

低温绝对辐射计不同定标光路的比对实验

庞伟伟¹, 郑小兵¹, 李健军¹, 史学舜², 吴浩宇¹, 刘昌明², 刘玉龙², 夏茂鹏¹, 高东阳¹,
史剑民¹, 康 晴¹, 戚 涛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: 低温辐射计是当前光辐射功率计量的最高标准, 其测量精度的评价可以通过不同低温辐射计之间的比对来完成。开展了不同定标光路的低温辐射计比对实验。实验采用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的陷阱探测器作为传递标准, 在 633 nm 波段对传递探测器的光谱响应度进行了绝对标定。比对结果表明, 传递探测器的绝对光谱响应度的测量一致性为 3.6×10^{-3} , 定标总合成不确定度为 3.3×10^{-4} ($k=1$), 实验结果验证了两家单位低温绝对辐射计定标系统的可靠性和高精度。

关键词: 低温辐射计; 比对实验; 传递探测器; 新型定标光路

中图分类号: O432 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0317004

Comparison experiment of cryogenic radiometer of different calibration optical path

Pang Weiwei¹, Zheng Xiaobing¹, Li Jianjun¹, Shi Xueshun², Wu Haoyu¹, Liu Changming²,
Liu Yulong², Xia Maopeng¹, Gao Dongyang¹, Shi Jianming¹, Kang Qing¹, Qi Tao¹

(1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China)

Abstract: Cryogenic radiometer currently is used as the supreme standard for the measurement of light power, whose accuracy evaluation can be acquired through the results between different cryogenic radiometer equipment. With trap detector serving the transfer standard and the calibration optical path in cryogenic radiometer being distinct, a comparison experiment was carried out between two equipments for the first time in China. The absolute spectral responsivity of transfer standard was calibrated at 633 nm wavelength. The results show that the consistence of absolute spectral responsivity is 3.6×10^{-3} and the combined uncertainty is 3.3×10^{-4} ($k=1$). It is proved that the two cryogenic radiometer equipments are of high reliability and accuracy.

Key words: cryogenic radiometer; comparison experiment; transfer detector; novel calibration schema

收稿日期: 2015-07-09; 修订日期: 2015-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(61275173, 11204318); 国防技术基础(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, 研究员, 博士生导师, 博士, 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: xzheng@aiofm.ac.cn

0 引言

在空间对地观测技术的强大需求下,高精度光辐射的计量能力在低温绝对辐射计出现后得到了长足的发展。低温辐射计为当前光辐射功率计量领域的最高标准^[1-2],可以实现宽谱段范围内的光辐射功率的最准确测量。低温辐射计系统构成复杂、运行维护条件要求苛刻,当前一般作为实验室内的初级辐射基准^[3-5],为验证其定标能力,可通过低温辐射计之间的相互比对来完成。

低温辐射计之间的比对分为两种方式:直接比对和间接比对^[6]。直接比对是使用不同低温辐射计对同一条定标光路进行绝对功率计量,需要把不同实验室内的低温辐射计移动至同一个实验室内来实现比对实验,低温辐射计包含初级标准固有的缺陷,移动不便,此种比对形式不太可能实现。间接比对是使用标准传递探测器通过测量同一物理量,间接地实现低温辐射计之间的比对实验。采用间接比对手段,在国际计量局的组织下,各主要国家的标准实验室之间已经开展过几次比对实验,其中规模最大的是 1996~1999 年期间 17 个国家参与的国际比对实验^[7]。2010 年,中国科学院安徽光学精密机械研究所(以下简称:中科院安徽光机所)与中国电子科技集团公司第四十一研究所(以下简称:中电第四十一研究所)首次在中国国内完成低温辐射计的比对实验,相互验证了各自低温辐射计系统的定标能力^[8]。

