

溯源于低温辐射计的 1 064 nm 波段探测器绝对光谱 响应度定标

庞伟伟¹, 郑小兵¹, 李健军¹, 史学舜², 吴浩宇¹, 夏茂鹏¹, 高东阳¹, 史剑民¹, 戚涛¹, 康晴¹

- (1. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘要: 标准传递探测器在红外波段的绝对光谱响应度定标不确定度较大且难以降低, 其主要影响因子是窗口透过率的测量不确定度, 该项因子是由布儒斯特窗口的状态复现引入。给出了陷阱型标准传递探测器在 1 064 nm 波段溯源于低温绝对辐射计的定标实验过程和结果。介绍了低温辐射计新型 Y 型定标光路, 该光路消除了低温辐射计窗口反射损耗引入的不确定性。实验测试了探测器在 1 064 nm 波段的线性、空间响应均匀性、稳定性和空间偏振非敏感性。结果表明: 传递探测器绝对光谱响应度定标的不确定度优于 0.023%, 响应度重复性的实验结果表明了 Y 型低温辐射计定标光路改造的可行性。

关键词: 低温辐射计; 传递探测器; 不确定度; 新型定标光路

中图分类号: O432 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3812-07

Calibration of absolute spectral responsivity at 1 064 nm of transfer detector against cryogenic radiometer

Pang Weiwei¹, Zheng Xiaobing¹, Li Jianjun¹, Shi Xueshun², Wu Haoyu¹, Xia Maopeng¹,
Gao Dongyang¹, Shi Jianmin¹, Qi Tao¹, Kang Qing¹

- (1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qindao 266555, China)

Abstract: The significant uncertainty of absolute spectral responsivity of Standard Transfer Detector in infrared band is difficult to solve, the main factor is measure uncertainty of window transmittance, which is introduced by the state reproduction of Brewster Window. The calibration process and results of Standard Transfer Trap Detector against a Cryogenic Radiometer at 1 064 nm were presented. The novel calibration structure, called Y calibration light path, could effectively eliminate the uncertainty caused by the window reflection loss inside the Cryogenic Radiometer. During the process, the linearity, spatial uniformity, polarization sensitivity and stability of the trap detector at 1 064 nm were measured. It is proved that the Standard Transfer Trap Detector shows a good performance with the uncertainty of

收稿日期: 2015-04-11; 修订日期: 2015-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(61275173, 11204318); 国防技术基础项目(J2920130004, J312013A0001)

作者简介: 庞伟伟(1987-), 男, 博士生, 主要从事高精度系统设计与研究、光学遥感器高精度定标、辐射定标等方面的研究。

Email: earth35@163.com

导师简介: 郑小兵(1969-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学精密测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学、辐射定标等方面的研究。Email: xbzheng@aiofm.ac.cn

absolute responsivity less than 0.023%. The repeatability experimental results show that Y calibration light path reconstruction of cryogenic radiometer is feasible.

Key words: cryogenic radiometer; transfer detector; uncertainty; novel calibration optical path

0 引言

低温绝对辐射计是目前国际上测量光辐射功率最高基准,其系统构成复杂,运行维护条件苛刻,各个国家辐射标准组织及机构都把其作为实验室中的辐射基准使用,并形成以低温辐射计为初级标准、标准探测器为传递标准的辐射标准传递链路^[1-3]。

可见波段溯源于低温辐射计的定标实验技术相对成熟^[4-5],但是在非可见波段,由于光线不可见等因素,绝对精度受到限制,其中重要的影响因素是低温辐射计的窗口。每次传递探测器绝对光谱响应度定标结束之后,需要复现窗口定标时的状态,测试窗口透过率,该项引入较大的不确定度^[6-7]。在宽谱段的绝对响应度定标中,所有窗口状态的复现基本不可能实现,在非可见波段尤其突出。为此,需要消除传统低温辐射计窗口带来的影响,中国科学院安徽光学精密机械研究所将其设计成 Y 型低温辐射计定标光路。

