

绝对辐射计溯源至低温辐射计实验测试

张俊超*, 徐楠, 许宁, 孟海凤, 刘文德, 蔡川, 张碧丰, 满帅, 王萌, 李因亮, 熊利民

中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100029

摘要 开展了绝对辐射计溯源至低温辐射计的计量技术研究。选用激光作为光源, 采用光斑非全覆盖绝对辐射计接收面的辐射功率模式进行校准实验。利用溯源至低温辐射计的陷阱探测器作为标准器定标激光器功率, 然后通过替代法将量值传递至绝对辐射计。通过绝对辐射计光阑面积校准, 实现激光功率与绝对辐射计测量辐照度的转化。通过对陷阱探测器的校准、绝对辐射计锥腔不同位置空间响应均匀性、锥腔的波长选择性等特性的分析, 对实验所用绝对辐射计校准不确定度进行了详细评估, 得到的校准不确定度为 0.86% (包含因子 $k=2$)。

关键词 测量; 绝对辐射计; 低温辐射计; 量值溯源; 测量不确定度

中图分类号 TB96

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0512006

Experimental Study on Traceability of Absolute Radiometer to Cryogenic Radiometer

Zhang Junchao*, Xu Nan, Xu Ning, Meng Haifeng, Liu Wende, Cai Chuan, Zhang Bifeng, Man Shuai, Wang Meng, Li Yinliang, Xiong Limin

Division of Metrology in Optics and Laser, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Abstract Metrological technique for traceability of an absolute radiometer to a cryogenic radiometer is studied. With laser as the light source, a calibration experiment is implemented in the radiation power mode in which the light spot does not fully cover the receiving plane of the absolute radiometer. The trap detector traceable to the cryogenic radiometer is used as the etalon to calibrate the laser, and the value is transferred to the absolute radiometer by substitution. The conversion from laser power to irradiance measured by the absolute radiometer is achieved by calibrating the aperture area of the absolute radiometer. The calibration uncertainty of the absolute radiometer used in the experiment is evaluated in detail by analyzing the calibration of the trap detector, the spatial response uniformity at different positions of the conical cavity in the absolute radiometer, and the wavelength selectivity of the cavity. The calibration uncertainty obtained is 0.86% (coverage factor $k=2$).

Key words measurement; absolute radiometer; cryogenic radiometer; quantity traceability; measurement uncertainty

1 引言

太阳辐照度的准确测量对研究全球气候变化、进行太阳能资源评估具有重要的意义, 太阳辐照度也是航空航天和光伏发电等太阳能利用方面的关键技术参数。

世界辐射中心(WRC)通过绝对辐射计的比

对, 建立了世界标准(辐射计)组(WSG), 通过加权平均的方式建立了世界辐射基准(WRR)^[1-2], 其太阳辐照度测量不确定度为 0.3%^[3]。太阳辐照度的量值通过 IEC 60904-4 所述的方式溯源至世界辐射基准^[4-5]。WRC 为了传播 WRR 的量值, 每 5 年进行一次绝对辐射计的国际比对, 以确保世界范围内辐射测量值的一致性。

收稿日期: 2021-08-17; 修回日期: 2021-09-09; 录用日期: 2021-09-26

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1500900)

通信作者: *zhangjc@nim.ac.cn

基于低温超导和真空技术的低温辐射计相对于常规绝对辐射计具有更高的测量准确性和更低的测量不确定度。在低温下用超导材料制作电加热引线可减小导线电阻对电替代过程中损耗的影响,真空环境可减小热辐射对测量结果的影响,测量不确定度较常温辐射计低 1 个数量级。因此,英国国家物理实验室(NPL)等开展了 WRR 与低温辐射计的对比研究^[6-9]。

国内,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所所在绝对辐射计的研制及太阳辐射测量方面进行了大量研究^[10-12],多次参加绝对辐射计的国际比对,其两台绝对辐射计在 WRC 用于保存和传递 WRR 量值。中国气象局气象探测中心在太阳辐射测量及太阳辐射计校准方面开展了大量研究工作。但国内针对绝对辐射计通过低温辐射计溯源至 SI 单位的计量技术研究较少。