受限于低温辐射计结构的限制,在传递探测器绝对光谱响应度定标的过程中,需要拆卸低温辐射计的布儒斯特窗口,测量窗口透过率,该项操作会引入较大的不确定度。为消除窗口对定标结果带来的影响,中科院安徽光机所将其设计成 Y 型低温辐射计定标光路,如图 1 所示。该系统中低温辐射计和标准传递探测器安置在可控同心弧形轨道上,二者可以分时切入定标光路,实现标准传递探测器相对于低温辐射计的绝对光谱响应度定标。低温辐射计 Y 型定标光路可以避免定标结束后复现窗口状态引入的不确定度,减少工作量,提高定标精度。

Y 型低温辐射计定标光路主要由低温辐射计主机、探测器仓、Y 型光路通道、运动控制部件及真空机组组成。低温辐射计是该系统的核心部件,测量定标光路的绝对功率,定标精度优于 1×10^{-4} 。探测器仓内径为 $\Phi 500$ mm、高度 400 mm,配备抽泄气阀门和

电气连接芯座;内置平移台采用磁流体密封方式,待标定的传递探测器安装在平移导轨上,移动距离大于 150mm。Y 型光路通道的主光路通道采用 $\phi 8.5$ mm \times 2.5 mm 不锈钢管,摆动光路通道采用 $\phi 50.8$ mm \times 1.55 mm 不锈钢管;光路通道安装有抽空阀门、真空规管、波纹管、三角阀及真空闸板。低温辐射计和探测器仓固定在运动部件上,真空管路配三角阀以及波纹管柔性管路,在不破坏系统环境情况下,能够切换低温辐射计和探测器仓进入定标光路。采用真空机组对 Y 型光路通道、探测器仓、低温辐射计进行抽真空,提供低温辐射计工作的高真空环境。系统的详细组成及参数请参阅参考文献[9]。

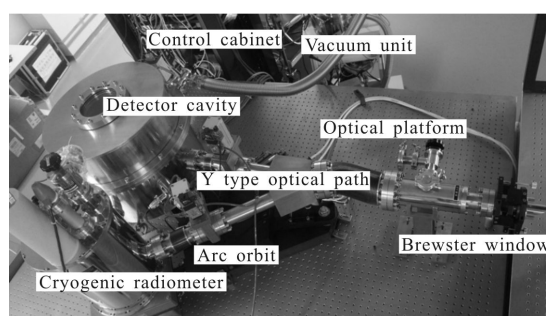


图 1 低温辐射计新型定标系统

Fig.1 Novel calibration system of cryogenic radiometer

表 1 中列出了两家低温辐射计主机的主要参
表 1 中科院安徽光机所与中电第四十一研究所低温绝对辐射计主机技术指标

Tab.1 Technique parameter comparison of cryogenic radiometer between AIOFM and 41st Institute of CETC

Technical specifications	AIOFM	41st institute of CETC
Instrument model	Cryorad II	MCR
Spectrum	0.25–50 μ m	0.25–50 μ m
Receiver response	2 K \cdot mW ⁻¹	1.2 K \cdot mW ⁻¹
Dynamic range	Max to 0.25 mW	Max to 2 mW
Absolute accuracy	$\pm 0.005\%$	$\pm 0.005\%$
Receiver absorptance	>0.999 98(632.8 nm)	>0.999 9(200–2 000 nm)
Refrigeration mode	Liquid nitrogen Liquid helium	Mechanical refrigeration Liquid helium
Calibration structure	Y type	–
Demount Brewster window	No	Yes

数^[8]。实验采用间接比对的方法,使用中科院安徽光机所研制的三片反射式陷阱探测器作为传递标准。两家单位分别于 2013 年 11 月和 2014 年 5 月对传递探测器完成在 633 nm 波段的绝对光谱响应度定标。

通过比较两单位对传递探测器在相同波段绝对光谱响应度之间的差值,可以评价两家单位的低温辐射计定标能力。文中详细介绍此次比对实验的实验装置、详细参数、比对定标结果及相应不确定度分析。

