

文章编号: 1002-1582(2004)04-0498-04

近红外高精度光辐射标准探测器的实验研究*

李双, 吴浩宇, 李照洲, 王骥, 章骏平, 郑小兵

(中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感研究室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 在 594 nm 和 785 nm 两个波长上, 用以低温辐射计标定过的陷阱探测器作为基准, 对两个响应未知的陷阱探测器进行了绝对标准的传递。为此建立了一种辐射定标的新型测量光路, 估算和分析了在光路调整时影响测量精度的关键环节, 其中包括光功率传输效率以及光路色散效应的影响。分析了在传递过程中各主要环节的不确定度, 总传递不确定度小于 0.045%。

关 键 词: 光辐射标准探测器; 近红外辐射定标; 不确定度分析

中图分类号: O432 **文献标识码:** A

Highly accurate calibration of optical radiation detectors at near infrared spectrum

LI Shuang, WU Hao-yu, LI Zhao-zhou, WANG Ji, ZHANG Jun-ping, ZHENG Xiao-bing

(Remote Sensing Department, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: At 594 nm and 785 nm, two trap is calibrated against a silicon standard detector which is calibrated against cryogenic radiometer. In order to achieve this, a new measuring system for radiometric calibration is established. Whose design and principle are discussed, and optical flux propagation efficiency and adaptation at different wavelengths are analyzed and estimated. The experimental results show an uncertainty of their absolute spectral responsivities less than 0.045%.

Key words: optical radiation detector; near infrared radiometric calibration; uncertainty analysis

1 引 言

在辐射度学和光度学中, 基于探测器的标准技术近 10 年来得到了较快的发展。高精度的光功率标准探测器是建立在辐照度、辐亮度标准的基本单元上的。在定量化遥感等应用领域, 需要有高精度的光谱响应率标准来标定各类传感器、评估其测量精度、长期稳定性以及数据可比较性。

低温绝对辐射计^[1~3]是目前公认的光辐射测量绝对精度最高的标准探测器(可见光波段不确定度达到了 0.005%~0.02%^[4]), 已被很多国家标准实验室作为光度学和辐射度学的初级标准。因为它运行条件苛刻, 费用昂贵, 所以不便作为常规运行的基准, 这就需要传递探测器作为次级标准或工作标准。硅光电二极管陷阱探测器是性能优良的标准传递探测器^[5], 在可见光波段利用低温辐射计定标的绝对光谱响应率测量不确定度小于 0.035%^[1]。

本次实验利用响应已知的标准传递探测器来标定响应未知的探测器, 以便把标准作进一步的传递。高精度光辐射定标及标准传递要求有高质量的光

束, 光束应具有无杂散光干扰, 光功率稳定, 光斑能准确的打到探测器的灵敏面上等, 这些都对光路调整提出了很高的要求。本文对光路的调整的关键环节进行了较为详细的分析和讨论。

2 光路及其调整和分析

2.1 光路及其工作原理

光路设计的基本思路是利用可见光来调节非可见光测量光路。光路如图 1 所示。光路中采用了 2×1(二进一出)的光纤耦合器, 它把近红外激光器和可见光激光器联系起来, 实现了两束激光共轴输出。从耦合器出射的发散光经过准直器和偏振器得到垂直偏振(*p* 偏振)和平行光束。激光功率控制器 LPC(laser power controller)可以调节定标时探测器接收的激光功率, 并将其起伏稳定在允许的范围内。为了消除激光束高阶模式对测量精度的影响, 采用空间滤波器来保证良好的基模光束进入探测器。

图 1 中, 激光器 1 和激光器 2 分别代表可见光激光器或近红外激光器。可见光源为 594nm He-Ne 气体激光器。近红外光源为 785 nm 的半导体激光

* 收稿日期: 2003-05-06; 收到修改稿日期: 2003-11-18

E-mail: shli@aiofm.ac.cn

作者简介: 李双(1976-), 男, 河北省唐山市人, 中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感研究室硕士, 从事光辐射高精度定标的研究。