红外 1 064 nm 光辐射的精确探测在激光测距、大气遥感等领域有重要的应用,文中使用低温辐射计 Y

型定标光路对研制的传递探测器在 1 064 nm 波段进行绝对光谱响应度定标,开展传递探测器溯源于低温辐射计的标准传递研究。探测器的绝对响应度受到线性、空间响应均匀性、稳定性和空间偏振非敏感性等因素的影响,文中通过实验对这些因素进行了测试并分别定量评估了它们对绝对响应度的影响。

1 定标实验装置

传递探测器溯源于低温辐射计的定标光路如图 1 所示,以 1 064 nm 单波长激光器作为光源,光束经过起偏器后产生垂直方向的 p 偏振光。第一个激光功率控制器(LPC)初步稳定入射光束的功率。空间滤波器滤除激光光束中夹杂的高阶模以及杂散光,获得纯净的基模光束。基模光束经过第二个 LPC 后,功率会得到进一步的稳定。监视探测器用于监视定标过程中光源的稳定性。定标光束透过布儒斯特窗口进入 Y 型定标光路中,通过精密电机控制低温辐射计和传递探测器分时切入定标光路,实现传递探测器相对于低温辐射计的绝对定标。

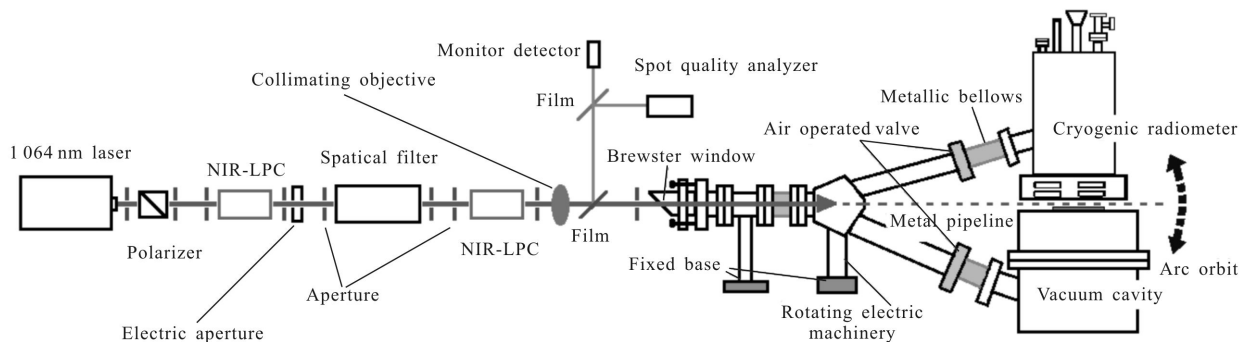


图 1 低温辐射计定标光路

Fig.1 Cryogenic radiometer calibration optical path

1.1 低温辐射计 Y 型定标光路

传统低温辐射计测量激光的绝对功率后,由于要重复拆卸、复现出窗口的定标状态测量其透过率及内部损耗,会引入较大的不确定度,影响激光功率测量的准确度,如表 1 所示^[7]。

从表 1 中可以看出,低温辐射计在对激光功率测量的过程中,布儒斯特窗口引入的不确定度占到

整个激光功率测量不确定度的 85%以上,该项不确定度是由布儒斯特窗口的重复拆卸测量引入。

为消除窗口引入的不确定度,提高定标的精度,中国科学院安徽光学精密机械研究所提出一种 Y 型定标光路的方案。设计方案以激光作为光源,低温辐射计与探测器安装在弧形轨道上,图 2 所示即为低温辐射计 Y 型定标光路系统。系统主要是由以下

4 个部分组成:低温辐射计系统、真空机组、探测器仓、运动控制部件。低温辐射计对入射激光的功率进行绝对测量;真空机组负责对系统抽真空,提供低温辐射计工作的高真空环境;探测器中装有待标定的传递探测器,通过磁流体电机控制其平移;运动控制部分用来切换低温辐射计和探测器仓进入光轴。

表 1 低温辐射计光功率测量不确定度($\times 10^{-4}$)