本文开展了绝对辐射计溯源至低温辐射计、进而实现辐照度 SI 单位制溯源的技术研究,建立了绝对辐射计校准装置。利用激光作为光源,将溯源至低温辐射计的陷阱探测器作为量值传递标准器,采用光束非完全覆盖精密光阑孔径的功率校准模式,通过比较法将辐射功率量值由低温辐射计传递至绝对辐射计。实验过程中采用监视探测器修正校准过程中激光功率的变化。结合绝对辐射计的精密光阑面积校准,建立激光功率与绝对辐射计辐照度的对应关系。通过绝对辐射计锥腔不同位置的响应均匀性、波长选择性、辐射功率响应线性、光阑面积校准等特性的分析,对实验所用绝对辐射计的校准不确定度进行了详细评估,校准不确定度为 0.86% (包含因子 $k=2$)。

2 实验方案及关键参数分析

2.1 实验方案分析

绝对辐射计校准方案基于光源光斑面积的不同,采用光斑非完全覆盖绝对辐射计入射孔径的辐射功率校准模式和光斑完全覆盖绝对辐射计入射孔径的辐射照度校准模式。辐射功率校准模式是指激光在未经扩束或经扩束但光束孔径小于陷阱探测器和绝对辐射计入射孔径尺寸条件下直接入射到陷阱探测器和绝对辐射计,通过定标激光功率和绝对辐射计的精密光阑面积,得到绝对辐射计的辐射照度测量校准结果;辐射照度校准模式是指激光经光学系统扩束(光束孔径大于陷阱探测器和绝对辐射计入射孔径尺寸)后入射到陷阱探测器和绝对辐射计,

通过定标入射光束的辐射照度数值进而直接对绝对辐射计的辐照度进行校准。

两种校准模式的差异及影响因素如下:1)辐射照度校准模式下需要保证扩束后的激光光源具有较好的均匀性;2)辐射功率模式下精密光阑面积定标准确性、陷阱探测器和绝对辐射计的空间响应均匀性将对结果产生影响。

本文采用辐射功率模式开展绝对辐射计溯源至低温辐射计的实验研究。

2.2 标准器标定和关键参数分析

下面对绝对辐射计校准过程中关键器件特性(如锥腔内壁镜向黑涂层吸收特性和陷阱探测器特性)进行分析和量值定标。

2.2.1 锥腔镜向反射黑吸收涂层的吸收率测量

在对太阳辐照度的测量过程中,绝对辐射计对太阳光谱各波长的光都存在吸收。但在实验过程中,受激光器波长的限制,需要采用有限激光波长点对绝对辐射计进行校准,因此需要考虑绝对辐射计各波长辐射吸收曲线的平坦性。在锥腔设计固定的条件下,绝对辐射计黑体腔吸收率与其内壁镜向反射黑吸收涂层的吸收率呈正相关,下面通过测试与绝对辐射计锥腔内壁同材料的黑涂层小样的反射率(R)和吸收率分析绝对辐射计各波长辐射吸收曲线的平坦性对结果的影响。

采用分光光度计测量了绝对辐射计锥腔用黑涂层的反射率,考虑太阳光谱辐射能量主要分布在 250~2500 nm 范围内,此波段的积分辐照度占比为 98.7%,因此可主要分析此波段范围内绝对辐射计各波长辐射吸收曲线的平坦性。

250~2500 nm 范围内黑涂层的反射率曲线如图 1 所示,从图 1 中可以看出,在 250~2500 nm 范围内黑涂层小样单次反射的反射率在 3.0%~6.5% 之间。