器,并带有尾纤准直输出。物镜的作用是把激光器的光耦合到光纤耦合器的光纤当中。光纤耦合器为 2×1 的光纤耦合器。该耦合器尾纤为多模光纤,芯径为 $50\mu\text{m}$,带有FC/APC标准连接器。准直器可以与光纤耦合器的FC/APC连接器直接相连,可调焦,其作用是把由光纤输出的发散光转变为准直光。LPC的工作波段为 $400 \sim 1100\text{ nm}$,可以使激光功率在8h时间内稳定在0.05%的精度以内。空间滤波器是由一个显微物镜和一个铂铱合金针孔组成的,其作用是用来消除光束由于光学器件中的缺陷和空气中微粒的散射产生的高阶模式。探测器都是反射式陷阱探测器(trap),由日本滨松公司生产的三片S1337系列无窗型硅光电二极管组成。

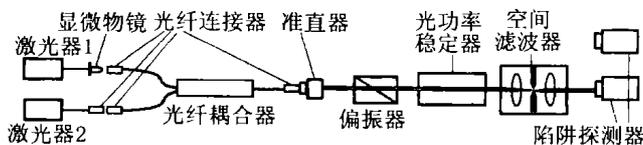


图1 定标实验光路图

2.2 光路调整和分析

光功率是测量对象,利用光功率稳定器来稳定,光功率稳定器的光学模块要求入射功率大于 0.5 mW (属正常工作要求)。功率稳定器在正常工作情况下,通过它还可以调节到达探测器的光功率。由于使用的激光器功率比较低,都是几个毫瓦,所以光功率传输效率对于近红外定标来说是很关键的。

2.2.1 光功率传输效率

从整个光路来看,光纤本身、偏振棱镜、功率稳定器的光学模块和空间滤波器本身透过率都很高,对光功率传输影响较小,影响激光传输效率的最主要环节是激光-光纤的耦合过程。

对显微物镜的选择来说,图2给出了把准直激光束耦合到光纤中的示意图。图中 n_1 和 n_2 分别

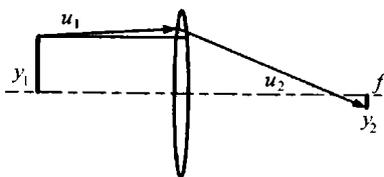


图2 激光束会聚光路图

为物方和像方介质的折射率,在这里都是空气折射率; u_1 和 u_2 分别为激光束的发散角和像方的孔径角; y_1 和 y_2 分别为入射激光束半径和会聚光斑的半径。作为估算,在这里把显微物镜简化成为一个理想的薄透镜,激光束光斑尺寸很小,发散角也很小,采用傍轴近似,所以可以利用 u 代替 $\sin u$ 。为了使激光器的光最大限度的耦合到光纤中去,可以从两个方面来考虑:

(1) 显微物镜的物方孔径角和像方孔径角要小于光纤的接收孔径角;

(2) 显微物镜会聚光斑应小于光纤芯径。

利用拉赫公式^[8]可以知道这两个问题是相互关联的,即

$$n_1 u_1 y_1 = n_2 u_2 y_2 \quad (1)$$

从图2中可以看出,因为会聚光斑离焦点很近且很小,所以

$$u_2 \approx \frac{y_1}{f} \quad (2)$$

通过拉赫公式可以知道

$$y_2 = u_1 f \quad (3)$$

表1列出了594nm和785nm两个激光器与光纤耦合器的参数。

表1 激光器和光纤耦合器参数

波长/nm	594	785
光束直径/mm	0.73	3
发散角/mrad	1.00	1.4
耦合器光纤芯径为 $50\mu\text{m}$,数值孔径 $NA=0.1$		

根据表1给出的数据,通过利用式(2)和式(3)对两个波段所需要的显微物镜焦距的估算,可以看出不仅要满足上面的两个要求,而且估算出的两个波长要求物镜焦距的范围分别为 $2.15\text{ mm} < f_{594\text{ nm}} < 50\text{ mm}$ 和 $8.82\text{ mm} < f_{785\text{ nm}} < 35.71\text{ mm}$ 。

从上面估算的 f 的取值可以看到,显微物镜倍率的选择范围为4倍至20倍。在实验中发现,使用10倍显微物镜时,其工作距离较短,光纤端面很难精细地调节到它的焦面上,会聚光斑与光纤端面对准调节很困难,只有部分的光耦合到了光纤当中,达不到理想的耦合效果;20倍的显微物镜的工作距离比10倍的还小,最后选择了焦距和工作距离比较大的4倍显微物镜。