1 比对实验

1.1 中电第四十一研究所绝对定标实验

中电第四十一研究所在 2013 年 11 月开展了低温辐射计定标实验,中科院安徽光机所技术人员携带传递探测器参与比对。实验定标光路如图 2 所示,在紫外至红外波段采用多个单波长的激光器作为光源,激光器安装在可移动的直线导轨上,根据需求分

时切换进入主定标光路。伴随激光器切入定标光路的还有相应的激光功率控制器(LPC)以及空间滤波器,这两个部件对波长具有选择性,负责光路功率的稳定和光斑的纯净,两部分的切换动作均由精密电机控制,确保复位的高精度。

实验开始前对整个系统进行联调,中电第四十一研究所的低温辐射计系统自带四象限光束位置探测器(图 2 中未标注),联调过程中,微调低温辐射计的窗口,使进入到四象限探测器的杂散光达到最小值,此时光全部落到低温辐射计的接收腔。联调结束,待系统稳定,即可以进行传递探测器绝对光谱响应度定标实验。低温辐射计的参数是在实验开始前进行设定,在整个定标过程中低温辐射计软件自动测量透过布儒斯特窗口后的激光功率,然后根据设定值计算定标光路的功率。待低温辐射计测量完毕后,安置在低温辐射计前端的传递探测器平移切入定标光路,响应定标光路的辐射功率。

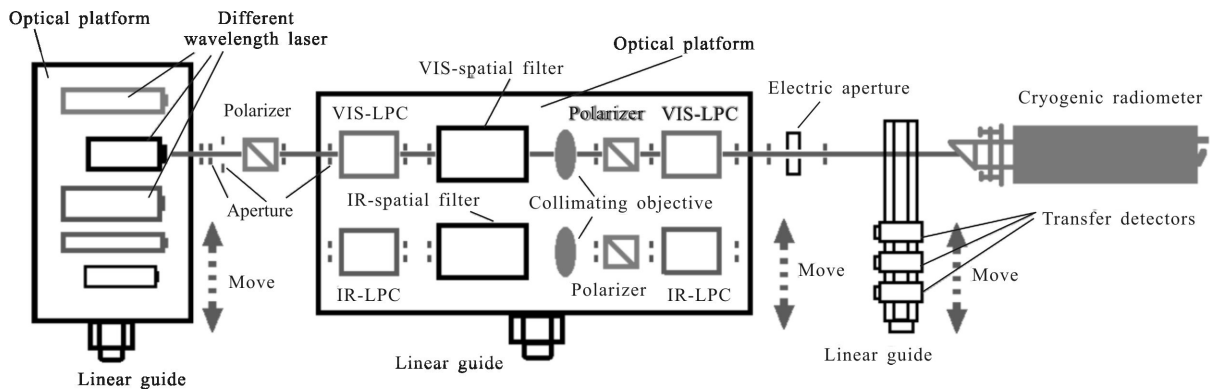


图 2 中电第四十一研究所陷阱探测器绝对光谱响应度定标系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of absolute spectral responsivity calibration of transfer detector in the 41st of CETC

VIS: visible. IR-LPC: infrared laser power controller. VIS-LPC: visible laser power controller. IR-LPC: infrared laser power controller.

1.2 中科院安徽光机所 Y 型定标光路定标实验

中科院安徽光机所 Y 型定标光路以激光作为光源,定标光路如图 3 所示。激光为线偏振光输出,经过起偏器后产生垂直方向的 p 偏振光。经过第一个激光功率控制器光束的功率获得初步稳定。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激光功率控制器后,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。

稳定而洁净的光源是标准传递的前提和保障。

低温辐射计接收腔的入口直径为 6 mm,为确保定标光束能完整地进入接收腔内部,使用激光光束轮廓仪对定标光束进行光斑面积及高阶模滤除检查。图 4(a)为光斑面积,可以看出光斑直径在 300 μm 左右,完全可以进入接收腔内部。图 4(b)、4(c)中显示的是定标光束在 W 及 V 两个垂直方向上的高阶模滤除情况,可以看出两个方向上的爱里斑曲线与非涅尔衍射理论上的高斯曲线吻合度达到了 94% 及 95% 以上。图 4(d)为光束的稳定性,使用陷阱探测器对定标光路进行连续测量 90 min,光路的不稳定性为 0.002 72%。

