

# 基于低温辐射计的长波红外绝对光谱响应率测量

刘红博<sup>1</sup>, 史学舜<sup>1</sup>, 徐文斌<sup>2</sup>, 刘长明<sup>1</sup>, 刘红元<sup>1</sup>, 王恒飞<sup>1</sup>

1. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555  
2. 北京环境特性研究所光学辐射重点实验室, 北京 100854

**摘要** 长波红外光谱(8~14  $\mu\text{m}$ )是介于中红外和太赫兹波之间的重要电磁辐射, 对应着地球表面常温目标物体的光谱辐射波段和地球“第三大气窗口”, 相对于短波和中波光谱辐射, 长波红外辐射受大气散射影响较小。因此, 长波红外光电探测器在红外光谱成像、红外侦察、光谱探测等领域得到广泛使用。绝对光谱响应率作为表征探测器响应能力的主要参数之一, 对其高精度标定的需求亟待解决。现在传统方法, 即基于标准辐射源的定标方法已无法满足诸多高精度绝对光谱响应率的应用需求。目前, 国内还没有建立基于激光光源和低温辐射计的长波红外绝对光谱响应率校准装置, 主要原因是缺少光功率稳定、光束质量高的激光光源, 以及性能稳定的长波红外传递标准探测器。针对此问题, 开展了以激光为光源, 以低温辐射计为光功率测量基准的长波红外绝对光谱响应率量值溯源技术研究。课题组选用可调谐  $\text{CO}_2$  稳频激光器作为光源, 以低温辐射计作为光功率测量基准; 采用 CdTe 晶体光电调制器搭建了激光功率稳定控制系统; 根据光束传输理论, 搭建长波红外空间滤波器以优化光束质量; 采用积分球与 HgCdTe 探测器组合, 研制了性能稳定可靠的标准传递探测器, 建立了长波红外探测器绝对光谱响应率高准确度校准装置, 实现长波红外光谱范围(9.2~10.8  $\mu\text{m}$ )探测器绝对光谱响应率的高准确度校准测量。选择可调谐激光器输出的波长值 9.62 和 10.60  $\mu\text{m}$  分别对积分球型 HgCdTe 探测器进行了测量。实验结果表明, (1)利用低温辐射计准确测量光功率, 光功率测量不确定度优于 0.30%~0.42% ( $k=2$ ); (2)探测器绝对光谱响应率测量不确定度优于 0.80%~1.02% ( $k=2$ ), 其他波长点可参考分析。该工作实现了基于激光光源的长波红外探测器绝对光谱响应率的高准确度校准。

**关键词** 长波红外光谱; 长波红外探测器; 绝对光谱响应率; 低温辐射计

**中图分类号:** O443.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)12-3680-06

## 引言

长波红外光谱(8~14  $\mu\text{m}$ )是介于中红外波段和太赫兹波之间的重要电磁辐射, 对应着地球表面常温目标物体的辐射波段和地球“第三大气窗口”, 相对于短波和中波红外辐射, 长波红外辐射受大气散射影响较小。因此, 长波红外辐射在红外夜视、资源探测、精确制导、安防报警等科研及国防领域具有极其重要的应用, 为国家综合实力的重要体现<sup>[1-5]</sup>。

为实现长波红外探测器绝对光谱响应率的测量, 需要对探测器的人射光功率和响应电压或电流分别进行准确测量。目前, 对电学参数的测量可以达到很高的精度; 对光功率的测量, 公认是溯源到低温辐射计。英国的国家物理实验室

(NPL)、美国的标准技术研究院(NIST)等计量机构均建立了基于低温辐射计的绝对光谱响应率校准装置<sup>[6-9]</sup>。在长波红外波段, 以  $\text{CO}_2$  激光器作为光源, NPL 在 9.2~10.8  $\mu\text{m}$  波段内对 HgCdTe 探测器的绝对光谱响应率进行校准, 测量不确定度达到 0.25%<sup>[10]</sup>。NIST 在 10.6  $\mu\text{m}$  波长点对热释电探测器进行绝对光谱响应率校准, 测量不确定度达到 1%<sup>[11]</sup>, 实现长波红外探测器绝对光谱响应率的高准确度测量。