2.2.2 光路的色散特性

光路中利用 2×1 的光纤耦合器可以把可见光和红外光联系起来,利用可见光辅助调节近红外测量光路。测量过程中要进行波长的转换,光路中的器件由于色散效应会对测量产生影响,对这些影响因素进行了分析和估算。

偏振棱镜的色散效应很小。准直器和空间滤波器的显微物镜存在一个同样的问题,就是由于色散的原因,其焦距都是随波长而变化的。为了避免这个问题,所购买的物镜和准直器都是消色差的。色散对功率稳定器和空间滤波器的影响较大。

功率稳定器的光学模块结构如图3所示。其中有一块平板玻璃,它与入射光束成 45° 角,其作用是把入射光束分出一部分垂直反射到下面的探测器上,探测器接受的光信号转换成电信号反馈给液晶调制器,电子学模块根据反馈信号和其本身定标系数,通过改变液晶调制器的透过率使光功率保持稳定,其厚度为 5 mm 。由于色散的原因,不同波长的

光传输时会产生不同程度的平移。

图 4 为空间滤波器示意图。它是由一个显微物镜和一个铂铱合金的针孔组成,通过选择合适的针孔直径,仅仅允许基模光束通过,消除了由于光学元件缺陷和空气中微粒的散射造成的高阶模式的影响。增加一个显微物镜,其目的是把从针孔出射的发散光进行准直平行。

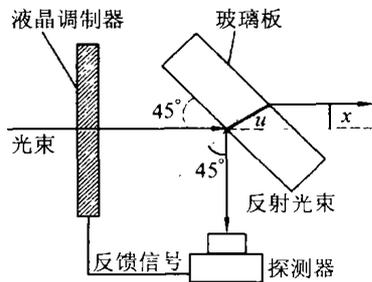


图 3 功率稳定器光学头分束器

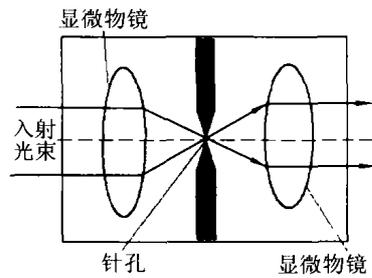


图 4 空间滤波器原理图

功率稳定器的平板玻璃使不同波长的光束产生不同大小的平移。理论上,平行于主光轴的人射光束通过空间滤波器的物镜后都能会聚到物镜的焦点上,但对于不同波长的光束会聚的光斑大小是不一样的。如果光斑过大,则不仅会因为针孔的遮挡而影响透过率,而且还会因为衍射效应产生新的高阶模式,破坏空间滤波的效果;如果光斑过小,则会由于光学元件的缺陷和微粒散射造成高阶模式透过,造成测量精度下降。因此通过选择合适的针孔,既可以保证滤掉高阶模式,同时又可以保证可见光束和近红外光束的基模均能完全通过针孔。

在显微物镜的焦面上,基模光斑的大小由爱里斑公式决定:

$$D = 2f\lambda/a \quad (4)$$

式中, D 为爱里斑直径; f 为显微物镜的焦距; λ 为入射激光波长; a 为入射激光的光束半径。对于公式中的 a 来说,取准直器出射的光斑直径,为 1.5mm,空间滤波器采用 4 倍的显微物镜,焦距为 38mm。那么 594 nm 和 785 nm 光束的基模光斑直径分别为 $D_{594\text{nm}} = 30.0\mu\text{m}$ 和 $D_{785\text{nm}} = 39.8\mu\text{m}$ 。