Tab.1 Uncertainty on measuring the laser power of cryogenic radiometer($\times 10^{-4}$)

Sources	Wavelength/nm						
	488	514	633	676	786	830	944
Electrical power	0.31	0.362	0.389	0.296	0.260	0.174	0.140
Window transmittance	1.525	0.609	1.529	0.437	0.453	0.521	0.520
Receiver absorptance	0.1						
Heating nonequivalence	0.087						
Total uncertainty	1.541	0.652	1.548	0.488	0.539	0.565	0.555
Percent	98.96%	93.40%	98.77%	89.55%	84.04%	92.21%	93.69%

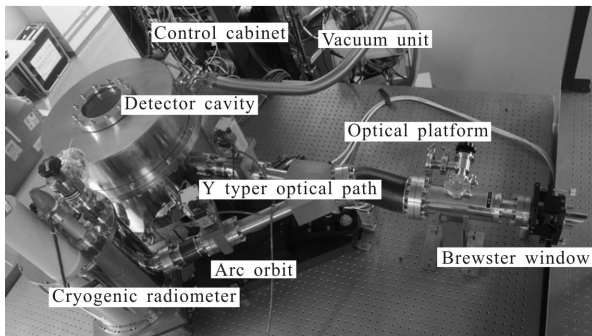


图 2 低温辐射计新型定标系统

Fig.2 Novel calibration system of cryogenic radiometer

低温辐射计测量激光的绝对功率可以用公式(1)计算^[9-10]。

$$P_L = \frac{1}{T} \left(\frac{NP_h}{A} + P_s \right) \quad (1)$$

式中: P_L 为待测量的入射激光功率; T 为低温辐射计窗口透过率; A 为接收腔的吸收率; N 为光加热和电加热等效性因子; P_h 为电加热功率,即低温辐射

计的直接输出值; P_s 为窗口表面反射和内部散射的损耗功率。

传递探测器定标时,探测器直接响应的是 P_L 而低温辐射计直接测量的是透过布儒斯特窗口之后的部分 P_h ,二者并不相同。虽然可以通过测量等效窗口透过率的方法,获得传递探测器接收的绝对光功率大小,但同样需要拆卸窗口,过程繁琐^[12]。

低温辐射计 Y 型定标光路中,低温辐射计和传递探测器分时切换进入定标光路,测量透过窗口后的激光功率。在传递标准探测器的前端安装有内径 6 mm 的光阑筒,此光阑筒内径与低温辐射计的接收腔相同,杂散光对二者的影响也相同。低温辐射计和传递探测器接收到的都是透过布儒斯特窗口的激光功率,其功率相同数值可以使用公式(2)进行计算。

$$P_L' = \frac{NP_h}{A} \quad (2)$$

1.2 标准传递探测器

传递探测器使用三片反射式陷阱结构,如图 3 所示。3 个光电二极管均为 Hamamatsu S1337-1010BQ 无窗器件,光敏面为直径 10 mm。3 个二极管在电路上并联,陷阱结构产生的总光电流经过前置放大器转换为电压输出。

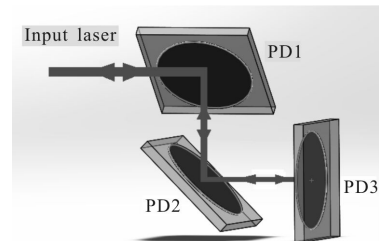


图 3 三片反射式陷阱结构几何图示

Fig.3 Geometry of 3-photodiode reflection trap detector

三片反射式陷阱结构中,入射光经过 5 次反射极大地提高了光电二极管的光电转换效率和探测器的灵敏度,同时降低入射光的反射损耗。由于第 1 和第 2 个二极管的入射角度相同、入射面相互垂直,第 3 个二极管正入射,保证了探测器对入射光的偏振状态是非敏感的。