目前, 国内中国计量院、光电子一级计量站、中科院安徽光机所等均开展了基于低温辐射计的绝对光谱响应率的高准确度测量及校准工作, 但应用范围主要局限在可见到近红外波段。中科院上海技术物理研究所等单位在 HgCdTe 等合金材料领域取得系统性成果, 并将其成功应用于我国的国防、航天和民生等领域<sup>[12-13]</sup>。本文主要描述建立的长波红外

收稿日期: 2019-10-01, 修订日期: 2020-03-12

基金项目: 国防技术基础科研项目(JSJL2014210B014), 国家重点实验室稳定运行项目(JCKYS2019204016)资助

作者简介: 刘红博, 1987年生, 中国电子科技集团公司第四十一研究所工程师 e-mail: lhbcet@163.com

探测器绝对光谱响应率校准装置, 实现长波红外波段(9.2~10.8 μm)探测器绝对光谱响应率的高准确度测量。

### 1 实验部分

长波红外探测器绝对光谱响应率校准装置的原理图如图 1 所示。校准装置主要由长波红外功率稳定激光源、空间滤

波器、低温辐射计、传递标准探测器和控制系统等组成。

光电探测器的绝对光谱响应率是表征光电探测器性能的基本参数, 即波长为 λ<sub>0</sub> 的光辐射入射到光电探测器上, 探测器输出的电信号 V(λ<sub>0</sub>) (电压或电流) 与入射光辐射功率 P<sub>e</sub>(λ<sub>0</sub>) 的比值, 用 R 表示。

$$R(\lambda_0) = \frac{V(\lambda_0)}{P_e(\lambda_0)} \tag{1}$$

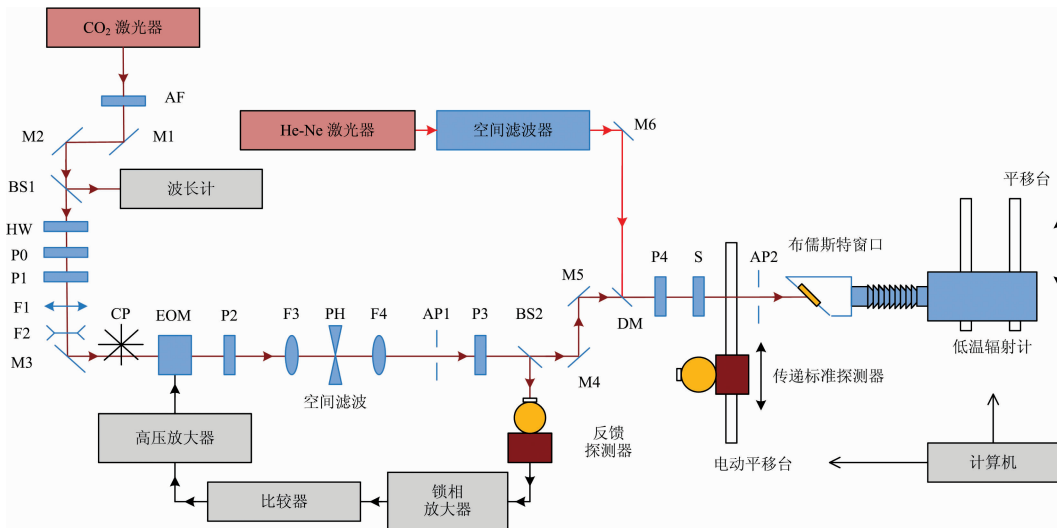


图 1 长波红外探测器绝对光谱响应率校准装置原理图

AF: 衰减片; M1, M2, M3, M4, M5, M6: 金镜; BS1, BS2: 分光片; HW: 半波片; P0, P1, P2, P3, P4: 偏振片; F1, F2, F3, F4: 透镜; CP: 斩波器; EOM: 电光调制器; PH: 针孔; AP1, AP2: 光阑; DM: 双色片; S: 光闸

Fig. 1 Diagram of the absolute spectral responsivity calibration facility of Long-wave infrared detector