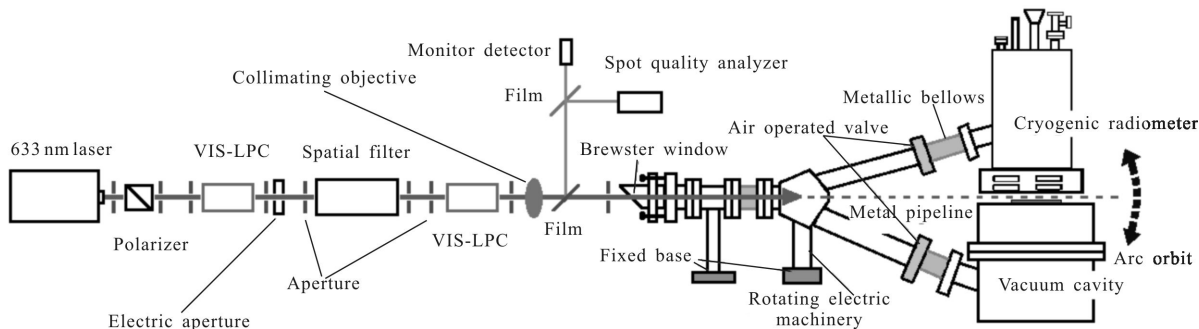


图 3 低温辐射计定标光路

Fig.3 Cryogenic radiometer calibration optical path

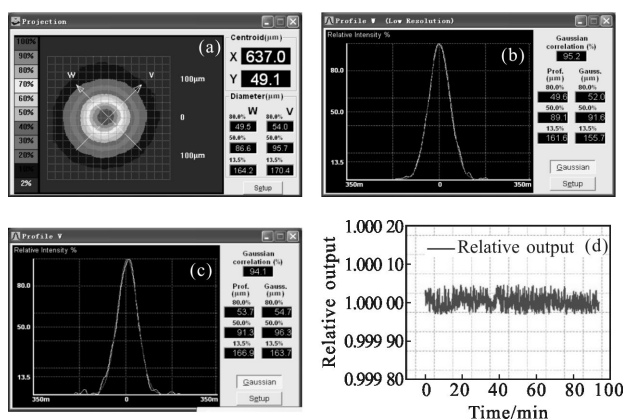


图 4 定标光斑质量及其稳定性

Fig.4 Spot quality and stability of laser beam

安装传递探测器前需确保探测器仓支路的阀门处于关闭状态,然后对探测器仓通以 0.999 99%的高纯氮气,待仓内压强升高至大气压强时,开启探测器仓门安装传递探测器。更换完成后,单独对探测器仓进行抽真空,当探测器仓和 Y 型光路的压强相近时,打开阀门,待系统稳定后进行定标实验。待定标探测器安置在探测器仓内的滑动导轨上,如图 5 所示,导轨可带动传递探测器平移切入定标光路。

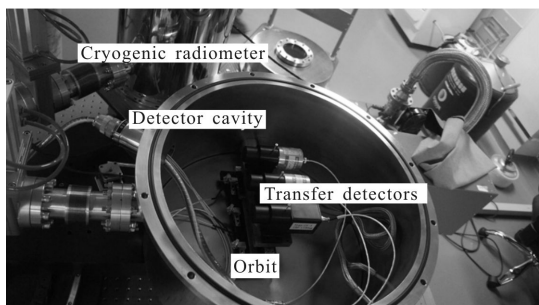


图 5 真空仓内安装的传递探测器

Fig.5 Transfer detectors in the detector cavity

2 比对结果及不确定度分析

2.1 传递探测器绝对光谱响应度对比

两家单位的实验均在十万级洁净室内开展,实验室内部采用恒温恒湿控制。此次比对实验期间,实验室温度控制在 $22 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度控制在 $30 \pm 2\%$ 。传递探测器绝对光谱响应度使用公式(1)进行计算^[8]。

