别为 ZJB320、CB535 和 HWB850,光谱使用范围为 185~

1 800 nm,第5和6挡为预留滤光片孔。利用电调制的LED光源产生交变方波信号,并配合具有频谱分析功能的示波器来测试红外探测器的时间响应特性。

为了提高微弱信号检测和处理能力,测试系统采用光调制和锁相放大电路设计。通过直流电机驱动机械斩波器对单色光辐射信号进行调制,将其变成交变脉冲信号,利用调制信号与参考信号间相位同步可以进行检波和相关处理,从而降低信号采样噪声,有效提高测试信噪比。测试系统采用斯坦福公司的SR540机械斩波器作为调制器,并搭配SR510型锁相放大器,实现对单色辐射测试信号的调制和锁相放大处理。测试装置的实物图如图3所示。

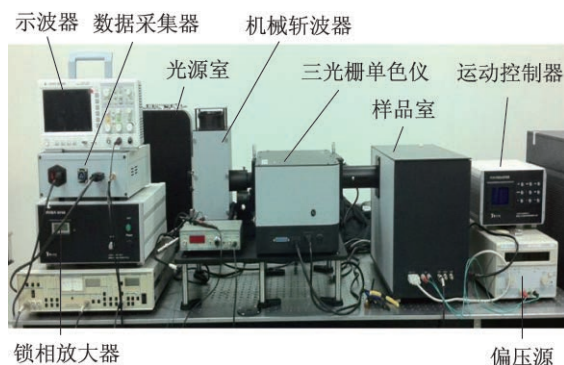


图3 设备实物图

Fig.3 Picture of the test system

2 光谱响应和量子效率测试

光谱响应测试的原理,是利用单色仪将光谱功率分布连续的定标光源按照波长分离出来,经过扩束光学系统后形成单色均匀照明辐射到被测试光电器件的光敏面,并且通过控制输出单色辐射的强度来实现探测器的光谱响应关系的测试,如图4所示。如前所述,探测器光谱响应测试系统包括:氙卤灯光源室、单色仪、狭缝像引出扩束光学系统、消二级光谱滤光片轮和标准参考探测器。光源室采用背透式复合光源。复合光源是将30 W 氙灯和250 W 卤钨灯集成在一个光源室内,先使卤钨灯成像在氙灯灯丝上,再将两者一起成像在出光口处。这样既可以同时点燃,也可以分别点燃,从而得到从200~2 500 nm的宽光谱连续光源。卤钨灯材料为德国OSRAM原装进口灯泡。光源具有光效高、光通稳定、使用寿命长等特点,其光谱范围为

300~2 500 nm。采用程控电源控制,电压调整范围为0~12 V,冷却方式为风冷。氙灯材料为进口紫外增强型氙灯,光源具有光效高、光通稳定、使用寿命长等特点,其光谱范围为200~400 nm,采用程控电源控制,冷却方式为风冷。复合光源通过控制箱控制电动台,将工作光源自动切换到输出光路中,特定时间只输出一种光源发出的光,通过光源的切换实现宽光谱范围的光输出。单色仪采用光栅扫描光谱仪,单色仪作为分光器件其作用是产生各种单色辐射。另外,可以通过调整单色仪出射狭缝与扩束光学系统之间的相对位置关系,从而能够在探测器光敏面上形成均匀和足够大的单色照明光斑,同时使用消二级光谱滤光片消除二级以上光谱对测试的影响。

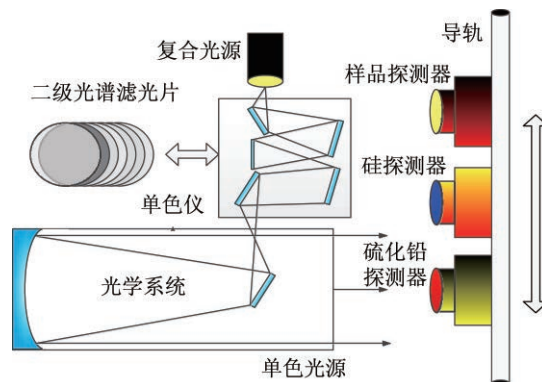


图4 红外探测器光谱响应测试原理

Fig.4 Spectral response test principle of the infrared detector

参照光电探测器光谱响应测试方法国家标准,采用相对比较法进行光电探测器光谱响应测试,所采用标准参考探测器必须为光谱响应已知或经过国家计量部门校准的器件。因此,采用两种标准参考探测器Si(硅探测器)和PbS(硫化铅探测器)来分别满足紫外-可见-近红外和短波红外测试谱段范围的需要。