AF: Attenuator; M1, M2, M3, M4, M5, M6: Gold steering mirrors; BS1, BS2: Beam splitters; HW: Half-wave plate; P0, P1, P2, P3, P4: Polarizers; F1, F2, F3, F4: Lenses; CP: Chopper; EOM: Electro-optic modulator; PH: Pinhole; AP1, AP2: Aperture; DM: Dichroic mirror; S: Shutter

#### 1.1 长波红外功率稳定激光源

校准装置使用可调谐 CO<sub>2</sub> 稳频激光器 (PL2-M, Edinburgh Instrument) 作光源, 其可调谐输出谱线共 60 条, 对应的波长范围覆盖 9.2~10.8 μm, 最大输出功率为 12.4 W, 满足长波红外探测器绝对光谱响应率测量要求。激光器输出激光光束直径 4.8 mm, 光束发散角 6 mrad, 功率稳定性 1%·h<sup>-1</sup>, 波长稳定性 1 MHz/10 min。通过调节激光器尾部螺旋测微旋钮改变谐振腔腔长, 实现对应波长的选择。

首先, 如图 1 所示, 由于可调谐 CO<sub>2</sub> 激光器输出激光功率较高, 激光经过衰减片 AF 衰减之后, 利用镀金反射镜 M1 和 M2 组成的爬高镜, 将光束抬升到与光电探测器位置相一致的高度, 入射进入由半波片 HW 和偏振片 P0、P1 组成的激光功率可调衰减镜组合, 实现激光功率的连续可调并提高激光光束的竖直偏振方向; 随后进入望远镜缩束系统, 将激光光束缩束到直径 2 mm。

其次, 激光经过由电光调制器 EOM、偏振片 P2、反馈探测器、锁相放大器、比较器和高压放大器等组成的长波红外激光功率稳定系统。实验用电光调制器由两块 CdTe 晶体组成, 双面镀增透膜, 在 10.6 μm 波长点透过率为 99%, 并且其电光张量大, 调制频率高, 可实现较大功率调制输出。

反馈探测器选用液氮制冷的 HgCdTe 探测器, 在其前端设计了直径为两英寸的镀金积分球, 用以提高入射到 HgCdTe 探测器光敏面的均匀性。通过实验验证, 如图 2 所示, 1 h 内激光功率不稳定性控制在 0.1% 以内, 满足长波红外绝对光谱响应率测量要求。

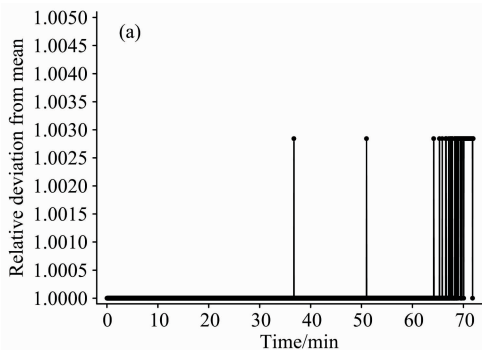


图 2 长波红外激光功率稳定测试结果

Fig. 2 The test results of long wave infrared laser power stability

第三, 激光入射到由两个透镜和一个针孔组成的空间滤

波系统,利用傅里叶变换滤除激光光束中高频分量和杂散光,优化激光光束质量。激光光束经 ZnSe 透镜 F3 会聚到针孔 PH,由针孔拦截光束的高频分量,输出衍射艾利斑,之后光束通过与透镜 F3 焦距相同的 ZnSe 透镜 F4 实现光束的准直。利用光阑 AP1 选择主光束的一级最大衍射光斑,实现激光光束的空间滤波。利用长波红外光斑轮廓分析仪(型号:WinCamD-FIR2-16-HR,DataRay Inc),分别测量空间滤波前(a)和空间滤波后(b)光斑形状,激光波长  $10.6\ \mu\text{m}$ ,光斑直径  $2\ \text{mm}$ ,测量结果如图 3 所示。在我们前期的研究工作中,参考文献[14]详细介绍了长波红外探测器绝对光谱响应率测量激光光源的组成及工作原理。