锥腔的吸收系数可表示为

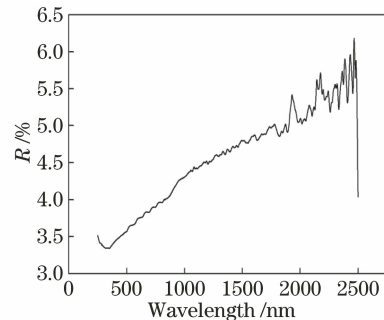


图 1 黑涂层样品在 250~2500 nm 内的反射率曲线

Fig. 1 Reflectivity curve of black coating in 250~2500 nm

$$\sigma = 1 - R^n, \quad (1)$$

式中: n 为反射次数。

对于 30° 锥腔, 与锥腔轴平行的入射光线在腔内可经过 6 次反射, 本实验采用的绝对辐射计的视场角度为 5° , 最大偏离轴的入射角度为 2.5° , 这导致腔内入射光线的反射次数低于轴向入射光线, 但可保持 4 次以上。通过图 1 所述的反射率数据和 (1) 式可得 $250 \sim 2500$ nm 波段锥腔吸收系数在 $0.999985 \sim 0.999999$ 之间。可以看出, 在 $250 \sim 2500$ nm 范围内, 锥腔吸收无波长选择性。实际上考虑锥腔的圆度、不平度及吸收涂料不完全镜面, 腔的有效吸收达不到上述理想情况, 实际锥腔吸收系数可控制在 0.9997 ± 0.0002 。

通过对绝对辐射计锥腔镜向反射黑吸收涂料的

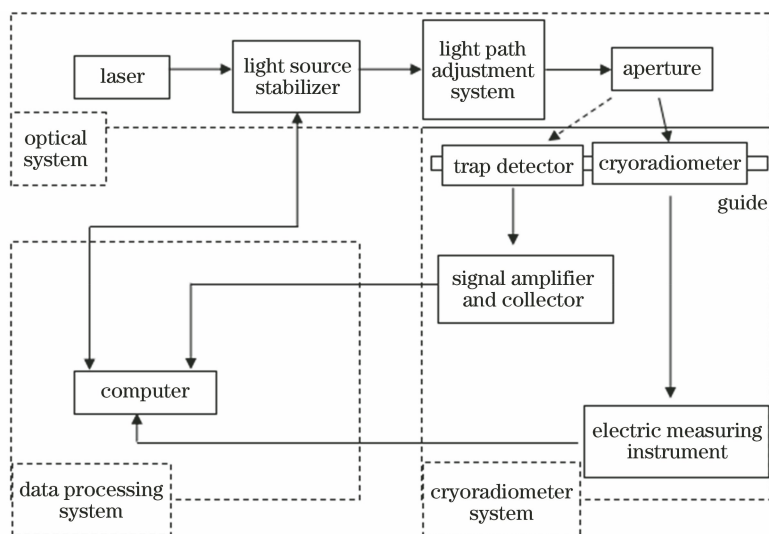


图 2 陷阱探测器溯源至低温辐射计的实验装置原理图

Fig. 2 Experimental device diagram of trap detector tracing to cryogenic radiometer

原理上, 陷阱探测器所有波长下的功率响应度都可以溯源至低温辐射计。实验中所用陷阱探测器由三片平面硅探测器组成, 常规硅探测器的功率响应在 $400 \sim 900$ nm 范围内具有较好的单调性, 与波长近似呈线性关系。考虑校准时间和激光器波长的限制, 实验上只在某些特定波长下标定陷阱探测器的功率响应度, 此波长范围中其他波长点的功率响应度数据可通过插值得到。

在多个激光波长下, 基于低温辐射计定标陷阱探测器(编号为 0901[#])的绝对光谱响应度, 校准数据如表 1 所示, 校准不确定度为 0.03% ($k=2$)。

采用插值可得到陷阱探测器在 532.05 nm 波长下的绝对功率响应度为 0.42717 A/W。

测量了锥腔内壁镜向黑涂层反射率, 分析了绝

吸收率进行测量及对锥腔吸收系数进行分析, 发现绝对辐射计波长选择性不明显。因此可以以某特定波长光源作为绝对辐射计校准光源, 考虑太阳光谱辐照度的各波长分布情况, 实验中选用波长为 532 nm 的固态激光器作为光源, 经波长准确性测量得到其中心波长为 532.05 nm。

2.2.2 陷阱探测器定标

绝对辐射计量值溯源实验中采用 10 mm \times 10 mm 三片式陷阱探测器作为量值传递标准。基于低温辐射计, 采用图 2 所示的校准方案搭建实验装置, 对实验用陷阱探测标准器特性进行了不同波长下功率响应度量值定标, 实验过程中低温辐射计接收腔的温度约为 4 K。