参考探测器输出的模拟信号 V_c 经ADC后成为数字信号,用 DN_c 表示,参考探测器与待测探测器采用同一套数据采集器。因此,用数字信号代替模拟信号计算量子效率结果不变,在一个波位置上多次采集并取平均值:

$$\overline{DN_c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N DN_c(i) \quad (1)$$

式中: N 为采样次数。

同理,被测探测器采集后的数据也需要进行平均处理,被测探测器光谱响应度 R 为

$$R = \frac{\overline{DN}}{\overline{DN}_c} \cdot R_c \quad (2)$$

式中: R_c 为参考标准探测器绝对光谱响应度定标值,单位为 A/W ; $\overline{DN}$ 为参考标准探测器数码值平均值; $\overline{DN}_c$ 为待测探测器数码值计算完成后显示、打印光谱曲线或数据。

根据光谱响应度可以进行量子效率和归一化探测率计算。以对索尼公司生产的探测器(型号: ICX285AL)进行实测为例。以波长间隔 2 nm 对探测器进行光谱扫描,得到探测器的输出结果如图 5 所示。

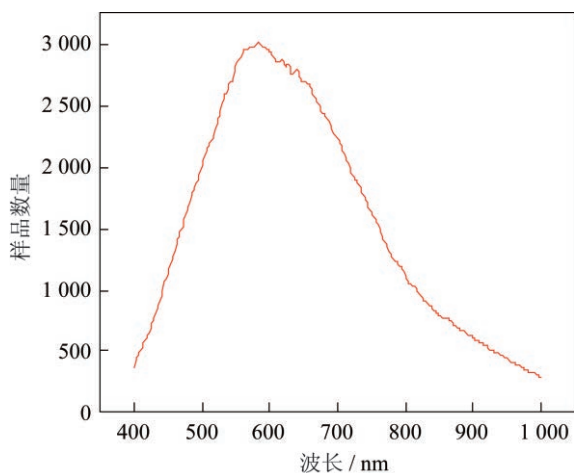


图 5 探测器图像灰度曲线

Fig.5 Gray scale curve of images obtained by the sample detector

以波长间隔 2 nm 对标准探测器进行光谱扫描,得到探测器的输出结果如图 6 所示。

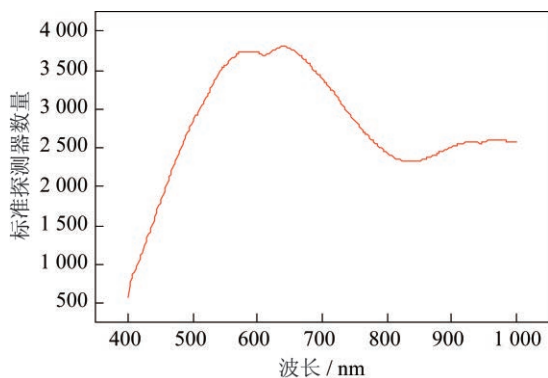


图 6 光谱响应测试系统标准输出值

Fig.6 Standard output of the spectral response test system

将探测器图像灰度曲线与标准输出曲线进行比较,计算得到探测器的相对光谱响应曲线如图 7 所示。

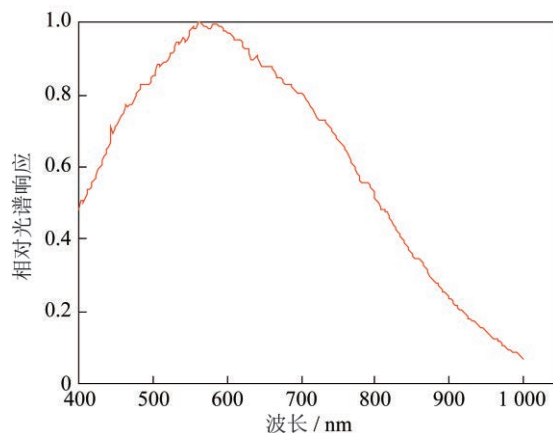


图 7 探测器样片相对光谱响应测试曲线

Fig.7 Relative spectral response curve of the sample detector

将系统测试得到相对光谱响应曲线(图 7)和如图 8 所示的索尼探测器资料手册中的曲线进行比较,两者的曲线形状趋势一致。

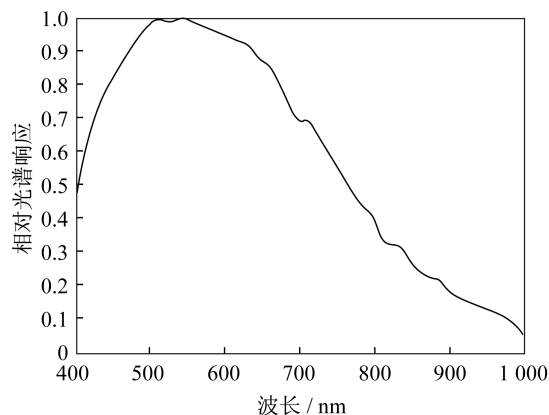


图 8 探测器资料手册中 ICX285AL 相对光谱响应曲线