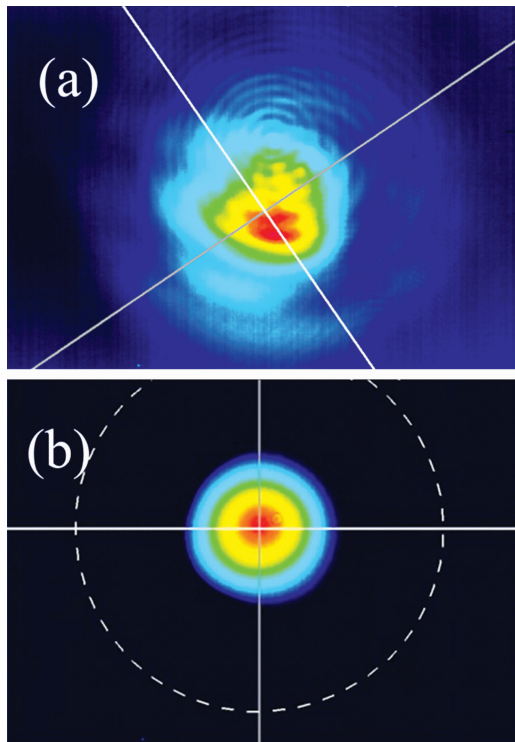


图 3 空间滤波器前后长波红外  $10.6\ \mu\text{m}$  激光光斑形状  
(a): 空间滤波前; (b): 空间滤波后

Fig. 3 Beam profiles of the long-wave laser at  $10.6\ \mu\text{m}$  before (a) and after (b) the spatial filter

### 1.2 低温辐射计的光束对准

校准装置测量长波红外激光的光功率使用 NPL 和 Oxford Instruments Ltd 联合研制的低温辐射计。针对长波红外光谱的特殊性,低温辐射计设计了窗口厚度  $5\ \text{mm}$  的 ZnSe 材料,按照 ZnSe 材料的布儒斯特角倾斜。根据折射率公式,可以计算出  $10.6\ \mu\text{m}$  的入射激光布儒斯特角为  $64.7^\circ$ 。窗口设计了可上下、左右平移和角度微调的旋钮,实现对不同波长的长波红外激光进行角度微调。布儒斯特窗口与低温辐射计主腔体之间通过长  $15\ \text{cm}$  的真空波纹管连接,如图 1 所示。在测量布儒斯特窗口透过率时,为避免窗口的拆卸和复原,采用将布儒斯特窗的位置固定,低温辐射计主腔体平移出主光路的实验方案,提高了窗口透过率测量的准确度。

由于长波红外激光不可见,而且低温辐射计内四象限探

测器对长波红外不响应,为了让长波红外激光完全准直入射进入低温辐射计吸收腔,引入  $633\ \text{nm}$  的 He-Ne 激光作为引导光辅助调节,如图 1 所示。首先,  $633\ \text{nm}$  的激光光束过空间滤波器进行光束质量优化后,经过反射镜 M6 入射到双色片 DM。双色片 DM 前表面镀有可见光高反膜,前后表面镀有长波红外光增透膜,实现对可见光高反,对长波红外激光高透,该镜片在调节两束激光共线时必不可少。第二,通过调节反射镜 M4, M5 和 M6,实现长波红外激光与可见引导光共线,在此过程,使用长波红外光斑轮廓分析仪进行辅助调节,直至光束准直入射进低温辐射计黑体腔。第三,关闭引导光,使用低温辐射计对长波红外光功率进行准确测量。经过计算,长波红外激光和可见激光以  $64.7^\circ$  的入射角入射进厚度  $5\ \text{mm}$  的 ZnSe 窗口时,由于光的折射作用导致两束光平移量的差值约  $70\ \mu\text{m}$ ,对共线调节影响很小,可以忽略不计。

如图 1 所示,在入射进低温辐射计前,长波红外激光通过偏振片 P4 对竖直偏振方向进行优化。光闸 S 的开关由计算机控制,实现低温辐射计电加热过程中遮挡入射激光,小孔光阑 AP2 的直径大小为  $5\ \text{mm}$ ,用以遮挡进入低温辐射计的散射光。