1.3 光路调节结果

为评价定标光路中光束的质量,使用激光光斑质量分析仪对定标光束进行测量,图 4 所示即为获取的定标光斑质量及光路稳定性。可以看出获取的

光斑直径在 500 μm 左右,如图 4(a)所示;在相互垂直的两个方向上与理论高斯光束的相关性已经达到 93%和 97%,如图 4(b)、(c)所示;光路的稳定性使用陷阱探测器进行测量,结果显示在 90 min 内光路稳定性的测量不确定度为 0.002 6%左右。

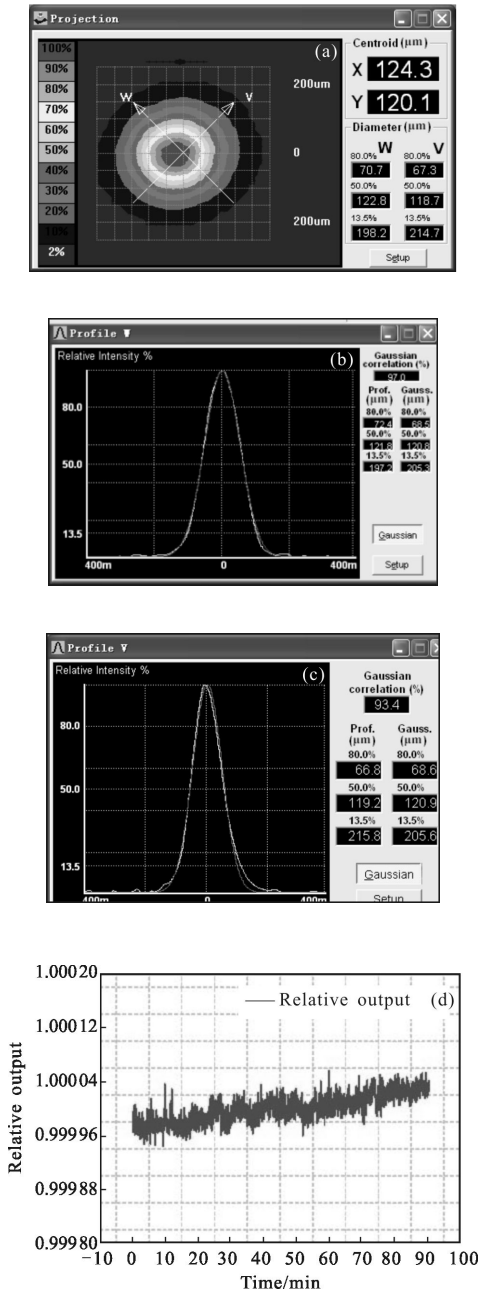


图 4 定标光斑质量及其稳定性

Fig.4 Stability and spot size of laser beam

2 探测器特性测试

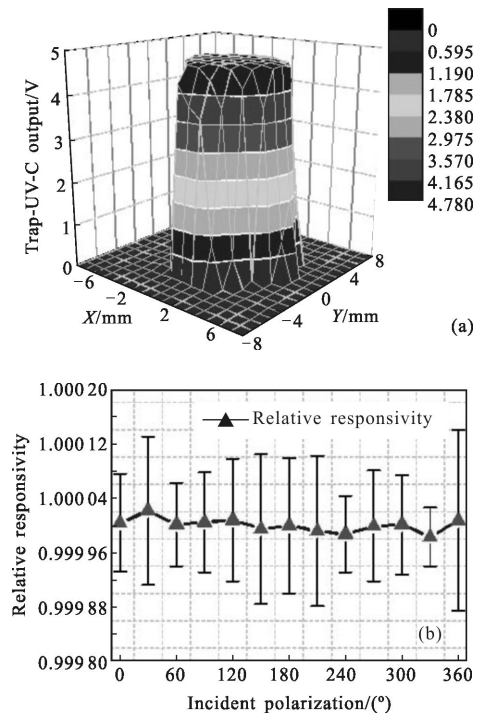
为了评价探测器性能,对研制的传递探测器进

行了整体评价,分别就探测器的空间均匀性、稳定性、线性度等进行了测量分析。

空间非均匀性测量时,使用波长为 1 064 nm 激光光源分别进行稳定、消除高阶模式及杂散光。调整激光光斑直径为 500 μm 左右,以入射角度 0°的条件下垂直入射在探测器入口,按照步长 1 mm 的间隔在 X、Y 方向进行网格扫描,测量了传递探测器的均匀性。以有效(光斑完全落在光敏面内)网格上各点测值的相对标准偏差作为响应的空间非均匀性不确定度,计算探测器响应面中心区域 5 mm×5 mm 的非均匀性不确定度为 0.010 2%,扫描结果如图 5(a)所示。