Fig.8 Relative spectral response curve of ICX285AL sample detector from the detector manual given by Sony

量子效率(η_e)为探测器将入射光子数转化成电子数的效率,是评价探测器性能的重要参数之一。量子效率可以通过光谱响应度测量进行转换:

$$\eta_e = \frac{\left(\frac{I \Delta t}{e} \right)}{P \Delta t} = \frac{R h c_0}{n e \lambda} = 1.24 \cdot \frac{R}{\lambda} \quad (3)$$

式中: h 为普朗克常数, $h=6.626\times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$; c 为真空中光速; e 为电子电量, $e=1.602\times 10^{-19}\text{ C}$; λ 为波长, μm ; n 为空气中该波长下的折射率。

此外,测试系统还可以测试探测器归一化探测率。归一化探测率是指单位电子学系统带宽,单位探测器面积下的噪声等效光功率, $\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{cm}\cdot\text{W}^{-1}$ 。计算公式为

$$D^* = \frac{A_D \sqrt{\Delta f}}{P} \quad (4)$$

其中, P 为噪声等效光功率(Noise Equivalent Power, NEP),是与探测器均方根噪声信号对应的辐射通量,

$$P = \frac{I_{\text{noise}}}{R} \quad (5)$$

式中: I_{noise} 为噪声电流测量值(AD多次采集暗信号并计算获得); R 为绝对光谱响应度; A_D 为探测器有效接收面积; Δf 为探测器放大器带宽可以用锁相放大器的带宽,Hz。

3 偏压响应和时间响应设计与实现

偏压响应度是探测器响应度随偏置电压变化的函数或曲线, $\text{A}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$ 。测量时只需改变探测器偏置电压,测量光谱响应度即可。偏压响应测试系统采用DH1722A直流稳压电源作为偏压源,用来产生和调整、改变待测试探测器的工作偏压,可以进行不同偏压下的光谱响应性能测试。

时间响应测试系统采用具有频谱分析功能的AV7062A型数字示波器作为时变信号分析工具,可以得到对应各种时钟脉冲信号输入所引起的探测器输出随时间变化曲线及其上升、下降沿的陡度,从而计算探测器的上升和下降时间。