### 1.3 传递标准探测器

为了提高绝对光谱响应率量值传递过程的准确度,采用镀金积分球和液氮制冷的 HgCdTe 探测器组合作为长波红外传递标准探测器。选用美国 Judson Technologies 公司的 J15D12 型液氮制冷 HgCdTe 探测器,该探测器采用液氮杜瓦瓶降温,为了减小外界环境的影响,将光电二极管密封在真空杜瓦瓶中。在相同温度下 HgCdTe 材料热激发载流子产生的暗电流最小,适合作为传递标准探测器使用。

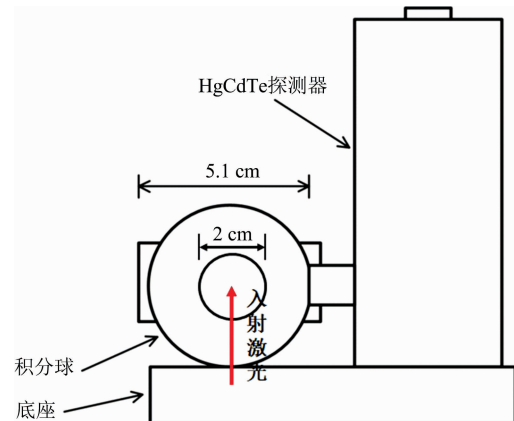


图 4 传递标准探测器结构示意图

Fig. 4 Diagram of transfer standard detector structure

传递标准探测器结构原理,如图 4 所示。在积分球中心垂直两端面开口,一端作为传递标准探测器的入射端口,另一端与液氮制冷的 HgCdTe 探测器相连,积分球开口中心与探测器中心保持一致。积分球直径约  $5.1\ \text{cm}$  (2 英寸),激光入射孔径为  $20\ \text{mm}$ 。该设计的优点是:(1)引入积分球,使得辐射到探测器光敏面的光束空间均匀性大幅提高;(2)由于探测器光电二极管密闭在真空内,积分球可减小入射方向等

因素对探测器响应的影响。(3)测量可知,在  $10.6 \mu\text{m}$  的最高入射功率  $2 \text{ mW}$ ,积分球对光束的散射及衰减,可以提高探测器的响应非线性指标到  $0.01\%$ <sup>[10]</sup>。

课题组开展了传递标准探测器空间均匀性的测试,传递标准探测器的输出信号经过前置放大器放大后输出,放大器用  $12 \text{ V}$  直流稳压电源供电。通过对探测器入射孔径中心  $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  的区域进行扫描,步进为  $0.5 \text{ mm}$ 。探测器的响应率空间均匀性具有空间对称结构,如图 5 所示。当功率为  $2.5 \text{ mW}$  的激光入射到传递标准探测器时,探测器的空间响应均匀性小于  $0.2\%$ 。由于激光光束的直径约为  $2 \text{ mm}$ ,则由探测器空间响应均匀性引入的不确定度符合均匀分布,即不确定度优于  $0.12\%$ 。

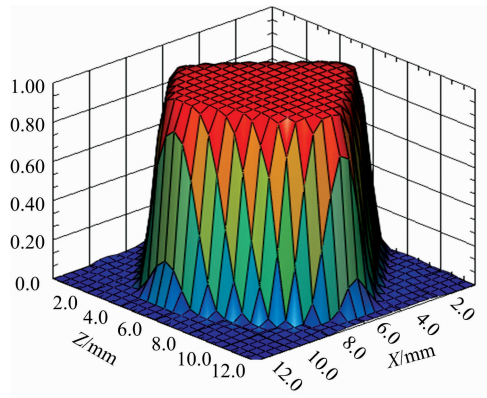


图 5 HgCdTe 探测器在  $10.6 \mu\text{m}$  响应的空间均匀性

Fig. 5 The spatial uniformity of the response of the HgCdTe detector at  $10.6 \mu\text{m}$