表 1 陷阱探测器(0901[#])的绝对功率响应度校准数据

Table 1 Calibration data of absolute power responsivity of trap detector (0901[#])

| Wavelength /nm | Power responsivity /($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$) |
|----------------|--|
| 488 | 0.390860 |
| 514 | 0.412614 |
| 633 | 0.508590 |
| 647 | 0.520140 |
| 752 | 0.604980 |
| 799 | 0.642560 |

对辐射计的波长吸收曲线的平坦性和吸收率对结果的影响, 所得结果为基于辐射功率校准模式和单波长激光光源的定标方案提供关键参数支撑; 通过对陷阱探测器的量值定标, 为绝对辐射计 SI 单位制溯源提供了量值传递载体。

3 实验装置及校准结果

绝对辐射计校准装置如图 3 所示,实验中激光器选取半导体固态激光器,该激光器可实现的输出功率约为 1 W,波长为 532.05 nm,激光器出射光束的直径约为 3 mm,但由于光束存在一定发散

角,通过在实验光路中增加聚光透镜可实现较长距离范围内较小的光束孔径,在透镜焦点后 30 cm (激光光斑直径约 4 mm)处进行校准实验。实验中采用功率稳定器对激光器输出功率进行稳定处理。为实现锥腔的导热稳定,将绝对辐射计的单次采集时间设置为 120 s。

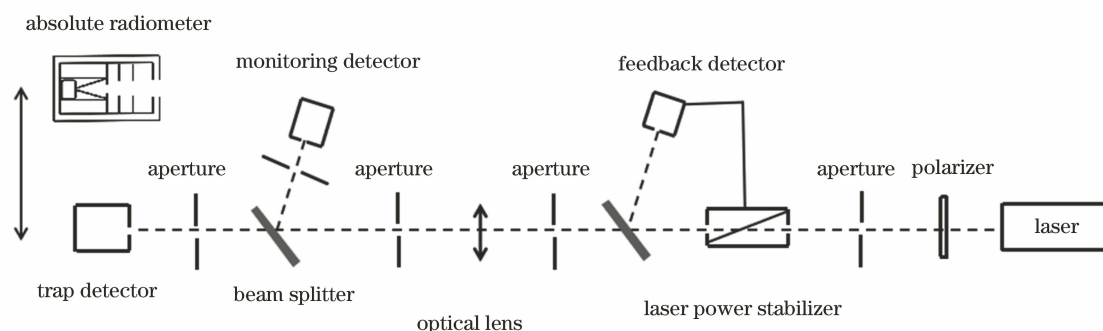


图 3 绝对辐射计溯源至陷阱探测器的实验装置图

Fig. 3 Experimental device diagram of absolute radiometer tracing to trap detector

绝对辐射计内设精密光阑的面积为 0.00005058 m^2 。考虑绝对辐射计主要在晴朗户外条件下对太阳辐照度进行测试或对太阳辐射传感器进行量值传递,世界辐射基准与低温辐射计的比对研究工作^[6-9]也主要以一个太阳常数(1000 W/m^2)左右的辐照度作为入射辐照度的参数,本实验主要开展 1000 W/m^2 下绝对辐射计量值溯源研究工作。通过计算入射激光功率和对应的辐照度,可得 1000 W/m^2 太阳辐照度对应 50.58 mW 入射激光功率,本文所述实验在 50 mW 激光功率下对绝对辐射计进行校准。

绝对辐射计校准所需光功率较高,超出陷阱探测器工作的线性区间($<1 \text{ mW}$),实验过程中需要在陷阱探测器的激光功率定标和绝对辐射计校准两个阶段分别调节激光功率,在所搭建的实验装置中,通过设置监视探测器,监测陷阱探测器的激光功率

定标和绝对辐射计校准两个过程中激光功率的变化,将其与陷阱探测器所定标的激光功率相乘,得到入射至绝对辐射计的激光功率标准值。

首先将激光功率调整为陷阱探测器可探测的功率线性区间,分别对陷阱探测器标准器信号和监视探测器信号进行测试。陷阱探测器的相关信息如下:放大器的放大倍率为 10^4 V/A ;暗背景下放大器输出信号的电压为 0.258 MV ;激光入射条件下放大器的输出信号电压为 3.0136 V 。监视探测器相关信息如下:放大器的放大倍率为 10^6 V/A ;暗背景下放大器的输出信号电压为 0.40 mV ;激光入射条件下放大器的输出信号为 4.1533 V 。