将LED安置在探测器积分球内,利用电调制LED光源产生交变方波信号,配合具有频谱分析功能的示波器来测试红外探测器的时间响应特性。时间响应的信号源采用贴片式高亮白光LED光源,由于LED响应速度足够快,上升沿小于100 ns,因此,可以保证对微秒量级的探测器响应时间测试要求;另外其具有发光效率高、寿命长、重复性好以及脉冲波形近似方波等特性,适用于探测器的时间响应测试。

某探测器下降和上升时间响应测试图分别如图9和图10所示。

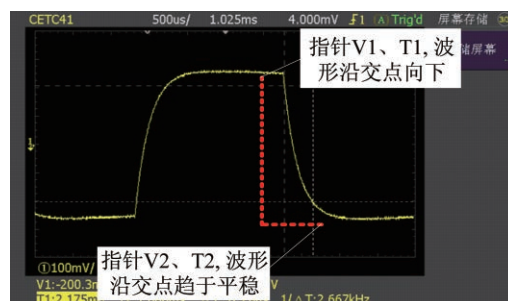


图9 某探测器下降时间响应测试图

Fig.9 Fall time response test diagram

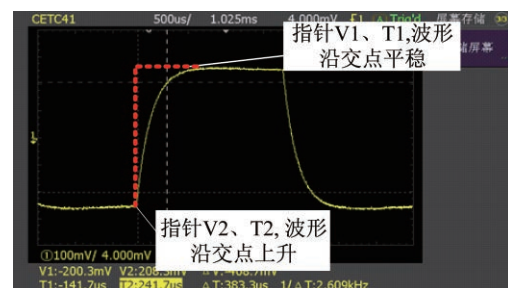


图10 某探测器上升时间响应测试图

Fig.10 Rise time response test diagram

4 波长标定和光谱辐射照度标定

光谱响应测试系统需要确定准直单色辐射的波长位置准确度和光谱辐射照度两个控制输出量,因此,必须对定标装置进行波长校准和光谱辐射强度的绝对标定。波长校准就是建立单色仪光栅衍射角(即波长扫描位置)与输出波长示值之间的关系,而光谱辐射照度的定标就是建立各波长处输出的单色辐射照度值。

4.1 单色照明光斑波长校准

探测器光谱响应测试结果受到波长位置准确度的影响,因此,控制光谱响应测试系统输出单色照明光斑波长位置精度,不仅是建立光谱响应测试系统的首要考虑因素,也是光谱响应测试过程的关键环节之一。

单色仪的波长控制是由步进电机扫描驱动光栅衍射角实现的,由于步进电机具有较好的位置重现性,且步进电机扫描位置与输出波长之间的关系为固定的线性关系,因此只要建立扫描位置(步进电机运行步数)与波长真值之间的对应关系即可完成波长校准。波长扫描位置通常采用线状发射光谱的金属元素灯作为标准光源,如汞灯、镉灯等,由

于汞灯谱线比较丰富,所以本文波长校准采用汞灯特征谱线作为波长标准光源。汞灯波长标准灯的特征谱线位置见表1。

表 1 汞灯典型特征谱线波长位置
Tab.1 Typical wavelengths of mercury lamp

第1组特征光谱位置/nm	第2组特征光谱位置/nm
365.0	730.0
404.7	809.4
435.8	871.6
546.1	1 092.2
577.0	—
579.1	—
1 014.0	—

波长校准的方法如图11所示。将波长标准灯对准单色仪入射狭缝,单色仪执行波长扫描,同时采用光电探测器接收和记录单色仪的出射辐射,通过将探测器响应输出的峰值波长位置和波长标准灯的特征谱线进行比较,就可以确定光谱响应测试装置的输出波长示值和真实值之间的关系。通过确定波长标准灯的若干个特征谱线位置与对应的单色仪输出波长示值,就可以建立单色仪扫描位置与输出波长之间的函数关系(一般为线性关系),这时采用线性回归法就能确定任意扫描(位置)步数对应的输出波长。汞灯的光谱定标装置波长定标结果如图12所示。