## 2 结果与讨论

利用校准装置对积分球型/HgCdTe 传递标准探测器开展的长波红外绝对光谱响应率校准实验。如图 1 所示,传递标准探测器置于电动平移台上,通过计算机和控制软件进行精确控制。将探测器移入光路,完成探测器在该激光辐射下响应电压的测量;将探测器移出光路,利用低温辐射计完成该激光辐射下光功率的测量。完整的测量周期约需要用时  $40 \text{ min}$ ,得到 1 组响应电压值和光功率值,实验在每个波长点分别测量了 6 组数据。校准装置所用  $\text{CO}_2$  激光器的可调谐波长范围为  $9.2 \sim 10.8 \mu\text{m}$ ,激光器连续可调,长波红外激光功率稳定系统以及空间滤波系统均可在该波段内正常运行,因此校准装置可以实现  $9.2 \sim 10.8 \mu\text{m}$  整个波段范围内探测器的绝对光谱响应率校准。校准实验选取了  $9.62$  和  $10.60 \mu\text{m}$  两个常用典型波长点进行了探测器绝对光谱响应率校准。

表 1 为探测器在  $9.62 \mu\text{m}$  的绝对光谱响应率测量结果,探测器的平均绝对光谱响应率为  $619.50 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

表 2 为探测器在  $10.60 \mu\text{m}$  的绝对光谱响应率测量结果,探测器的平均绝对光谱响应率为  $743.31 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

表 3 为低温辐射计测量长波红外光功率的相对标准不确定度分量,主要包括黑体腔吸收率、布儒斯特窗透过率、低

表 1  $9.62 \mu\text{m}$  波长点探测器绝对光谱响应率校准实验结果  
Table 1 Absolute spectral responsivity of the transfer standard detector at  $9.62 \mu\text{m}$

| Wavelength / $\mu\text{m}$ | Optical power / $\mu\text{W}$ | Absolute responsivity / $(\text{V} \cdot \text{W}^{-1})$ |
|----------------------------|-------------------------------|--|
| 9.62                       | 371.73                        | 619.12   |
|                            | 371.82                        | 621.66   |
|                            | 371.08                        | 616.56   |
|                            | 371.10                        | 618.33   |
|                            | 371.71                        | 619.01   |
|                            | 371.54                        | 622.32   |

表 2  $10.60 \mu\text{m}$  波长点探测器绝对光谱响应率校准实验结果  
Table 2 Absolute spectral responsivity of the transfer standard detector at  $10.60 \mu\text{m}$

| Wavelength / $\mu\text{m}$ | Optical power / $\mu\text{W}$ | Absolute responsivity / $(\text{V} \cdot \text{W}^{-1})$ |
|----------------------------|-------------------------------|--|
| 10.60                      | 338.93                        | 743.07   |
|                            | 338.51                        | 747.17   |
|                            | 338.32                        | 741.04   |
|                            | 386.26                        | 745.21   |
|                            | 385.80                        | 743.12   |
|                            | 385.42                        | 740.24   |

表 3 长波红外光功率测量不确定度分量

Table 3 The components of the combined relative standard uncertainty associated with the measurement of the optical power of the long-wave infrared laser using the absolute cryogenic radiometer

| Source of uncertainty          | Type | Relative standard uncertainty / % |
|--------------------------------|------|-----------------------------------|
| Cavity absorbance              | B    | 0.006                             |
| Window transmittance           | A    | 0.130                             |
| Sensitivity of radiometer      | B    | 0.001                             |
| Electrical measurement         | B    | 0.002                             |
| Measurement repeatability      | A    | 0.071~0.166                       |
| Combined uncertainty           |      | 0.15~0.21                         |
| Expanded uncertainty ( $k=2$ ) |      | 0.30~0.42                         |

表 4 探测器绝对光谱响应率校准不确定度分量

Table 4 The contributing components to the uncertainty of the absolute spectral responsivity of the transfer standard detector in the long-wave infrared region

| Source of uncertainty          | Type | Relative standard uncertainty / % |
|--------------------------------|------|-----------------------------------|
| Optical power measurement      | B    | 0.150~0.210                       |
| Response voltage               | B    | 0.003                             |
| Lock-in                        | B    | 0.030                             |
| Chopper stability              | B    | 0.010                             |
| Detector spatial uniformity    | B    | 0.120                             |
| Temperature variation          | B    | 0.012                             |
| Measurement repeatability      | A    | 0.346~0.448                       |
| Combined uncertainty           |      | 0.40~0.51                         |
| Expanded uncertainty ( $k=2$ ) |      | 0.80~1.02                         |