探测器偏振非敏感性测试方法和装置基本与空间均匀性的相同,唯一的区别是采用旋转台取代二维平移台,使探测器相对于入射光轴 360°旋转,每隔 30°测量其输出电压,即可确定其响应随入射光束偏振状态的变化。在使用波长为 1 064 nm 入射角度 0°的条件下,测量传递探测器的偏振非敏感性不确定度为 0.000 978%,测试结果如 5(b)所示。

根据叠加法测量原理,在激光波长为 1 064 nm、入射角度 0°的测量条件下,测量了传递探测器的线性。功率测量范围为 50~160 μW,测量结果如图 5(c)所示。可以看出:探测器的线性度均在 0.01%,相应的不确定度为 0.002 79%。



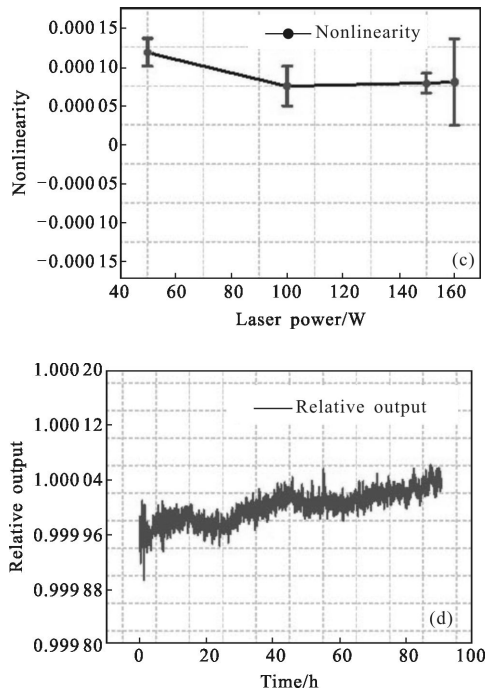


图 5 传递探测器特性

Fig.5 Characteristics of transfer detector

在暗室环境下, 经过充分预热后对待定标探测器进行连续 9 h 的数据采集, 计算采集数据的均值、标准差及相对标准差, 作为探测器非线性的数据源。测得结果如图 5(d) 所示。计算结果显示, 探测器的稳定性均方根起伏为 0.002 24%。

3 定标实验结果不确定度分析

使用低温辐射计定标标准探测器的绝对光谱响应度时, 在综合考虑传递探测器的自身特性后, 其绝对光谱响应度可以使用公式(3)进行计算^[11]:

$$R=U \cdot p \cdot N_L \cdot C \cdot \frac{V}{P_L'} \quad (3)$$

式中: R 为探测器的响应率; U 为光敏面上的响应均匀性因子; p 为偏振敏感性因子; N_L 为响应的线性; C 为稳定性; V 为实测探测器的输出电压; P_L' 为入射激光功率。依据探测器的光谱响应率计算公式(3)可以看出, 传递探测器的定标不确定度主要来源有 3 个方面, 分别是: (1) 探测器本身特性引入的不确定度已在上述论述中进行分析; (2) 激光功率测量的不确定度; (3) 测量环境、仪器及操作引入的不确定度。

3.1 激光功率测量的不确定度(A 类评定方法)

由公式(2)可知: 低温辐射计新结构测量激光绝对功率时, 激光功率 P_L' 的不确定度来源主要有 3 项, 分别是: (1) 等效电加热不确定度 u_N ; (2) 腔体吸收不确定度 u_A ; (3) 电加热功率测量不确定度 u_{P_h} 。根据不确定度传递规律, 低温辐射计测量激光绝对功率的联合不确定度可以进行如下计算^[12]:

(1) 联合不确定度的平方:

$$u_{P_L'}^2 = \left(\frac{P_h}{A}\right)^2 u_N^2 + \left(\frac{NP_h}{A^2}\right)^2 u_A^2 + \left(\frac{N}{A}\right)^2 u_{P_h}^2 \quad (4)$$

(2) 相对不确定度:

$$u_{r_{P_L'}} = u_{P_L'} / P_L' = \sqrt{\frac{1}{N^2} u_N^2 + \frac{1}{A^2} u_A^2 + \frac{1}{P_h^2} u_{P_h}^2} = \sqrt{u_{r_N}^2 + u_{r_A}^2 + u_{r_{P_h}}^2} \quad (5)$$

使用 1 064 nm 波段单波长激光器, 测量了 4 次的激光功率, 按照公式(5)的不确定度合成算法, 计算激光绝对功率测量不确定度, 表 2 给出了在 1 064 nm 条件下激光绝对功率的不确定度。取表 2 中最大的不确定度值作为此次实验的不确定度, 那么此次辐射标准传递实验中, 激光功率的测量不确定度值不会大于 0.009 68%。

表 2 低温辐射计测量激光不确定度($\times 10^{-4}$)

Tab.2 Laser uncertainty measure using cryogenic radiometer($\times 10^{-4}$)

Source	Power/ μ W			
	31	33	34	31
Electrical power	0.907 3	0.789 7	0.803 2	0.961 1
Receiver absorptance		0.1		
Heating nonequivalence		0.051 95		
Total uncertainty	0.910 7	0.797 7	0.811 1	0.967 7

3.2 测量环境、仪器及操作引入的不确定度

(B 类评定方法)

为验证定标结果的可靠性, 对传递探测器分别在不同时间进行绝对光谱响应度进行定标实验, 表 3 为传递探测器 4 次重复测量结果, 其相对标准差为 1.67×10^{-4} 。

表 3 传递探测器 4 次重复性测量

Tab.3 Measure repeatability of transfer detector for 4 times

Date	Power/ μw	Responsivity/ $\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$
May 21st	31	0.2992
	33	0.2991
	34	0.2991
May 22st	31	0.2991
Relative standard deviation	-	1.67E-4

3.3 不确定度合成

依据不确定度合成规范,标准传递探测器定标结果的联合标准不确定度计算过程如下:

$$u^2(R) = \left(\frac{\partial R}{\partial U}\right)^2 u^2(U) + \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)^2 u^2(P) + \left(\frac{\partial R}{\partial N}\right)^2 u^2(N) + \left(\frac{\partial R}{\partial C}\right)^2 u^2(C) + \left(\frac{\partial R}{\partial V}\right)^2 u^2(V) + \left(\frac{\partial R}{\partial P_L'}\right)^2 u^2(P_L')$$

$$\frac{u^2(R)}{R^2} = \frac{u^2(U)}{U^2} + \frac{u^2(P)}{P^2} + \frac{u^2(N)}{N^2} + \frac{u^2(C)}{C^2} + \frac{u^2(V)}{V^2} + \frac{u^2(P_L)}{P_L^2}$$

$$u_r(R) = \sqrt{u_r^2(U) + u_r^2(P) + u_r^2(N) + u_r^2(C) + u_r^2(V) + u_r^2(P_L)} \quad (6)$$

辐射初级标准传递系统内部的杂散光、温度漂移、数据采集误差等的不确定度包含在 $u_r^2(V)$ 项中。表 4 列出了传递探测器的各项不确定度因子,并计算出联合不确定度,计算结果显示,传递探测器在 1 064 nm 的定标不确定度为 0.022 5%。

表 4 传递探测器测量不确定度($\times 10^{-4}$)

Tab.4 Uncertainty of absolute responsivity of transfer detector($\times 10^{-4}$)