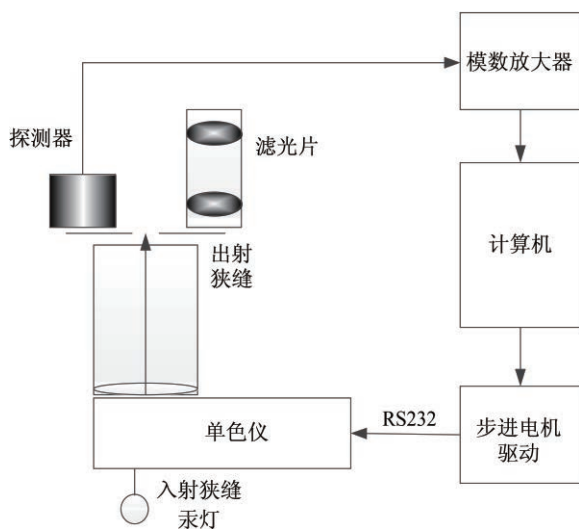


图 11 波长校准方法

Fig.11 Schematic diagram of the wavelength calibration method

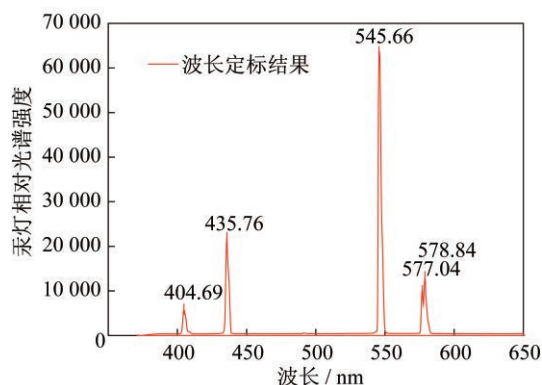


图 12 光谱定标装置波长定标结果

Fig.12 Results of wavelength calibration

4.2 光谱辐射照度标定

照明光斑的光谱辐射照度标定决定测试结果的可靠性和精度,因此,需要对参考探测器进行绝对光谱辐射照度响应度标定。参考探测器绝对光谱辐射定标方法,将可调谐激光器的出射光作为单色入射光到F4材料的积分球内,将待测参考探测器置于积分球的样品开口处(避开入射光直射照明),同时通过标准激光功率计(溯源与国家一级计量站辐射量值基准)进行实时监控,改变入射光谱段,最终得到参考探测器的绝对光谱响应结果。国防计量一级站提供的对上述硅和硫化铅两种材料参考探测器进行定标的结果,如图13所示。

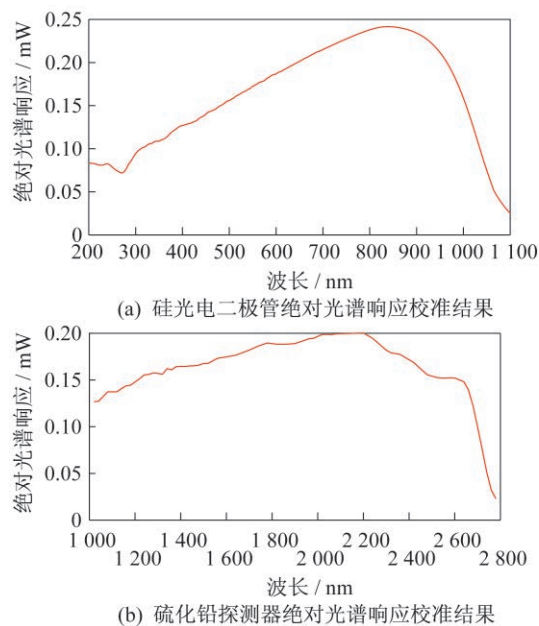


图 13 两种类型参考标准探测器绝对光谱响应曲线

Fig.13 Spectral response curves of two types of standard detectors

利用参考探测器得到的绝对光谱响应度,可以获得单色仪出射经扩束系统后照明光斑的绝对光谱辐射照度,从而可以计算得到待测探测器的光谱辐射照度响应度。最终根据式(3)计算得到探测器的量子效率。量值传递步骤如图 14 所示。