温辐射计灵敏度、低温辐射计的电功率测量和重复性等引入的分量。课题组开展了数次激光功率测量的重复性实验,由重复性引入的测量不确定度分量为  $0.071\% \sim 0.166\%$ ,合成标准不确定度为  $0.15\% \sim 0.21\%$ ,扩展不确定度为  $0.30\% \sim 0.42\%$  ( $k=2$ )。

表 4 为在长波红外波段测量积分球型 HgCdTe 探测器的绝对光谱响应率的相对标准不确定度分量,主要包括光功率测量、响应电压的测量、锁相放大器稳定性、斩波器稳定性、探测器响应均匀性、温度波动和测量重复性等引入的不确定度分量。在本文 1.3 节描述了探测器响应的线性和空间均匀性对准确测量的影响。综上,探测器绝对光谱响应率的合成标准不确定度为  $0.40\% \sim 0.51\%$ ,扩展不确定度为  $0.80\% \sim 1.02\%$  ( $k=2$ )。

## References

- [ 1 ] LI Yang-yu, FANG Yong-hua, LIU Yang, et al(李扬裕,方勇华,刘洋,等). Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报), 2012, 7(4): 315.
- [ 2 ] SHEN Wei-min, XUE Ming-qiu, YU Jian-jun, et al(沈为民,薛鸣球,余建军,等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2002, 10(4): 329.
- [ 3 ] ZHANG Xiao-long, LIU Ying, et al(张晓龙,刘英,等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2012, 11: 230.
- [ 4 ] YAN Xiao-ke, ZHENG Jun-jie(闫晓珂,郑均杰). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2012, 41(10): 2583.
- [ 5 ] CHANG Shuai, GAO Xiu-wei, et al(常帅,高秀伟,等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2016, 45(1): 1.
- [ 6 ] Fox N P, Theocharous E, Ward T H, et al. Metrologia, 1998, 35(4): 535.
- [ 7 ] Larason T C, Bruce S S, Cromer C L, et al. Journal of Research of the NIST, 1996, 101(2): 133.
- [ 8 ] Richter M, Johannsen U, Kuschner P, et al. Metrologia, 2000, 37(5): 515.
- [ 9 ] Werner L, Friedrich R, Johannsen U, et al. Metrologia, 2000, 37(5): 523.
- [ 10 ] Theocharous E, Prior T R, Haycocks P R, et al. Metrologia, 1998, 35: 543.
- [ 11 ] Gentile T R, Houston J M, Eppeldauer G, et al. Applied Optics, 1997, 36(16): 3614.
- [ 12 ] LIN Li, ZHANG Yan-bing, et al(林立,张艳冰,等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 1997, 26(2): 45.
- [ 13 ] HU Wei-da, LIANG Jian, YUE Fang-yu, et al(胡伟达,梁健,越方禹,等). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2016, 35(1): 25.
- [ 14 ] CHEN Hai-dong, ZHAO Kun, SHI Xue-shun, et al(陈海东,赵坤,史学舜,等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2017, 46(12): 1.

## Long-Wave Infrared Absolute Spectral Responsivity Scale by Using an Absolute Cryogenic Radiometer

LIU Hong-bo<sup>1</sup>, SHI Xue-shun<sup>1</sup>, XU Wen-bin<sup>2</sup>, LIU Chang-ming<sup>1</sup>, LIU Hong-yuan<sup>1</sup>, WANG Heng-fei<sup>1</sup>