然后将激光功率调节至 50 mW 左右,利用绝对辐射计对激光功率进行测量,为减小激光入射位置对测量结果的影响,实验过程中通过平移绝对辐射计得到不同位置空间响应的测量结果。测量值如表 2 所示。

表 2 绝对辐射计在不同位置的辐照度输出值

Table 2 Irradiance output at different positions of absolute radiometer

| Spot position | Irradiance / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) | | | |
|----------------------|---|---------------|--------------------------|---------------|
| | Single measurement value | Average value | Single measurement value | Average value |
| Center position | 977.9 | 978.7 | 977.9 | 978.2 |
| Move to left (1 mm) | 981.0 | 980.7 | 980.2 | 980.6 |
| Move to right (1 mm) | 975.5 | 975.1 | 975.6 | 975.4 |
| Move up (1 mm) | 982.3 | 982.4 | 982.6 | 982.4 |
| Move down (1 mm) | 980.8 | 981.2 | 981.7 | 981.2 |

各位置的平均辐照度为 979.6 W/m^2 ,空间响应不均匀度的最大偏差为 0.72% 。根据绝对辐射计测量的辐照度值及通过精密光阑面积换算得到的绝对

辐射功率,计算得到平均辐射功率为 49.56 mW 。

在绝对辐射计测试过程中,监视探测器信息如下:放大器的放大倍率为 10^4 V/A ,暗背景下放大器

的输出信号电压为 0.265 mV, 监视探测器的输出量值为 2.9256 V。

基于绝对辐射计辐照度修正系数的计算公式[(2)式], 得到绝对辐射计溯源至低温辐射计的校准修正因子为 1.003。

$$F = \frac{E_s}{E_t} = \frac{P_s}{E_t \cdot S} = \frac{P_s}{P_t} \cdot \frac{V_{mt} - V_{mt0}}{V_{ms} - V_{ms0}} = \frac{V_s - V_{s0}}{K \cdot R_s \cdot P_t} \cdot \frac{V_{mt} - V_{mt0}}{V_{ms} - V_{ms0}}, \quad (2)$$

式中: F 为绝对辐射计测得的辐照度修正系数; E_s 为入射到绝对辐射计的辐照度; E_t 为绝对辐射计测得的辐照度; S 为绝对辐射计的精密光阑面积; P_s 为陷阱探测器测得的激光功率; P_t 为绝对辐射计测得的激光功率; V_{mt} 为绝对辐射计测量时监视探测器的输出信号; V_{mt0} 为绝对辐射计测量时监视探测器输出的暗背景信号; V_{ms} 为陷阱探测器标准器测量时监视探测器的输出信号; V_{ms0} 为陷阱探测器标准器测量时监视探测器输出的暗背景信号; V_s 为陷阱探测器标准器测量的激光功率; V_{s0} 为陷阱探测器标准器输出的背景信号; K 为放大器的放大倍数; R_s 为陷阱探测器的 532.05 nm 响应度。

表 3 绝对辐射计的辐照度校准不确定度评定

Table 3 Uncertainty assess of irradiance calibration of absolute radiometer

| Uncertainty component | Source of uncertainty | Uncertainty type | Uncertainty distribution | Relative uncertainty /% |
|-----------------------|--|------------------|--------------------------|-------------------------|
| u_1 | Measurement repeatability | A | Normal | 0.030 |
| u_2 | Light source instability | B | Equidistribution | 0.002 |
| u_3 | Trap detector calibration | B | Normal | 0.015 |
| u_4 | Interpolation calculation of standard value of trap detector | B | Equidistribution | 0.030 |
| u_5 | Nonlinearity of signal amplifier and monitoring detector | B | Equidistribution | 0.050 |
| u_6 | Absorptivity and wavelength flatness of black coating of absolute radiometer | B | Equidistribution | 0.030 |
| u_7 | Absolute radiometer position response non-uniformity | B | Equidistribution | 0.410 |
| u_8 | Aperture calibration | B | Normal | 0.100 |