$$R(\lambda) = \frac{V_S - V_B}{P} \quad (1)$$

式中: $R(\lambda)$ 为传递探测器的绝对光谱响应度; V_S 为探测器的信号电压; V_B 为探测器的背景; P 为进入传递探测器的辐射通量。

2.1.1 中科院安徽光机所的传递探测器绝对光谱响应度计算

中科院安徽光机所的 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,测量透过布儒斯特窗口的激光功率。传递标准探测器的前端安装有内径为 6 mm 的光阑筒,此光阑筒内径与低温辐射计的接收腔内径相同,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相同的激光功率,其数值可以用 P_L' 表示:

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

计算入射激光功率时,只需要测量低温辐射计的非等效性因子 N , A 值为接收腔的吸收率,由低温辐射计的出厂定标报告给出, P_h 为低温辐射计的输出值。使用新型定标光路,传递探测器的绝对光谱响应度 $R(\lambda)$ 可以使用公式(3)进行计算:

$$R(\lambda) = \frac{V_S - V_B}{P} = \frac{V_S - V_B}{P_L'} = \frac{V_S - V_B}{\left(\frac{NP_h}{A}\right)} = \frac{A(V_S - V_B)}{NP_h} \quad (3)$$

2.1.2 中电第四十一研究所的传递探测器绝对光谱响应度计算

中电第四十一研究所使用传统的低温辐射计系统测量定标光路的辐射通量,依据低温辐射计的工作原理,其激光通量的测量原理可以用公式(4)表示:

$$P_L = \frac{1}{T} \left(\frac{NP_h}{A} + P_s \right) \quad (4)$$

式中: P_L 为入射激光绝对功率; T 为布儒斯特窗口的透过率; 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; P_s 为窗口表面反射和内部散射的损耗功率。透过率 T 及损耗 P_s 需要在低温辐射计绝对定标传递探测器结束之后,拆下布儒斯特窗口复现出定标时的状态进行测量获取。中电第四十一研究所的低温辐射计软件依据上述方程及参数设置,在每次测量结束后自动计算入射激光功率 P_L 。此时,传递探测器绝对光谱响应度可由公式(5)进行计算:

$$R(\lambda) = \frac{V_s - V_B}{P} = \frac{V_s - V_B}{P_L} = \frac{V_s - V_B}{\left(\frac{1}{T} \left(\frac{NP_h}{A} + P_s \right) \right)} = \frac{AT(V_s - V_B)}{NP_h + AP_s} \quad (5)$$

定标结束后依据各自的计算方程,可以得到传递探测器的绝对光谱响应度,计算结果分别列于表 2 中。

表 2 两家单位定标获得的传递探测器绝对响应度对比
Tab.2 Comparison of absolute spectral responsivity of transfer detector between two units

Wavelength	Absolute spectral responsivity of transfer detector/A·W ⁻¹	
	41st of CETC	AIOFM
633 nm	0.506 3	0.504 5

定义一致性因子 K 来表示低温辐射计系统对传递探测器绝对响应度定标的差异,计算公式如方程(6)所示。

$$K = \frac{R_1 - R_2}{(R_1 + R_2)/2} \quad (6)$$

式中: R_1 为传递探测器在中电第四十一研究所标定的绝对光谱响应度; R_2 为传递探测器在中科院安徽光机所标定的绝对光谱响应度。依据公式(6)可计算出两家单位对传递探测绝对光谱响应度定标的一致性为 3.6×10^{-3} 。