1. The 41st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China

2. Beijing Institute of Environmental Features Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China

**Abstract** Long-wave infrared spectrum ( $8 \sim 14 \mu\text{m}$ ) is important electromagnetic radiation between middle infrared and terahertz wave, corresponding to the spectral radiation band of the target object at room temperature on the earth surface and the "Third Atmospheric Window" of the earth. Compared with short-wave and medium-wave spectral radiation, long-wave infrared radiation is less affected by atmospheric scattering. Therefore, the long-wave infrared photodetector is widely used in infrared spectral imaging, infrared reconnaissance, spectral detection and other fields. So the absolute spectral responsivity, as one of the main parameters to characterize the response ability of detectors, needs to be solved urgently for its high-precision calibration. At present, the traditional calibration method based on the standard radiation source can no longer meet the requirements of high precision absolute spectral responsivity. At present, there is no long-wave infrared absolute spectral responsivity calibration

## 3 结 论

详细描述了基于低温辐射计的长波红外探测器绝对光谱响应率校准装置,以功率稳定的宽光谱可调谐激光源为光源,以镀金积分球和液氮制冷 HgCdTe 探测器的组合作为传递标准探测器。实验结果表明,利用低温辐射计分别在  $9.62$  和  $10.60 \mu\text{m}$  波长点测量光功率,光功率测量不确定度优于  $0.30\% \sim 0.42\%$  ( $k=2$ );传递标准探测器的绝对光谱响应率测量不确定度优于  $0.80\% \sim 1.02\%$  ( $k=2$ ),其他波长点可参考分析。本研究实现了基于低温辐射计的长波红外探测器绝对光谱响应率的高准确度校准。

device based on laser source and cryogenic radiometer in China. The main reason is the lack of laser source with stable power, high beam quality, and long-wave infrared standard transfer detector with stable performance. In order to measure the absolute spectral responsivity of detectors with high accuracy, we are reporting a laser-based absolute spectral responsivity calibration device in the long-wave infrared spectral range. The tunable CO<sub>2</sub> stable frequency laser was selected as the light source, and the cryogenic radiometer was used as the light power measurement benchmark. CdTe crystal electro-optic modulator is used to construct the laser power stability control system. Based on the beam transmission theory, a long wave infrared spatial filter is constructed to optimize the beam quality. A standard transfer detector with stable and reliable performance was developed by integrating/sphere HgCdTe detector, and a calibration device with high absolute spectral response rate and high accuracy of long-wave infrared detector was established. We measured the HgCdTe/sphere detectors at 9.62 and 10.60  $\mu\text{m}$ , respectively. The experimental results show that the extended uncertainty of optical power measurement was less than 0.30%~0.42% ( $k=2$ ) by using cryogenic radiometer; The extended uncertainty of the absolute spectral responsivity measurement has been analyzed to be 0.80%~1.02% ( $k=2$ ), other wavelengths can be referenced for analysis. The work realizes the high accuracy calibration of absolute spectral responsivity of long wave infrared detector based on laser source.

**Keywords** Long-wave infrared spectrum; Absolute spectral responsivity; Infrared detector; Cryogenic radiometer

(Received Oct. 1, 2019; accepted Mar. 12, 2020)

## 关于《光谱学与光谱分析》调整审稿费收费标准的通知

尊敬的《光谱学与光谱分析》广大作者、读者：我刊自 2018 年 7 月 1 日以后登记的稿件向投稿作者收取审稿费 200 元/篇，在您投稿之前，为免受经济损失，请您必须考虑：

1. 没有创新的一般性稿件，请您不要投稿。
2. 没有国家级基金资助的稿件，请您不要投稿。
3. 不是光谱专业的稿件，请您不要投稿。
4. 与其他文章重合率超过 10% 的稿件，请您不要投稿。

所投稿件经初审通过后，作者会收到缴纳审稿费的通知。请作者及时从我刊网站 (<http://www.gpxygpx.com>) 查询稿件是否处于交审稿费状态，在收到通知后，请及时缴纳审稿费；如在 10 天之内没有收到您的审稿费，被视为自动放弃，我刊不再受理。交费后我刊开据增值税电子普通发票，并传至作者提供的电子邮箱，作者可自行打印。

联系电话：010-62181070, 62182998

电子邮箱：chngpxygpx@vip.sina.com

感谢您多年来对《光谱学与光谱分析》的支持和厚爱！

《光谱学与光谱分析》期刊社

2018 年 6 月 30 日