根据上面的估算,选择了直径为 $50\mu\text{m}$ 的针孔。

3 定标实验

根据分析和估算,完成光路器件的选取和调节是用以低温辐射计定标过的标准探测器作为基准的,对两个未标定过的探测器进行绝对标准的传递。

用绝对低温辐射计标定过的标准传递探测器^[1] trap2c、用未标定过的 trap2a 和 trap2b 分别测量激光的绝对光功率。由陷阱探测器产生的光电流

以电压形式输出。利用电压表测量出在两个过程中 trap 各自的电压输出。定标过的 trap2c 有

$$V_S = R_S \times P_L \quad (5)$$

式中, V_S 为已定标的 trap2c 的电压输出; R_S 为低温辐射计定标 trap 的绝对响应; P_L 为激光入射功率。未标定的 trap 有

$$V = R \times P_L \quad (6)$$

式中, V 为未定标 trap 的电压输出; R 为其绝对响应。由式(9)和式(10)可以得到的未标定的 trap 的绝对响应为

$$R = \frac{V}{V_S} R_S \quad (7)$$

这样就完成了标准的传递。

在本次实验中, LPC 把功率稳定在三个级别,分别是 0.3mW, 0.1mW 和 0.03mW。因为用低温辐射计定标 trap2c 时的功率范围是 25~250 μW , 所以选择功率等级是为了避免 trap 响应线性带来的额外影响。

测量开始前,全部的仪器需要预热 30min。当换 trap 和改变功率时要维持 5min 的时间才能进行测量。测量的顺序为每个功率点连续测量三个 trap,这大约需要 1h,然后改变功率,重复上面的过程。

4 实验结果及分析

测量了三个 trap 在两个波段、三个功率等级上的输出电压值,依据国际上通行的规范^[10]考察了测量中不确定度的来源,给出了被标定 trap 的不确定度分析。

影响被定标 trap 最后不确定度结果的因素有:

(1) 标准探测器本身的不确定度,由低温辐射计定标过的 trap 决定^[1]。

(2) 标准传递过程中的不确定度,由标准探测器输出电压 V_S 的起伏决定。

(3) 被定标的 trap 自身测量的不确定度,由待定标的 trap 输出电压 V 的起伏决定。

(4) 定标过程中光强本身波动带来的不确定度。由于每个完整的定标过程(一个波段,三个功率等级,三个 trap)需要 1h,所以把光强本身在 1h 波动的标准偏差作为光强自身带来的不确定度。

用以低温辐射计定标过的标准探测器作为基由表 2 和表 3 可以看出,两个波长在 0.03mW 功率处的标准传递不确定度比其它两个功率要大,这可能是因为入射功率太小导致探测器信噪比降低的缘故。785nm 波段的测量联合不确定度比 594nm 波段的要大,这是因为 785nm 标准 trap 自身测量不确

表2 594nm 波段两个被定标 trap 的不确定度 ($\times 10^{-4}$)

trap		2a			2b		
功率/mW		0.03	0.1	0.3	0.03	0.1	0.3
不 确 定 度 源	标准 trap	2.260	2.260	2.26	2.260	2.26	2.260
	传递过程	1.043	0.397	0.512	1.043	0.397	0.512
	待定标 trap	0.883	0.453	0.641	1.139	0.487	0.494
	光强波动/h	2.646	2.646	2.646	2.646	2.646	2.646
联合不确定度		3.739	3.532	3.575	3.803	3.536	3.552

表3 785nm 波段两个被定标 trap 的不确定度 ($\times 10^{-4}$)

trap		2a			2b		
功率/mW		0.03	0.1	0.3	0.03	0.1	0.3
不 确 定 度 源	标准 trap	3.470	3.470	3.470	3.470	3.470	3.470
	传递过程	0.123	0.082	0.115	0.123	0.082	0.115
	待定标 trap	0.103	0.082	0.084	0.130	0.075	0.084
	光强波动/h	2.646	2.646	2.646	2.646	2.646	2.646
联合不确定度		4.367	4.365	4.366	4.367	4.365	4.366

定度很大造成的。594nm 传递过程的测量不确定度比 785nm 的要大,这主要是因为空间滤波器针孔的选择是综合考虑了两个波段的要求,但是由于 594nm 会聚光斑尺寸较小,导致部分的高阶模式通过。trap 定标联合不确定度在 0.045% 以内。