5 结 论

针对绝对辐射计溯源至低温辐射计的计量技术开展研究, 分析了辐射功率模式和辐射照度校准模式的特点, 采用辐射功率模式搭建了溯源至低温辐射计进而溯源至 SI 单位制的绝对辐射计校准装置。针对陷阱探测器校准、锥腔内壁镜向黑涂层吸收率和波长选择性、绝对辐射计锥腔空间响应均匀性等主要影响因素进行了实验分析和量值定标。通过对绝对辐射计进行校准并对不确定度进行详细评定, 发现被校准绝对辐射计的空间响应不均匀性是最主

4 不确定度分析

辐照度修正因子计算公式中各物理量之间不存在相关性, 相关系数为 0, 修正系数的校准不确定度为

$$u(F) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right]^2}, \quad (3)$$

式中: x_i 为(2)式中第 i 个因变量; $u(x_i)$ 为 x_i 的标准不确定度; N 为(2)式中因变量的个数。绝对辐射计辐照度校准不确定度评定的来源、不确定度类型(A类/B类)、不确定度分布及不确定度分量如表 3 所示, 其中, 不确定度来源主要包括: 测量重复性 u_1 , 光源不稳定性 u_2 , 陷阱探测器校准值 u_3 , 陷阱探测器插值 u_4 , 信号放大器和监视探测器非线性 u_5 , 绝对辐射计黑涂层吸收率及波长吸收平坦性 u_6 , 绝对辐射计位置响应非均匀性 u_7 , 光阑面积校准值 u_8 。从表中可以看出, 不确定度分量中的主要不确定度来源为被校准绝对辐射计空间响应的不均匀性, 校准结果的不确定度与被校准绝对辐射计的特性相关, 因此空间响应均匀性好的绝对辐射计可以实现更低的校准不确定度。

要的不确定度来源, 实验所用绝对辐射计可实现的校准不确定度为 0.86% ($k=2$)。

参 考 文 献

- [1] World Meteorological Organization. WMO final report[R]. Geneva: WMO, 1978: 490.
- [2] World Meteorological Organization. Technical regulations[S]. Geneva: WMO, 1979.
- [3] Fröhlich C. History of solar radiometry and the world radiometric reference[J]. Metrologia, 1991, 28(3): 111-115.
- [4] International Electrotechnical Commission.

- Photovoltaic devices-part 4: reference solar devices-procedures for establishing calibration traceability: IEC 60904-4[S]. Geneva: IEC Central Office, 2019.
- [5] Reda I, Myers D, Stoffel T. Uncertainty estimate for the outdoor calibration of solar pyranometers: a metrologist perspective[J]. NCSLI Measure, 2008, 3(4): 58-66.
- [6] Romero J, Fox N P, Fröhlich C. First comparison of the solar and an SI radiometric scale[J]. Metrologia, 1991, 28(3): 125-128.
- [7] Romero J, Fox N P, Fröhlich C. Improved comparison of the world radiometric reference and the SI radiometric scale[J]. Metrologia, 1995, 32(6): 523-524.
- [8] Finsterle W, Blattner P, Moebus S, et al. Third comparison of the world radiometric reference and the SI radiometric scale[J]. Metrologia, 2008, 45(4): 377-381.
- [9] 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(2): S34-S38.
- [10] Fang W, Yu B X, Yao H S, et al. Solar irradiance absolute radiometer and international comparison[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 112-116.
方伟, 禹秉熙, 姚海顺, 等. 太阳辐照绝对辐射计与国际比对[J]. 光学学报, 2003, 23(1): 112-116.
- [11] Yu B X, Yao H S, Fang W. Rapid measurement method of absolute radiometer by using forecast radiation in electrically heating compensation [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 786-790.
禹秉熙, 姚海顺, 方伟. 绝对辐射计预测辐射电补偿的快速测量方法[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 786-790.
- [12] Yang Z L, Fang W, Song B Q, et al. Variation of solar irradiance absolute radiometer cavity temperature response in vacuum and its effect [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912008.
杨振岭, 方伟, 宋宝奇, 等. 真空环境中太阳辐照度绝对辐射计腔温响应的变化及其影响[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912008.