2.2 定标不确定度分析

两单位低温辐射计定标传递探测器的不确定度

分别用表 3 和 4 表示。其中传递探测器的各定标不确定度值是根据各不确定度成分的相对标准偏差来表示;合成不确定度用各不确定度因子的均方根和来表示^[10]。

表 3 中电第四十一研究所低温绝对辐射计在 633 nm 波段的绝对光谱响应度不确定度成分表

Tab.3 Uncertainty component of absolute spectral responsivity at 633 nm wavelengths in the 41st Institute of CETC

Source	Uncertainty
Optical power measurement	0.032 534%
Detector calibration	0.000 500%
Detector drift	0.000 500%
Amplifier calibration	0.010 000%
Amplifier drift	0.001 000%
Laser stability	0.005 000%
Positional reproducibility	0.005 000%
Measurement repeatability	0.015 808%
Total uncertainty	0.023 9%

表 4 中科院安徽光机所低温绝对辐射计在 633 nm 波段的绝对光谱响应度不确定度成分表

Tab.4 Uncertainty component of absolute spectral responsivity at 633 nm wavelengths in AIOFM

Source	Uncertainty
Electrical power	0.00 671%
Receiver absorptance	0.001%
Heating nonequivalence	0.000 519 5%
Output	0.000 244%
Spatial uniformity	0.019 9%
Linearity	0.004 34%
Stability	0.006 87%
Polarization sensitivity	0.004 92%
Repeatability	0.002 906 57%
Total uncertainty (k=1)	0.023 08%

2.3 比对的总定标不确定度合成

按照目前使用的比对方法^[11],参加比对双方在传递探测器的绝对光谱响应度总合成不确定度可以

使用公式(7)计算:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (7)$$

式中: u_A 为在中科院安徽光机所测量的不确定度; u_B 为在中电第四十一研究所测量的不确定度。由表 3 及表 4 的数据可以计算出传递探测器在 633 nm 波段的绝对光谱响应度测量的总合成不确定度为 0.033 22%。

3 结 论

报道了低温辐射计新型定标光路和传统定标系统的比对实验。实验采用陷阱探测器作为传递标准,分别在两家单位对传递探测器在 633 nm 波段进行绝对光谱响应度表征。实验结果显示,传递探测器绝对光谱响应度定标的一致性为 3.6×10^{-3} , 总合成不确定度为 3.3×10^{-4} 。国内的低温辐射计比对实验规程目前尚不完善,各比对单位应使用专用的比对探测器,统一不确定度评定方法。此次比对实验,探测器的响应度定标存在一定的差异,希望通过三方的比对实验对此作进一步的探讨。

参考文献:

[1] Hoyt C, Foukal P. Cryogenic radiometer and their application to the metrology[J]. *Metrologia*, 1991, 28(3): 163-167.
 [2] Gentile T J Houston, Hardis J, Cromer C, et al. The NIST high accuracy cryogenic radiometer[J]. *Applied Optics*, 1996,

35(7): 1056-1068.
 [3] 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: S112-S114.
 [4] Fehlmann A, Kopp G, Schmutz W, 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: S34-S38.
 [5] 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.
 [6] Kohler R, Goebel R, Pello R. Experimental procedures for the comparison of cryogenic radiometers at the highest accuracy[J]. *Metrologia*, 1996, 33(5): 549-554.
 [7] Goebel R, Stock M, Kohler R. Report on the international comparison of cryogenic radiometers based on the transfer detectors[R/OL]. [2000-09-11]. <http://www.bipm.org>.
 [8] 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)
 [9] Pang Weiwei, Zheng Xiaobing, Li Jianjun, et al. Novel calibration optical path of cryogenic radiometer [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(5): 051201-1-051201-5.
 [10] Taylor B N, Kuyatt C E. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results [J/OL]. [2013-11-12]. <http://physics.nist.gov/pubs/guidelines>.
 [11] Goebel R, Stock M. Final report on the subsequent bilateral comparison of cryogenic radiometers (BIPM-IEN)[R]. Paris: International Bureau of Weights and Measures, 2003.