5 结论

准,在 594nm 和 785nm 两个波段对两个未定标的陷阱探测器进行了绝对标准传递,被标定探测器的不确定度在 0.045% 以内。结果证明,光路的调整方法对高精度定标是有效的,同时也证明了陷阱探测器之间能够相互定标,仍能保持高水平的不确定度。这有利于将陷阱探测器作为辐射定标的传递标准。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] T J Quinn, J E Martin. Cryogenic Radiometry and Prospects for Further Improvements in Accuracy[J]. Metrologia, 1991, 28(3): 155—161.
- [3] C C Hoyt, P V Foukal. Cryogenic Radiometers and their Application to Metrology[J]. Metrologia, 1991, 28(3): 163—167.
- [4] P V Foukal, H Kochling, P Miller. Cryogenic absolute radiometer as laboratory irradiance standards, remote sensing detector and pyroheliometers[J]. Appl Opt, 1990, 29(7): 988—993.
- [5] N P Fox. Trap Detector and their Properties[J]. Metrologia, 1991, 28(3): 197—202.
- [6] P Kärhä, A Haapalinna, P Toivanen, et al. Filter radiometry based on direct utilization of trap detectors[J]. Metrologia, 1998, 35(4): 255—259.
- [7] E G Atkinson. Butler Calibration of an InGaAs photodiode at 1300nm with a cryogenic radiometer and a diode laser[J]. Metrologia, 1998, 35(4): 241—245.
- [8] 张以谟. 应用光学(上册)[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [9] 赵凯华,钟锡华. 光学(下册)[M]. 北京:北京大学出版社,1984.
- [10] B N Taylor, C E Kuyatt. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results[J/OL]. <http://physics.nist.gov/pubs/guidelines>.

(上接第 497 页)

4 结论

用傅里叶光学方法详细推导出了具有多个相位量化级闪耀光栅衍射场强的解析表达式。讨论了利用这种二元光学光栅元件实现偏振光分离并聚焦的可行性。优化设计了两个光栅。计算和分析表明,本文的模型光栅能够将 o 光和 e 光分离任意距离,并分别在指定的方向上聚焦。取较少的量化级(8~16)就可以得到较大的衍射效率,而且两偏振光的能量比较均衡,偏振性能好。量化级的进一步增加,只是增强了衍射光的强度,并不能显著改变偏振效果。与多个无规律的相位量化光栅相比^[4],本文构造的相位量化光栅具有规则的轮廓结构,在实际制作光栅时容易控制。

参考文献:

- [1] Liu S Q, Chen Y S. Multilevel binary phase grating polarization device with a birefringent substrate[J]. Opt Lett, 1995, 20(17): 1832—1834.

- [2] Fainman Y, Xu F, Tyan R, et al. Polarization selective diffractive optical elements and applications[J]. In Proceeding on diffractive optics and micro-optics, Technical digest series, 1998, 10: 50—52.
- [3] Liu R, Dong B Z, Yang G Z, et al. Optical design of polarizing beam splitters with a birefringent substrate[J]. J Opt Soc Am, 1997, 14(1): 49—53.
- [4] 刘娟,杨国栋,顾本源,等. 用衍射相位元件分离并聚焦偏振光[J]. 光学学报,1999,19(12):1667—1671.
- [5] Daniel P. Moire fringe multiplication with a nonsymmetrical double blazed reference grating[J]. Appl Opt, 1971, 10(4): 901—907.
- [6] Haidner H, Sheridan J T, Streibl N. Dielectric binary blazed gratings[J]. Appl Opt, 1993, 32(12): 4276—4278.
- [7] Kita T, Harada T, Nakano N, et al. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings for a flat-field grazing-incidence spectrograph[J]. Appl Opt, 1983, 22(4): 512—513.
- [8] 刘亚青,范品忠,徐至展. 平焦光栅光谱仪的新用法[J]. 光学学报,2000,20(7):879—882.
- [9] 张耀举. 用闪耀光栅获得并聚焦偏振光[J]. 激光杂志,2002,24(1):24—26.
- [10] 齐文宗,李志刚,唐玉国,等. 处理金属闪耀光栅的多次基尔霍夫积分法[J]. 光学学报,2000,20(7):984—990.
- [11] 赵博,晏磊,李言青,等. 闪耀光栅的傅里叶分析[J]. 光学技术,2001,27(2):103—105.
- [12] 金国藩,严瑛白,邬敏贤. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社,1999:298—335.
- [13] 张耀举,郑崇伟. 台阶光栅衍射的傅里叶分析[J]. 光学技术,2002,28(6):510—512.
- [14] 张耀举. 阶梯透射光栅衍射效率的研究[J]. 中国激光,2003,30(7):601—604.