Source	Value
Laser power	0.968
Linearity	0.279
Spatial uniformity	1.02
Polarization sensitivity	0.0978
Stability	0.224
Repeatability	1.67
Output V	0.295
Total uncertainty($k=1$)	2.25

4 结 论

实验测量了传递探测器的各项特性,并使用基于低温辐射计 Y 型光路系统对传递探测器进行了绝对光谱响应率定标,在综合各项因子的不确定度之后,标准传递探测器的联合不确定度为 2.25×10^{-4} ,降低了标准传递探测器在 1 064 nm 波段定标的不确定度。传递探测器在不同时间内 4 次重复测量的相对标准差为 1.67×10^{-4} ,验证了新型辐射标准传递系统的稳定性和可靠性。

参考文献:

[1] Eppeldauer G P, Yoon H W, Zeng J, et al. Extension of the NIST spectral power-responsivity calibration service to 2 500 nm[J]. *Metrologia*, 2012, 49: 112-114.

[2] Fehlmannl A, Schmutz GKopp W, Winkler R, et al. Fourth World Radiometric Reference to SI radiometric scale comparison and implications for on-orbit measurements of the total solar irradiance[J]. *Metrologia*, 2012, 49(2): 34-38.

[3] Zhang Jianmin, Lin Yandong, Shao Jing, et al. A standard facility for spectral response measurement of silicon photodiodes[J]. *Metrologia*, 1998, 19(3): 194-198. (in Chinese) 张建民, 林延东, 邵晶, 等. 硅光电探测器光谱响应度测量标准装置[J]. 计量学报, 1998, 19(3): 194-198.

[4] Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping, et al. Calibration and standard transfer method of high precision optical radiation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(12): 1341-1344. (in Chinese) 郑小兵, 吴浩宇, 章骏平, 等. 高精度光辐射定标和标准传递方法[J]. 科学通报, 2000, 45(12): 1341-1344.

[5] Li Jianjun, Shi Xueshun, Zheng Xiaobing, et al. Research of domestic comparison experiment of cryogenic radiometer[J]. *Science China*, 2011, 41(6): 749-755. (in Chinese) 李健军, 史学舜, 郑小兵, 等. 低温绝对辐射计国内比对实验研究[J]. 中国科学, 2011, 41(6): 749-755.

[6] Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping, et al. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035%[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(6): 749-752. (in Chinese) 郑小兵, 吴浩宇, 章骏平, 等. 不确定度优于 0.035% 的绝对光谱响应率标准探测器[J]. 光学学报, 2001, 21(6): 749-752.

[7] Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Lu Yunjun, et al. Accurate calibration of the spectral responsivity of silicon trap

- detectors between 350 nm and 1 064 nm[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2009, 58(9): 6273–6278. (in Chinese)
- 李健军, 郑小兵, 卢云君, 等. 硅陷阱探测器在 350~1 064 nm 波段的绝对光谱响应度定标 [J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6273–6278.
- [8] Ingmar Muller, Uwe Johannsen, Ulrike Linke, et al. Predictable quantum efficient detector:II. Characterization and confirmed responsivity[J]. *Metrologia*, 2013, 50(4): 395–401.
- [9] Foukal P V, Kochling H, Miller P. Cryogenic absolute radiometer as laboratory irradiance standards, remote sensing detectors and pyroheliometers [J]. *Appl Opt*, 1990, 29 (7): 988–993.
- [10] Gentile T R, Houston J M, Hardis J E, et al. The NIST high accuracy cryogenic radiometer [J]. *Appl Opt*, 1996, 35 (7): 1056–1068.
- [11] Li Shuang. The continuous spectral radiometric calibration at a wide spectrum based on cryogenic radiometer [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics (AIOFM), Chinese Academy of Sciences(CAS), 2006. (in Chinese)
- 李双. 基于低温辐射计的宽谱段连续光谱辐射定标技术研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2006.
- [12] Taylor B N, Kuyatt C E. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results [Z]. NIST Technical Note 1297, 1994.