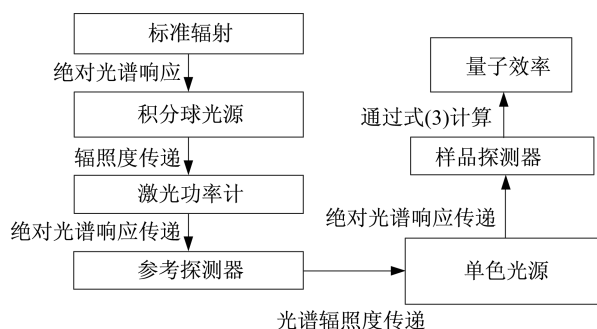


图 14 量值传递图

Fig.14 Transmission of radiation

5 结束语

本文介绍了一套用于对紫外到短波红外探测器进行光电性能测试的装置。测试装置由宽光谱复合光源、单色仪、扩束光路、样品室、锁相放大器、标准探测器等构成,并具体介绍了绝对/相对光谱响应度、量子效率、归一化探测率、频响特性、偏压响应度和时间响应参数的测试原理和测试方法,最后通过对照明光斑的波长标定和光谱辐射标定,保证了测试结果的可靠性和精度,并给出标定结果。测试装置结合复合光源室使探测器的工作测谱段覆盖紫外谱段到短波红外谱段,并适用于不同类型、封装尺寸的探测器进行光电性能测试。测试装置为探测器光电特性参量测试提供设备和评价依据,解决了多谱段探测器综合性能指标评价和筛选问题。

参考文献

- [1] 何小穆,李自田.红外探测器光电性能测量系统方案研究[J].光子学报,2000,29(4):376-379.
- [2] 邹鹏,郑小兵,吴浩宇,等.基于陷阱探测器的辐亮度探

- 测器定标方法研究[J].光学学报,2013,33(7):193-198.
- [3] 舒嵘,孔伟.空间主动光电遥感现状及发展[J].上海航天,2019,36(3):1-14.
- [4] 曾戈虹.HgCdTe 红外探测器性能分析[J].红外技术,2012,34(1):1-4.
- [5] 李宪圣,万志,刘则洵,等.大视场空间相机 CCD 性能测试及筛选方法[J].红外与激光工程,2014,43(7):2245-2250.
- [6] 刘红元,王恒飞,王洪超,等.基于均匀光辐射法测量 CCD 器件量子效率[J].光学学报,2014,34(增刊 2):373-378.
- [7] POLETTO L, BOSCOLO A, TONDELLO G. Characterization of a charge-coupled-device detector in the 1 100 - 0.14-nm (1-eV to 9-keV) spectral region [J]. Appl Opt, 1999, 38(1):29-36.
- [8] THEOCHAROUS E, THEOCHAROUS S P, LEHMAN J H. Assembly and evaluation of a pyroelectric detector bonded to vertically aligned multiwalled carbon nanotubes over thin silicon [J]. Applied Optics, 2013, 52(33):8054-8059.
- [9] 陈仁厚,冯刚,马晓东.硫化铅红外探测器光电性能自动测试系统设计[J].激光与红外,2010,40(9):1001-1005.
- [10] 孙景旭,刘则洵,万志,等.CCD 成像电子学单元光电参量测试系统[J].应用光学,2013,34(2):289-294.
- [11] 胡友勃,李健军,夏茂鹏,等.光子计数器的线性测量和修正[J].光子学报,2016,45(6):149-154.
- [12] 廖清君,胡晓宁,黄爱波,等.短波红外探测器绝对光谱响应的准确测量[J/OL].红外与激光工程[2021-05-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20201012.1343.008.html>.
- [13] 姚萍萍,许孙龙,涂碧海,等.星载面阵 CCD 性能测试系统设计及温度影响分析[J].中国激光,2020,47(9):308-317.
- [14] 邵晓鹏,王杨,高鹏,等.CCD 芯片量子效率的测量装置及其测量方法[J].红外与激光工程,2013,42(增刊 1):103-106.